

**Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Latvia University of Life Sciences and
Technologies**



Rasma Platače

**ZĀLAUGU BIOMASAS IEGUVE CIETĀ
KURINĀMĀ RAŽOŠANAI**

**OBTAINING OF GRASS BIOMASS FOR
THE PRODUCTION OF SOLID FUEL**

Promocijas darba
KOPSAVILKUMS

Dr. agr. zinātniskā grāda iegūšanai

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

Jelgava
2018

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Latvia University of Life Sciences and Technologies

Lauksaimniecības fakultāte
Faculty of Agriculture



Mg. sc. env. **Rasma Platače**

**ZĀLAUGU BIOMASAS IEGUVE CIETĀ KURINĀMĀ
RAŽOŠANAI**

***OBTAINING OF GRASS BIOMASS FOR THE
PRODUCTION OF SOLID FUEL***

Promocijas darba KOPSAVILKUMS
Dr. agr. zinātniskā grāda iegūšanai

SUMMARY
of the Doctoral Thesis for the scientific degree of Dr. agr.

Paraksts / *Signature*

Jelgava
2018

Darba zinātniskais vadītājs / *Scientific supervisor*
Profesors, *Dr. agr.* Aleksandrs Adamovičs

Darba recenzenti /
Reviewers Profesors *emeritus* Dr. agr. Dainis Lapiņš
Profesors Dr. sc. ing. Aivars Kaķītis
Profesore Dr. biol. Anita Osvalde

Promocijas darba aizstāvēšana paredzēta Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības nozares Laukkopības apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2018. gada 28. augustā, plkst. 10.00, LLU 123. auditorijā, Lielā ielā 2, Jelgavā.

The defence of the Doctoral Thesis in an open session of the Promotion Board of Agriculture will be held on August 28, 2018, at 10:00, Room 123, Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela iela 2, Jelgava, Latvia.

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

The Thesis is available at the Fundamental Library of Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela iela 2, Jelgava, Latvia.

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

References are welcome to be sent to Dr. agr. Maija Ausmane, the Secretary of the Promotion Board, Latvia University of Life Sciences and Technologies, Liela iela 2, Jelgava, LV-3001, Latvia.

ISBN 978-9984-48-303-0
DOI: 10.22616/lluthesis/2018.010

SATURS / CONTENTS

PĒTĪJUMU AKTUALITĀTE	4
PĒTĪJUMU APSTĀKĻI UN METODEDES	6
PĒTĪJUMU REZULTĀTI	10
1. Mēslojuma ietekmes uz stiebrzāļu sausas ražu efektivitāte	10
2. Slāpekļa mēslojuma izmantošanas efektivitāte stiebrzāļu audzēšanā	16
3. Stiebrzāļu biomasas kurināmā kvalitātes rādītāju novērtēšana	17
4. Biomasas kurināmā sadegšanas parametri	22
5. Biomasas kurināmā izejvielu enerģētiskā vērtība	23
6. Biomasas kurināmā izejvielu ražošanas izmaksas	25
SECINĀJUMI	28
PRIEKŠLIKUMI	30
THE TOPICALITY OF THE RESEARCH	30
STUDY CONDITIONS AND METHODS	32
RESULTS	35
1. The Effect of Fertilizer on Grass Dry Matter Yield	35
2. Fertilizer Efficiency in Grass Growing	38
3. Evaluation of Grass Biomass Fuel Quality Indicators	38
4. Biomass Combustion Parameters	43
5. Energy Value of Biomass Fuel Raw Materials	44
6. Production Costs of Biomass Fuel Raw Materials	44
CONCLUSIONS	46
PROPOSALS	47
PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA /	
APPROBATION OF THE DOCTORAL THESIS	48

PĒTĪJUMU AKTUALITĀTE

Šobrīd biomasas enerģētiskais potenciāls tiek lēsts ap 10–14% no kopējā enerģijas patēriņa pasaulē (Putun, Ozcan, Gercel et al., 2011; Offermann, Brunner, Barnthaler et al., 2011; Venkata, 2014). Pētījumi par atjaunojamo energoresursu izmantošanu ir aktuāli visā pasaulē, t. sk. Eiropā un Latvijā.

Jaunākajos pētījumos daudzgadīgo zālaugu izmantošana biokurināmā ražošanai tiek atzīta par perspektīvāku salīdzinājumā ar viengadīgajiem kultūraugiem (Jasinskas, Zaltauskas, Kryzeviciene, 2008; Prochnow, Heiermann, Plöchl et al., 2009). Rezultāti liecina, ka kurināmā siltumspēja ir atkarīga no zālaugu sugu daudzveidības (Khalsa, 2013).

Šajā pētījumā apskatīta tikai neliela daļa no daudzgadīgo zālaugu sugu biomasas veidiem, proti, – stiebrzāles, kas tiek uzskatītas par daudzsolšoško atjaunojamo resursu avotu un kam piemīt atbilstošas enerģētiskās īpašības un pietiekami augsta siltumspēja. Stiebrzāļu biomasu var izmantot cietā kurināmā granulūn ar briekšu ražošanā. Stiebrzāļu biomasas mīnuss ir augstais pelnu iznākums; tāpat tās fizikālās, mehāniskās un ķīmiskās īpašības ir atkarīgas no šķirnes, augsnes un klimatiskajiem apstākļiem, izmantoto mēslošanas līdzekļu veidiem un daudzuma, augu blīvuma un novākšanas laika. Svarīgi ir noskaidrot konkrētu stiebrzāļu sugu biomasas enerģētisko īpašību atbilstību vietējiem apstākļiem, lai atrastu optimālo biomasas pielietojuma variantu (tīrā veidā vai maisījumos) cietā kurināmā ražošanai. Promocijas darbā skaidrota Latvijas apstākļiem piemērotāko stiebrzāļu sugu izmantošana biomasas maisījumu veidošanai ar koksni un analizēta cietā kurināmā enerģētiskā vērtība, ņemot vērā arī ekonomisko aspektu.

Bioenerģētikas vajadzībām no zālaugu sugām piemērotākais ir miežabrālis (*Phalaris arundinacea* (L.) Raush.), niedru auzene (*Festuca arundinacea* Schreb.), auzenairene (\times *Festulolium* Asch & Graebn.), parastā kamolzāle (*Dactylis glomerata* L.) un citas stiebrzāļu sugas.

Salīdzinājumā ar citiem alternatīvo enerģiju veidiem granulētā zālaugu biomasu var kļūt par nozīmīgu kurināmā avotu siltumenerģijas ražošanai Latvijā. Piemēram, Latvijā ir pietiekami liels kurināmās koksnes izmantošanas potenciāls, tomēr koksnes resursi nākotnē var strauji sarukt, jo tie lēni atjaunojas (atkarībā no kokaugu sugas vismaz 20–60 gadu laikā). Stiebrzālēm kā atjaunojamam enerģijas avotam ir liels potenciāls, jo izmantošanai noderīgā biomasu izaug vienā veģetācijas sezonā un to var apstrādāt un patērēt izaudzēšanas vietā. Stiebrzāles siltumenerģijas ražošanai Latvijā gandrīz netiek izmantotas, tāpēc promocijas darba ietvaros, lai iegūtu Latvijas apstākļiem optimāla sastāva un augstas energoietilpības biokurināmo, autore pētīja dažādu proporciju (1/3, 1/1 un 3/1) koksnes un stiebrzāļu biomasas maisījumus granulūn ražošanai.

Darba hipotēze. Stiebrzāļu biomasu un tās maisījumi ar koksni pēc siltumtehnikajiem parametriem ir piemēroti cietā kurināmā ražošanai.

Darba mērķis: novērtēt stiebrzāļu biomasas izmantošanas iespējas cietā kurināmā ražošanai.

Darba uzdevumi:

- 1) izvērtēt stiebrzāļu sugu ražu, lietojot dažādas slāpekļa mēslojuma normas;
- 2) noteikt stiebrzāļu biomasas siltumtehnikos parametrus un izvērtēt to atbilstību cietā kurināmā ražošanai;
- 3) noskaidrot ieteicamās stiebrzāļu un koksnes biomasas proporcijas granulū veidošanai;
- 4) noteikt enerģijas saturu stiebrzāļu, koksnes un to maisījumu biomasām un novērtēt kurināmā pašizmaksu.

Pētījuma novitāte:

- noteikta stiebrzāļu sugu biomasas kvalitāte kurināmā ražošanai;
- pirmo reizi analizēta stiebrzāļu un koksnes biomasu maisījumu proporciju siltumtehniko parametru atbilstība cietā kurināmā kvalitātes prasībām.

Aizstāvamās tēzes:

- stiebrzālēm ir labas enerģētiskās īpašības un pietiekami augsta siltumspēja;
- stiebrzāļu biomasu var izmantot cietā kurināmā granulū un briekšu ražošanai;
- saražotais enerģijas daudzums ir atkarīgs no stiebrzāļu un koksnes sugu izvēles, kā arī no to proporcijas maisījumos.

Pētījuma oriģinalitāte. Pirmo reizi no enerģētiskā aspekta analizēta mēslojuma ietekme uz stiebrzāļu ražu, sausnas ķīmisko sastāvu un enerģētiskajiem rādītājiem, kā arī uz šo stiebrzāļu un koksnes biomasas maisījumiem, veidojot atšķirīgas maisījumu proporcijas ar dažādu kokaugu sugu koksniem, un uz to atbilstību biokurināmā standarta kvalitātes prasībām.

Pētījuma rezultātu praktiskā un teorētiskā nozīmība. Stiebrzālēm, salīdzinot ar kokaugiem, ir savs augšanas ritms, prasības pret augšanas vidi un mēslojumu, un tās atšķiras ar siltumtehnikajām īpašībām, ko ietekmē izvēlēta agrotehnika un novākšanas veids. Pētījumā iegūtie rezultāti ļauj pilnveidot stiebrzāļu audzēšanas tehnoloģiju atbilstoši kurināmā kvalitātes prasībām, pieņemot precīzāku lēmumu par attiecīgās stiebrzāļu sugas izvēli audzēšanai konkrētos agroklimatiskajos apstākļos un papildina zināšanas par biokurināmā ražošanas procesa efektivitāti. Iegūtie rezultāti noder stiebrzāļu un koksnes granulū enerģētiskā potenciāla aprēķiniem, ņemot vērā, ka biomasas vērtība mainās atkarībā no stiebrzāļu sugas, iestrādātā mēslojuma un attiecīgā gada meteoroloģisko apstākļu īpatnībām.

Ieguvums no pētījuma rezultātiem. Pētījuma gaitā uzkrātā un aprakstītā pieredze ļaus paplašināt stiebrzāļu izmantošanas spektru – ne tikai kā līdz šim tradicionāli lauksaimniecībā lopbarības ieguvei, bet vēl papildus arī

biokurināmā ražošanai. Iegūtie rezultāti uzskatāmi parāda lietderīgākos stiebrzāļu un koksnes biomasu maisījumu veidus un to proporcijas.

PĒTĪJUMU APSTĀKĻI UN METODES

Lauka izmēģinājumi tika ierīkoti Latvijas Lauksaimniecības universitātes (LLU) mācību un pētījumu saimniecībā „Pēterlauki” (56°53' N, 23°71' E) 2011. gadā. Pētījums veikts laikā no 2012. gada līdz 2016. gadam.

Augsnes tips: velēnu karbonātu (VK; *sod calcareous soil*) (*Endocaleric Luvisol* pēc FAO klasifikācijas). Granulometriskais sastāvs: smags putekļu smilšmāls. Augsnes agroķīmiskie rādītāji: pH_{KCl} 6.7 (LVS ISO 10390:2006); organiskās vielas saturs – 21 g kg⁻¹ (pēc Tjurina metodes; LV ST ZM 80–91); fosfora saturs – 52 mg kg⁻¹ P₂O₅ (zems); kālija saturs – 128 mg kg⁻¹ K₂O (vidējs) (pēc Egnera-Rīma metodes; LV ST ZM 82–97).

Priekšaugi bija vasaras mieži, audzēti divus gadus pēc kārtas kā izlīdzinošs sējums. Pēc priekšauga novākšanas augsne tika uzarta rudenī 22 cm dziļi. Pavasarī, augsnei sasniedzot fizikāli mehānisko gatavību, tā vispirms tika nošļūkta, pēc tam – nokultivēta.

Izmēģinājumu ierīkoja 2011. gadā ar sešām stiebrzāļu sugām: miežabrālis (*Phalaris arundinaceae* (L.) Raush.), šķirne ‘Marathon’; auzeņairene (× *Festulolium* Asch. & Graebn.), šķirne ‘Vetra’; timotiņš (*Phleum pratense* L.), šķirne ‘Teicis’; pļavas auzene (*Festuca pratensis* Huds.), šķirne ‘Vaira’; niedru auzene (*Festuca arundinaceae* Schreb.), šķirne ‘Fawn’; un kamolzāle (*Dactylis glometata* L.), šķirne ‘Priekuļu 30’.

Stiebrzāļu sugu izsējas norma bija 1000 dīgtspējīgu sēklu uz 1 m² ar attiecīgo daudzumu uz 1 ha: miežabrālim – 10.0 kg, auzeņairenei – 9.5 kg, timotiņam – 13.0 kg, pļavas auzenei – 12.5 kg, niedru auzenei – 17.0 kg, kamolzālei – 18.0 kg. Stiebrzāļu sugas tika iesētas bez virsauga, ar sējmašīnu „Hēge-80” 2011. gada 10. maijā.

Visām stiebrzāļu sugām tika izmantoti šādi mēslojuma varianti: N0P₂O₅0 K₂O0 – kontrole; P₂O₅80K₂O120 kg ha⁻¹ – pamatmēslojums (F); un seši pamatmēslojuma varianti ar slāpekļa mēslojuma normām: F+30, F+60, F+90, F+120, F+150 un F+180 kg ha⁻¹ N. Mīnerālmēslus stiebrzāļu sējas gadā nelietoja, bet izsēja pavasarī, veģetācijas sākumā, attiecīgā zelmeņa izmantošanas gadā.

