

Latvijas Lauksaimniecības universitātē
Lauksaimniecības fakultātē

Latvia University of Agriculture
Faculty of Agriculture



IEGULDĪJUMS TAVĀ NĀKOTNĒ

INGA JANSONE

**ZIEMĀJU LABĪBAS KĀ IZEJVIELA ATJAUNOJAMĀS
ENERĢIJAS IEGUVEI LATVIJĀ**

Winter cereals as raw material for renewable energy production
in Latvia

Promocijas darba **KOPSAVILKUMS**

Dr. agr. zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY

of the Doctoral thesis for the scientific degree Dr. agr.

paraksts/ signature

Jelgava 2016

Darba zinātniskā vadītāja/ *Scientific supervisor*

Dr. agr. Zinta Gaile

Darba recenzenti/ *Reviewers*

Dr. habil. agr. A. Ruža

Dr. agr. D. Lapiņš

Dr. sc. ing. A. Kaķītis

Promocijas darba aizstāvēšana paredzēta Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības nozares Laukkopības apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2016. gada 18. martā plkst. 10.00, LLU 123 auditorijā, Lielā ielā 2, Jelgavā

The defence of thesis in open session of the Promotion Board of Agriculture will be held on March 18., 2016, at 10:00 AM in the room 123, Latvia University of Agriculture, Liela Street 2, Jelgava, Latvia.

Ar promocijas darbu var iepazīties LLU Fundamentālajā bibliotēkā, Jelgavā, Lielā ielā 2.

Atsauksmes sūtīt Lauksaimniecības zinātņu nozares Laukkopības apakšnozares promocijas padomes sekretārei Dr. agr. Maijai Ausmanei, Lielā ielā 2, Jelgava, LV – 3001.

The thesis is available at the Fundamental Library of the Latvia University of Agriculture, Liela Street 2, Jelgava.

References are welcome to send: Dr. agr. Maija Ausmane, the Secretary of the Promotion Board, Latvia University of Agriculture, Liela Street 2, Jelgava, LV – 3001.

ISBN 978-9984-48-216-3 (online)

SATURS/*CONTENTS*

IEVADS	4
PĒTĪJUMU APSTĀKĻI UN METODEDES	6
REZULTĀTI	9
Labību skābbarības piemērotība biogāzes ieguvei	9
Labību izmantošana bioetanola ieguvē	12
Labību piemērotība siltumenerģijas ražošanai	15
Iegūto izejvielu un enerģijas veidu ekonomiskais novērtējums	18
SECINĀJUMI	22
PĒTĪJUMA APROBĀCIJA	40
<i>INTRODUCTION</i>	<i>24</i>
<i>MATERIALS AND METHODS</i>	<i>27</i>
<i>RESULTS</i>	<i>30</i>
<i>Suitability of cereal silage for production of biogas</i>	<i>30</i>
<i>Use of cereals for production of bioethanol</i>	<i>32</i>
<i>Suitability of cereals for production of thermal energy</i>	<i>34</i>
<i>Economic assessment of the obtained raw materials and energy</i>	<i>36</i>
<i>CONCLUSIONS</i>	<i>38</i>
<i>APROBATION OF THE SCIENTIFIC WORK</i>	<i>40</i>

IEVADS

Visā pasaulē aktuāls ir jautājums par energoresursu taupīgu izmantošanu un ražošanu no atjaunojamām izejvielām. Kā nākotnes prioritāte enerģētikā ir izvirzīta atjaunojamo energoresursu izmantošana, ko līdz 2020. gadam reglamentē direktīva 2009/28/EK. Ņemot vērā jautājuma aktualitāti, promocijas darbā tika pētīta ziemāju graudaugu kā atjaunojamo resursu piemērotība biogāzes un bioetanola ražošanai, kā arī gan graudu, gan salmu izmantošana siltumenerģijas ražošanai.

Biogāzi var ražot no lauksaimniecības un rūpnieciskām izejvielām. Lauksaimnieciskās izejvielas var būt lauksaimniecības blakusprodukti, kā arī tā saucamie enerģētiskie kultūraugi. Lai varētu izmantot augu biomasu visa gada garumā, to ieskābē. Anaerobās fermentācijas procesā iegūtā biogāze ir lēts un CO₂ neitrāls atjaunojamās enerģijas avots, kas dod iespēju videi draudzīgā veidā pārstrādāt enerģētiskos kultūraugus. Atšķirībā no fosilajiem kurināmajiem anaerobās fermentācijas ceļā iegūtā biogāze ir pilnībā atjaunojams resurss, jo to ražo no biomasas, kas fotosintēzes ceļā uzkrāj saules enerģiju. Saskaņā ar ārvalstu zinātnieku pētījumiem ziemāju labības izmantojamas kā atjaunojamais energoresurss, jo nodrošina augstu biomasas ražu, kas ir viegli ieskābējama. Latvijā šādu pētījumu pagaidām ir maz un tie ir fragmentāri.

Bioetanolu kā fosilā benzīna aizstājēju arvien plašāk izmanto dažādās pasaules valstīs. Bioetanolu galvenokārt ražo no atjaunojamās biomasas, kas satur cukurus, cieti vai lignocelulozi. Latvijas apstākļos, bioetanola ražošanai piemērotas varētu būt labības ar augstu cietes un zemu proteīna saturu graudos. Bioetanola ražošanai piemēroti varētu būt ziemas kvieši (*Triticum aestivum*), tritikāle (*×Triticosecale*) un rudzi (*Secale cereale*). Latvijā audzēto rudzu, kviešu un tritikāles šķirņu klāsts ir plašs, tomēr līdz šim maz pētīts ar mērķi iegūt bioetanolu. Dati par rudzu, ziemas kviešu un tritikāles šķirņu izmantošanu bioetanola ražošanai palīdzētu graudaugu audzētājiem izpildīt pārstrādātāju prasības un piegādāt atbilstošas kvalitātes graudus atjaunojamās enerģijas ražošanai.

Graudu un salmu iespējamā izmantošana kurināšanai. Līdz šim Latvijā apkurei plašāk izmantoti meža atjaunojamie energoresursi – koksne, tomēr koksnes atjaunošanās spējas ir samērā lēnas. Alternatīvās siltumenerģijas ražošanai var izmantot citus lauksaimnieciskās ražošanas blakusproduktus, piemēram, salmus un zāli. Galvenās īpašības augstvērtīgai biomasai, ko izmanto siltumenerģijas ražošanai, ir augsta raža, zems pelnu saturs, zems mitruma saturs un laba degtspēja. Latvijas nepastāvīgajos laika apstākļos atsevišķos gados iegūst pārtikas un pat lopbarības kvalitātei neatbilstošus graudus. Graudi, kurus nevar izmantot ne pārtikas, ne lopbarības vajadzībām, ir viens no biomasas veidiem, ko varētu izmantot

apkurei. Salmi kā kurināmais plaši tiek izmantoti citur Eiropā, un to varētu darīt arī Latvijā.

Darba hipotēze: ziemāju labības ir piemērotas vairāku atjaunojamās enerģijas veidu ieguvei Latvijas apstākļos.

Darba mērķis: noskaidrot ziemāju labību piemērotību dažādiem atjaunojamās enerģijas ieguves veidiem.

Darba uzdevumi

1. Vērtēt ziemas kviešu (*Triticum aestivum*), tritikāles (\times *Triticosecale*) un rudzu (*Secale cereale*) šķirņu piemērotību biogāzes iegūšanai atkarībā no labības, šķirnes un attīstības fāzes novākšanas laikā.
2. Vērtēt ziemas kviešu, tritikāles un rudzu šķirņu piemērotību bioetanola ieguvei.
3. Vērtēt ziemas kviešu, tritikāles un rudzu šķirņu piemērotību (graudu un salmu) siltumenerģijas ražošanai.
4. Sniegt kompleksu novērtējumu ziemāju labību izmantošanai atjaunojamās enerģijas ieguvei.

Darba zinātniskā novitāte

1. Noteikta Latvijā piemērotākā labību attīstības fāze biomasas novākšanai, lai no tās sagatavoto skābbarību izmantotu biogāzes ražošanai.
2. Vienādos apstākļos detalizēti izvērtēts trīs labību sugu biomasas, graudu un salmu ķīmiskais sastāvs un tā ietekme uz dažādi iegūtas enerģijas (biogāze, bioetanol, siltums) iznākumu no masas vienības.
3. Pirmo reizi vienādos apstākļos veikts komplekss trīs ziemāju labību novērtējums dažādu atjaunojamās enerģijas veidu ražošanai Latvijā.

Pētījuma rezultāti atspoguļoti 10 zinātniskās publikācijās angļu, latviešu un krievu valodā, tai skaitā starptautisko konferenču, kongresu un zinātnisko semināru recenzētās starptautiskās publikācijās.

Par zinātniskā darba rezultātiem sniegti 6 mutiski referāti un 6 stenda ziņojumi starptautiskās konferencēs, kongresos un zinātniskos semināros.

Pētījums veikts pateicoties: ESF projektam „Atbalsts LLU doktora studiju īstenošanai” vienošanās nr. 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017 un APP Valsts Stendes graudaugu selekcijas institūtam.

PĒTĪJUMU APSTĀKĻI UN METODES

Lauka izmēģinājumu iekārtošanas metodika

Lauka izmēģinājumi tika veikti Valsts Stendes Stendes graudaugu selekcijas institūtā no 2009./2010. – 2011./2012. gadam. Izmēģinājumā katrai labībai tika pēfītas trīs genotipi (šķirnes vai līnijas): kvieši – 'Mulan', 'Skalmeje' un Stendes graudaugu selekcijas institūtā izveidotā līnija '99-115', tritikāle – 'SW Valentino', 'Dinaro' un Priekuļu laukaugu selekcijas institūtā izveidotā līnija '0002-26', un rudzi: 'Matador', 'Placido', 'Dankowskie Nowe'.

Lauka izmēģinājumi tika iekārtoti divās daļās. Pirmajā daļā labība tika sēta biomasas ieguvei, skābbarības sagatavošanai, no kuras ieguva biogāzi. Biomasas ieguvei tika sēti trīs izmēģinājuma bloki, kurus novāca trīs dažādās augu attīstības fāzēs:

- ziedēšanā (60. – 62. AE);
- piengatavībā (70. – 72. AE);
- dzeltengatavības sākumā (80 – 82. AE).

Otrajā daļā labība tika sēta graudu un salmu ieguvei, lai izvērtētu bioetanola iznākumu, kā arī graudu un salmu izmantošanu siltumenerģijas ražošanai.

Lauciņa lielums visos gadījumos bija 12 m², visus variantus sakārtoja randomizēti 4 atkārtojumos. Izmēģinājums tika iekārtots velēnpodzolētā glejotā augsnē (Augsnes diagnostika..., 2008), (*Stagnic Retisol (Loamic)*) (World Reference Base ..., 2014)), granulometriskais sastāvs – smilšmāls (atb. N. Kačinska sistēmai), tās agroķīmiskie rādītāji: organiskā viela vidēji 19 – 24 g kg⁻¹ augsnes (pēc Tjurina metodes), augsnes apmaiņas reakcija pH KCl 5.3 – 5.8 augiem izmantojamais P₂O₅ 83 – 229 mg kg⁻¹ un K₂O – 126 – 181 mg kg⁻¹ augsnes (pēc Egnera – Rīma metodes).

Sēja tika veikta septembra otrajā dekādē (18.09.09., 14.09.10., 15.09.11.). Izsējas norma visos gados hibrīdajiem rudziem ('Placido') bija 200, populāciju rudziem un tritikālei 400, bet kviešiem 450 dīgspējīgas sēklas uz m².

Biomasas plauja skābbarības sagatavošanai, lai iegūtu biogāzi un sausnas ražas noteikšanai tika veikta ar rokas zāles pļāvēju. No lauka katrai šķirnei tika ņemts viens vidējais paraugs no četriem atkārtojumiem, sadalot to divās daļās: 1) paraugs biogāzes ieguvei (kas tika ieskābēts) un 2) kvalitātes analīzēm. Lai noteiktu salmu ražu un novērtētu to piemērotību kurināšanai, noteica graudu/salmu attiecību. Graudu un salmu ieguvei labības tika novāktas 88. – 92. AE, veicot tiešo kombainēšanu. Labību graudi tika žāvēti, tīrīti, raža tika noteikta pie 14% mitruma un 100% ūrības.

Ziemāju labību graudu un skābbarības audzēšanas un sagatavošanas pašizmaksas aprēķinātas pēc Latvijas lauksaimniecības konsultācijas centra (LLKC) „Bruto seguma aprēķins zemnieku saimniecībās” metodikas.

Meteoroloģisko apstākļu raksturojums

Meteoroloģiskie apstākļi triju sezonu laikā bija atšķirīgi. 2009./2010. gada sezona bija piemērota ziemāju audzēšanai, nokrišņu daudzums sezonas laikā par 24% pārsniedza ilggadīgos novērojumus. Aktīvo temperatūru summa (virs +5 °C) 2009./2010. gada veģetācijas periodā bija 2119.5 °C, kas mūsu klimatiskajā zonā kopumā ir piemērota ziemāju audzēšanai. Kopumā 2010./2011. gada sezonā apstākļi ziemā bija nelabvēlīgi ziemāju pārziemošanai. Aktīvo temperatūru summa (virs + 5 °C) 2010./2011. gada veģetācijas periodā bija 2065.5 °C. 2011./2012. gada sezona bija labvēlīga ziemāju audzēšanai, nokrišņu daudzums sezonas laikā par 23% pārsniedza ilggadīgos novērojumus. Aktīvo temperatūru summa (virs +5 °C) 2011./2012. gada veģetācijas periodā bija 2088.8 °C.

Izmantotās kvalitātes analīžu metodes

Graudu un salmu analīzes, lai novērtētu to piemērotību bioetanola ieguvei un apkurei, tika veiktas Valsts Stendes graudaugu selekcijas institūta Graudu kvalitātes un agroķīmijas laboratorijā. Noteica: mitruma saturu (LVL EN ISO 721:2010); cietes saturu sausnā (LVS EN ISO 10520); kopslāpekļa saturu graudiem un salmiem (LVS EN ISO 20483:2007); kopproteīna saturu graudiem (LVS EN ISO 20483:2007), izmantojot koeficientu 5.75; koptauku saturu (ISO 6492:1999); koppelnu saturu (LVS 276:2000); magnija saturu (LVS EN ISO 6869); kalcija saturu (GOST 26570-95p2); fosfora saturu (ISO 6492); kālija saturu (LVS EN ISO 6869); kokšķiedras saturu (ISO 5498).