Izmēģinājumā kopā ierīkoti 48 varianti. Lauciņa platība – 10 m², ar 2 m platu sļuju starp stiebrzāļu sugām. Variantu izkārtojums – randomizēts.

Ražas uzskaitē un paraugu sagatavošana. Ražas uzskaiti pētījuma vajadzībām sāka veikt no 2012. gada (1. zelmeņa izmantošanas gads). Turpmākie zelmeņu izmantošanas gadi bija: 2013. gads – 2. zelmeņa izmantošanas gads; 2014. gads – 3. zelmeņa izmantošanas gads; 2014. gads – 4. zelmeņa izmantošanas gads; 2016. gads – 5. zelmeņa izmantošanas gads. Ražas

uzskaite tika veikta, nopļaujot zāli 5–6 cm augstumā ar kombainu „Hans-Ulrich Hege 212”, un augu zaļmasas svars tika nolasīts elektroniski, nosakot katra atkārtojuma ražu uz lauka.

Katrai sugai un mēslojuma variantam trīs atkārtojumos tika noņemti zaļmasas paraugi, katrs 1.5–2.0 kg; tos sasmalcināja 2–3 cm garos gabaliņos. Katram variantam sagatavoja paraugus ar 1 kg masu, ar precizitāti ± 0.01 kg, fizikālo un ķīmisko analīžu veikšanai. Sausnas saturu zaļmasas paraugos noteica, žāvējot tos 105 °C temperatūrā.

Sausnas ražas katrā variantā tika izteiktas kā vidējās aritmētiskās vērtības no trīs atkārtojumiem un savā starpā salīdzinātas kā absolūtā novirze ($\pm(t \text{ ha}^{-1})$) un relatīvā novirze (%). Slāpekļa mēslojuma ietekmes noskaidrošanai mēslojuma varianta faktiskās vērtības tika salīdzinātas ar (1) kontroles variantu, kurā netika lietots mēslojums, un ar (2) fona variantu ($\text{P}_2\text{O}_5\text{80K}_2\text{O120}$), kurā nebija izmantots slāpekļa mēslojums.

Meteoroloģisko apstākļu raksturojums. Par laika periodu no 2011. gada 1. janvāra līdz 2016. gada 31. decembrim tika izmantoti dati par gaisa temperatūru un nokrišņu daudzumu no LLU MPS „Pēterlauki” automātiskās meteoroloģiskās stacijas. Kārtējā gada meteoroloģisko datu salīdzināšanai izmantoja ilggadējos vidējos temperatūras un nokrišņu datus (norma) no Jelgavas meteostacijas.

Klimatiskie apstākļi ietekmē stiebrzāļu pārziemošanu un zelmeņa ataugšanu, kā arī nosaka ražas lielumu. Ziemešanas perioda garums pa gadiem svārstījās no 128 dienām 2013./2014. gadā līdz 173 dienām 2012./2013. gadā. Piecu gadu periodā tikai divas ziemas bija ar negatīvu vidējo gaisa temperatūru. Aukstākā ziema bija 2012./2013. gadā, kad vidējā gaisa temperatūra noslīdēja līdz -2.5 °C, savukārt 2014./2015. un 2015./2016. gada ziemas bija vissiltākās, kad vidējā gaisa temperatūra sasniedza vai pārsniedza $+1.0$ °C.

Veģetācijas periodā nokrišņu daudzums 2011., 2012. un 2014. gadā, salīdzinot ar normu, atbilda ilggadēji vidēji novērotajam, bet 2013., 2015. un 2016. gadā bija ievērojami mazāks par normu.

Cietā kurināmā paraugu sagatavošana. Cietā kurināmā biomasas granulas tika veidotas no samaltas stiebrzāļu un koksnes biomasas. Granulu veidošanai tika izmantoti sausi pulvera maisījumi, kuri sastāvēja no šādiem komponentiem: stiebrzāles (miežabrālis, auzenairene, niedru auzene, timotiņš, pļavas auzene) un koksne (bērzs (*Betula pendula* Roth.), kārkls (*Salix* spp.), baltalksnis (*Alnus incana* (L.) Moench), apse (*Populus tremula* L.) un hibrīdapse (*Populus tremuloides* × *Populus tremula*)).

Koksnes biomasu – sausa pulvera veidā, ar daļiņu diametru <1 mm – ieguva no Latvijas Valsts mežzinātnes institūta (LVMI) „Silava”.

Stiebrzāļu un koksnes pulveri sapresēja granulās ar rokas presi „IKA Werke”.

Divkomponentu granulas veidoja ar šādu komponentu attiecību:

(I) proporcija 1/3 (25% koksne + 75% stiebrzāles);

(II) proporcija 1/1 (50% koksne + 50% stiebrzāles);

(III) proporcija 3/1 (75% koksne + 25% stiebrzāles).

Par kontroli izmantoja vienkomponentu (100%) granulas no stiebrzāļu un koksnes pulvera.

Granulu enerģētisko vērtību aprēķināja pēc formulas (1):

$$Q_{kop} = Q_a \cdot M_s, \quad (1)$$

kur Q_{kop} – kopējais enerģijas daudzums, ko iegūst no 1 ha, MJ ha⁻¹;

Q_a – biomasas sausnas augstākā siltumspēja, MJ kg⁻¹;

M_s – no 1 ha iegūtās biomasas sausnas masa, kg ha⁻¹.

Granulu enerģijas pašizmaksa tika aprēķināta pēc formulas (2):

$$p_e = \frac{P_m}{1000 \cdot Q_a}, \quad (2)$$

kur p_e – iegūtās enerģijas pašizmaksa (rēķinot uz sausnu), Eur MJ⁻¹;

P_m – 1 tonnas biomasas sausnas ieguves pašizmaksa, Eur t⁻¹;

Q_a – biomasas sausnas augstākā siltumspēja, MJ kg⁻¹.

Lai novērtētu stiebrzāļu un koksnes biomasas un to maisījumu granulu piemērotību izmantošanai par cieto kurināmo siltumenerģijas ražošanai, tika veiktas ķīmisko un enerģētisko rādītāju un īpašību analīzes. Analīzes veica LLU Agronomisko analīžu zinātniskajā laboratorijā un Atkritumproduktu un kurināmā izpētes un testēšanas laboratorijā „Virisma” ar metodēm, kas apkopotas 1. un 2. tabulā.

1. tabula / Table 1

Ķīmisko īpašību analīžu metodes /

*Methods of the Analyses of Chemical Properties*¹

(LLU Agronomisko analīžu zinātniskā laboratorija / LLU Scientific Laboratory of Agronomic Analysis)

Rādītāji / Parameters	Mērvienība / Unit	Metode / Method
Sausnas saturs / Dry matter content	%	Forage analyses, USA, met. 2.2.1.1:1993
Pelnu saturs / Ash content	%	ISO 5984:2002/Cor 1: 2005
Slāpekļis (N) / Nitrogen	%	LVS EN ISO 5983–2:2009
Fosfors (P) / Phosphorus	%	ISO 6492; spektrometrijas metode / spectrometry method

¹ LVS EN 14961–2:2011. Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Section 2: Wood pellets for industrial use.

1. tabulas turpinājums / *Table 1 continue*

Rādītāji / Parameters	Mērvienība / Unit	Metode / Method
Kālijs (K) / <i>Potassium</i>	%	LVS EN ISO 6869:2002
Sērs (S) / <i>Sulphur</i>	%	CS-500 analizatora metode / <i>analyzer method</i>
Ogleklis (C) / <i>Carbon</i>	%	CS-500 analizatora metode / <i>analyzer method</i>
Celuloze / <i>Cellulose</i>	%	Celuloze = ADF – lignīns / <i>Cellulose = ADF – lignin</i>
Hemiceluloze / <i>Hemicellulose</i>	%	Hemiceluloze = NDF – ADF / <i>Hemicellulose = NDF – ADF</i>
Lignīns / <i>Lignin</i>	%	LVS EN ISO 13906:2008

2. tabula / *Table 2*

**Enerģētisko rādītāju analīžu metodes /
Analyses Methods of Energetic Parameters ²**

(Atkritumproduktu un kurināmā izpētes un testēšanas laboratorija „Virisma” /
Laboratory of Testing and Research of Waste Products and Fuels „Virisma”)

Rādītāji / Parameters	Mērvienība / Unit	Standarts / Standard
Mitruma saturs / <i>Moisture content</i>	%	ISO 589; LVS EN 14774
Pelnu saturs / <i>Ash content</i>	%	ISO 1171; LVS EN 14775
Hlors (Cl) / <i>Chlorine</i>	%	ISO 587; LVS EN 15105
Ūdeņradis (H) / <i>Hydrogen</i>	%	ISO 625; LVS EN 15104
Augstākā siltumspēja (Q _a) / <i>Gross calorific value</i>	MJ kg ⁻¹	ISO 1928; LVS EN 14918
Pelnu kušanas temperatūra oksidējošā atmosfērā / <i>Ash melting temperature in oxidizing atmosphere</i>	°C	ISO 540; LVS EN 15370-1

Pētīto stiebrzāļu sugu biomasas kurināmā fizikālās īpašības tika novērtētas, salīdzinot ar prasībām, kas noteiktas standartā LVS EN 14961–2–2012 (LVS EN ISO 17225–6:2014) miežabrālim, bet koksnes biomasas kurināmā fizikālās īpašības tika salīdzinātas ar prasībām, kas norādītas standartā LVS EN 14961–

² LVS EN 14961–2:2011. Solid biofuels. Fuel specifications and classes. Section 2: Wood pellets for industrial use.

6–2012 (LVS EN ISO 17225–2:2014) veseliem kokiem bez saknēm, kā arī koku stumbriem.

Datu matemātisko apstrādi veica ar „Microsoft Excel for Windows 2000” un SPSS programmas paketēm. Ar šīm programmām iegūti arī atbilstošie koeficienti, vienādojumi un grafiskie attēli.

Iegūtos pētījuma rezultātus statistiski apstrādāja, pielietojot aprakstošās statistikas un variācijas statistikas pie 95% ticamības līmeņa, kā arī tika izmantotas, korelācijas un faktoranalīzes metodes. Veicot korelācijas analīzi, aprēķināta empīriskā būtiskuma p vērtība. Faktoru ietekmes būtiskuma novērtēšanai izmantots būtiskuma līmenis $p < 0.05$. Lai noskaidrotu mainīgo faktoru ietekmi uz atkarīgo faktoru, tika izmantota multiplas lineāras regresijas analīze. Datu analīze atainota ar lineārās regresijas līknēm un vienādojumiem. Slāpekļa mēslojuma normas lieluma ietekmi uz enerģētisko augu produktivitāti novērtēja ar lineārās regresijas vienādojumiem un determinācijas koeficientu (R^2). Slāpekļa mēslojuma normu ietekme uz stiebrzāļu sausnas ražu analizēta un parādīta polinomālo sakarību veidā attiecīgo slāpekļa normu intervālā (ayx un byx) un aprakstīta ar polinomu lineāro definīciju apgabalu lineārajiem regresijas koeficientiem un atbilstošajiem lineārajiem regresijas vienādojumiem. Stiebrzāļu un koksnes biomasas augstākā siltumspēja tika izmantota saražotās enerģijas daudzuma aprēķiniem.

PĒTĪJUMU REZULTĀTI

1. Mēslojuma ietekmes uz stiebrzāļu sausnas ražu efektivitāte

Visu pētījumā iekļauto stiebrzāļu sugu ražību ietekmēja gan attiecīgā gada klimatiskie apstākļi, gan lietotais minerālmēslojums.

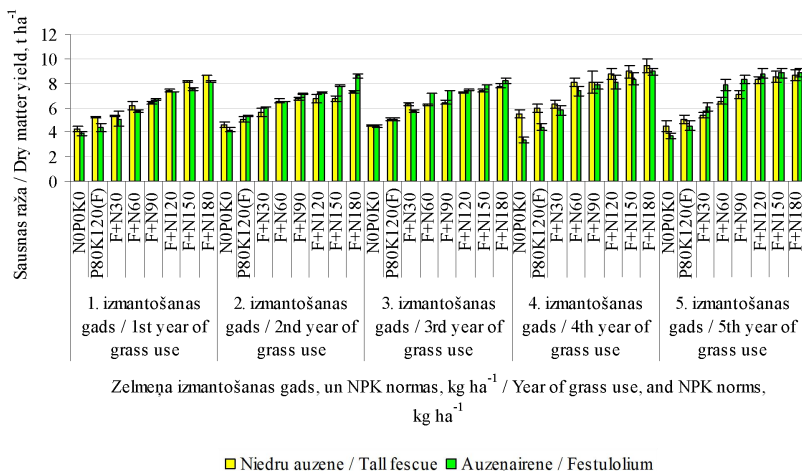
Variāntā bez mēslojuma miežabrāļa sausnas raža izmantošanas gados variēja no 3.67 t ha⁻¹ līdz 5.73 t ha⁻¹, turklāt tā palielinājās ar katru nākamo izmantošanas gadu; niedru auzenei sausnas raža bija no 4.23 t ha⁻¹ līdz 5.51 t ha⁻¹, ar maksimālo ražu 4. izmantošanas gadā; auzuņairenei – no 3.87 t ha⁻¹ līdz 4.51 t ha⁻¹, ar ražas maksimumu 3. izmantošanas gadā; timotiņam – no 2.99 t ha⁻¹ līdz 4.38 t ha⁻¹, ar augstāko sausnas ražu 3. izmantošanas gadā; pļavas auzenei – no 2.72 t ha⁻¹ līdz 4.01 t ha⁻¹, ar ražas maksimumu 3. izmantošanas gadā; kamolzālei – no 5.18 t ha⁻¹ līdz 5.27 t ha⁻¹.

Slāpekļa mēslojums visām stiebrzāļu sugām pozitīvi ietekmēja sausnas ražas pieaugumu visos zemeņa izmantošanas gados, taču ne vienmēr ražas pieaugums bija būtisks vai ekonomiski izdevīgs.

Slāpekļa minerālmēsļu variantos vidēji zemāko sausnas ražas līmeni uzrādīja auzuņairene (6.18 t ha⁻¹), bet augstāko sausnas ražu – kamolzāle (9.62 t ha⁻¹). Slāpekļa mēslojuma lietošana stiebrzālēm vidēji visos zemeņa izmantošanas gados nodrošināja šādus sausnas ražas pieaugumus: kamolzālei –

3.48 t ha⁻¹ (+57%, salīdzinot ar variantu bez slāpekļa mēslojuma), timotiņam – 2.55 t ha⁻¹ (+51%), pļavas auzenei – 2.33 t ha⁻¹ (+52%), auzeņairenei – 2.24 t ha⁻¹ (+57%), niedru auzenei – 1.99 t ha⁻¹ (+38%), miežabrālim – 1.93 t ha⁻¹ (+37%).

Iegūtie izmēģinājuma rezultāti liecina, ka niedru auzene un auzeņairene bija atsaucīgas uz slāpekļa mēslojumu: palielinot slāpekļa normu, arī to sausas raža būtiski palielinājās (1. att.).



1. att. / Fig. 1. Mēslojuma ietekme uz niedru auzenes un auzeņaires sausas ražu. / Effect of fertilizer on dry matter yield of tall fescue and festulolium.

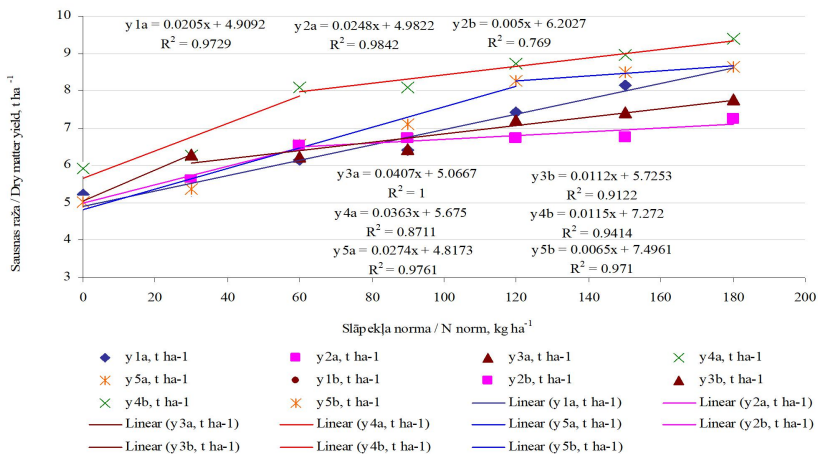
Zelmeņa 1. izmantošanas gadā niedru auzenei būtisku ($p < 0.05$) ražas palielinājumu novēroja, ja tika lietota 60 kg ha⁻¹ N mēslojuma norma, – tad sausas raža sasniedza 6.15 t ha⁻¹. Turpmāka slāpekļa normas palielināšana līdz 180 kg ha⁻¹ N sekmēja būtisku ražas pieaugumu – pat 8.64 t ha⁻¹ sausas. Arī auzeņairenei būtisks ($p < 0.05$) sausas ražas pieaugums turpinājās līdz 180 kg ha⁻¹ N normai, nodrošinot 8.11 t ha⁻¹ sausas ražas iegūšanu. Turpmākajos gados līdz ar blīvāka zelmeņa attīstību auzeņairenei sausas raža >8.0 t ha⁻¹ ieguva ar mazākām slāpekļa normām, nekā tas bija nepieciešams zelmeņa 1. izmantošanas gadā.

Niedru auzenei 2. zelmeņa izmantošanas gadā būtisku ($p < 0.05$) ražas palielinājumu novēroja, lietojot 30 kg ha⁻¹ N normu. Palielinot mēslojuma normu līdz 60 kg ha⁻¹ N, arī sausas raža turpināja būtiski palielināties. Taču tālāka slāpekļa normas palielināšana būtiskus ražas pieaugumus nenodrošināja. Arī 3. zelmeņa izmantošanas gadā niedru auzenei būtisku sausas ražas pieaugumu ieguva, lietojot slāpekļa mēslojuma normas 30, 120 un 180 kg ha⁻¹ N. Ceturtajā zelmeņa izmantošanas gadā būtisku ($p < 0.05$) ražas palielinājumu

ieguva, lietojot 60, 120 un 180 kg ha⁻¹ N normu, savukārt 5. zelmeņa izmantošanas gadā būtisks ražas palielinājums tika iegūts ar slāpekļa normām 60 un 120 kg ha⁻¹ N.

Niedru auzeni 1. zelmeņa izmantošanas gadā, lai pārsniegtu 8.0 t ha⁻¹ sausas ražu, no agronomiskā viedokļa raugoties, jālieto augstas slāpekļa normas (>150 kg ha⁻¹ N). Šai stiebrzālei līdz ar zelmeņa vecumu, kad tas kļūst spēcīgāks un blīvāks, jālieto 120 kg ha⁻¹ N un vairāk slāpekļa mēslojuma, lai noturētu sausas ražu >8.0 t ha⁻¹.

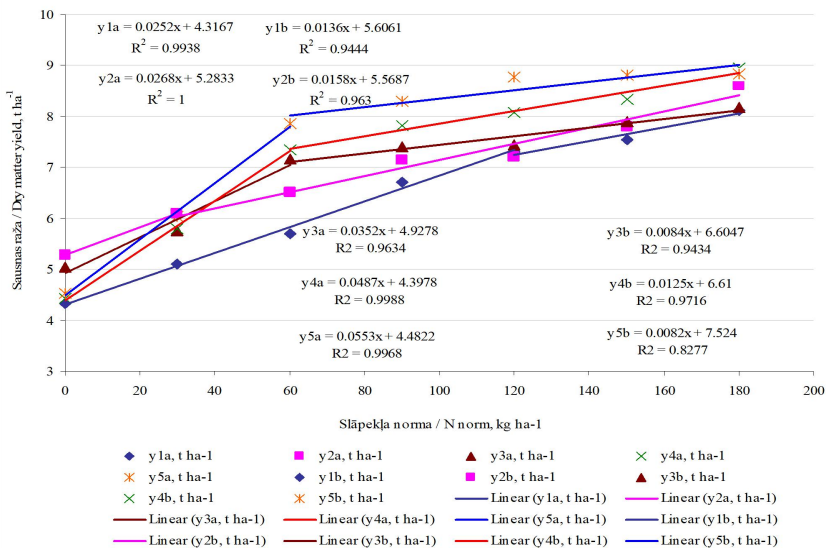
Ar polinomu lineāro sadalīšanu tika noteikts faktoru mijiedarbības efekts, t.i., kā izmantošanas gadi un fons ietekmēja slāpekļa mēslojuma normu palielināšanas efektivitāti un līdz kādam lielumam bija lietderīgi kāpināt slāpekļa mēslojuma normas (2. att.).



Lineāro sakarību izmaiņas ar regresijas koeficientiem a_{yx} un b_{yx} definīcijas apgabalos: $y1a$ un $y1b$ – pirmajā zelmeņa izmantošanas gadā; $y2a$ un $y2b$ – otrajā gadā; $y3a$ un $y3b$ – trešajā gadā; $y4a$ un $y4b$ – ceturtajā gadā; $y5a$ un $y5b$ – piektajā izmantošanas gadā.

2. att. / Fig. 2. **Slāpekļa normu palielināšanas efektivitāte niedru auzenes zelmeņos.** / Efficiency of increasing nitrogen fertilizer norms for tall fescue sward.

Izmantojot lineāros regresijas koeficientus, konstatēja, ka niedru auzene 1. zelmeņa izmantošanas gadā augstāko slāpekļa efektivitāti sasniedza ar slāpekļa mēslojuma normu 180 kg ha⁻¹ N; 2. un 4. gadā – ar slāpekļa normu 60 kg ha⁻¹ N; 3. gadā – ar slāpekļa normu 30 kg ha⁻¹ N; 5. izmantošanas gadā – ar slāpekļa normu 120 kg ha⁻¹ N.



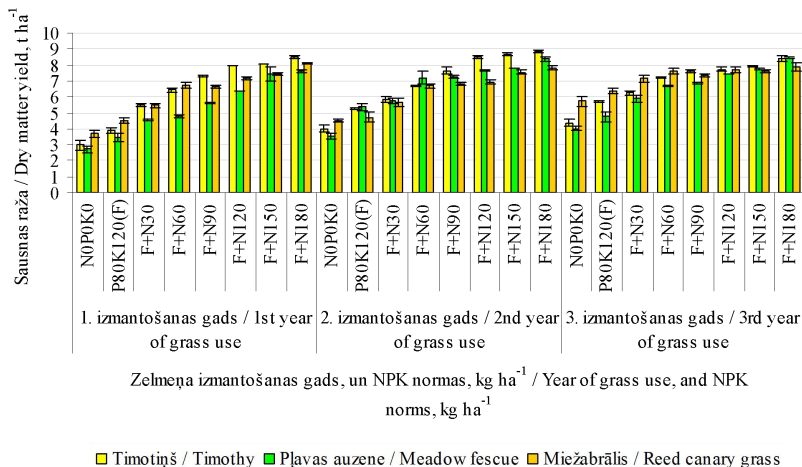
Lineāro sakarību izmaiņas ar regresijas koeficientiem ayx un byx definīcijas apgabalos: y_{1a} un y_{1b} – pirmajā zeltneņa izmantošanas gadā; y_{2a} un y_{2b} – otrajā gadā; y_{3a} un y_{3b} – trešajā gadā; y_{4a} un y_{4b} – ceturtajā gadā; y_{5a} un y_{5b} – piektajā gadā.

3. att. / Fig. 3. Slāpekļa normu palielināšanas efektivitāte auzenāirenes zeltneņos. / Efficiency of increasing nitrogen fertilizer norms for festulolium sward.

Lineāro koeficientu izvērtējums apstiprināja iepriekš konstatētās un aprakstītās sausas ražas pieauguma būtiskuma svārstības. Savukārt auzenāirenei slāpekļa normu palielināšanas augstākā efektivitāte zeltneņa 1. izmantošanas gadā tika sasniegta, lietojot 120 kg ha⁻¹ N normu, 2. gadā – lietojot 30 kg ha⁻¹ N, un no 3. līdz 5. zeltneņa izmantošanas gadam – lietojot 60 kg ha⁻¹ N normu.

Timotiņam sausas ražu būtiski ($p < 0.05$) paaugstināja slāpekļa mēslojums (4. att.). Jau 30 kg ha⁻¹ N norma ļāva sasniegt 5.86 t ha⁻¹ (+18%) sausas ražu vidēji trīs gados. Slāpekļa mēslojuma norma 180 kg ha⁻¹ N fosfora un kālija mēslojuma fonā vidēji trīs gadu laikā deva iespēju iegūt 8.60 t ha⁻¹ sausas ražu, kas bija 2.27 reizes vairāk nekā variantā bez mēslojuma. Visos trīs timotiņa izmantošanas gados variantā ar 180 kg ha⁻¹ N normu tika iegūti augstākie ražas pieaugumi: no 2.70 t ha⁻¹ (+47%) līdz 4.59 t ha⁻¹ (+118 %).

Pļavas auzene bija atsaucīga uz slāpekļa mēslojumu, kas ļāva būtiski ($p < 0.05$) paaugstināt sausas ražu. Ar katru slāpekļa normas soli, sākot no 30 kg ha⁻¹ N, sausa raža būtiski palielinājās, un augstākais rādītājs – 8.13 t ha⁻¹ (vidēji trīs zeltneņa izmantošanas gados) – tika iegūts, lietojot slāpekļa normu 180 kg ha⁻¹ N (4. att.).



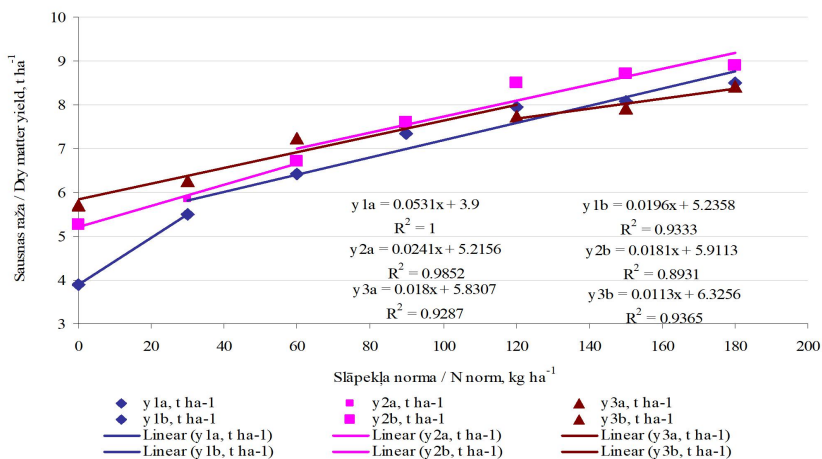
4. att. / Fig. 4. **Mēslojuma ietekme uz timotiņa, pļavas auzenes un miežabrāļa sausnas ražu.** / *Effect of fertilizer on dry matter yield of timothy, meadow fescue and reed canary grass.*

Miežabrāļa sausnas ražas maksimums tika iegūts, lietojot ≤ 60 kg ha⁻¹ N mēslojuma normu visos izmantošanas gados (4. att.); tālāka normas paaugstināšana nedeva būtisku ražas pieaugumu.