Latvijas Valsts Koksnes Ķīmijas institūtā noteica oglekļa, ūdeņraža, slāpekļa, skābekļa saturu pēc LVS CEN/TS 15104:2005.

Labību skābbarībai kvalitātes analīzes veiktas LLU Agronomisko analīžu zinātniskajā laboratorijā. Skābbarības kvalitātes raksturošanai noteica: sausnas saturu (Forage analyses USA, met 2.2.1.1:1993); kopslāpekļa un kopproteīna saturu (LVS EN ISO 5983 – 2:2009), izmantojot koeficientu 6.25; oglekļa (CS – 500 analizatora metode), kokšķiedras (ISO 5498:1981), koptauku (ISO6492:1999), lignīna (LVS EN ISO 13906:2008), cietes (ISO 6493:2000), NDF (neitrāli skalota kokšķiedra) (LVS EN ISO 16472:2006), ADF (skābi skalota kokšķiedra) (LVS EN ISO 13906:2008) saturu; pH KCl (GOST 26180:1984).

Izmantotās metodes biogāzes un bioetanola noteikšanai

Biogāzes ieguve. Katras labības vienas šķirnes skābbarības paraugi visos trijos pļaušanas laikos tika nosūtīti uz BiNoLab laboratoriju Vācijā, kur atbilstoši Vācijas inženieru asociācijas standartam VDI 4630 „Organisko materiālu fermentācija”, tika noteikts biogāzes iznākums un metāna saturs tajā. Biogāzes iznākums laboratorijā tika noteikts 2 – 3 atkārtojumos. Metāna iespējamais iznākums no labību skābbarības tika arī aprēķināts pēc literatūrā aprakstītā vienādojuma (Amon et al., 2007) ((1) formula):

$$MEV = 5.904 \times XP + 3.79 \times XF + 1.352 \times BEV, \quad (1)$$

kur

MEV – metāna iznākums $\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1}$ organiskās sausas,

BEV – bezslāpekļa ekstraktvielas, %, aprēķinātas pēc (2) formulas:

$$BEV = 1000 - XP - XF - XT - XY, \quad (2)$$

kur

XP – kopproteīns, %, XF – kokšķiedra, %, XT – koptauki, %, XY – koppelni, %.

Bioģāzes un metāna iznākums izteikts normkubikmetros – Nm^3 (Nm^3 – kubikmetrs gāzes pie 0 °C temperatūras un 1013 mbar spiediena) no vienas tonnas organiskās sausas ražas ($\text{Nm}^3 \text{ t}(\text{ODM})^{-1}$).

Bioetanola eksperimentālā ieguve. Praktiskā etanola ieguve notika Latvijas Universitātes mikrobioloģijas un biotehnoloģijas institūtā visām pētītajām sugām un šķirnēm. Metode pamatojas uz pārcukurotu kviešu, tritikāles un rudzu paraugu fermentāciju ar spirta raugu *Saccharomyces cerevisiae* ar tai sekojošu etanola iznākuma un fermentācijas ātruma aprēķinu. Etanola iznākums no graudiem tika aprēķināts pēc noteiktā cietes satura. Aprēķini veikti pēc Dr. biol. A. Vīganta adaptētām formulām.

Siltumspēja (kJ kg^{-1}) **laboratorijā** noteikta saskaņā ar LVS EN 14918. Augstākās siltumspējas noteikšanai tika izmantots skābekļa bumbas kalorimetrs "Parr 1341", kurā notiek analizējamā parauga sadedzināšana ar skābekli noslēgtā bumbā, lai izdalītu visu siltuma enerģiju no parauga. Iegūst kurināmā augstāko siltumspēju konstantā tilpumā $Q_{V,gr,ar}$ – noteikts laboratorijā kalorimetrā. Lai teorētiski aprēķinātu kurināmā siltumspēju pēc ķīmisko reakciju norises, izmantoja (3) formulu.

$$Q_{as} = 0.34X_C + 1.26X_H + 0.1(X_S - X_O) - 0.02(X_N + X_P), \quad (3)$$

kur Q_{as} – teorētiski aprēķinātā siltumspēja, MJ kg^{-1} , X_C – oglekļa daudzums kurināmajā, %, X_H – ūdeņraža daudzums kurināmajā, %, X_S – sēra daudzums kurināmajā, %, X_O – skābekļa daudzums kurināmajā, %, X_N – slāpekļa daudzums kurināmajā, %, X_P – pelnu daudzums kurināmajā, %

Datu apstrāde. Bioetanola, bioģāzes un apkures izejvielu ražas un kvalitātes rādītāju datu apstrāde tika veikta, izmantojot divfaktoru un trīsfaktoru dispersijas analīzi. Kvalitatīvo un kvantitatīvo rādītāju sakarību analīzei tika izmantota regresijas un korelācijas analīze ar datu rīku ANOVA. Rezultāti analizēti izmantojot 95% būtiskuma līmeni un vērtēts faktoru ietekmes īpatsvars (η^2 , %).

REZULTĀTI

Labību skābbarības piemērotība biogāzes ieguvei

Ziemāju labību biomasas sausnas raža, t ha⁻¹. Biogāzes ražošanas izejvielai svarīgs kvalitātes rādītājs ir sausnas raža. Ziemas kviešu, tritikāles un rudzu šķirnēm vidēji augstāko sausnas ražu ieguva, tos plaujot 70. – 72. AE un 80. – 82. AE: 15.19 – 16.20 t ha⁻¹ (1. tab.). Dati liecina, ka labībām sausnas raža palielinājās, augiem nobriestot. Starp pētītajām šķirnēm un līnijām tika novērotas būtiskas atšķirības.

1. tabula/ Table 1

Biomassas sausnas un skābbarības organiskās sausnas raža ziemāju labībām dažādos novākšanas laikos, t ha⁻¹

Biomass dry matter (DM) yield of winter cereals and organic dry matter (ODM) yield of silage made from winter cereals, t ha⁻¹

Labības/ Cereals	Sausnas raža, t ha ⁻¹ DM yield, t ha ⁻¹			Skābbarības organiskās sausnas raža t ha ⁻¹ / Silage ODM yield, t ha ⁻¹		
	Augu attīstības etapi/ Growth stages					
	60.– 62. AE/GS	70.– 72. AE/GS	80.– 82. AE/GS	60.– 62. AE/GS	70.– 72. AE/GS	80.– 82. AE/GS
Kvieši/ Wheat	9.04	15.45	15.27	8.06	14.26	14.17
Tritikāle/ Triticale	9.99	15.47	15.33	9.02	13.93	14.16
Rudzi/ Rye	7.52	15.19	16.20	6.74	13.65	15.01
RS/LSD _{0.05} ABC	2.93			2.69		

* kur A – gads, B – labības, C – augu attīstības fāzes/ where A – year, B – cereal species, C – growth stage at harvest

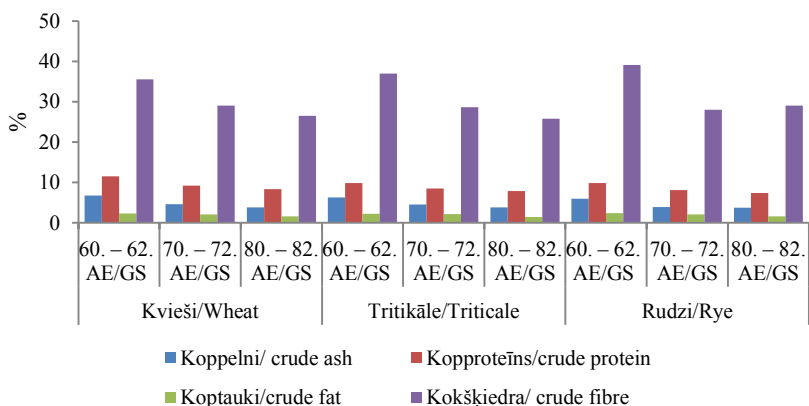
Konstatēja būtisku ($p < 0.05$) novākšanas gada ietekmi uz labību sausnas ražu. Pētījuma gadi pēc agroekoloģiskajiem apstākļiem bija atšķirīgi, līdz ar to arī iegūtās sausnas ražas bija būtiski atšķirīgas. Labvēlīgākie apstākļi sausnas ražas veidošanai bija 2011./2012. gada sezonā, kad bija ideāli ziemošanas apstākļi un piemērots mitruma un temperatūras režīms, kas spēja nodrošināt ziemāju labībām visās attīstības fāzēs augstāko biomasas sausnas ražu. Arī biomasas novākšanas laikam bija būtiska ietekme uz labību sausnas ražu.

Organiskās sausnas ražai ir būtiska nozīme biogāzes ieguvē. Biogāze veidojās fermentācijas procesā, kurā baktērijas sadala organisko vielu. Tāpēc specifisko biogāzes vai metāna iznākumu izsaka NL vai Nm³ no 1 kg vai 1 t organiskās sausnas ražas. Ziemas kviešiem un tritikālei augstākā organiskās sausnas raža pētījumā tika iegūta 70. – 72. AE un 80. – 82. AE. Būtiski

augstāko kviešu skābbarības organiskās sausas ražu iegūva no šķirnes ‘Skalmeje’, to novācot 60. – 62. AE un 70. – 72. AE, un no līnijas 99 – 115, to novācot 70. – 72. AE, 80. – 82. AE. Būtiski augstāko tritikāles skābbarības organiskās sausas ražu iegūva no līnijas 0002 – 26, to novācot 60. – 62. AE un 70. – 72. AE, un no šķirnes ‘Dinaro’, to novācot 80. – 82. AE. Augstākā rudzu skābbarības organiskās sausas raža iegūta 80. – 82. AE. Rudziem būtiski ($p < 0.05$) augstākā skābbarības organiskās sausas raža iegūta no šķirnes ‘Matador’, kas novāktā 70. – 72. AE un 80. – 82. AE.

Ziemāju labību skābbarības kvalitāte un metāna ieguve

Lai varētu norisināties anaerobie procesi biogāzes veidošanās laikā, ir nepieciešama mikroorganismu attīstībai labvēlīga vide. Biogāzes iegūvi anaerobā vidē ietekmē biomasas sastāvs. **Koproteīna** saturu skābbarībā ietekmēja izvēlēta suga un labības novākšanas laiks. Vērtējot koproteīna saturu starp sugām, būtiski ($p < 0.05$) augstākais koproteīna saturs konstatēts kviešu skābbarībā. Koproteīna saturu skābbarībā būtiski ($p < 0.05$) ietekmēja novākšanas laiks un augstāks koproteīna saturs tika konstatēts 60. – 62. AE novāktā skābbarībā. Salīdzinot koproteīna saturu starp vienas labību sugas šķirnēm, netika novērotas būtiskas atšķirības. Augstāks kokšķiedras, celulozes, hemicelulozes, ADF un NDF saturs skābbarībā bija paraugos, kas vākti agrākās attīstības fāzēs (60. – 62. AE), (1. att.), šī sakarība novērota visām pētītajām labībām un šķirnēm.



1. att. Skābbarības kvalitātes rādītāji pētītajām ziemāju labībām.

Fig. 1. Silage quality indicators for winter cereals (AE means „growth stage”).

Bezslāpekļa ekstraktvielas (BEV) tika iegūtas aprēķinu ceļā. Augstāks bezslāpekļa ekstraktvielu saturs teorētiski nodrošina augstāku metāna iznākumu atbilstoši (1) formulai. Agrākā augu attīstības fāzē novāktai

skābbarībai BEV iznākums bija zemāks. Tas ir izskaidrojams ar augstākiem koproteīna, kokšķiedras un koppelnu rādītājiem šajās augu attīstības fāzēs. Būtiski ($p < 0.05$) augstākais koppelnu saturs visām pētītajām labībām un šķirnēm bija 60. – 62. AE novāktā labību skābbarībā: 5.9 – 6.8% atkarībā no labības un šķirnes. Analizējot skābbarību, kas novākta 70. – 72. AE un 80. – 82. AE, konstatēja būtiskas atšķirības koppelnu saturā, svārstības bija robežās 3.7 – 4.6%. Koppelnu saturs arī starp vienas labības dažādām šķirnēm bija būtiski atšķirīgs. Vērtējot faktoru ietekmes īpatsvaru (η) uz skābbarības ķīmiskā sastāva rādītājiem, būtiska ($p < 0.05$) ietekme uz koppelnu, kopslāpekļa, koproteīna, koptauku un cietes sastāva izmaiņām bija skābbarības novākšanas laikam. Šī sakarība tika novērota visām pētītajām labībām. Pētījumā tika konstatēts, ka arī koptauku saturu visām pētītajām labībām ietekmēja skābbarības novākšanas laiks. Koptauku saturs samazinājās skābbarībā, kas novākta vēlākās attīstības fāzēs. Starp pētītajām labībām koptauku saturam nebija būtiskas atšķirības.

Teorētiski aprēķinātais metāna iznākums ($\text{Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$) ir atkarīgs no skābbarības ķīmiskā sastāva. Skābbarības novākšanas laiks ietekmēja teorētiski aprēķināto metāna iznākumu. Būtiski ($p < 0.05$) augstāko teorētiski aprēķināto metāna iznākumu no tonnas organiskās sausas nodrošina 60. – 62. AE novāktā skābbarība visām pētītajām labībām. Vidējais teorētiskais metāna iznākums 60. – 62. AE bija: kviešiem – $261.6 \text{ Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$, tritikālei – $258.5 \text{ Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$ un rudzu skābbarībai $263.6 \text{ Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$ (2. tab.). Pētītās šķirnes ietekme uz metāna iznākumu bija neliela.

Novācot ziemas kviešu skābbarību vēlākās attīstības fāzēs, palielinās teorētiski aprēķinātā metāna ieguve no hektāra. Tas izskaidrojams ar sausas satura paaugstināšanos biomasā un kopējo biomasas pieaugumu vēlākās attīstības fāzēs. Augstāko teorētiski aprēķināto metāna ieguvu no hektāra ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) vidēji ziemāju labībām ieguva no 80. – 82. AE novāktās tritikāles un rudzu skābbarības, bet, izmantojot kviešu skābbarību, augstāko metāna iznākumu no hektāra ieguva, to novācot 70. – 72. AE (2. tab.). Teorētisko metāna ieguvu no hektāra būtiski ($p < 0.05$) ietekmēja visi pētītie faktori un to mijiedarbības. Tomēr augstāku ietekmes īpatsvaru (η) uzrādīja skābbarības novākšanas laiks un audzēšanas gada apstākļu atšķirības.