Ar polinomu lineāro sadalīšanu, izmantojot lineāros regresijas koeficientus, konstatēja, ka timotiņam zelmeņa izmantošanas gados slāpekļa mēslojuma augstākās efektivitātes rādītāji atšķirās: 1. zelmeņa izmantošanas gadā timotiņam slāpekļa augstākā efektivitāte tika iegūta ar slāpekļa normu 30 kg ha⁻¹ N (5. att.), 2. gadā slāpekļlis bija nepieciešams krietni vairāk – 120 kg ha⁻¹ N, bet 3. zelmeņa izmantošanas gadā augstākā efektivitāte tika sasniegta ar 60 kg ha⁻¹ slāpekļa normu.

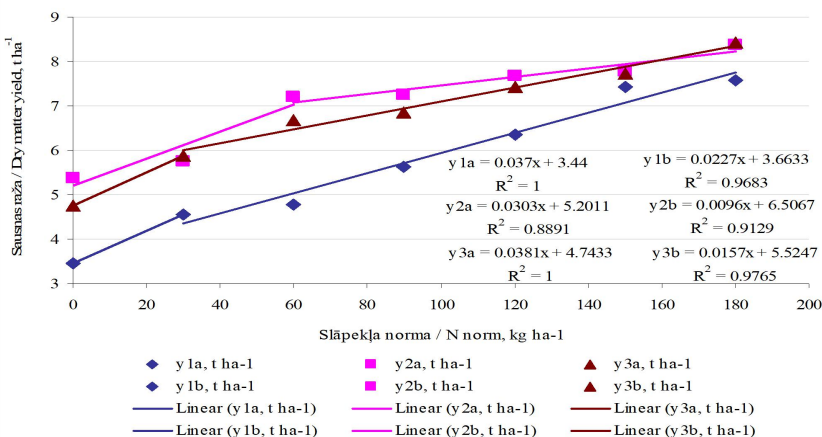
Ar polinomu lineāro sadalīšanu, izmantojot lineāros regresijas koeficientus, konstatēja, ka slāpekļa normu palielināšanas augstākā efektivitāte pļavas auzenes zelmeņa 1. un 3. izmantošanas gadā tika iegūta, lietojot 30 kg ha⁻¹ N normu (6. att.), bet 2. izmantošanas gadā – lietojot 60 kg ha⁻¹ N.

Ar polinomu lineāro sadalīšanu, izmantojot lineāros regresijas koeficientus, noskaidroja, ka miežabrālim augstākā slāpekļa mēslojuma efektivitāte tika sasniegta ar 60 kg ha⁻¹ N mēslojuma normu 1. un 2. zelmeņa izmantošanas gadā, bet 3. gadā pietika ar 30 kg ha⁻¹ N normu (7. att.).



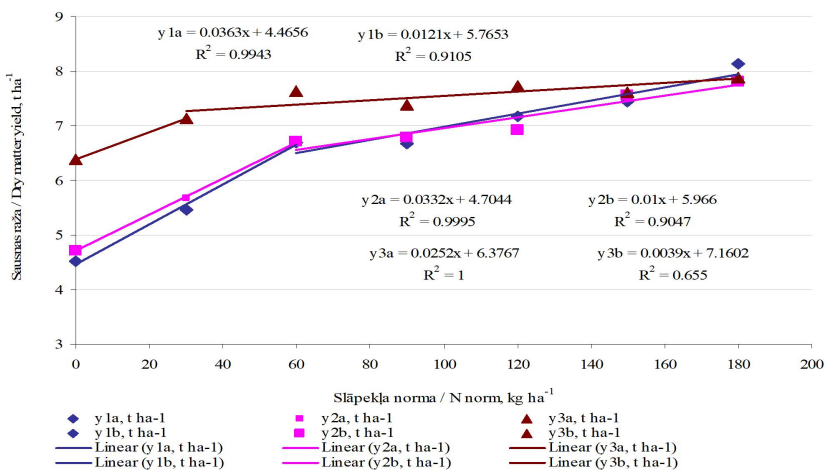
Lineāro sakarību izmaiņas ar regresijas koeficientiem ayx un byx definīcijas apgabalos: y_{1a} un y_{1b} – pirmajā zeltmeņa izmantošanas gadā; y_{2a} un y_{2b} – otrajā gadā; y_{3a} un y_{3b} – trešajā gadā.

5. att. / Fig. 5. Slāpekļa normu palielināšanas efektivitāte timotiņa zelmeņos. / Efficiency of increasing nitrogen fertilizer norms for timothy sward.



Lineāro sakarību izmaiņas ar regresijas koeficientiem ayx un byx definīcijas apgabalos: y_{1a} un y_{1b} – pirmajā zeltmeņa izmantošanas gadā; y_{2a} un y_{2b} – otrajā gadā; y_{3a} un y_{3b} – trešajā gadā.

6. att. / Fig. 6. Slāpekļa normu palielināšanas efektivitāte pļavas auzenes zelmeņos. / Efficiency of increasing nitrogen fertilizer norms for meadow fescue sward.



Lineāro sakarību izmaiņas ar regresijas koeficientiem ayx un byx definīcijas apgabalos: y_{1a} un y_{1b} – pirmajā zelmeņa izmantošanas gadā; y_{2a} un y_{2b} – otrajā gadā; y_{3a} un y_{3b} – trešajā gadā.

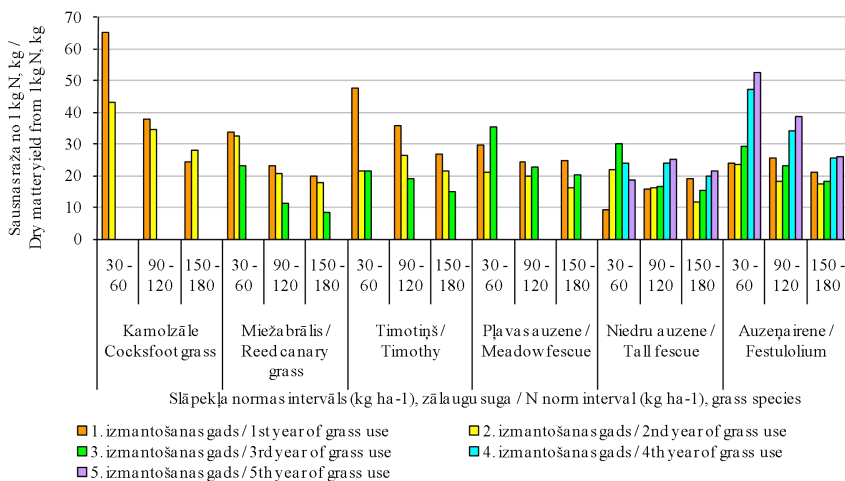
7. att. / Fig. 7. Slāpekļa normu palielināšanas efektivitāte miežabrāļa zelmeņos. / Efficiency of increasing nitrogen fertilizer norms for reed canary grass sward.

2. Slāpekļa mēslojuma izmantošanas efektivitāte stiebrzāļu audzēšanā

Stiebrzālēm augstākā slāpekļa izmantošanas efektivitāte no 1 kg lietotā slāpekļa tika sasniegta, lietojot mazas slāpekļa normas – 30–60 kg ha⁻¹ N (8. att.).

Lietojojot vidējas slāpekļa mēslojuma normas (90–120 kg ha⁻¹ N), gandrīz visos gadījumos iegūtais sausnas daudzums samazinājās, izņemot timotiņu 2. izmantošanas gadā. Lielu slāpekļa mēslojuma normu (150–180 kg ha⁻¹ N) lietošana stabili uzrādīja sausnas ražas pieaugumu 1. zelmeņa izmantošanas gadā. Iegūtie rezultāti liecināja, ka no visām stiebrzāļu sugām niedru auzene bija visatsaucīgākā uz slāpekļa mēslojumu zelmeņa attīstības sākumā, kad sausnas ražas palielināšanās no 1 kg lietotā slāpekļa tika sasniegta, palielinot slāpekļa normu visos devu lieluma līmeņos.

Pirmajā zelmeņa izmantošanas gadā timotiņš slāpekli izmantoja labāk, ja tika lietotas mazas slāpekļa mēslojuma normas, bet niedru auzenei augstāka slāpekļa izmantošanas efektivitāte tika iegūta, lietojot lielas slāpekļa normas. Savukārt 2. zelmeņa izmantošanas gadā abām stiebrzāļu sugām slāpekļa izmantošanas efektivitāte bija proporcionāli apgriezta pozīcijā salīdzinājumā ar 1. izmantošanas gadu.



8. att. / Fig. 8. Slāpekļa mēslojuma efektivitāte no 1 kg lietotā N atkarībā no mēslojuma normas. / Nitrogen fertilizer efficiency of 1 kg applied N depending on fertilizer norm.

Miežabrālim augstākā slāpekļa izmantošanās – vidēji 37.2% – tika konstatēta, lietojot 60 kg ha⁻¹ N mēslojuma normu.

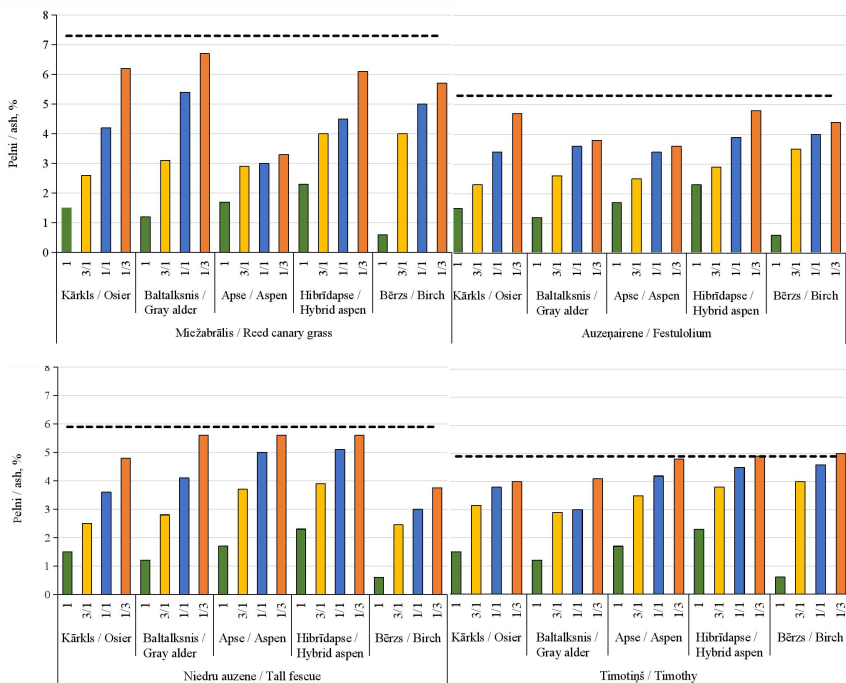
Timotiņam vidēji divos gados, neskatoties uz slāpekļa izmantošanas atšķirībām atsevišķos audzēšanas gados, augstākā slāpekļa izmantošanās sasniedza 41.7–43.1% variantos ar slāpekļa normu 90–120 kg ha⁻¹ N. Pļavas auzenei labāka slāpekļa izmantošanās (41.8%) vidēji divos gados tika novērota variantā ar 60 kg ha⁻¹ N normu.

3. Stiebrzāļu biomasas kurināmā kvalitātes rādītāju novērtēšana

Mitruma saturs biomasā ir mainīgs lielums, kas ietekmē kurināmā kvalitāti un pašizmaksu. Lai samazinātu mitruma saturu, jāiegulda ievērojams enerģijas daudzums, kas kurināmā ražošanas procesā veido vienu no lielākajām izdevumu pozīcijām. Pētījumā stiebrzāļu biomasas mitrums pirms granulēšanas vidēji bija 9.00% (no 8.10% pļavas auzenei līdz 10.40% auzuņāirenei), bet koksnei – 7.82% (no 7.00% kārklam līdz 8.50% hibrīdapsei un bērzam), kas atbilda standarta prasībām. Mitruma saturs stiebrzāļu un koksnes biomasu maisījumiem arī bija mazāks par 10%, turklāt tas samazinājās līdz ar koksnes daudzuma palielināšanos. Pievienojot 1/3 koksnes, biomasas maisījumu mitrums samazinājās vidēji par 5%; pievienojot pusi vai 2/3 koksnes, maisījumu mitrums samazinājās attiecīgi par 15% vai 20%.

Pelni veido sakušņus, kā rezultātā ātrāk aizsērējas degšanas kamera un katla konvektīvā daļa, un līdz ar to biežāk jāveic mehāniskā tīrīšana. Pētījumā tika konstatēts, ka stiebrzāļu biomasai vidējais pelnu saturs bija robežās no 6.60% timotiņam līdz 8.05% niedru auzenei, kas ir tuvu literatūrā minētajiem pelnu satura rādītājiem (Beidermann, Obernberger, 2005; Bakker, Elbersen, 2005). Vidēji visos izmēģinājumā iekļautos mēslojuma variantos pelnu saturs dažādiem stiebrzāļu biomasu veidiem bija: 8.05% niedru auzenei, 7.36% miežabrālim, 7.27% auzenāirenei, 7.14% pļavas auzenei un 6.60% timotiņam.

Standarta prasībās noteikts, ka miežabrāļa biomasai pelnu saturs nedrīkst pārsniegt 8.0%. Miezabrālim $\geq 60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ mēslojuma normas sekmēja pelnu satura samazināšanos zem standartā noteiktajiem 8.0% abos zeltaņģa izmantošanas gados. Auzenāirenei un timotiņam pelnu saturs bija mazāks par 8.0%.



Apzīmējumi:

maisījums (koksne + stiebrzāle) / mix (timber + grass) 3/1, 1/1, 1/3;
 stiebrzāļu biomasas pelnu saturs / ash content of grass biomass.

9. att. / Fig. 9. Pelnu saturs koksnes un stiebrzāļu biomasām un to maisījumiem. / Ash content for grass and timber biomasses and their mixtures.