Vērtējot teorētiski aprēķināto metāna iznākumu ($\text{Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$) starp labībām, netika konstatētas būtiskas atšķirības nevienā skābbarības novākšanas laikā. Augstāko teorētisko metāna iznākumu visām pētītajām labībām ieguva no agrākā attīstības fāzē (60. – 62. AE) novāktās skābbarības.

Veiktajā pētījumā ziemas kviešiem **laboratorijā eksperimentāli iegūtais metāna iznākums** bija $323.2 - 266.3 \text{ Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$, atkarībā no novākšanas laika. Tas bija lielāks salīdzinājumā ar teorētiski aprēķināto. No tritikāles skābbarības laboratorijā iegūtais metāna iznākums bija $300.5 - 276.8 \text{ Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$. Turpretī no rudzu skābbarības – $225.1 - 237.7 \text{ Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$.

2. tabula/ Table 2

Teorētiski aprēķinātais metāna iznākums ($\text{Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$) un ieguve no hektāra ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) atkarībā no audzētās labības

Specific methane yield ($\text{Nm}^3 \text{t}(\text{ODM})^{-1}$) and methane yield ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) calculated according to the silage chemical composition depending on grown cereal and its growth stage at harvest

Labības/ Cereals	Metāna iznākums no tonnas/ <i>Specific methane yield</i>			Metāna ieguve no hektāra / <i>Methane yield</i>		
	60. – 62. AE/GS	70. – 72. AE/GS	80. – 82. AE/GS	60. – 62. AE/GS	70. – 72. AE/GS	80. – 82. AE/GS
Kvieši/ Wheat	261.6	238.8	230.5	2108.5	3369.6	3237.9
Tritikāle/ Triticale	258.5	234.4	226.5	2057.5	2952.6	3448.9
Rudzi/ Rye	263.6	232.4	232.1	1733.8	2576.7	3673.8
Vidēji/ Average	261.3	235.2	229.7	1966.6	2966.3	3453.6
RS/ LSD _{0.05ABC}	8.4			194.0		

* kur A – gads, B – labības, C – augu attīstības fāzes/ where A – year, B – cereal species, C – growth stage at harvest

Vērtējot laboratorijā noteikto metāna ieguvi no hektāra, augstākos rezultātus nodrošināja vēlākās attīstības fāzēs novākta skābbarība, tas izskaidrojams ar augstāku organiskās sausas ražu šajās fāzēs. Labākie rezultāti tika iegūti no kviešu šķirnes ‘Skalmeje’ – 70. – 72. AE, bet 80. – 82. AE gatavotai skābbarībai – no tritikāles šķirnes ‘Dinaro’.

Labību izmantošana bioetanola ieguvē

Graudu raža bioetanola ražošanai. Viens no priekšnoteikumiem bioetanola izejvielu izvēlē ir izvēlētās labības un šķirnes augsta ražība. No izmēģinājumā izmantotajām kviešu šķirnēm augstāko vidējo ražas līmeni uzrādīja šķirnes ‘Mulan’ un ‘Skalmeje’, attiecīgi 9.72 un 9.50 t ha⁻¹. Tritikālei augstāko graudu ražu nodrošināja šķirne ‘Dinaro’ – 9.39 t ha⁻¹, tikai nedaudz zemāka (9.18 t ha⁻¹) bija ‘SW Valentino’ vidējā raža. Rudziem augstāko ražu nodrošināja hibrīdie rudzi ‘Placido’ – 9.74 t ha⁻¹. Gada apstākļiem bija būtiska ietekme uz graudu ražu visām labībām, tāpat būtiska ietekme bija arī šķirnes un gada audzēšanas apstākļu mijiedarbībai. Šķirnes ietekme uz ražu bija būtiska kviešiem un rudziem. Būtiskas graudu ražas atšķirības starp labībām netika konstatētas, tomēr augstāko vidējo trīs gadu ražu nodrošināja ziemas

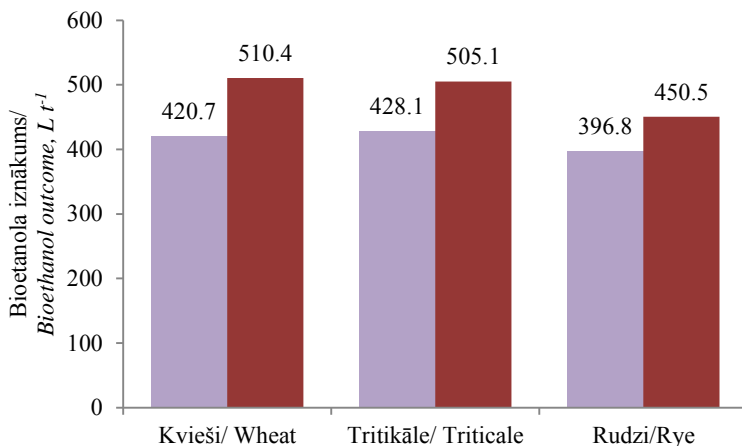
kvieši – 9.50 t ha⁻¹. Triticālei un rudziem bija nedaudz zemākas vidējās ražas, attiecīgi – 9.14 un 8.96 t ha⁻¹.

Ziemāju labību graudu kvalitāte. Ziemāju labību graudi ir piemēroti bioetanola ražošanai, kas pamatojams ar augstu cietes saturu izejvielā. Salīdzinot cietes saturu graudos starp labībām, augstāko iznākumu vidēji trijos gados nodrošināja kvieši – 71.0%. Par 0.7% zemāks vidējais cietes saturs atzīmēts tritikāles (70.3%) graudos, bet viszemākais pētījumā atzīmēts rudzu graudos – 62.7%; salīdzinot ar kviešiem, tas bija par 8.3% zemāks. Vērtējot trīs audzēšanas gadu datus, novēroja tendenci, ka visaugstākais cietes saturs graudos bija 2011./2012. gada audzēšanas sezonā, kad ziemāju graudu veidošanās laikā bija augsts mitruma nodrošinājums un gaisa temperatūra bija ilggadīgo vidējo rādītāju robežās. Augstāko cietes saturu vidēji trijos gados ziemas kviešiem nodrošināja līnija 99 – 115 – 71.8%, tritikālei šķirne ‘Dinaro’ un līnija 0002-26, attiecīgi 70.8 un 70.6%. Cietes saturam graudos starp pētītajām rudzu šķirnēm nebija vērojama būtiska atšķirība 95% būtiskuma līmenī.

Kopproteīna saturu graudos ietekmēja klimatiskie apstākļi, labības un šķirnes izvēle. Vērtējot labības, vidēji trijos gados augstāko kopproteīna saturu uzrādīja ziemas kvieši – 12.5%. Triticāles un ziemas rudzu graudos bija būtiski zemāks vidējais kopproteīna saturs, attiecīgi 10.5 un 10.3%. Vērtējot kopproteīna saturu starp šķirnēm audzēto labību robežās, zemāko kopproteīna saturu ziemas kviešiem vidēji trīs gadu periodā nodrošināja līnija 99 – 115: 12.3%. Triticālei zemākais kopproteīna saturs graudos bija šķirnēm ‘SW Valentino’ un ‘Dinaro’ – vidēji tas bija 10.3 un 10.1%. Rudziem zemākais kopproteīna saturs graudos izmēģinājumā vidēji trijos gados bija šķirnei ‘Matador’ – 10.0%.

Bioetanola iznākums. Veiktajā pētījumā laboratorijā eksperimentāli visvairāk bioetanola ieguva no kviešu un tritikāles graudiem. Neskatoties uz to, ka augstākais cietes saturs pētītajām labībām bija ziemas kviešu graudiem, eksperimentāli augstāko bioetanola iznākumu nodrošināja tritikāle – 428.1 L t⁻¹ (2. att.). Vidējais bioetanola iznākums no ziemas kviešiem bija 420.7 L t⁻¹. Zemākais cietes saturs graudos un arī zemākais bioetanola iznākums no 1 t graudu starp pētītajām labībām konstatēts rudziem – 396.8 L t⁻¹. Vērtējot šķirņu ietekmi uz bioetanola ieguvī, no kviešiem augstāko iznākumu no tonnas graudu nodrošināja līnija 99 – 115 (428.7 L t⁻¹), kas bija likumsakarīgi, jo šai līnijai bija augstākais cietes un zemākais kopproteīna saturs graudos.

Triticālei līdzīgi, šķirne ‘Dinaro’ ar augstāko cietes un zemāko kopproteīna saturu graudos nodrošināja augstāko bioetanola iznākumu – 433.7 L t⁻¹. No rudzu šķirnēm augstāko bioetanola iznākumu nodrošināja šķirne ‘Matador’ – 400.8 L t⁻¹, tai graudos bija zemākais kopproteīna saturs. Augstāko teorētiski aprēķināto un laboratorijā iegūto bioetanola iznākumu nodrošināja kvieši un tritikāle.



- Laboratoriski noteiktais bioetanola iznākums/Experimentally obtained bioethanol outcome
- Teorētiski aprēķinātais bioetanola iznākums/Theoretically calculated bioethanol outcome

2. att. Vidējais laboratorijā noteiktais un teorētiski aprēķinātais bioetanola iznākums vidēji atkarībā no audzētās labības, L t⁻¹.

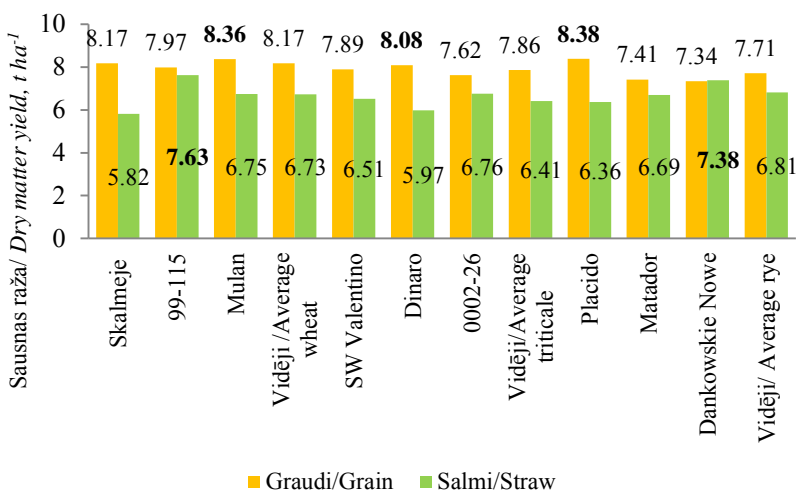
Fig. 2. Averages experimentally obtained and theoretically calculated bioethanol outcome, L t⁻¹, from cereals.

*RS_{0.05 prakt.} = 7.40, RS_{0.05 teorētiskie apr.} = 6.64 / LSD_{0.05 Exper.} = 7.40, LSD_{0.05 Theor.} = 6.64

Laboratorijā iegūtā bioetanola ieguve no hektāra, L ha⁻¹. Bioetanola iegūvi no viena hektāra ietekmē bioetanola iznākums (L t⁻¹) un graudu raža (t ha⁻¹). Zemākās graudu ražas un līdz ar to bioetanola iegūvi izmēģinājumā ieguva 2009./2010. gadā, kad bija nelabvēlīgi klimatiskie apstākļi graudu veidošanās laikā. Turpretī 2011./2012. gada sezonā ieguva visaugstākās graudu ražas visām pētītajām ziemāju labībām, līdz ar to arī bioetanola ieguve no hektāra bija ievērojami augstāka (4482 – 4597 L ha⁻¹). Vērtējot bioetanola iegūvi no hektāra atkarībā no pētītās šķirnes, ziemas kviešiem nekonstatēja būtiskas atšķirības, tomēr nedaudz augstāku bioetanola iegūvi uzrādīja šķirne ‘Mulan’ – 4042 L ha⁻¹. Triticālei augstāko bioetanola iegūvi no hektāra nodrošināja šķirnes ‘SW Valentino’ un ‘Dinaro’, attiecīgi – 3911 un 4081 L ha⁻¹. Šīm šķirnēm bija nedaudz augstākas ražas un bioetanola iznākums no vienas tonnas. Rudziem savukārt augstāko graudu ražu ieguva no šķirnes ‘Placido’, kas ietekmēja arī iegūto bioetanola iegūvi no hektāra – 3851 L ha⁻¹. Vērtējot bioetanola iegūvi no hektāra, vidēji augstāko ieguva no tritikāles un kviešu graudiem, attiecīgi – 3928 un 4005 L ha⁻¹. To nodrošināja šo labību augstākā graudu raža un bioetanola iznākums no vienas tonnas.

Labību piemērotība siltumenerģijas ražošanai.

Siltumenerģijas ieguves aprēķiniem ir nepieciešama izejvielas sausnas ražas atšķirībām. Graudu sausnas ražai ir līdzīga tendence, kā graudu ražai pie 14% mitruma, kas aprakstīta nodaļā par bioetanola ieguvi. Ziemas kviešu vidējā salmu sausnas raža bija 6.73 t ha⁻¹. Augstākā salmu sausnas raža tika iegūta no līnijas 99 – 115 (7.63 t ha⁻¹), (3. att.). Triticālei salmu sausnas raža bija 6.41 t ha⁻¹, un izmantotā tritikāles šķirne to būtiski neietekmēja. Rudziem salmu sausnas raža bija līdzīga kā tritikālei – 6.81 t ha⁻¹. Augstāko salmu sausnas ražu ieguva no šķirnes ‘Dankowskie Nowe’ – 7.38 t ha⁻¹. Vērtējot ražu atkarībā no audzēšanas gada, tritikāles un rudzu salmu sausnas raža augstāka bija 2009./2010. un 2011./2012. gadā.



3. att. Ziemāju labību graudu un salmu sausnas raža, t ha⁻¹.

Fig. 3. Grain and straw dry matter yield of winter cereals, t ha⁻¹.