Veiktā regresijas analīze liecināja, ka pelnu saturs palielinājās līdz ar kālija ($R^2 = 0.86$; $p = 0.01$), fosfora ($R^2 = 0.62$; $p = 0.01$), hlora ($R^2 = 0.71$; $p = 0.01$) un slāpekļa ($R^2 = 0.74$; $p = 0.01$) satura pieaugumu biomasas sausnā. To var skaidrot ar apstākli, ka šie elementi, biomasas kurināmajam sadegot, veido pelnu sastāvā ietilpstošus savienojumus (Vassilev, Vassileva, Song et al., 2017).

Stiebrzāļu un koksnes biomasas maisījumiem pelnu saturs samazinājās proporcionāli koksnes daļas pieaugumam, jo vidēji koksnes biomasai, salīdzinot ar stiebrzālēm, ir par 70–80% mazāk pelnu. Stiebrzāļu un koksnes biomasu sastāva analīze liecināja, ka stiebrzāļu biomasai ar 1/3 koksnes piejaukuma pelnu saturs samazinājās par 20%, bet, piejaucot pusi vai 2/3 koksnes, pelnu saturs samazinājās attiecīgi par 40% vai 55%. Zemākais pelnu satura rādītājs bija auzuņaienei un miežabrālim maisījumā 1/3 ar kārklu – attiecīgi 2.30% un 2.63%; niedru auzenei gan ar kārklu, gan ar bērzu – 2.5%; timotiņam ar baltalksni – 2.9% (9. att.).

Vērtējot stiebrzāļu piemērotību kurināmā ražošanai, jāņem vērā, ka pelnu saturs var mainīties gadu no gada, taču proporcionālās izmaiņas saglabājas. Novērojumi norāda uz pelnu satura atkarību no sugas un agrometeoroloģiskajiem apstākļiem.

Ogleklis (C) ir viens no ķīmiskajiem elementiem, kas nosaka no kurināmā iegūtās siltumenerģijas daudzumu. Oglekļa saturs augos ir svarīgs rādītājs, jo tas ir degošais elements. Jo lielāks oglekļa saturs augos, jo augstāks sadegšanas siltums.

Oglekļa saturs pētītajās stiebrzālēs vidēji bija no 44.5% niedru auzenei līdz 45.3% timotiņam. Miežabrāļa sausnā C saturs vidēji bija 45.11% (no 42.69% 2013. gadā līdz 47.58% 2012. gadā), savukārt variantos bez mēslojuma – vidēji 44.93% (attiecīgi no 42.90% līdz 47.43%).

Koksnes paraugos augstākais oglekļa saturs bija apsei (48.90%), bet zemākais – bērzam (46.10%). Oglekļa saturs stiebrzāļu izmēģinājumā 1. un 2. izmantošanas gadā variēja no 42.00% pļavas auzenei 2013. gadā līdz 48.97% timotiņam 2012. gadā.

Apkopojot iegūtos rezultātus, redzams, ka variantos, kur slāpekļa mēslojuma norma bija ≥ 120 kg ha⁻¹ N, oglekļa saturs vidēji bija lielāks par 45%.

Augstākie oglekļa satura rādītāji maisījumā 1/3 bija auzuņaienei ar kārklu un miežabrālim ar baltalksni – attiecīgi 46.6% un 46.9%. Savukārt zemākie rādītāji bija auzuņaienei maisījumā 3/1 ar hibrīdapsi un miežabrālim maisījumā 3/1 ar kārklu – attiecīgi 43.7% un 43.4%.

Ūdeņraža (H) saturs kurināmajā nosaka tā siltumspēju: jo vairāk ūdeņraža, jo lielāka augstākā siltumspēja.

Ūdeņraža saturs analizētajos koksnes un stiebrzāļu paraugos attiecīgi bija robežās no 5.48% timotiņam līdz 5.93% niedru auzenei un no 6.39% baltalksnim līdz 6.83% bērzam. Ūdeņraža saturs pētītajām stiebrzāļu sugām vidēji bija par 6% mazāks nekā koksnes biomasas paraugos. Kopumā ūdeņraža

saturs pētītajās biomasās bija līdzīgs. Stiebrzālēs H satura izmaiņas bija 10% robežās. Ūdeņraža saturs vidēji augstāks bija koksnes biomasā.

Dažu stiebrzāļu, tādu kā auzeņairenes, miežabrāļa un niedru auzenes, biomasas H/C attiecība (1.51–1.52) bija līdzīga apses, hibrīdapses un baltalkšņa biomasas H/C attiecībai (1.52). Visaugstākais rādītājs bija kārkklam un bērzam – 1.54. Apses maisījumos ar stiebrzālēm H/C palielinājās līdz ar koksnes daudzuma palielināšanos, taču tas bija tikai 0.5–2%.

Ūdeņraža un oglekļa saturs norāda uz kurināmā energoietilpību, ko raksturo šo elementu atomārā attiecība H/C. Jo vairāk ūdeņraža attiecībā pret oglekli, jo zemāka oksidēšanās pakāpe un jo vairāk enerģijas izdalās oksidēšanās reakcijā. Tātad – jo augstāka atomārā H/C attiecība, jo vairāk enerģijas izdalīsies, kurināmajam sadegot. Lignocelulozes biomasai H/C attiecība vidēji bija 1.5 (Lehmann, Joseph, 2009). Šajā pētījumā no stiebrzālēm visaugstākā H/C attiecība – 1.52 – bija niedru auzenei, bet viszemākā – 1.45 – pļavas timotiņam. No koksnes biomasām visaugstākā H/C attiecība bija bērzam – 1.54. Kopumā pētītajām biomasām H/C attiecība krasi neatšķīrās, un vidējā H/C attiecība stiebrzālēm bija par 2.3% zemāka nekā koksņēm.

Slāpekļlis (N), sadegot kurināmajam, veido gaistošus slāpekļa savienojumus, kas ar neattīrītām dūmgāzēm nonāk atmosfērā, tādēļ augu biomasā kā kurināmajā tam nevajadzētu pārsniegt 0.6% robežu (Oberberger, Brunner, Barnthaler, 2006). Savukārt standartā LVS EN 14961–2–2012 (LVS EN ISO 17225–6:2014) noteikts, ka slāpekļa saturs sausnā nedrīkst pārsniegt 2.0%.

Stiebrzālēm slāpekļa saturs atkarībā no sugas un gada bija robežās no 0.63% pļavas auzenei 2012. gadā līdz 2.59% pļavas auzenei 2013. gadā. Vidēji visos izmēģinājumā ierīkotajos mēslojuma variantos slāpekļa saturs pļavas auzenei bija 1.71%, timotiņam – 1.32%, auzeņairenei – 1.18%, miežabrālim – 1.13%, niedru auzenei – 1.05%.

Slāpekļa saturs koksnes paraugos variēja no 0.3% līdz 0.6%, bet miežabrālim un auzeņairenei tas attiecīgi bija 1.3% un 1.1%.

Koksnes un stiebrzāļu maisījumos slāpekļa saturs palielinājās, palielinoties stiebrzāļu proporcijai tajā. Maisījumu proporcijā 3/1 (75% koksne + 25% stiebrzāles) slāpekļa saturs palielinājās vidēji par 23%, bet proporcijās 1/1 (50% koksne + 50% stiebrzāles) un 1/3 (25% koksne + 75% stiebrzāles) – attiecīgi par 36% un 56%.

Fosfors (P), līdzīgi kālijam, biomasai sadegot, veido vienkāršus sāļus, kas ietilpst pelnu sastāvā.

Fosfora saturs atkarībā no gada un stiebrzāļu sugas bija robežās no 0.20% timotiņam un pļavas auzenei 2012. gadā līdz 0.47% pļavas auzenei 2013. gadā. Vidēji visos izmēģinājumā ierīkotajos mēslojuma variantos fosfora saturs pļavas auzenei bija 0.34%, miežabrālim un auzeņairenei – 0.28%, niedru auzenei – 0.27%, timotiņam – 0.26%. Savukārt vidēji visos slāpekļa minerālmēsļu variantos fosfora saturs stiebrzāļu biomasā bija: 0.35% (+9%),

salīdzinot ar variantu bez slāpekļa mēslojuma) pļavas auzenei, 0.28% (+17%) auzenei, 0.28% (-3%) miežbrālim, 0.26% (attiecīgi -7% un -10%) timotiņam un niedru auzenei.

Kālija (K) saturs ir būtisks biomasas kvalitātes rādītājs, jo sārnu metāli (kālijs un nātrijs) samazina pelnu kušanas temperatūru, kas savukārt izraisa izdedžu slāņa veidošanos uz sadedzināšanas iekārtu sienām.

Stiebrzālēm kālija saturs atkarībā no sugas un gada bija robežās no 1.37% pļavas auzenei 2012. gadā līdz 3.69% pļavas auzenei 2013. gadā. Vidēji visos izmēģinājumā ierīkotajos mēslojuma variantos kālija saturs pļavas auzenei bija 2.69%, auzenei - 2.61%, timotiņam - 2.52%, niedru auzenei - 2.45%, miežbrālim - 2.21%.

Korelācijas analīze liecināja, ka pastāvēja vāja pozitīva saistība starp K saturu augos un mēslojuma normu ($r = 0.31$; $p = 0.1$).

Vidēji visos slāpekļa minerālmēsļu variantos stiebrzāļu biomasā kālija saturs bija: 2.70% pļavas auzenei, 2.66% auzenei, 2.55% timotiņam, 2.50% niedru auzenei un 2.33% miežbrālim.

Kālija saturu vairāk ietekmēja konkrētā gada meteoroloģiskie apstākļi. Nokrišņiem bagātajā 2012. gadā stiebrzāļu intensīvas veģētācijas periodā kālija saturs stiebrzāļu biomasā atkarībā no sugas variēja no 1.37% pļavas auzenei līdz 2.31% niedru auzenei, bet sausajā 2013. gadā - no 1.95% miežbrālim līdz 3.69% pļavas auzenei. Tas tikai apstiprina citu pētnieku domu, ka palielināts augsnes mitrums samazina kālija uzkrāšanās procesu augos (Nutralapati, Gupta, Moghtaderi et al., 2007).

Sērs (S) ir viens no nevēlamiem elementiem, jo izraisa kurināšanas iekārtu koroziju. Sēra saturs augos, tajā skaitā stiebrzālēs, ir ļoti mainīgs.

Šajā pētījumā sēra saturs stiebrzāļu biomasā bija robežās no 0.036% timotiņam 2012. gadā līdz 0.180% timotiņam 2013. gadā. Sēra saturs analizētajos stiebrzāļu sugu paraugos vidēji bija 0.013%, bet koksnei - vidēji 0.029%, un šīs vērtības nepārsniedza standartos noteiktos rādītājus. Koksnes un stiebrzāļu maisījumos sēra saturs salīdzinājumā ar tīras koksnes biomasas paraugiem vidēji palielinājās par 37% proporcijai 3/1, par 39% proporcijai 1/1 un par 53% proporcijai 1/3.

Hlors (Cl), līdzīgi sēram, izraisa iekārtu koroziju (Rosendahl, 2013).

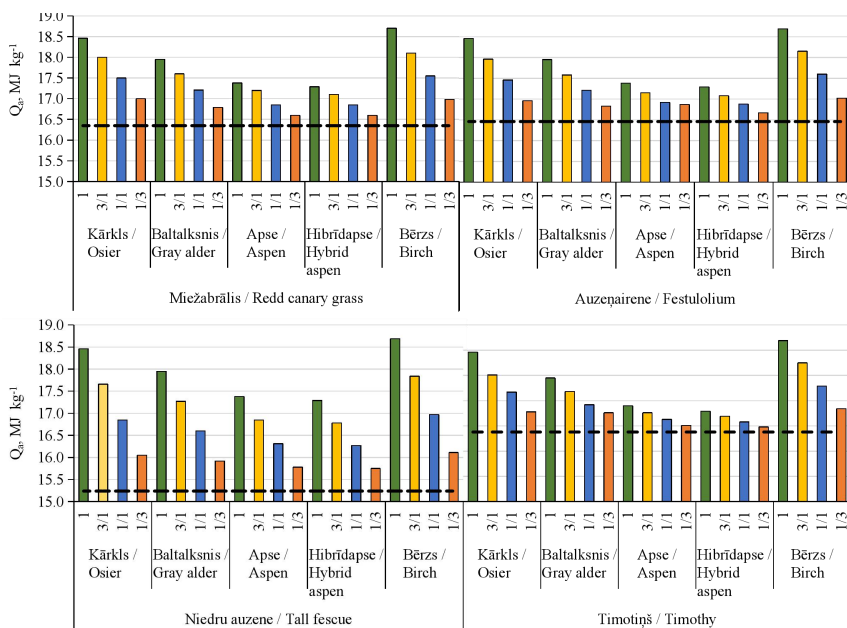
Hlora saturs koksnes un stiebrzāļu biomasas paraugos bija attiecīgi 0.008–0.012% un 0.50–0.74%. Hlora saturs stiebrzāļu biomasā bija 2.5–3.5 reizes augstāks par standartā LVS EN 14961–6–2012 pieļaujamo 0.2% robežu. Savukārt koksnes biomasu paraugos hlora saturs bija 1.5–2.5 reizes zemāks par standartā LVS EN 14961–2–2011 noteikto 0.02% robežu. Pētījumu rezultāti liecināja, ka hlora saturs stiebrzālēs ir ievērojami augstāks nekā koksnē. Stiebrzāļu biomasā hlora saturs bija no 0.50% auzenei līdz 0.74% miežbrālim. Koksnes biomasas paraugos viszemākais hlora saturs tika konstatēts apsei (0.008%), bet visaugstākais - kārklam un bērzam (0.012%). Stiebrzāļu un koksnes maisījumos hlora saturs samazinājās, palielinoties

koksnes daudzumam, jo Cl satura ziņā koksnes un stiebrzāļu biomasas atšķirās vairāk nekā 10 reizes. Zemākie hlora satura rādītāji tika konstatēti maisījuma proporcijai 1/3: auzeņairenei ar bērzu – 0.18%; miežabrālim ar hibrīdapsi – 0.25%; niedru auzenei ar baltalksni un timotiņam ar baltalksni – attiecīgi 0.22% un 0.17%.