*graudiem RS_{0.05kvieši} = 0.46, RS_{0.05trīti} = 0.47, RS_{0.05rudzi} = 0.51; salmiem RS_{0.05kvieši} = 1.55, RS_{0.05trīti} = 1.02, RS_{0.05rudzi} = 0.78 / grain LSD_{0.05wheat} = 0.46, LSD_{0.05trīti} = 0.47, LSD_{0.05rye} = 0.51; straw LSD_{0.05wheat} = 1.55, LSD_{0.05trīti} = 1.02, LSD_{0.05rye} = 0.78

Ziemāju labību graudu un salmu kvalitātes rādītāju analīze siltumenerģijas ražošanai. Koppelnu daudzums biomasā ir atkarīgs no tās ķīmiskā sastāva. Graudu sastāvā esošie ķīmiskie elementi – K, P, Si, Na, S, Cl, Ca, Mg, Fe – ietekmē koppelnu daudzumu un izdedžu veidošanos apkures katlos. Pētīto ziemāju labību graudos koppelnu saturs vidēji bija 1.58 – 1.86%. Zemāko koppelnu saturu konstatēja rudzu un kviešu graudos, attiecīgi 1.58 un 1.63%. Pelnu saturu graudos visām pētītajām labībām būtiski (p < 0.05) ietekmēja audzēšanas gada meteoroloģiskie apstākļi. Zemākais pelnu saturs gan

salmos, gan graudos konstatēts 2010./2011. un 2011./2012. gada sezonā. Salmos koppelnu saturs vidēji bija 4.61 – 4.92%, tas bija ievērojami augstāks nekā graudos. Būtiski augstāko ($p < 0.05$) koppelnu saturu uzrādīja ziemas kviešu salmi. Koppelnu saturs salmos būtiski atšķīrās starp pētītajām šķirnēm, to ietekmēja šķirņu ķīmiskā sastāva atšķirības. Zemāko koppelnu saturu salmos nodrošināja kviešu šķirne ‘Mulan’ un līnijas 99 – 11, tritikāles šķirne ‘Dinaro’ un līnijas 0002 – 26, rudzu šķirnes ‘Matador’ un ‘Dankowskie Nowe’. Biomasas ķīmiskais sastāvs ietekmē kurināmā materiāla kvalitāti. Slāpekļa saturs ziemāju graudos pētījumā bija no 1.91 līdz 2.19%, bet ziemāju salmos slāpekļa saturs bija ievērojami mazāks 0.54 – 0.64%. Augstākais vidējais slāpekļa saturs tika konstatēts kviešu graudos – 2.19%, kas var būt izskaidrojams gan ar ģenētiskām īpatnībām, gan ar augstāku pielietoto slāpekļa papildmēslojumu normu.

Slāpekļa saturs graudos bija augstāks nekā salmos, un būtiski augstāks tas bija kviešu graudos. Salmos, salīdzinot ar graudiem, bija zemāks fosfora un magnija saturs, turpretī augstāks kālija un kalcija saturs. Starp pārējiem noteikto ķīmisko elementu rezultātiem nebija lielas atšķirības. Tika novērotas būtiskas rezultātu atšķirības atkarībā no pētītās labības.

Siltumspēja. Labību graudiem vidējā laboratorijā noteiktā augstākā siltumspēja bija 17.80 MJ kg⁻¹ (3. tab.), kas starp pētītajām labībām būtiski neatšķīrās.

3. tabula/ Table 3

Ziemāju labību teorētiski aprēķinātā un laboratorijā noteiktā augstākā siltumspēja, MJ kg⁻¹

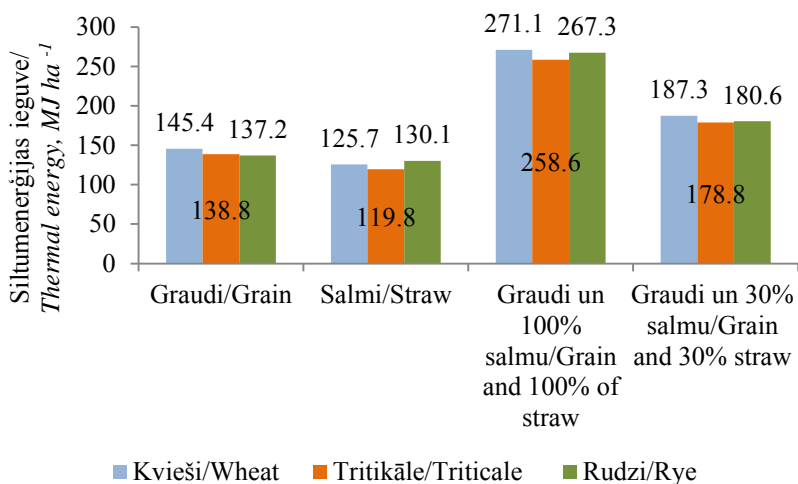
Theoretically calculated and experimentally obtained highest heating values, MJ kg⁻¹

Labības/ Cereals	Laboratorijā noteiktā augstākā siltumspēja/ Experimentally obtained highest heating values	Teorētiski aprēķinātā augstākā siltumspēja/ Theoretically calculated highest heating values	±, %	Laboratorijā noteiktā augstākā siltumspēja/ Experimentally obtained highest heating values		±, %
				salmi/ straw		
Kvieši/ Wheat	17.83	20.40	-12	18.65	19.75	-6
Tritikāle/ Triticale	17.71	20.19	-13	18.66	19.88	-6
Rudzi/ Rye	17.85	20.44	-13	19.08	20.15	-5
Vidēji/ Average	17.80	20.34	×	18.80	19.93	×

Salmiem vidēji augstākā laboratorijā noteiktā siltumspēja bija 18.80 MJ kg⁻¹. Vislielāko augstāko siltumspēju ieguva no rudzu salmiem – 19.08 MJ kg⁻¹.

Kviešu un rudzu salmiem laboratorijā noteiktai augstākai siltumspējai netika novērotas būtiskas atšķirības atkarībā no pētītās šķirnes, turpretī tritikālei augtāku siltumspēju uzrādīja līnijas 0002 – 26 salmi (19.49 MJ kg⁻¹). Pētījumā tika novērotas augstākas siltumspējas atšķirības starp aprēķināto un laboratorijā eksperimentāli iegūto rezultātu. Graudiem laboratorijā noteiktais rezultāts bija par 13% zemāks, salīdzinot ar teorētiski aprēķināto. Salmiem šī atšķirība bija 6%. Iznākuma atšķirība jeb zudumi veidojās siltuma ražošanas procesā.

Nozīmīgs rādītājs biomasai ir siltumenerģija, kas iegūta no viena hektāra. Šo rādītāju ietekmē biomasas raža un 1 t siltumspēja. No graudiem vidēji tika iegūti 137.2 – 145.4 MJ ha⁻¹, turpretī no salmiem – 119.8 – 271.1 MJ ha⁻¹ (4. att.). No graudiem iegūto siltumenerģijas daudzumu no 1 ha ne pētītā labība, ne šķirne neietekmēja būtiski 95% līmenī.



4. att. Laboratorijā noteiktā ziemāju labību siltumenerģijas ieguve, MJ ha⁻¹.

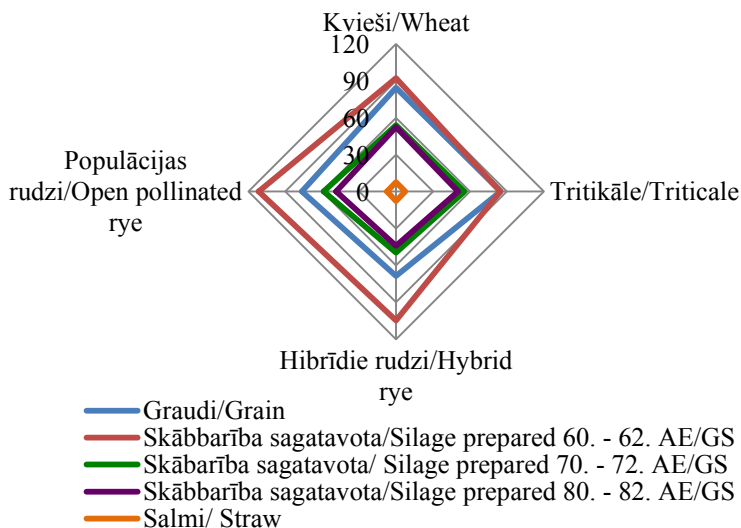
Fig. 4. Experimentally obtained thermal energy from winter cereals, MJ ha⁻¹.

No rudzu salmiem iegūto siltumenerģijas daudzumu būtiski neietekmēja pētītā šķirne, turpretī kviešiem augstākus rezultātus uzrādīja šķirnes ‘Mulan’ un līnijas 99 – 115 salmi (127.1 un 142.2 MJ ha⁻¹), bet tritikālei – līnijas 0002 – 26 salmi (132.0 MJ ha⁻¹). Izvērtējot iegūto siltumenerģiju, ko var iegūt, apkurei izmantojot visus salmus un graudus, augstāku rezultātu ieguva no kviešiem – 271.1 MJ ha⁻¹, nedaudz zemāku rezultātu ieguva no rudziem – 267.3 MJ ha⁻¹, bet zemāko siltumenerģijas iegūvi nodrošināja tritikāle – 258.6

MJ ha⁻¹. Apkurei Latvijā ieteicams lietot vienu trešo daļu no salmu ražas, pārējo salmu masu iestrādājot augsnē. Izvērtējot iegūto siltumenerģijas ieguvu, ja izmanto kopā graudus un 30% no salmu masas, tika konstatēts, ka praktiski noteiktās siltumenerģijas iznākums no labībām bija 178.8 – 187.3 MJ ha⁻¹.

Iegūto izejvielu un enerģijas veidu ekonomiskais novērtējums

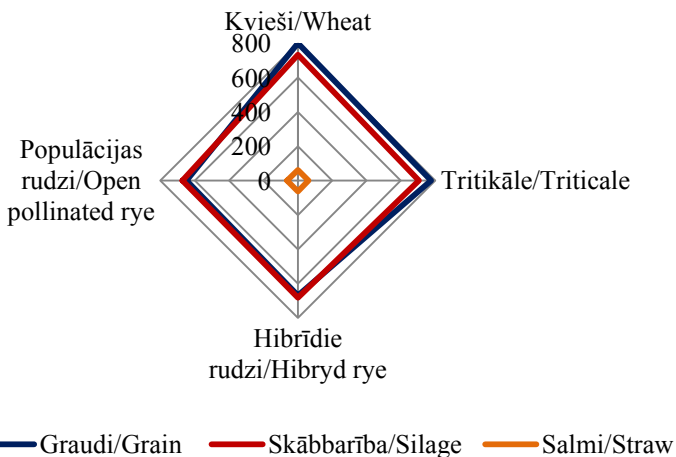
Izejvielu ražošanas izmaksas. Trīs gadu vidējie rādītāji liecina, ka augstākās izejvielu **ražošanas izmaksas** ir kviešu **skābbarībai** (5. att.), kas pamatojams ar augstākām slāpekļa mēslojuma normām un sēklas izmaksām, jo tika izmantotas jaunas augstražīgākas šķirnes. Vērtējot labības dažādos attīstības etapos, 60. – 62. AE zemākās bija tritikāles skābbarības organiskās sausnas izmaksas (84.87 EUR t⁻¹), bet, novācot labības 70. – 72. un 80. – 82. AE, – populācijas šķirņu rudzu skābbarības organiskās sausnas izmaksas, attiecīgi 45.56 EUR t⁻¹ un 44.09 EUR t⁻¹.



5. att. Ziemāju labību graudu, salmu un skābbarības audzēšanas izmaksas, EUR t⁻¹.

Fig. 5. Grain, straw, and silage cultivation costs for winter cereals, EUR t⁻¹:
*skābbarības izmaksas rēķinātas uz 1 t organiskās sausnas/ where silage costs have been calculated per 1 t of organic dry matter

Analizējot izmaksas uz vienu hektāru: zemākās bija salmu, kā blakusprodukta izmaksas (62.28 EUR ha⁻¹). Pētīto labību skābbarības audzēšanas izmaksas sugu ietvaros uz 1 hektāru bija vienādas neatkarīgi no tā, kurā augšanas fāzē tika novākta labība (6 att.).



6. att. Ziemāju labību graudu, salmu un skābbarības sausnas audzēšanas izmaksas, EUR ha⁻¹.

Fig. 6. Grain, straw, and silage dry matter cultivation cost for winter cereals, EUR ha⁻¹.

Izejvielu enerģētiskā vērtība

Svarīgs rādītājs enerģētisko augu audzēšanā un izmantošanā dažādiem enerģijas veidiem ir **to enerģētiskā vērtība**. Enerģija tiek izteikta MWh no masas vienības (t) vai laukuma vienības (ha). Iegūstot biogāzi, visām labībām un šķirnēm tika novērota tendence, ka, novācot biomasu vēlākā augu attīstības fāzē, masas vienības enerģētiskā vērtība samazinās. Visām pētītajām labībām šis rādītājs 60. – 62. AE bija līdzīgs – 2.86 – 2.92 MWh t⁻¹, vēlākās attīstības fāzēs skābbarībai bija zemāka enerģētiskā vērtība: 70. – 72. AE – no 2.57 līdz 2.64, bet 80. – 82. AE: no 2.51 līdz 2.57 MWh t⁻¹. Enerģētisko vērtību no hektāra ietekmēja metāna ieguve no ha, kas atkarīga no ražas. Likumsakarīgi, ka, novācot labību vēlākās attīstības fāzēs (80. – 82. AE), ieguva augstāku enerģijas daudzumu no 1 ha, jo ieguva vairāk metāna no hektāra. Iegūtais enerģijas daudzums atbilstoši teorētiskajiem aprēķiniem bija 35.41 – 38.49 MWh ha⁻¹ atkarībā no labības (4. tab.). Arī atbilstoši laboratorijā noteiktajam metāna iznākumam lielāku metāna ieguvu no 1 ha nodrošināja vēlākā attīstības fāzē (80. – 82. AE) novāktā skābbarība.