Pēc hlora satura viszemākais izdedžu veidošanās potenciāls ir koksnes biomasai, jo Cl saturs tajā ir zemāks. Analizētajos maisījumos zemākās vidējās Cl satura vērtības bija auzeņairenei un miežabrālim.

4. Biomasas kurināmā sadegšanas parametri

No kurināmā iegūto siltumenerģiju raksturo **augstākās siltumspējas (Q_a)** rādītājs.



Apzīmējumi:

maisījums (koksne + stiebrzāle) / mixture (timber + grass) 3/1, 1/1, 1/3,
 stiebrzāļu biomasas pelnu saturs / ash content of grass biomass.

10. att. / Fig. 10. Augstākā siltumspēja koksnes un stiebrzāļu biomasām un to maisījumiem. / Gross calorific value of grass and timber biomasses and their mixtures.

Stiebrzāļu biomasai lielākā Q_a vērtība tika konstatēta timotiņam – 16.9 MJ kg⁻¹, kas ir par 1.2–2.3% mazāk nekā hibrīdapsei, kurai no visām pētījumā iekļautajām koksnēm bija zemākais augstākās siltumspējas rādītājs, vai par 9.6% mazāk nekā bērzam, kuram bija augstākā Q_a vērtība. Savukārt zemākā Q_a vērtība bija niedru auzenei – 15.2 MJ kg⁻¹, kas bija par 11.1–12.6% mazāk nekā hibrīdapsei un par 18.7% mazāk nekā bērzam. Koksnes un stiebrzāļu biomasas maisījumos augstākā siltumspēja palielinājās, palielinoties koksnes proporcijai maisījumā (10. att.). Augstākās siltumspējas vērtības maisījuma attiecībai 1/3 (25% koksne + 75% stiebrzāles) bija no 15.8 MJ kg⁻¹ niedru auzenes maisījumam ar apsi un hibrīdapsi līdz 17.3 MJ kg⁻¹ timotiņa maisījumam ar kārklu, baltalksni un bērzu, bet maisījuma attiecībai 3/1 (75% koksne + 25% stiebrzāles) augstākās siltumspējas vērtības bija no 16.8 MJ kg⁻¹ niedru auzenes maisījumam ar hibrīdapsi līdz 18.3 MJ kg⁻¹ timotiņa maisījumam ar bērzu.

Korelācijas analīzē tika konstatēta nozīmīga ($p = 0.01$) negatīva augstākās siltumspējas korelācija ar pelnu saturu ($R^2 = 0.45$) un CI ($R^2 = 0.47$), bet korelācija ar lignīnu bija pozitīva ($R^2 = 0.46$).

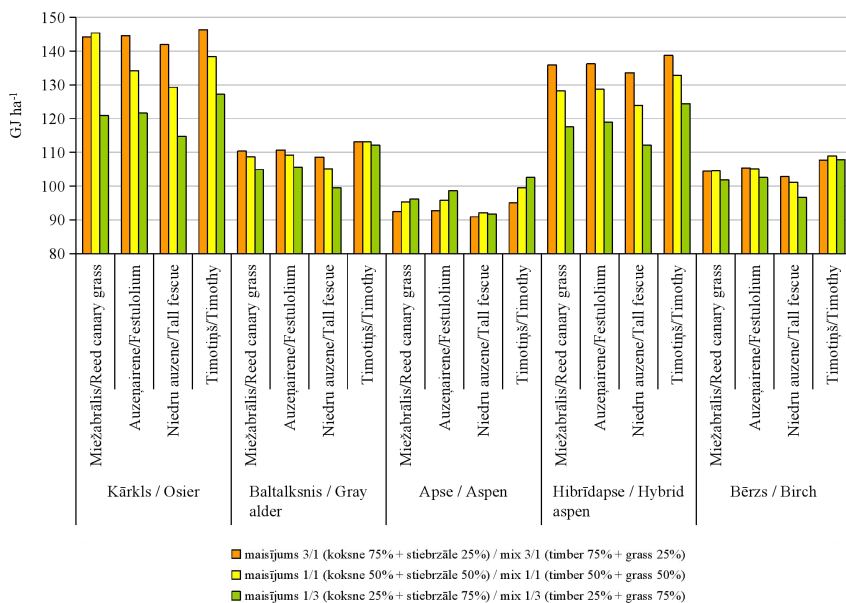
Pelnu kušanas temperatūru raksturo četras fāzes: deformācijas sākuma temperatūra (DT), kušanas sākums (ST), hemisfēras punkts (HT) un plūšanas temperatūra (FT), kad izkusušie pelni izplūst pa virsmu. Starp stiebrzāļu sugām augstākā DT bija miežabrālim – 1245 °C; pārējām stiebrzālēm tā bija robežās no 1020 °C līdz 1120 °C. Koksnes biomasai DT bija robežās no 1390 °C līdz 1460 °C. Tika izvērtēta koksnes un stiebrzāļu maisījumu deformācijas sākuma temperatūru starpība koksnes un koksnes-stiebrzāļu maisījumu biomasām. Konstatēts, ka miežabrāļa pievienošana koksnes biomasai samazināja biomasas maisījuma DT vidēji tikai par 14%. Timotiņa, auzeņairesnes un niedru auzenes pievienošana koksnei samazināja iegūtā maisījuma DT attiecīgi par 26%, 28% un 39%. Korelācijas analīze nenorādīja uz saikni starp pelnu kušanas temperatūru un citiem noteiktajiem parametriem.

Pētnieki dažādās pelnu kušanas temperatūru atšķirības skaidro ar stiebrzāļu ķīmisko sastāvu, kas augstas temperatūras ietekmē var izraisīt zināmas ķīmiskas reakcijas pat vienas sugas ietvaros (Kaķītis, Šmits, Belicka, 2009). Konstatēts, ka, palielinoties kālija oksīda saturam, samazinās arī pelnu kušanas temperatūra (Kalnačs, Grehovs, Grigale u.c., 2008).

5. Biomasas kurināmā izejvielu enerģētiskā vērtība

Pētītajām stiebrzāļu sugām iegūtais enerģijas daudzums bija tieši atkarīgs no stiebrzāļu ražības. Vislielākais enerģijas daudzums no visām stiebrzāļu biomasām 2012.–2013. gadā tika iegūts: no 120.7 GJ ha⁻¹ niedru auzenei līdz 146.8 GJ ha⁻¹ timotiņam variantā F+N180. Nelietojot mēslojumu, iegūtais enerģijas daudzums dažādām stiebrzāļu sugām variēja no 49.0 GJ ha⁻¹ pļavas auzenei līdz 67.2 GJ ha⁻¹ miežabrālim. Fosfora un kālija mēslojuma variantā

iegūtais enerģijas daudzums bija robežās no 69.3 GJ ha⁻¹ pļavas auzeni (+41%, salīdzinot ar kontroles variantu) līdz 79.3 GJ ha⁻¹ (+19%) auzenairenei.



Koksnes un stiebrzāļu biomasas / Timber and grass biomass

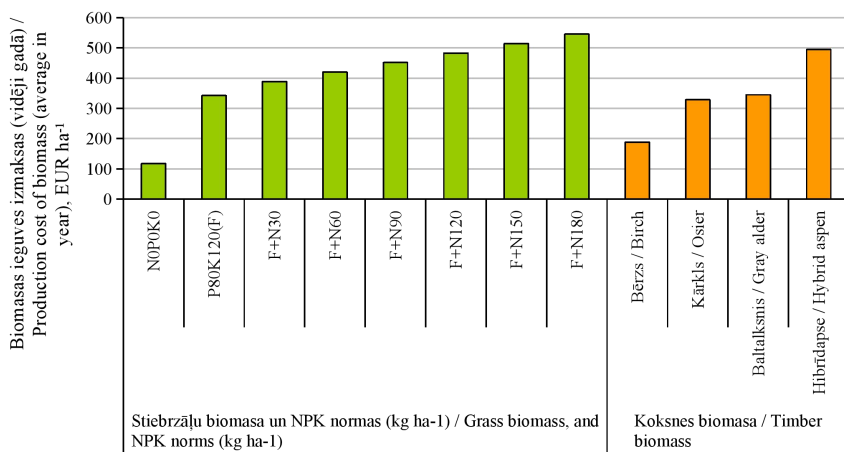
11. att. / Fig. 11. Iegūtā enerģijas raža no koksnes un stiebrzāļu biomasu maisījumiem. / Energy yield from grass and timber biomass mixtures.

Slāpekļa mēslojums sekmēja ne tikai sausnas ražas pieaugumu, bet arī iegūto enerģijas daudzumu. Vidēji visos slāpekļa normu variantos iegūtais enerģijas daudzums bija no 103.5 GJ ha⁻¹ niedru auzeni līdz 126.8 GJ ha⁻¹ timotiņam, ar attiecīgu iegūtās enerģijas pieaugumu no 33% līdz 64%. Vidēji 2012.–2013. gadā visvairāk enerģijas (11. att.) tika saražots, maisot kārklus (visaugstākā produktivitāte no pētījumā izmantotajām koksnēm) ar katru no stiebrzāļu sugām attiecību proporcijā 3/1 (75% koksne + 25% stiebrzāles), t.i., ar koksnes pārsvaru, kas ļāva pārsniegt 140 GJ ha⁻¹: no 141.9 GJ ha⁻¹ maisījumā ar niedru auzeni līdz 146.4 GJ ha⁻¹ maisījumā ar timotiņu. Samazinoties koksnes īpatsvaram biomasu maisījumā, attiecīgi samazinājās ne tikai tā augstākā siltumspēja, bet arī saražotais enerģijas daudzums.

6. Biomasas kurināmā izejvielu ražošanas izmaksas

Šajā promocijas darbā pēfīto zālaugu audzēšanas agrotehniskie paņēmienu bija vienādi un salīdzināmi, lai novērtētu to ietekmi uz zālaugu produktivitāti un konstatētu atšķirību nianse atšķirīgos mēslojuma variantos. Savukārt koksnes biomasas ieguves izmaksas tika iegūtas, pamatojoties uz literatūrā atrodamajām norādēm.

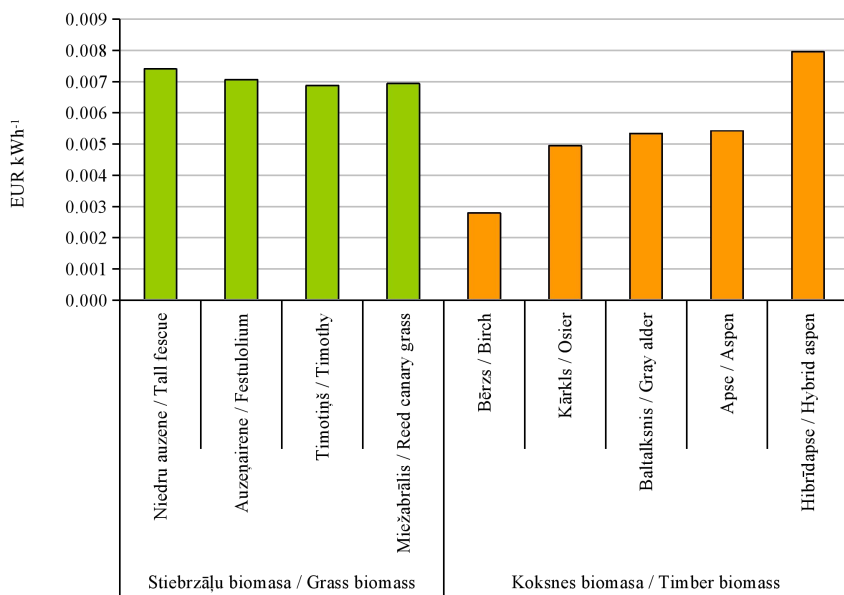
Salīdzinošs apkopojums par vidējām stiebrzāļu un koksnes biomasu iegūšanas izmaksām parādīts 12. attēlā. Kā rāda aprēķinu rezultāti, vidēji gadā vismazāk izdevumu – 122.82 EUR ha⁻¹ – stiebrzāļu biomasas ieguvē bija variantā, kad netika lietots mēslojums (ņemot vērā izmantošanas ilgumu – 10 gadus), kas ir saistīts ar zemeņa atjaunošanās biežumu. Fona (P80K120) mēslojuma variantā izdevumi veidoja 347.82 EUR ha⁻¹, bet fona variantā ar slāpekļa mēslojumu – no 394.22 EUR ha⁻¹ (ar slāpekļa normu 30 kg ha⁻¹ N) līdz 551.20 EUR ha⁻¹ (ar slāpekļa normu 180 kg ha⁻¹ N). Stiebrzāļu audzēšanas agrotehnikā mēslojums ne tikai nodrošina sausnas ražas pieaugumu, bet rada arī papildu izdevumus, kas sadārdzina produkcijas pašizmaksu.



12. att. / Fig. 12. Vidējās viena gada izmaksas (EUR ha⁻¹) stiebrzāļu biomasas (lietojot atšķirīgas mēslojuma normas) un koksnes biomasas ražošanai. / Average annual costs (EUR ha⁻¹) for the production of timber biomass and the biomass of grasses applying different fertilizer norms.