Iegūstot etanolu, tika konstatēts, ka augstākā enerģētiskā vērtība ir tritikālei – 2.53 MWh t⁻¹, kas bija likumsakarīgi, jo arī augstāko etanola iznākumu (L ha⁻¹) ieguva no tritikāles graudiem. Pētījumā enerģijas ieguve, ražojot bioetanolu no tritikāles graudiem, bija 23.13 MWh ha⁻¹, kas ir izskaidrojams ar augstāku graudu ražu no hektāra. Enerģijas ieguve no kviešiem, kuru vidējā raža izmēģinājumā bija 9.50 t ha⁻¹, vidēji visām pētītajām šķirnēm bija

23.53 MWh ha⁻¹. Enerģijas ieguve, ja bioetanolu ražo no rudziem, bija zemāka 21.02 MWh ha⁻¹.

4. tabula/ Table 4

Iegūtā enerģija no ziemāju labībām, MWh ha⁻¹/
Energy production from winter cereals, MWh ha⁻¹

Labības/ Cereals	Siltumenerģijas ražošana/ Production of thermal energy			Bioetanols/ Bioethanol	Metāns/Methan*		
	graudi/ grain	salmi/ straw	100% salmi un graudi/ 100% straw and grain	graudi/ grain	skābbarība, novākta atšķirīgās attīstības fāzēs/ Silage made in certain growth stage		
					60. – 62. AE/GS	70. – 72. AE/GS	80. –82. AE/GS
Kvieši/ Wheat	40.38	34.91	75.29	23.53	23.35	37.31	35.38
Tritikāle/ Triticale	40.38	33.28	73.66	23.13	25.83	36.13	35.41
Rudzi/Rye	39.63	34.78	74.41	21.02	19.54	34.87	38.49

*pēc teorētiskajiem aprēķiniem/ on the basis of theoretical calculations

Ziemāju labību salmu un graudu enerģētiskā vērtība, tos izmantojot kurināšanai. No graudiem tika iegūtas 4.92 – 4.96 MWh t⁻¹, atkarībā no labības, bet salmu tonna nodrošināja vairāk enerģijas: 4.68 – 5.30 MWh t⁻¹. Aprēķinot enerģijas ieguvu no hektāra, augstākus rezultātus uzrādīja ziemāju graudi (38.12 – 40.38 MWh ha⁻¹), salīdzinājumā ar salmiem (33.28 – 39.14 MWh ha⁻¹), galvenokārt tāpēc, ka graudu raža bija augstāka, salīdzinot ar salmiem.

Salīdzinot enerģijas ieguvu atkarībā no dažādiem ziemāju labību izmantošanas veidiem, jāsecina, ka augstāko enerģijas daudzumu no tonnas izejvielas ieguva no ziemāju labību salmiem, ko izmantoja siltumenerģijas ražošanai. Augsts enerģijas iznākums no tonnas izejvielas tika iegūts arī no graudiem, tos sadedzinot. Vērtējot siltumenerģijas ieguvu no hektāra, augstāku rezultātu ieguva, sadedzinot graudus. Ja ziemāju labību skābbarību izmantoja metāna ražošanai, tad gan atbilstoši teorētiskajam aprēķinam, gan laboratorijā iegūtiem rezultātiem, augstākais enerģijas iznākums MWh t⁻¹ tika iegūts, skābbarību gatavojot 60. – 62. AE. Metāna ražošanā enerģijas ieguve no hektāra (MWh ha⁻¹) augstāka bija, ja skābbarību gatavoja vēlākās attīstības fāzēs. Konstatēja, ka atbilstoši teorētiskajam aprēķinam enerģijas ieguve MWh ha⁻¹ bija mazāka, nekā metānu iegūstot laboratorijā. Zemāko enerģijas iznākumu no tonnas izejvielu nodrošināja, graudu izmantošana bioetanola ieguvei. Ražojot bioetanolu no ziemāju labībām, enerģijas ieguve no hektāra augstāka bija, izmantojot kviešus.

Komplekss enerģijas ražošanu raksturojošs rādītājs ir izejvielas izmaksas (EUR), lai saražotu vienu MWh enerģijas Augstākās izejvielas izmaksas 1 MWh bija, ražojot etanolu no graudiem. Salīdzinot trīs labības, izejvielu izmaksas augstākas bija, ja etanolu ieguva no kviešu un tritikāles graudiem. Zemākās 1 MWh ražošanai nepieciešamās izejvielu izmaksas bija, ja izmantoja hibrīdos rudzus (4. tab.)

Ražojot metānu, izejvielu izmaksas 1 MWh ražošanai bija atkarīgas no skābbarības novākšanas laika. Zemākās tās bija, ja izmantoja kviešu un tritikāles skābbarību vēlākās attīstības fāzēs. Viszemākās izejvielu izmaksas 1 MWh ražošanai konstatēja, ražojot siltumenerģiju no salmiem, kas ir blakusprodukts. Vērtējot audzēto labību graudu izmantošanu siltumenerģijas ieguvei, zemākās izmaksas 1 MWh ražošanai bija, izmantojot hibrīdo rudzu šķirni 'Placido'. Arī pieņemot, ka apkurei izmantos gan 100% salmus, gan graudus, hibrīdo rudzu šķirnei 1 MWh izmaksas bija zemākās (14.54 EUR MWh⁻¹). Izmantojot kviešu un tritikāles graudus, 1 MWh izmaksas bija augstākas.

5. tabula/ Table 5

Izejvielu izmaksas, lai saražotu 1 MWh enerģijas, EUR
Cost of raw materials for production of 1MWh energy, EUR

Labības/ <i>Cereals</i>	Siltumenerģijas ražošana/ <i>Production of thermal energy</i>			Bioetanol/ <i>Bioethanol</i>	Metāns/ <i>Methan</i>		
	graudi/ <i>grain</i>	salmi/ <i>straw</i>	100% salmi un graudi/ <i>100% straw and grain</i>	graudi/ <i>grain</i>	skābbarība, novākta atšķirīgās attīstības fāzēs/ <i>silage made in certain growth stage</i>		
					60. – 62. AE/GS	70. – 72. AE/GS	80. – 82. AE/GS
Kvieši/ <i>Wheat</i>	17.05	0.62	17.67	34.18	21.29	13.55	16.41
Tritikāle/ <i>Triticale</i>	17.29	0.68	17.97	33.63	21.94	16.13	14.21
Populāciju rudzi*/ <i>Open pollinated rye</i>	15.43	0.73	16.16	32.67	×	×	×
Hibrīdie rudzi/ <i>Hybrid rye</i>	13.85	0.69	14.54	29.73	38.74	20.04	18.32

*populāciju rudziem metāna iznākums netika noteikts laboratorijā/ *specific methane yield of open pollinated rye was not determined experimentally in the laboratory*

Tomēr jāpiezīmē, ka izejvielas tieši sadedzinot, uzreiz iegūst siltumenerģiju, kas ir gala produkts. Iegūstot enerģiju no metāna un bioetanola, to var izmantot gan apkurei, gan elektrības ražošanai, gan kā degvielu transporta sektorā. Līdz ar to no metāna un bioetanola iegūtā enerģija ir augstvērtīgāka.

SECINĀJUMI

1. Būtiski ($p < 0.05$) augstākās **vidējās sausnas ražas** visām pēfītajām ziemāju labībām ieguva 70. – 72. AE un 80. – 82. AE. Sausnas ražas apjomu būtiski ietekmēja audzēšanas gads, suga un šķirne un labību novākšanas laiks skābbarības gatavošanai.
2. Teorētiski aprēķinātais **metāna iznākums** no vienas masas vienības organiskās sausnas bija līdzīgs ($p > 0.05$) visām trīs labībām, bet augstākais tas bija, ja skābbarību gatavoja 60. – 62. AE. Tomēr, nosakot metāna iznākumu laboratorijas apstākļos, labības izvēlei uz rezultātu bija būtiska ietekme, turpretī skābbarības novākšanas laikam – nebija vērojama būtiska ietekme. Augstāku metāna iznākumu no vienas masas vienības organiskās sausnas nodrošināja ziemas kviešu un tritikāles skābbarība.
3. Augstāko vidējo **metāna ieguvu no hektāra** ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) tritikāle un rudzi nodrošināja, ja tos novāca 80. – 82. AE, bet kvieši – tos novācot 70. – 72. AE.
4. Augstāko teorētiski aprēķināto un laboratorijā noteikto **etanola iznākumu no graudu tonnas** (L t^{-1}) nodrošināja kvieši un tritikāle. **Šķirņu ietekme uz etanola iznākumu** tika konstatēta gan kviešiem, gan tritikālei, bet rudziem būtiska šķirnes ietekme uz šo rādītāju netika konstatēta.
5. Augstāko **etanola ieguvu no hektāra** (L ha^{-1}) nodrošināja tritikāle un kvieši. Būtiska ietekme uz etanola ieguvu no hektāra bija audzēšanas gada meteoroloģiskajiem apstākļiem.
6. **Ziemāju graudu un salmu sausnas ražu** ietekmēja audzēšanas gada meteoroloģiskie apstākļi, bet uz trīs gadu vidējiem rādītājiem netika konstatēta būtiska sugas ietekme. Audzēto labību ietvaros vienīgi ziemas kviešiem konstatēja būtisku šķirnes ietekmi uz salmu sausnas ražu.
7. Gan salmu, gan graudu **teorētiski aprēķinātā siltumspēja** bija augstāka, kā laboratorijā noteiktā. Teorētiskajos aprēķinos konstatēja, ka graudiem bija augstāka siltumspēja, salīdzinot ar salmiem. No pēfītajām labībām teorētiski aprēķināto augstāko siltumspēju uzrādīja kviešu un rudzu graudi, kā arī rudzu salmi. Tomēr **laboratorijā iegūtie** dati bija pretrunā ar teorētisko aprēķinu, jo nedaudz lielāku augstāko siltumspēju konstatēja salmiem. Lielāko augstāko siltumspēju uzrādīja rudzu salmi, bet visu pēfīto labību graudi bija līdzvērtīgi atbilstoši šim rādītājam.
8. Vairāk **siltumenerģijas no hektāra** var saražot, izmantojot labību graudus, nevis salmus. Izmantojot graudus, būtisku labību sugas un šķirnes ietekmi

uz siltumenerģijas ieguvī no hektāra nekonstatēja, bet, izmantojot salmus, būtiska šķirnes ietekme tika konstatēta tikai kviešiem un tritikālei.

9. **Zemākās skābbarības ražošanas izmaksas (EUR t⁻¹)** visām sugām bija, ja labību biomasa novākta 70. – 72. un 80. – 82. AE, bet starp labībām – izmantojot populācijas šķirnes rudzus. Zemākās graudu audzēšanas izmaksas (EUR t⁻¹) bija populācijas un hibrīdās šķirnes rudziem. Arī izejvielu izmaksas, rēķinot **uz 1 ha, zemākas** bija populācijas un hibrīdo šķirņu rudziem gan ražojot skābbarību, gan graudus.
10. **Visvairāk enerģijas (MWh ha⁻¹) iegūva**, ražojot siltumu no labību salmiem un graudiem. Nedaudz zemāku rezultātu deva ziemāju labību skābbarības izmantošana metāna ieguvei, ja kviešu un tritikāles skābbarību gatavoja 70. – 72. AE, bet rudzu – 80. – 82. AE. Ražojot etanolu no graudiem, enerģijas iznākums no hektāra bija zemākais.
11. **Zemākās izejvielu izmaksas, lai iegūtu vienu MWh enerģijas**, konstatēja siltumenerģijas ražošanā. Iegūstot 1 MWh enerģijas no metāna, izejvielu izmaksas vidēji bija nedaudz augstākas, bet starp labībām zemākās tās bija, izmantojot tritikāles un kviešu skābbarību, kas gatavota vēlākās attīstības fāzēs (70. – 72. un 80. – 82. AE). Augstākās 1 MWh izmaksas bija, ražojot etanolu no graudiem.

INTRODUCTION

Frugal use of energy sources and production thereof from renewable raw materials bears global relevance. Use of renewable energy sources has been put forward as a future priority for energy sector, and this priority is being governed by the Directive 2009/28/EC for the period until 2020. Given the topicality of the issue, the thesis covers research on suitability of winter cereals as renewable sources for the production of biogas and bioethanol, as well as on utilisation of both grain and straw for the production of thermal energy.

Biogas can be produced from raw materials of agricultural and industrial origin. The agricultural raw materials include agricultural by – products and also so-called cultivated energy crops. Crop biomass is being ensilaged in order to allow for its use throughout a whole year. Biogas obtained by employing the anaerobic fermentation process is a cost – effective and CO₂ – neutral source of renewable energy which provides an opportunity to process cultivated energy crops. Contrary to fossil fuels, biogas obtained via anaerobic fermentation is a fully renewable source, as it is produced from biomass which accumulates the captured sun's energy by the process of photosynthesis. In accordance with research of scientists from abroad the winter cereals can be utilised as a renewable energy source, as it provides high yield of biomass which can be ensilaged conveniently. Research of the kind in Latvia has been carried out rarely and on a random basis.

Bioethanol is being ever-increasingly used as a substitute for petrol in many countries worldwide. Bioethanol is being produced mostly from the renewable biomass which contains sugars, starch and lignocellulose. As regards cereals to be used for the production of bioethanol in local conditions of Latvia, grain with high content of starch and low content of proteins could be suitable. The needs of the production of bioethanol could be met by winter wheat (*Triticum aestivum*), triticale (*×Triticosecale*) and rye (*Secale cereale*). The scope of rye, wheat and triticale varieties grown in Latvia is wide, yet it has been hitherto rarely researched for the purposes of the production of bioethanol. Data on utilisation of rye, wheat and triticale varieties for the production of bioethanol would help the cereal growers to meet the requirements of processing industry and to supply grain of adequate quality for the production of renewable energy.

Possible use of grain and straw in heating. The material most commonly used for heating in Latvia so far has been the renewable energy source of forest origin, namely, wood, whose regeneration process is quite slow. Other by-products of agricultural production, for instance, straw and grass, can be utilised in production of alternative thermal energy. Biomass of high value to be used in production of thermal energy must have the following properties – high yield, low ash content, low moisture content and high combustion efficiency. Given the changing weather conditions present in Latvia, years occur in which the harvested grain fail to meet the quality requirements of food

production and even of feed production. The grain which cannot be used for the production of either food or feed are among the types of biomass which could be used in heating. Use of straw as heating fuel is widely common elsewhere in Europe, and it could be used so also in Latvia.

Hypothesis statement: winter cereals are suitable for production of several types of renewable energy sources in local conditions of Latvia.

The aim of the research was to determine the suitability of winter cereals for production of different types of renewable energy sources.