Lai novērtētu koksnes pašizmaksu promocijas darba vajadzībām, katram koksnes veidam tika izmantotas izmaksu augstākās vērtības, kuras attiecināja uz doto koksnes ražošanas aprites ciklu (kārklam, hibrīdapsei un baltalksnim – 20 gadi; bērzam – 40 gadi) kā vidējās vērtības uz vienu gadu, lai varētu tās

salīdzināt ar stiebrzāļu ražošanas izmaksām, jo stiebrzāļu sausnas ražu iegūst katru gadu, bet koksni – tikai periodiski. Baltalkšņa apsaimniekošanas izdevumus aprēķināja kā vidējo vērtību no kārkla, bērza un hibrīdapses maksimālajām vērtībām. Balstoties uz šo pieņēmumu, kopējās izmaksas aprites ciklā enerģētiskās koksnes biomasas ieguvei kārklam bija 6574.75 EUR ha⁻¹ (vidēji gadā 328.74 EUR ha⁻¹), bērzam – 7515.70 EUR ha⁻¹ (vidēji gadā 187.89 EUR ha⁻¹), hibrīdapsei – 9891.50 EUR ha⁻¹ (vidēji gadā 494.58 EUR ha⁻¹), baltalksnim – 6899.43 EUR ha⁻¹ (vidēji gadā 344.97 EUR ha⁻¹). Aprēķini liecina, ka analizētajām stiebrzāļu un koksnes biomasām bija zema enerģijas pašizmaksa (≤ 0.8 eirocenti kWh⁻¹). No analizētajām koksņēm augstākā enerģijas pašizmaksa bija hibrīdapsei, bet zemākā – bērzam: attiecīgi 0.8 un 0.28 eirocenti kWh⁻¹. Savukārt stiebrzāļu sugām enerģijas pašizmaksas bija līdzīgas: no 0.69 līdz 0.74 eirocentiem kWh⁻¹ (13. att.).



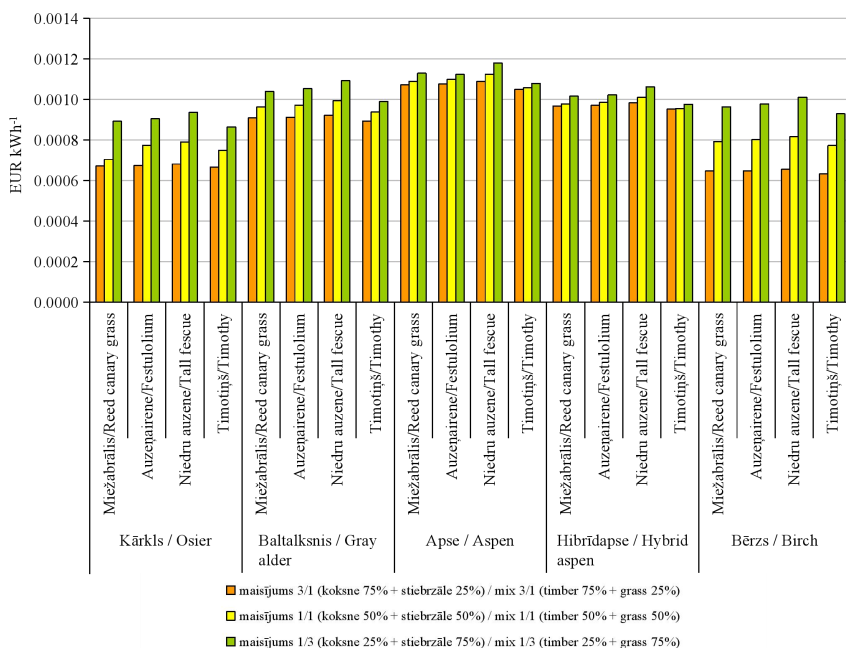
13. att. / Fig. 13. Iegūtās enerģijas pašizmaksa stiebrzāļu un koksnes biomasām. / The cost price of resulting energy for grass and timber biomasses.

Augstākā enerģijas pašizmaksa tika konstatēta variantos, kad stiebrzāļu audzēšanā izmantoja fosfora un kālija minerālmēslus, proti, 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ un 120 kg ha⁻¹ K₂O palielināja biomasas enerģijas pašizmaksu vidēji 2.27 reizes (no 1.96 reizēm pļavas auzenei līdz 2.59 reizēm miežabrālim), salīdzinot ar kontroles variantu. Fosfora un kālija mēslojumu papildinot ar slāpekli, no stiebrzāļu biomasas iegūtās enerģijas pašizmaksa samazinājās. Lielākais

enerģijas pašizmaksas samazinājums (20%) bija timotiņam, sākot ar 90 kg ha⁻¹ N normu, salīdzinājumā ar variantu bez slāpekļa mēslojuma lietošanas. Savukārt niedru auzenei neatkarīgi no lietotās slāpekļa normas iegūtās enerģijas pašizmaksas bija līdzīgas: 0.12–0.13 eirocenti par kWh.

Veidojot koksnes un stiebrzāļu biomasu maisījumus, zemākā enerģijas pašizmaksa bija kārkļa un bērza koksnes maisījumiem ar stiebrzālēm: 0.06–0.10 eirocenti par kWh (14. att.). No baltalkšņa un stiebrzāļu maisījumiem iegūtās enerģijas pašizmaksa bija robežās no 0.09 līdz 0.10 eirocentiem par kWh, no hibridapses maisījumiem ar stiebrzālēm – ap 0.10 eirocenti par kWh, un no apses maisījumiem ar stiebrzālēm – 0.11–0.12 eirocenti par kWh.

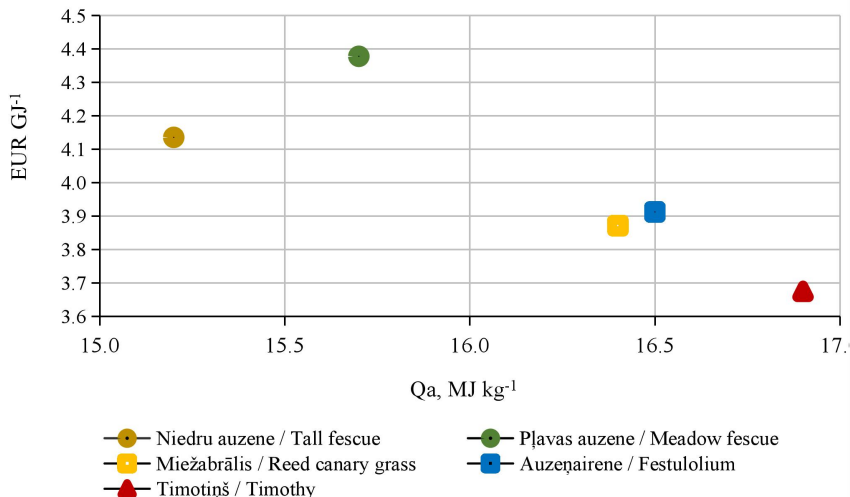
Apkopojot zālaugu augstākās siltumspējas (Q_a) un enerģijas pašizmaksas rezultātus, tika konstatēta šāda tendence: jo augstāka siltumspēja, jo lētāka enerģija (15. att.).



14. att. / Fig. 14. Iegūtā enerģijas pašizmaksa koksnes biomasas maisījumiem ar stiebrzālēm (vidēji 2012.–2013. g.). / The cost price of resulting energy for timber biomass mixtures with grasses (average in 2012–2013).

Salīdzinot visas pētītās stiebrzāļu sugas, zemākā enerģijas pašizmaksa un lielākais augstākās siltumenerģijas rādītājs bija timotiņam: attiecīgi

3.68 EUR GJ⁻¹ un 16.88 MJ kg⁻¹. Liels augstākās siltumspējas rādītājs bija arī auzuņaierei – 16.46 MJ kg⁻¹, kas bija līdzīgs miežabrāļa augstākai siltumspējai – 16.36 MJ kg⁻¹; līdz ar to arī iegūtās enerģijas pašizmaksas bija līdzīgas: attiecīgi 3.91 un 3.87 EUR GJ⁻¹. Viszemākā augstākā siltumspēja tika konstatēta niedru auzenes un pļavas auzenes biomasai – attiecīgi 15.24 un 15.71 MJ kg⁻¹, savukārt enerģijas pašizmaksas šīm stiebrzālēm attiecīgi bija par 13% un 19% lielāka nekā timotiņam (ar viszemāko enerģijas pašizmaksu).



15. att. / Fig. 15. Stiebrzāļu biomasas pašizmaksas (EUR GJ⁻¹) atkarībā no augstākās siltumspējas (vidēji 2012.–2013. g.). / The cost price of grass biomass (EUR GJ⁻¹) depending on gross calorific value (average in 2012–2013).

SECINĀJUMI

- Slāpekļa minerālmēslojuma efektivitāte bija atšķirīga gan dažādām stiebrzāļu sugām, gan dažādos zemeszemes izmantošanas gados. Visos izmēģinājuma variantos saunas raža stiebrzālēm 1. izmantošanas gadā vidēji bija 6.08 t ha⁻¹, 2. izmantošanas gadā tā palielinājās par 7%, 3. izmantošanas gadā – par 11%, 4. izmantošanas gadā – par 18%, un 5. izmantošanas gadā – par 14%. Slāpekļa mēslojuma normu efektivitātes atšķirības pa zemeszemes izmantošanas gadiem apstiprina polinomu sadalījuma lineārie regresijas koeficienti.

2. Augstākā sausnas raža no 1 kg N tika iegūta no kamolzāles un pļavas auzenes, attiecīgi vidēji 60.4 kg un 29.0 kg, ja tika lietota slāpekļa mēslojuma norma 30 kg ha⁻¹ N. Savukārt 60 kg ha⁻¹ N norma paaugstināja sausnas ražu no 1 kg lietotā N auzēnārai līdz 36.48 kg, timotiņam līdz 30.5 kg, miežabrālim līdz 30.20 kg un niedru auzenei līdz 24.4 kg.
3. Slāpekļa izmantošanās efektivitāte no minerālmēsliem sausnas ražas ieguvei, lietojot 90 kg ha⁻¹ N mēslojuma normu, vidēji bija 61.3% timotiņam, 50.6% auzēnārai, 41.7% pļavas auzenei un 28.0% niedru auzenei; lietojot 60 kg ha⁻¹ N normu, slāpekļa izmantošanās efektivitāte miežabrālim vidēji veidoja 40.3%.
4. Augstākās stiebrzāļu sausnas ražas no 1 kg NPK ieguva mēslojuma variantā N60P₂O₅80K₂O120 kg ha⁻¹: kamolzālei – 34.7 kg, miežabrālim – 27.0 kg, auzēnārai – 26.6 kg, timotiņam – 26.1 kg, niedru auzenei – 25.8 kg, pļavas auzenei – 23.9 kg.
5. Pelnu saturs stiebrzālēm nepārsniedza 8.92% pirmajā zelmeņa izmantošanas gadā un 7.91% otrajā izmantošanas gadā. Mazākais pelnu saturs koksnes un stiebrzāļu maisījuma proporcijā 3/1 bija kārklam ar auzēnārai un miežabrāli (2.30–2.63%) un kārklam un bērzam ar niedru auzeni (2.5%).
6. Lielākā augstākā siltumspēja stiebrzālēm tika konstatēta no 15.24 MJ kg⁻¹ niedru auzenei līdz 16.88 MJ kg⁻¹ timotiņam. Lielākā augstākā siltumspēja (≥18.0 MJ kg⁻¹) biomasu maisījumiem bija bērzam un kārklam maisījumā ar miežabrāli, auzēnārai un timotiņu proporcijā 3/1 (75% koksne + 25% stiebrzāles).
7. Augstākā pelnu kušanas sākuma temperatūra (DT) bija miežabrālim (1240 °C), savukārt koksnes un zālaugu biomasu maisījumiem augstākās DT vērtības (lielākas par 1100 °C) tika konstatētas, kad koksnei pievienoja miežabrāli, auzēnārai vai timotiņu.
8. Saražotais enerģijas daudzums stiebrzālēm bija robežās no 93.6 GJ ha⁻¹ pļavas auzenei līdz 112.1 GJ ha⁻¹ timotiņam. No stiebrzālēm iegūtais enerģijas daudzums vidēji bija par 21% mazāks nekā no koksnes saražotais. Veidojot koksnes maisījumus ar stiebrzāļu sugām, vairāk enerģijas tika iegūts no niedru auzenes un timotiņa maisījumiem ar koksni proporcijā 3/1 (75% koksne + 25% stiebrzāles): 141.9–146.4 GJ ha⁻¹.
9. Stiebrzāļu sugām enerģijas pašizmaksa bija robežās no 0.69 līdz 0.74 eirocentiem kWh⁻¹, bet koksnei – no 0.28 eirocentiem kWh⁻¹ bērzam līdz 0.8 eirocentiem kWh⁻¹ hibrīdapsei. Koksnes un stiebrzāļu biomasu maisījumiem enerģijas pašizmaksa variēja no 0.06 eirocentiem kWh⁻¹ kārkla un bērza koksnes maisījumiem ar stiebrzālēm līdz 0.12 eirocentiem kWh⁻¹ apses maisījumiem ar stiebrzālēm. Enerģijas pašizmaksu stiebrzālēm ietekmēja arī minerālmēslojuma normas.

PRIEKŠLIKUMI

1. Paplašinot stiebrzāļu izmantošanas spektru – ne tikai tradicionāli lopbarībai (zaļmasa, siens, skābbarība, zāles milti), bet arī enerģētikā (biogāze, kurināmais) – un izvērtējot stiebrzāļu biomasas siltumtehnikos rādītājus, tika apstiprināta hipotēze: stiebrzāles ar labām sekmēm var izmantot kā cietā kurināmā izejvielu, kas atbilst Latvijas standartu prasībām.
2. Tā kā koksnes biomasa ir lēni augoša un to var iegūt periodiski, bet stiebrzāļu biomasu var ražot ik gadu, tad ar stiebrzāļu biomasas izmantošanas potenciāla palīdzību iespējams daļēji atrisināt nepieciešamos biomasas resursus (kā izejvielu) siltuma enerģijas ražošanai.
3. Kurināmā izejvielu iegūšanai stiebrzāļu un koksnes biomasu maisījumu ieteicams veidot, pievienojot tam līdz 25% stiebrzāļu biomasas.
4. Iegūtie siltumtehnikie parametri norāda, ka perspektīvākās stiebrzāles cietā kurināmā ieguvei ir kamolzāle, miežabrālis, timotiņš un auzeņairene, tādēļ ieteicams tās izmantot kā piedevas koksnes granulu ražošanā.