Assigned tasks of the research

1. To evaluate the suitability of winter wheat (*Triticum aestivum*), triticale (\times *Triticosecale*) and rye (*Secale cereale*) varieties for the production of biogas depending on the species, variety and developmental phase during the harvest.
2. To evaluate the suitability of winter wheat, triticale and rye varieties for the production of bioethanol.
3. To evaluate the suitability of winter wheat, triticale and rye varieties (grain and straw) for the use in heating.
4. To provide the complex assessment for use of winter cereals in the production of renewable energy.

Scientific novelty of the paper

1. Developmental phase of cereals which is the most suitable in Latvia for harvesting of biomass with a view to utilise the silage thereof in production of biogas has been established.
2. Detailed assessment of the chemical composition of three cereal species' biomass, grain and straw, as well as detailed assessment of the chemical compositions' effect on the outcome of acquired energy of various types (biomass, bioethanol, thermal energy) from a mass unit, have been carried out under identical conditions.
3. A comprehensive assessment of three winter cereals species under identical conditions for the purpose of production of various types of renewable energy in Latvia has been carried out for the first time.

Findings of the research have been elaborated upon in 10 scientific publications drawn up in English, Latvian and Russian, including internationally reviewed scientific papers published in the Proceedings of international conferences, congresses and scientific seminars.

Six oral and six poster presentations on the scientific research findings have been given in international conferences, congresses and scientific seminars.

Research was supported by the ESF Project "Support for doctoral studies in LLU", Agreement No 2009/0180/1DP/1.1.2.1.2/09/IPIA/VIAA/017, and by the DPP State Stende Cereals Breeding Institute.

MATERIALS AND METHODS

Methodology for setting up the field experiments

The field experiments were carried out in State Stende Cereals Breeding Institute from 2009/2010 until 2011/2012. Three genotypes (varieties or breeding lines) per each cereal species were examined in course of research, namely, wheat – ‘Mulan’, ‘Skalmeje’ and ‘99-115’ which is a breeding line developed in State Stende Cereals Breeding Institute, triticale – ‘SW Valentino’, ‘Dinaro’ and ‘0002-26’ which is a breeding line developed by the State Priekuli Plant Breeding Institute, rye – ‘Matador’, ‘Placido’ and ‘Dankowskie Nowe’.

Conduct of the field experiments was set up in two parts. In course of the first part, the cereals were sown with a view to obtain biomass and prepare silage which later served for the production of biogas. Sowing of the biomass cereals was arranged in three experiment blocks which were harvested at three different crop developmental phases:

- flowering (growth stage (hereinafter – "GS") 60 – 62);
- milk ripening stage (GS 70 – 72);
- beginning of the yellow ripening stage (GS 80 – 82).

In course of the second part, the cereals were sown to obtain grain and straw in order to assess the bioethanol outcome as well as the utilisation of grain and straw for the production of thermal energy.

The plots in all cases covered 12 m², and all variants were arranged in a random manner in 4 repetitions. The experiment was set up in sod-podzolic gley soil (Soil diagnostics..., 2008), (*Stagnic Retisol (Loamic)* (World Reference Base..., 2014)), soil granulometric composition – loam (in accordance with the N. Kachinsky system), agrochemical indicators: organic matter – on average 19 – 24 g kg⁻¹ of soil (in accordance with the Tyurin method), soil exchange reaction pH KCl – 5.3 – 5.8, available for plants P₂O₅ content – 83 – 229 mg kg⁻¹ of soil and available for plants K₂O content – 126 – 181 mg kg⁻¹ of soil (in accordance with the Egner-Riehm method).

Sowing was carried out in the 2nd ten – day period of September (18 September 2009, 14 September 2010, 15 September 2011). The sowing rates applied in all years expressed in germinable seeds per m² were 200 for hybrid rye (‘Placido’), 400 for open pollinated rye and triticale and 450 for wheat.

Mowing of the biomass intended for preparation of silage for biogas production and assessment of dry matter yield was carried out with a hand – held mowing – machine. One average sample from four repetitions was taken from each variety on the field, and each sample was split into two parts, as follows: 1) a sample for the production of biogas (which was subsequently ensilaged) and 2) a sample for the quality analysis. In order to determine the straw yield and to assess their suitability for heating, the grain/straw ratio was

determined. In order to obtain grain and straw, the respective cereals were harvested at GS 88 – 92 by means of direct combining. The grains of cereals underwent drying and cleaning, and the yield was determined under conditions of 14 % humidity and 100 % purity.

The prime costs of cultivation and preparation of grains and silage of winter cereals were calculated on the basis of methodology of the Rural Consultations and Education Centre of Latvia (*LLKC*).

Description of weather conditions

Weather conditions in the three trial years differed. The 2009/2010 was suitable for cultivation of winter cereals, as precipitation readings throughout the period exceeded those of long-term observations by 24%. The sum of active temperatures (above +5 °C) throughout the 2009/2010 growing season was 2119.5 °C which is generally deemed to be suitable for cultivation of winter crops in our climatic zone. On the whole, the winter weather conditions in 2010/2011 were unfavourable for overwintering of winter cereals. The sum of active temperatures throughout the 2010/2011 growing season was 2065.5 °C. The 2011/2012 was favourable for cultivation of winter cereals, as precipitation readings throughout the period exceeded those of long-term observations by 23%. The sum of active temperatures throughout the 2011/2012 growing season was 2088.8 °C.

Methods used for quality analysis

Analyses of grain and straw with a view to assess their suitability for the production of bioethanol and in heating were carried out in Laboratory of Grain Technology and Agrochemical Research of the State Stende Cereals Breeding Institute. The following were determined: moisture content (LVL EN ISO 721:2010); starch content in dry matter (LVS EN ISO 10520); crude nitrogen content of grain and straw (LVS EN ISO 20483:2007); crude protein content of grain (LVS EN ISO 20483:2007) by applying a ratio of 5.75; crude fat content (ISO 6492:1999); crude ash content (LVS 276:2000); magnesium content (LVS EN ISO 6869); calcium content (GOST 26570-95p2); phosphorus content (ISO 6492); potassium content (LVS EN ISO 6869); crude fibre content (ISO 5498:1981).

Carbon, hydrogen, nitrogen and oxygen contents were determined in accordance with LVS CEN/TS 15104:2005 in the Latvian State Institute of Wood Chemistry.

Quality analyses of the cereals for silage were carried out in the Scientific Laboratory of Agronomic Analysis of the LLU. The following contents were determined for the purpose of silage quality assessment: dry matter (Forage analyses USA, met 2.2.1.1:1993); crude nitrogen and crude protein (LVS EN ISO 5983 – 2:2009) by applying a ratio of 6.25; carbon (by means of CS – 500 analyser method); crude fibre (ISO 5498:1981); crude fat (ISO 6492:1999); lignin (LVS EN ISO 13906:2008); starch (ISO 6493:2000); NDF (neutral

detergent fibre) (LVS EN ISO 16472:2006); ADF (acid detergent fibre) (LVS EN ISO 13906:2008); pH KCl (GOST 26180:1984).

Methods used to determine biogas and bioethanol

Production of biogas. Silage samples of each variety of each cereal species obtained during each of the three mowing exercises were delivered to the BiNoLab laboratory in Germany where biogas outcome and methane content therein were determined in accordance with the standard VDI 4630 "Fermentation of organic materials" of the Association of German Engineers. The biogas outcome was determined experimentally in the laboratory by carrying out 2 – 3 repetitions. In addition, specific methane yield was also calculated on the basis of an equation described in scientific literature (Amon et al., 2007) (formula (1)):

$$\text{MEV} = 5.904 \times \text{XP} + 3.79 \times \text{XF} + 1.352 \times \text{BEV}, \quad (1)$$

where:

MEV – specific methane yield, Nm^3 per t^{-1} of organic dry matter;

BEV – nitrogen-free extracts, %, calculated on the basis of formula (2):

$$\text{BEV} = 1000 - \text{XP} - \text{XF} - \text{XT} - \text{XY}, \quad (2)$$

where:

XP – crude protein, %; XF – crude fibre, %; XT – crude fat, %; XY – crude ash, %.

Biogas outcome and specific methane yield is expressed in Nm^3 ($\text{Nm}^3 - 1 \text{ m}^3$ of gas at 0°C temperature and 1013 mbar pressure) per one tonne of organic dry matter yield (ODM) ($\text{Nm}^3 \text{ t}(\text{ODM})^{-1}$).

Experimental production of bioethanol. The experimental production of ethanol from all species and varieties covered by the research was carried out in the Institute of Microbiology and Biotechnology of University of Latvia. The method applied consisted of fermentation of the highly sugared samples of wheat, triticale and rye with yeast *Saccharomyces cerevisiae* and subsequent calculations of the ethanol outcome and the speed of fermentation. The ethanol outcome from the grain was calculated on the basis of the determined starch content. Calculations were carried out on the basis of formulas adapted by Dr. biol. A. Vīgants.

Experimentally obtained heating value (kJ kg^{-1}) was determined in accordance with LVS EN 14918. In order to determine the highest heating value, an oxygen bomb calorimeter "Parr 1341" was used whereby the sample is being combusted with oxygen in a round-shaped enclosure to extract all calorific energy from the sample. Highest heating value of the heating fuel in constant volume $Q_{v,gr,ar}$ was thus obtained – determined experimentally in the laboratory with a calorimeter. After conduct of the chemical reactions a formula (3) was used to carry out theoretical calculations of heating values of the heating fuels.

$$Q_{as} = 0.34X_C + 1.26X_H + 0.1(X_S - X_O) - 0.02(X_N + X_p), \quad (3)$$

where: Q_{as} – theoretically calculated heating value, MJ kg⁻¹; X_C – carbon content in the heating fuel, %; X_H – hydrogen content in the heating fuel, %; X_S – sulphur content in the heating fuel, %; X_O – oxygen content in the heating fuel, %; X_N – nitrogen content in the heating fuel, %; X_p – ash content in the heating fuel, %.

Data processing. Processing of the data on yield and quality indicators of raw materials for bioethanol, biogas and heating was carried out by means of two- and three-factor analysis of variance. Analysis of correlation between quality and quantity indicators was carried out by means of regression and correlation analysis with the data-processing tool ANOVA. Confidence level of 95% was applied and factors' effect rate (η^2 , expressed in %) was assessed in analysis of the results.

RESULTS

Suitability of cereals' silage for production of biogas

Dry matter yield of winter cereals' biomass, t ha⁻¹. Dry matter yield is an important quality indicator of the raw materials for the production of biomass. The highest average dry matter yield of winter wheat, triticale and rye varieties was obtained from samples harvested at the GS 70 – 72 and GS 80 – 82, namely, 15.19 – 16.20 t ha⁻¹ (Table 1). The data indicate that the dry matter yield increased in step with the maturation. Substantial differences were observed across varieties and breeding lines covered by the research.

Substantial ($p < 0.05$) effect of harvest timing on the cereals dry matter yield was observed. Given the differing agroecological conditions throughout the years covered by the research, the obtained dry matter yields also differed substantially. The most favourable conditions for development of dry matter yield were those of the 2011/2012 when ideal conditions for overwintering as well as suitable humidity and temperature regime were present, which secured higher dry matter yield of winter cereals biomass than those of other trial years. Cereals dry matter yield was also substantially affected by biomass harvest timing.

Organic dry matter (ODM) yield has a significant role in production of biogas. Biogas develops in fermentation process whereby bacteria disperse the organic matter. Therefore specific biogas outcome or specific methane yield is being expressed in NL or Nm³ per 1 kg or 1 t of organic dry matter yield. As regards winter wheat and triticale, the highest organic dry matter yield was obtained at GS 70 – 72 and GS 80 – 82. As regards wheat silage, the substantially highest organic dry matter yield was obtained from variety 'Skalmeje' harvested at GS 60 – 62 and GS 70 – 72, as well as from breeding

line '99 – 115' harvested at GS 70 – 72 and GS 80 – 82. As regards triticale silage, the substantially highest organic dry matter yield was obtained from breeding line '0002 – 26' harvested at GS 60 – 62 and GS 70 – 72, as well as from variety 'Dinero' harvested at GS 80 – 82. The highest rye silage organic dry matter yield was obtained at GS 80 – 82. As regards rye silage, the substantially ($p < 0.05$) highest organic dry matter yield was obtained from variety 'Matador' harvested at GS 70 – 72 and 80 – 82.

Quality of winter cereals silage and methane yield. Favourable environment for development of microorganisms is required in order to facilitate conduct of anaerobic processes during the development of biogas. Biomass composition affects the production of biogas in anaerobic environment. **Crude protein** content was affected by the chosen species and cereals harvest timing. As regards species-dependent findings on crude protein content, the substantially ($p < 0.05$) highest crude protein content was found in wheat silage. Harvest timing had a substantial ($p < 0.05$) effect on crude protein content – higher crude protein content was found in silage harvested at GS 60 – 62. No substantial differences in crude protein content among varieties of a cereal species were found. Higher crude fibre, cellulose, hemicellulose, ADF and NDF contents were present in silage samples harvested in early developmental phases (GS 60 – 62), and this proved to be true in case of all cereals and varieties examined.

Nitrogen-free extracts (BEV) rate was established by means of calculations. In theory, higher nitrogen-free extracts content provides higher specific methane yield in accordance with the formula (1). Silage harvested in earlier developmental phase had a lower BEV rate. The underlying explanation is that at this developmental phase of the crops they have higher crude protein, crude fibre and crude ash indicators. Across all cereals and varieties examined, the substantially ($p < 0.05$) highest crude ash content was found in silage harvested at GS 60 – 62 which amounted to 5.9 – 6.8%, depending on the cereal and variety.

Analysis of crude ash content in silage harvested at GS 70 – 72 and 80 – 82 revealed substantial differences within 3.7 – 4.6% range. Crude ash content was also substantially different across varieties of a species. As regards findings on factors' effect rate (η) pertaining to indicators of the silage chemical composition, silage harvest timing had a substantial ($p < 0.05$) effect on changes in crude ash, crude nitrogen, crude protein, crude fat and starch contents. This interrelation was observed on all cereal species covered by the research. It was found that silage harvest timing also had an effect on crude fat content of all cereals examined. Analysis of silage harvested at later developmental phases revealed the decrease in crude fat content. No substantial species – dependent differences were found with respect to crude ash content.

Theoretically calculated specific methane yield ($\text{Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$) is conditional on the chemical composition of silage. Silage harvest timing affected the theoretically calculated specific methane yield. The substantially ($p < 0.05$) highest theoretically calculated specific methane yield per tonne of organic dry matter was obtained from silage of all cereals covered by the research harvested at GS 60 – 62. The average theoretically calculated specific methane yield at GS 60 – 62 was, as follows: wheat – $261.6 \text{ Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$, triticale – $258.5 \text{ Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$, rye silage – $263.6 \text{ Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$ (Table 2). There were only minor variety-dependent differences with respect to the specific methane yield.

Harvesting of winter wheat silage at later developmental phases secured increase in theoretically calculated methane yield per hectare. It is attributable to increase in biomass dry matter content as well as to total biomass increase at later developmental phases. The highest theoretically calculated methane yield per hectare ($\text{Nm}^3 \text{ ha}^{-1}$) of winter cereals on average was obtained from silage of triticale and rye harvested at GS 80 – 82, while the highest methane yield per hectare of the wheat silage was obtained at GS 70 – 72 (Table 2). All factors covered by the research and their interaction had a substantial ($p < 0.05$) effect on theoretically calculated methane yield per hectare. However, the highest effect rate (η) was attributable to the silage harvest timing and different conditions in the cultivation years.

As regards findings on theoretically calculated specific methane yield ($\text{Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$), neither of the silage harvest timing periods presented substantial species-dependent differences. The highest theoretical specific methane yields across all cereals examined were obtained from the silage harvested at earlier developmental phase (GS 60 – 62).

The winter wheat **specific methane yield obtained experimentally in the laboratory** in course of the research amounted to $323.2\text{--}266.3 \text{ Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$, depending on harvest timing. This indicator exceeds the theoretically calculated indicator. The specific methane yield obtained experimentally from triticale silage amounted to $300.5\text{--}276.8 \text{ Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$. Meanwhile, the one obtained from rye silage amounted to $225.1\text{--}237.7 \text{ Nm}^3 \text{ t(ODM)}^{-1}$.

As regards findings on experimentally obtained methane yield per hectare, silage harvested at later developmental phases provided the highest outcome; it is attributable to higher organic dry matter yields at these phases. The best results were obtained from wheat variety ‘Skalmeje’ by preparing the silage at GS 70 – 72, while at GS 80 – 82 the best results originated from triticale variety ‘Dinaro’.

Use of cereals for production of bioethanol

Grain yield for production of bioethanol. As regards choice of raw materials for production of bioethanol, one of prerequisites is high productivity of the cereal species and variety in question. Among the wheat varieties

observed in course of the experiments, 'Mulan' and 'Skalmeje' provided the highest average yields – 9.72 and 9.50 t ha⁻¹, respectively. The highest grain yield among triticale varieties was provided by 'Dinaro' – 9.39 t ha⁻¹, while 'SW Valentino' provided slightly lower average yield (9.18 t ha⁻¹). The highest yield among rye varieties was provided by hybrid rye 'Placido' – 9.74 t ha⁻¹. Environment and environment×variety interaction in the respective cultivation years substantially affected grain yields of all cereal species. Substantial variety-dependent differences were found in case of wheat and rye. No substantial species-dependent differences in grain yields were found, yet the highest average three-year yield originated from winter wheat – 9.50 t ha⁻¹. Triticale and rye average yields were slightly lower – 9.14 and 8.96 t ha⁻¹, respectively.

Grain quality of winter cereals. Winter cereal grains are suitable for production of biomass due to high starch content in this raw material. Species-dependent comparison of starch content in grain revealed that wheat provided the highest average result across three years – 71.0%. The average starch content indicator of triticale grain was 0.7% lower (70.3%), while the lowest one was attributable to rye grain – 62.7%, which is 8.3% lower than that of wheat. Data covering the three cultivation years attest to the following pattern – starch content in grain was at its highest level in the 2011/2012 when the formation of winter cereal grain yield coincided with high humidity levels and ambient temperature was within limits of long-term average levels. As regards the highest starch content on average across three years, the best indicator among winter wheat samples was attributable to breeding line '99-115' which amounted to 71.8%, while among triticale – to variety 'Dinaro' and breeding line '0002 – 26', which amounted to 70.8 and 70.6%, respectively. No substantial differences within confidence level of 95% were found with respect to starch content in grain of rye varieties covered by the research.

Crude protein content in grain was affected by climatic conditions and choice of cereal species and variety. As regards cereal species, the highest crude protein content on average across three years was found in winter wheat – 12.5%. Triticale and winter rye grain had substantially lower average crude protein contents – 10.5 and 10.3%, respectively. As regards varieties of the cereals grown, the lowest crude protein content on average across three years was provided by winter wheat breeding line '99 – 115' – 12.3%. In case of triticale, the lowest crude protein content was found in grain of varieties 'SW Valentino' and 'Dinaro' – 10.3 and 10.1% on average. As regards rye, the lowest crude protein content on average across three years was provided by variety 'Matador' – 10.0%.

Bioethanol outcome. As regards bioethanol obtained experimentally in the laboratory in course of the research, the highest amount was obtained from grain of wheat and triticale. Notwithstanding the fact that the highest starch content among the cereals examined was found in winter wheat grain, the highest experimentally-obtained bioethanol outcome originated from triticale –

428.1 L t⁻¹ (Fig. 2). Average bioethanol outcome from winter wheat was 420.7 L t⁻¹. The lowest starch contents in grain and also the lowest bioethanol outcome per 1 t of grain across the cereals species examined were found in rye – 396.8 L t⁻¹. As regards variety-dependent effects on the production of bioethanol, the highest outcome per 1 t of grain among the wheat varieties was provided by breeding line '99 – 115' (428.7 L t⁻¹), which was to be expected, given the causal ground – the highest starch content and the lowest crude protein content in the grain.

Likewise, the triticale variety 'Dinaro' with the highest starch content and the lowest crude protein content in the grain provided the highest bioethanol outcome – 433.7 L t⁻¹. The highest bioethanol outcome among the rye varieties – 400.8 L t⁻¹ – was provided by 'Matador' whose grain had the lowest crude protein content. The highest theoretically calculated and experimentally obtained bioethanol outcome originated from wheat and triticale.

Experimentally obtained bioethanol yield per hectare, L ha⁻¹. Bioethanol yield per one hectare is being affected by bioethanol outcome (L t⁻¹) and grain yield (t ha⁻¹). The lowest grain yields and thus also the lowest bioethanol yields occurred in 2009/2010 when unfavourable climatic conditions prevailed during the formation of grain. The 2011/2012, however, brought the highest grain yields of all winter cereals examined, and bioethanol yield per hectare therefore was considerably higher (4482 – 4597 L ha⁻¹). As regards variety-dependent findings on bioethanol yield per hectare, winter wheat varieties did not present any significant differences, yet variety 'Mulan' provided slightly higher bioethanol yield – 4042 L ha⁻¹. The highest results of bioethanol yield per hectare among the triticale varieties – 3911 and 4081 L ha⁻¹ – were provided by varieties 'SW Valentino' and 'Dinaro', respectively. These varieties had slightly higher grain yield and bioethanol outcome per tonne. The highest grain yield among the rye varieties was obtained from 'Placido' which also affected the bioethanol yield per hectare – 3851 L ha⁻¹. As regards species-dependent findings on bioethanol yield per hectare, the highest ones on average were obtained from triticale and wheat – 3928 and 4005 L ha⁻¹, respectively. It is attributable to the fact that they had the highest results of grain yield and bioethanol outcome per tonne.

Suitability of cereals for production of thermal energy

Calculations pertaining to production of thermal energy require an indicator of raw material – dry matter yield. Grain dry matter yield exhibits a pattern similar to that of grain yield under conditions of 14% humidity, as described in the section on bioethanol production. The average straw dry matter yield of winter wheat was 6.73 t ha⁻¹. The highest straw dry matter yield was obtained from the breeding line '99 – 115' (7.63 t ha⁻¹) (Fig. 3). The straw dry matter yield of triticale was 6.41 t ha⁻¹, and there were no variety-dependent effects on the yield. The straw dry matter yield of rye was similar to that of triticale – 6.81 t ha⁻¹. The highest straw dry matter yield was obtained

from variety 'Dankowskie Nowe' – 7.38 t ha⁻¹. As regards findings on the cultivation years, the straw dry matter yields of triticale and rye were higher in 2009/2010 and 2011/2012.

Analysis of quality indicators of winter cereals' grain and straw for the purpose of thermal energy production. Crude ash content in the biomass is determined by chemical composition of the latter. Chemical elements present in the grains – K, P, Si, Na, S, Cl, Ca, Mg, Fe – affect quantity of crude ash and formation of clinker in boilers. Crude ash content in the grain of winter cereals examined was 1.58 – 1.86% on average. Low crude ash content were found in the grain of rye and wheat – 1.58 and 1.63%, respectively. Weather conditions in the cultivation years had a substantial ($p < 0.05$) effect on ash content in grain of all cereals examined. The lowest ash contents in both straw and grain were found in 2010/2011 and 2011/2012. Crude ash content in straw was 4.61 – 4.92% on average which is considerably higher than that found in grain. The substantially ($p < 0.05$) highest crude ash content was found in winter wheat straw. Given the effects of differences in chemical composition of varieties, substantially different crude ash contents were found across varieties examined. As regards crude ash content in straw, the lowest indicators among wheat straw were attributable to variety 'Mulan' and breeding line '99 – 115', among triticale – to variety 'Dinaro' and breeding line '0002 – 26', and among rye – to varieties 'Matador' and 'Dankowskie Nowe'. The chemical composition of biomass affects quality of heating material. Nitrogen content in winter cereals grain covered by the research was within range from 1.91 to 2.19%, while nitrogen content in winter cereals straw was considerably lower – 0.54 – 0.64%. The highest average nitrogen content of 2.19% was found in wheat grain which may eventually be attributable to genetic peculiarities as well as to application of higher norm of nitrogen fertilisers.

Nitrogen content of grain exceeded that of straw, and it was substantially higher in wheat grain. In comparison with grain, the straw had lower contents of phosphorus and magnesium, meanwhile having higher potassium and calcium contents. As regards other chemical elements examined, no considerable differences were found. Substantial species – dependent differences in the results were observed.

Heating value. The average experimentally obtained highest heating value of cereal grain was 17.80 MJ kg⁻¹ (Table 3), and no significant species-dependent differences were observed. The experimentally obtained highest heating value of straw was 18.80 MJ kg⁻¹. The highest heating value was obtained from rye straw – 19.08 MJ kg⁻¹.

As regards the experimentally obtained highest heating values of wheat and rye straw, no substantial variety – dependent differences were observed, while in case of triticale higher heating value was delivered by straw of variety '0002 – 26' (19.49 MJ kg⁻¹). The research revealed differences between calculated and experimentally obtained results of the highest heating values.

The experimentally obtained result for grain was 13% lower than the theoretical calculated result. As regards straw, this difference was found to be 6%. The outcome difference or losses formed in the heat production process.

A significant indicator in this context is the biomass thermal energy obtained from one hectare. This indicator is dependent on both biomass yield and heating value per 1 t. Grain returned on average 137.2 – 145.4 MJ ha⁻¹, straw – 119.8 – 271.1 MJ ha⁻¹ (Fig. 4). As regards thermal energy outcome from grain per 1 ha, neither species-dependent nor variety-dependent substantial (at 95% level) effects on the outcome were found.

No substantial variety-dependent effect on thermal energy outcome from rye straw was found, while in case of wheat higher results were delivered by straw of variety 'Mulan' and breeding line '99-115' (127.1 and 142.2 MJ ha⁻¹), and in case of triticale – by straw of breeding line '0002-26' (132.0 MJ ha⁻¹). Analysis of thermal energy outcome obtainable from totality of all grain and straw of a species revealed that the highest result was delivered by wheat – 271.1 MJ ha⁻¹, while rye delivered slightly lower result – 267.3 MJ ha⁻¹, and the lowest thermal energy outcome was provided by triticale – 258.6 MJ ha⁻¹. As regards use for heating in Latvia, it is recommendable to utilise one third of the straw yield for heating and to plough the remaining straw mass into the soil. Analysis of thermal energy outcome obtainable from totality of all grain and 30% of straw mass revealed that the highest experimentally-obtained thermal energy outcome from cereals was 178.8 – 187.3 MJ ha⁻¹.

Economic assessment of the obtained raw materials and energy sources

Raw material production costs. The three-year average data indicate that the highest **production costs** incurred in production of raw material were attributable to wheat **silage** (Fig. 5); the factors which contributed to these costs include higher norm of nitrogen fertilisers applied and seed costs, as highly productive new varieties were used. Analysis of cereals over different developmental phases revealed that the lowest costs incurred when harvesting at GS 60 – 62 were attributable to silage organic dry matter of triticale (84.87 EUR t⁻¹), while costs incurred when harvesting at GS 70 – 72 and 80 – 82 were attributable to silage organic dry matter of open pollinated rye varieties – 45.56 EUR t⁻¹ and 44.09 EUR t⁻¹, respectively.

Analysis of costs per one hectare revealed that the lowest costs incurred were attributable to straw as a by-product (62.28 EUR ha⁻¹). Costs of silage production per one hectare within species of the cereals examined were equal, irrespective of the growing phase at which the respective cereals were harvested (Fig. 6).

Calorific value of raw materials

Calorific value of energy crops is an important indicator for their cultivation and their use in production of different types of energy. Energy is being expressed in MW h per mass unit (t) or area unit (ha). Observations made in course of **biogas production** from all cereals and varieties attested to the following pattern – harvesting of biomass at later crop developmental phases leads to decrease of calorific value per mass unit. All cereals covered by the research exhibited similar values within range of 2.86 – 2.92 MWh t⁻¹ at GS 60 – 62, yet at later developmental phases the silage exhibited lower calorific values, namely, from 2.57 to 2.64 MWh t⁻¹ at GS 70 – 72 and from 2.51 to 2.57 MWh t⁻¹ at GS 80 – 82. Calorific value per hectare was affected by methane yield per hectare which is dependent on yield harvested. The higher energy outcome per 1 ha from cereals harvested at later developmental phases (GS 80 – 82) was a causal effect of the higher methane yield obtained per hectare. In accordance with theoretical calculations, the obtained energy outcome amounted to 35.41 – 38.49 MWh ha⁻¹, depending on the species (Table 4). Furthermore, in line with experimentally determined specific methane yield, higher methane yield per 1 ha originated from silage harvested at later developmental phases (GS 80 – 82).

In course of production **ethanol** it was found that the highest **calorific value** of 2.53 MWh t⁻¹ originated from triticale, which was to be expected, given the causal ground – the highest ethanol outcome originated from grain of triticale. Energy outcome in production of bioethanol from triticale grain was 23.13 MWh ha⁻¹, which is attributable to higher grain yield per hectare in the trial. Energy outcome from all wheat varieties covered by the research was on average 23.53 MWh ha⁻¹, whereby average grain yield was 9.50 t ha⁻¹. Energy outcome in production of bioethanol from rye was 21.02 MWh ha⁻¹.

Calorific value of straw and grain of winter cereals used as heating fuel. Grain delivered 4.92 – 4.96 MWh t⁻¹, depending on cereal species, while a ton of straw delivered more energy – 4.68 – 5.30 MWh t⁻¹. In accordance with calculations of energy outcome per hectare, winter cereals grain delivered higher results (38.12 – 40.38 MWh ha⁻¹) than straw (33.28 – 39.14 MWh ha⁻¹), which is attributable mostly to the fact that yield of grain exceeded that of straw.

Comparison of energy outcome from the end-use perspective, that is, depending on different types of use of winter cereals, leads to a conclusion that the highest energy outcome per tonne of raw material was obtained from straw of winter cereals used for production of thermal energy. High result per tonne of raw material was obtained also from grain in combustion process. As regards thermal energy outcome per hectare, the highest result was obtained from grain combustion. As regards winter cereals silage used for production of methane, both theoretical calculations and experimentally obtained results confirm that higher energy outcome (MWh t⁻¹) was obtained from silage prepared at GS 60 – 62. Energy outcome per hectare (MWh ha⁻¹) in production

of methane was higher if the silage had been prepared at later developmental phases. Energy outcome (MWh ha^{-1}) established by theoretical calculations was found to be lower than that of experimentally obtained methane. The lowest energy outcome per tonne of raw materials was obtained when grain were used for production of bioethanol. Energy outcome per hectare in production of bioethanol from winter cereal species was higher where wheat had been used.

A complex indicator describing energy production is cost of raw materials (in EUR) for production of 1 MWh energy. The highest costs of raw materials were incurred in production of ethanol from grain. Use of wheat and triticale grain for production of ethanol contributed to increase in costs. The lowest costs of raw materials for production of 1 MWh energy were provided by use of hybrid rye (Table 5).

As regards production of methane, costs of raw materials for production of 1 MWh energy were conditional on the silage harvest timing. Use of wheat and triticale at later developmental phases secured the lowest costs. The lowest costs of raw materials for production of 1 MWh were incurred in production of thermal energy from straw. As regards cereal grain used for production of thermal energy, use of a hybrid rye variety 'Placido' secured the lowest cost. The hybrid rye variety secured the lowest cost of 1 MWh also in case of assumption that both grain and straw would be used for heating. Use of wheat and triticale grain led to increase in costs of 1 MWh.

It must be noted, however, that direct combustion of raw materials provides immediate thermal energy which is an end product. Energy obtained from methane and bioethanol can be used for heating, for electricity production and as a fuel in transport sector. Therefore the energy obtained from methane and bioethanol is of higher quality.

CONCLUSIONS

1. The substantially ($p < 0.05$) highest average dry matter yields of all winter cereals examined had been harvested at GS 70 – 72 and at GS 80 – 82. Dry matter yield was substantially affected by cultivation year, species, variety and harvest timing for preparation of silage.
2. Results of theoretical calculated **specific methane yield** from a mass unit of organic dry matter were similar ($p < 0.05$) across all three cereal species, but the the highest result was pertaining to the silage prepared at GS 60 – 62. However, as regards specific methane yield obtained experimentally in the laboratory, the choice of cereal species had a substantial effect on the result, while the silage harvest timing did not have a substantial effect. Higher specific methane yields from a mass unit of organic dry matter were attributable to the silage of winter wheat and triticale.

3. The highest average results of **methane yield per hectare** ($\text{Nm}^3 \text{ha}^{-1}$) were obtained from triticale and rye harvested at GS 80 – 82 and from wheat harvested at GS 70 – 72.
4. The highest results of theoretically calculated and experimentally obtained **ethanol outcome per tonne of grain** (L t^{-1}) originated from wheat and triticale. **Variety-dependent effects on ethanol outcome** on both wheat and triticale were observed, while no substantial variety-dependent effect on this indicator on rye was observed.
5. The highest **ethanol yield per hectare** (L ha^{-1}) originated from wheat and triticale. Ethanol yield per hectare was substantially affected by weather conditions in the cultivation years.
6. **Grain and straw dry matter yield of winter cereals** were affected by weather conditions in the cultivation years, but no substantial species – dependent effect on the three-year average data was found. Among all the cereals grown, only winter wheat exhibited substantial variety – dependent effect on straw dry matter yield.
7. Results of **theoretically calculated heating value** of both straw and grain were found to be higher than those of experimentally obtained heating value. Theoretical calculations revealed that the heating value of grain exceeded that of straw. The highest theoretically calculated heating values among the cereals examined were exhibited by wheat and rye grain, as well as by rye straw. However, the **experimentally obtained** data contradicted with theoretical calculations, as a slightly higher result of highest heating value was attributed to straw. Rye straw exhibited the highest theoretical calculated heating value, while grain of all the cereals examined had similar values.
8. More thermal energy per one hectare can be produced from cereal grain than from straw. As regards use of grain, no substantial species – dependent and variety – dependent effects on thermal energy outcome per hectare were found, but, in case of straw, substantial wheat and triticale variety-dependent effects on outcome were found.
9. **The lowest silage production costs** (EUR t^{-1}) for all species were attained if the cereal biomass had been harvested at GS 70 – 72 and GS 80 – 82, but the lowest costs among cereals were attained by varieties of open pollinated rye. The lowest grain cultivation costs (EUR t^{-1}) were attributable to open pollinated and hybrid rye. Open pollinated and hybrid rye also provided the **lowest costs per 1 ha** pertaining to both silage and grain.
10. **The highest energy outcome** (MWh ha^{-1}) was attained in production of thermal energy from straw and grain of cereals. Slightly lower result was attained from winter cereals silage used for methane production whereby wheat and triticale silage had been prepared at GS 70 – 72, but rye silage – at GS 80 – 82. Production of ethanol from grain delivered the lowest energy outcome per hectare.

11. **The lowest costs of raw materials for production of one MWh of energy** were attributable to production of thermal energy. As regards production of 1 MWh of energy from methane, average cost of raw materials was slightly higher, while the lowest costs among cereals were secured by use of triticale and wheat silage prepared at later developmental phases (GS 70 – 72 and GS 80 – 82). The highest cost of 1 MWh was incurred in production of ethanol from grain.

PĒTĪJUMA APROBĀCIJA

APPROBATION OF THE SCIENTIFIC WORK

Recenzētie zinātniskie raksti/ *Peer-reviewed articles*

1. Jansone I., Malecka S., Miglane V. (2010). Suitability of winter triticale varieties for bioethanol production in Latvia. *Agronomy Research*, No. 8, Special issue 3, Proceedings of the International scientific conference "Novel tasks posed on plant breeding programmes to cope with climate change", p. 573 – 582.
2. Jansone I., Gaile Z. (2011). Production on bio-ethanol from winter cereals. In: *Research for Rural Development 2011: annual 17th international scientific conference proceedings*, Jelgava, 18 – 20 May, 2011. Latvia University of Agriculture. Jelgava: LLU, Vol.1, p. 29 – 34 (SCOPUS).
3. Jansone I., Gaile Z. (2012). Cereal grains as alternative fuel in Latvia. *Renewable Energy and Energy Efficiency: proceedings of the international scientific conference*, [Jelgava, Latvia, May 28 – 30, 2012]. Latvia University of Agriculture. p. 33 – 38.
4. Jansone I., Gaile Z. (2012). Impact of harvest timing and cultivar on biogas outcome from winter wheat silage. In: *Research for Rural Development 2012: annual 18th international scientific conference proceedings*, Jelgava, 16 – 18 May, 2012. Latvia University of Agriculture. Jelgava: LLU, Vol.1, p. 18 – 23 (SCOPUS).
5. Jansone I., Gaile Z. (2013). Production of bioethanol from starch based agriculture raw material. In: *Research for Rural Development 2013: annual 19th international scientific conference proceedings*, Jelgava, 15 – 17 May, 2013. Latvia University of Agriculture. Jelgava: LLU, Vol.1, p. 35 – 42 (SCOPUS).
6. Jansone I., Gaile Z. (2015). Heat of Winter Cereal Crops. In: *Research for Rural Development 2015: annual 21th international scientific conference proceedings*, Jelgava, 13 – 15 May, 2015. Latvia University of Agriculture. Jelgava: LLU, Vol.1, p. 40 – 44.

Citi zinātniskie raksti/ *Other scientific papers*

1. Jansone I., Gaile Z. (2010). Ziemāju labību biomasas raža. No: *Ražas svētki „Vecauce - 2010”*, Zināšanas – visdrošākais ieguldījums darbam un dzīvei: zinātniskā semināra rakstu krājums. Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Lauksaimniecības fakultāte. SIA LLU mācību un pētījumu saimniecība "Vecauce". Jelgava: LLU, 46. – 49. lpp.
2. Jansone I., Gaile Z. (2011). Ziemas rudzu un tritikāles skābbarība biogāzes ražošanai. No: *Ražas svētki „Vecauce – 2011”*: LLU mācību un pētījumu saimniecībai Vecauce – 90: zinātniskā semināra rakstu krājums. Latvijas

Lauksaimniecības universitāte, Lauksaimniecības fakultāte. SIA LLU mācību un pētījumu saimniecība „Vecauce”. Jelgava: LLU, 27 – 31. lpp.

3. Jansone I., Gaile Z. (2012). Ziemāju salmu izmantošana apkurei. No: *Zinātne Latvijas lauksaimniecības nākotnei: pārtika, lopbarība, šķiedra un enerģija*: LLU Lauksaimniecības fakultātes, Latvijas Agronomu biedrības un Latvijas Lauksaimniecības un meža zinātņu akadēmijas organizētās zinātniski praktiskās konferences raksti, Jelgava: LLU, 149 – 153 lpp.
4. Янсоне И., Гайле З. (2012). Озимые в производстве биоэтанола. В кн.: *Земледелие, растениеводство, селекция: настоящее и будущее*. Национальная академия наук Беларуси, с. 321 – 324.

Konferenču tēzes/ Abstracts

1. Jansone I., Gaile Z. (2012). Bioethanol outcome from winter cereals In: *Diversity in Plant Breeding and Agriculture: Strategies for Healthy Lifestyle: Material of the International Scientific Conference*, Talsi, Latvia, May 30 – June 1, 2012. State Stende Cereals Breeding Institute. Latvian Society of Geneticists and Breeders. Nordic Genetic Resources Center, p. 60.
2. Jansone I. (2014). Winter cereals grain and straw suitability for heating in Latvia. In: *Book of Abstracts in EUCARPIA Cereals Section conference „Cereals for Food, Feed and Fuel – Challenge for Global Improvement*. 29.06. – 4.07.2014. Wernigerode, Germany, p. 289.

Referāti konferencēs/ Oral presentations

1. Jansone I., Malecka S., Miglane V. (2010). Suitability of winter triticale varieties for bioethanol production in Latvia. *International Scientific Conference: Novel Tasks Posed on Plant Breeding Programmes to Cope with Climate Change*, July 7 – 9, 2010, Jogeve, Estonia.
2. Jansone I., Gaile Z. (2011). Production on bio-ethanol from winter cereals. *Starptautiskā zinātniskā konference „Research for Rural Development – 2011”*, May 18 – 20, Jelgava, Latvija.
3. Jansone I., Gaile Z. (2012). Impact of harvest timing and cultivar on biogas outcome from winter wheat silage. *Starptautiskā zinātniskā konference „Research for Rural Development – 2012”*, May 16 – 18, Jelgava, Latvija.
4. Jansone I., Gaile Z. (2012). Ziemāju salmu izmantošana apkurei. *Zinātne Latvijas lauksaimniecības nākotnei: pārtika, lopbarība, šķiedra un enerģija*, 23. – 24. februārī, 2012. Jelgava, Latvija.
5. Jansone I., Gaile Z. (2013). Suitability of straw and grain from winter crops for the heating purposes. *Starptautiskā konference „Crop breeding and management for environmentally friendly farming: research results and achievements”*, 4 – 6 June 2013, Priekule, Latvija.

6. Jansone I., Gaile Z. (2015). Heat of Winter Cereal Crops. *Starptautiskā zinātniskā konference „Research for Rural Development – 2015”*, May 13 – 15, Jelgava, Latvija.

Stenda referāti/ *Poster presentations*

1. Jansone I., Gaile Z. (2010). Ziemāju labību biomasas raža. *Ražas svētki „Vecauce – 2010”*, 4.11.2010., Vecauce.
2. Jansone I., Gaile Z. (2011). Ziemas rudzu un tritikāles skābbarība biogāzes ražošanai. *Ražas svētki „Vecauce – 2011”*, 3.11.2010., Vecauce.
3. Jansone I., Gaile Z. (2012). Cereal grains as alternative fuel in Latvia. *Starptautiskā zinātniskā konference Renewable energy and energy efficiency*, Latvia University of Agriculture, May 28th – 30th, 2012, Jelgava, Latvia.
4. Jansone I., Gaile Z. (2012). Bioethanol outcome from winter cereals. *Starptautiskā zinātniskā konference „Diversity in plant breeding and agriculture: strategies for healthy lifestyle”*, 30.05 – 1.06.2012., Dīžstende, Latvia.
5. Янсоне И., Гайле З. (2012). Озимые в производстве биоэтанола. *Международная научно практическая конференция „Земледелие, растениеводство, селекция: настоящее и будущее Беларуси”*, 15 – 16 ноября 2012 г., Жодино, Беларусь.
6. Jansone I. (2014). Winter cereals grain and straw suitability for heating in Latvia. *EUCARPIA Cereals Section – I T M I Joint Conference*, June 29 – July 4, 2014, Wernigerode, Germany.