THE TOPICALITY OF THE RESEARCH

At present, the energy potential of biomass is estimated to be around 10-14% of the world's total energy consumption (Putun, Ozcan, Gercel et al., 2011; Offermann, Brunner, Barntaler et al., 2011; Venkata, 2014). Research on the use of renewable energy sources is current worldwide, incl. Europe and Latvia.

In recent studies, the use of perennial grasses for the production of biofuel is considered to be more promising than annual crops (Lewandovski, Scurlock, Lindvall et al., 2003; Jasinsk, Zaltauskas, Kryzeviciene, 2008; Prochnow, Heiermann, Plöchl et al., 2009). Studies have shown that the calorific value of a fuel depends on the diversity of grass species (Khalsa, 2013).

This study examines only a small part of the perennial grasses biomass types – cereal grasses, which are considered to be the most promising source of renewable resources, with the corresponding energy qualities with a sufficiently high calorific value. Cereal grasses biomass can be used in the production of solid fuel pellets and briquettes. The disadvantage of cereal grasses biomass is its high ash yield, and its physical, mechanical and chemical properties depend on the grass variety, soil and climatic conditions, the type and amount of fertilizers used as well as the density of plants, and the time of harvest. It is important to clarify the suitability of the biomass of certain cereal grass species for local conditions in order to find the optimal biomass application (in pure form or in mixtures) for the production of solid fuels. The thesis examines the use of cereal grass species suitable for Latvian conditions for mixing with

timber and analyses solid fuel energy values, considering also the economic aspect.

For bio-energy, the most suitable grasses are reed canary grass (*Phalaris arundinacea* (L.) Raush.), tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.), festulolium (\times *Festulolium* Asch & Graebn.), cocksfoot grass (*Dactylis glomerata* L.) and other cereal grass species.

Compared to other types of alternative energy, granulated grass biomass can become an important fuel source for the production of heat in Latvia. For example, in Latvia there is a sufficient potential for the use of fuel timber, however, wood resources can decrease rapidly in the future due to a slow recovery (depending on the species of trees, it takes at least 20 to 60 years). In addition, it would be wise to use timber more sensibly. Cereal grasses have a great potential as a renewable energy source, since biomass, which is useful for growing, grows during one vegetation season and can be processed and consumed at the place of production. Within the framework of the dissertation, in order to obtain optimum composition and high energy biofuels for Latvian conditions, the author studies mixes of timber and grass biomass in various proportions (1/3, 1/1 and 3/1) for the production of granules for heating in Latvia.

Hypothesis: Cereal grass biomass and its mixtures with timber according to the thermal-technical characteristics are suitable for production of solid fuels.

The aim of the work: to evaluate possibilities of using cereal grasses biomass for production of solid fuels.

Objectives:

1. to evaluate yield of cereal grasses at various nitrogen fertilizer rates;
2. to determine the thermal-technical parameters of cereal grasses biomass and to assess their suitability for production of solid fuels;
3. to find the most suitable proportions of cereal grasses and timber biomass for the formation of granules;
4. to determine the energy content of biomass of cereal grasses, timber and their mixtures and estimate costs of the fuel.

Study novelty:

- specified biomass of cereal grasses for fuel production;
- for the first time, the compliance of the thermal-technical parameters of the ratio of grasses and timber biomass with the requirements of solid fuel quality is analysed.

Thesis defence:

- cereal grasses have good energetic qualities and a sufficiently high calorific value;
- cereal grasses biomass can be used for the production of solid fuel pellets and briquettes;
- The amount of energy produced depends on the choice of grasses and timber species, as well as on the proportion of them in mixtures.

Originality of the research. For the first time, the author analyses the impact of fertilizers on the yield of cereal grasses, the chemical composition of the dry matter and energy indicators, as well as their impact on mixtures of these grasses and timber biomass, having different proportions with timber of different species of trees, and their compliance with the requirements of the biofuel standard quality, from an energy point of view.

The practical and theoretical significance of the research results. Cereal grasses, in comparison with trees, have their own growth rhythm, requirements for the growth medium and fertilizer, they differ in the thermal-technical properties that are affected by the choice of agro-technology and the type of harvest. The results obtained in the study allow to improve cereal grass cultivation technology in accordance with fuel quality requirements and to make more precise decisions on the choice of culmiferous species for cultivation under specific agro-climatic conditions. The information gathered in the study adds to the knowledge of the efficiency of the biofuel production process. The obtained results are useful for calculating the energetic potential of cereal grass and timber pellets, taking into account the fact that the biomass value changes depending on the type of the cereal grass, the fertilizer and the specific characteristics of the meteorological conditions of the year.

Benefits from the results of the study. The experience accumulated and described in the study will allow expanding the spectrum of use of cereal grasses, not only as traditionally used in agriculture for fodder production, but also in addition to energy production for biofuel. The obtained results demonstrate the most useful types of biomass mixtures of timber and cereal grasses and their proportions.

STUDY CONDITIONS AND METHODS

The field trials were conducted in 2011 at the *Peterlauki* Study and Research Farm (56°53' N, 23°71' E) of the Latvia University of Life Sciences and Technologies. The study was conducted from 2012 to 2016.

The soil type: *sod calcareous soil (Endocalcaric Luvisol* according to the FAO classification). Grain size composition: heavy dusty sand clay. Soil agrochemical parameters: pH KCL 6.7 (LVS ISO 10390: 2006), organic matter content 21 g kg⁻¹ (according to Tyurin method, LV ST ZM 80–91), phosphorus content 52 mg kg⁻¹ P₂O₅ (low) and potassium content 128 mg kg⁻¹ K₂O (medium) (by Egner-Rhyming method; LV ST ZM 82–97).

The pre-plant was summer barley – grown for two consecutive years as a counterweight. After pre-crop harvesting, the soil was ploughed in the autumn, 22 cm deep. In the spring, when the soil reached its physical-mechanical readiness, it was first splashed, then cultivated.

The experiment was carried out with six types of cereal grasses: reed canary grass (*Phalaris arundinaceae* (L.) Raush.), cultivar 'Marathon'; festulolium (\times *Festulolium* Asch. & Graebn.), the cultivar 'Vetra'; timothy (*Phleum pratense* L.), cultivar 'Teicis'; meadow fescue (*Festuca pratensis* Huds.), cultivar 'Vaira'; tall fescue (*Festuca arundinaceae* Schreb.), cultivar 'Fawn'; and cocksfoot grass (*Dactylis glometata* L.), the cultivar 'Priekuļi 30'.

The seedling rate for cereal grass species was 1000 germinating seeds per 1 m² with the respective amount per 1 ha: reed canary grass – 10.0 kg for festulolium – 9.5 kg for timothy – 13.0 kg for meadow fescue – 12.5 kg for tall fescue – 17.0 kg and cocksfoot grass – 18.0 kg. Cereal grasses were sown on May 10, 2011, unpeeled, with seed-driller Hege-80.

The following fertilizer variants were used for all types of cereal grasses: N0P0K0 – control, P80K120 – background fertilizer (F), and six pre-plant fertilizer variants with nitrogen fertilizer rates: F + 30, F + 60, F + 90, F + 120, F + 150 and F + 180 kg ha⁻¹ N.

The experiment contained 48 variants. The field area was 10 m², with 2 m wide aisle between cereal grass species. The option layout was randomized.

Harvesting and sample preparation. Crop accounting began for 2012 for the research purposes (1st year of use). The following years of use of the grassland were: 2013 – the second year of use; 2014 – 3rd year of use; 2014 – 4th year of use; 2016 – 5th year of use. Harvesting was carried out by cutting the grass between 5 and 6 cm high with the grass harvester HANS – ULRICH HEGE 212, the weight of the green mass weight was calculated electronically, determining the yield of each replicate in the field.

For each species and fertilizer variant, 1.5–2.0 kg green mass samples were taken in three replicates. They were cut in 2–3 cm long pieces; for each variant, average samples of 1 kg mass, accurate to ± 0.01 kg, for physical and chemical analysis were prepared. The dry matter content of the green mass samples was determined by drying them at 105 °C to a constant mass (LVL EN ISO 721: 2010).

Dry matter yields calculated in each variant were expressed as average arithmetic values from three replicates and compared with each other as the absolute deviation \pm (t ha⁻¹) and relative deviation (%). In order to determine the effect of the nitrogen fertilizer, the actual values of the fertilizer variant were compared with (1) non-fertilizer control and with (2) the background variant (P80K120) in which nitrogen fertilizers were not used.

Characteristics of meteorological conditions. For the period from 01/01/2011 to 31/12/2016, the data about air temperature and rainfall were obtained from the automatic Meteorological station at the *Peterlauki* Study and Research Farm of the Latvia University of Life Sciences and Technologies. For comparison of the annual meteorological data; the long-term average temperature and precipitation data (norm) were used from the Jelgava meteorological station.

Climatic conditions affect grass hibernation and growing of grassland and determine the size of the crop. The length of the wintering period varied from 128 days in 2013/2014 to 173 days in 2012/2013. During the five-year period, only two winters had a negative average air temperature. The coldest winter was in 2012/2013, when the average temperature dropped to $-2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, whereas the warmest winters were in 2014/2015 and 2015/2016, when the average temperature in the wintertime reached or exceeded $+1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

In the vegetation period, the amount of precipitation corresponded to the norm in 2011, 2012 and 2014, when it was consistent with the average observed on a long-term basis, but in 2013, 2015 and 2016 it was significantly lower than the norm.

Solid fuel biomass granules were made from ground cereal grasses and timber biomass. For the formation of pellets, dry powder mixtures were used consisting of the following components: grasses (reed canary grass, festulolium, tall fescue, timothy, meadow fescue) and timber (birch (*Betula pendula* Roth.), osier (*Salix* spp.), grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench), aspen (*Populus tremula* L.) and hybrid aspen (*Populus tremuloides* \times *Populus tremula*)).

The timber biomass was obtained from the State Forest Research Institute Silava (located in Salaspils) – in the form of powder, with a particle diameter $<1\text{ mm}$.

The grass and timber pulp was pressed in granules with the hand press IKA WERKE. The two component granules were composed of the following components:

- (I) ratio 1/3 (25% timber + 75% grasses);
- (II) ratio 1/1 (50% timber + 50% grasses);
- (III) proportion 3/1 (75% timber + 25% grasses).

One component (100%) granules of grasses and timber pulp were used for control.

The energy value of the pellets was calculated using the following formula (1):

where Q_{kop} – total amount of energy obtained from 1 ha, MJ ha^{-1} ;

Q_a – gross calorific value of biomass dry matter, in MJ kg^{-1} ;

M_s – dry matter of biomass of 1 hectare, kg ha^{-1} .

The cost of energy for pellets was calculated according to the following formula (2):

where p_e – cost of energy (on dry basis), Eur MJ^{-1} ;

P_m – biomass 1 tonne dry matter extraction cost, Eur t^{-1} ;

Q_a – highest heating value of biomass dry matter, in MJ kg^{-1} .

Chemical and energy indicators and properties were assessed to evaluate the suitability of granules of grass and wood biomass and their mixtures for use as solid fuels for heat production. The analyses were carried out at the Laboratory of Agronomic Analysis of the Latvia University of Life Sciences

and Technologies and Virsma, Laboratory for Research and Testing on Waste and Fuel. The methods used are given in tables 1 and 2.

The physical properties of the investigated cereal grass biomass fuel were evaluated in comparison with the requirements specified in the standard LVS EN 14961-2:2012 (LVS EN ISO 17225-6: 2014) for reed canary grass (one of the first grasses that started to be used as an energy plant), whereas the physical properties of timber biomass fuel were compared to the requirements specified in standard LVS EN 14961-6:2012 (LVS EN ISO 17225-2: 2014) for whole trees without roots as well as tree trunks.

Data mathematical processing. The data were mathematically processed with Microsoft Excel for Windows 2000 and SPSS packages. These programs also produce relevant coefficients, equations, and graphic images.

The obtained study results were statistically processed using descriptive statistics (mean arithmetic, minimum and maximum values, S_x – mean arithmetic representation error, S_d – difference representation error) and variation statistics at 95% confidence level, as well as correlation and factor analysis methods were used. Materiality significance was used to measure the significance of the factors. Materiality level was $p < 0.05$. A multiplicity linear regression analysis was used to determine the effect of the variables on the dependent variable. Data analysis is represented by linear regression curves and equations. The effect of the nitrogen fertilizer norm on the energy crop productivity was estimated by linear regression equations and determination coefficient (R^2). The effect of nitrogen fertilizer norms on yield of grasses is analysed and shown in polynomial relationships in the corresponding nitrogen norm (ayx and byx) and described with linear regression coefficients and corresponding linear regression equations for polynomial linear definition regions. The gross calorific value of cereal grass and timber biomass was used to calculate the amount of energy produced.

RESULTS

1. The Effect of Fertilizer on Grass Dry Matter Yield

The yield of the cereal grasses species included in the study was influenced both by the climatic conditions of the year and the use of mineral fertilizers.

In the non-fertilized variant of the first harvest, the yield of the dry matter yield of the **reed canary grass** was 3.67 t ha^{-1} to 5.73 t ha^{-1} , and the dry matter yield increased with each subsequent year of use, **for tall fescue** – from 4.23 t ha^{-1} to 5.51 t ha^{-1} with the maximum yield in the fourth year of use, **for festulolium** – from 3.87 t ha^{-1} to 4.51 t ha^{-1} with a maximum yield in the third year of use, **for timothy** – from 2.99 t ha^{-1} to 4.38 t ha^{-1} with the highest dry crop in the third year of use, **for meadow fescue** – from 2.72 t ha^{-1} to 4.01 t ha^{-1}

with the maximum yield in the third year of use and from the **cocksfoot grass** from 5.18 t ha⁻¹ to 5.27 t ha⁻¹.

Nitrogen fertilizers have had a positive effect on the growth of dry crop in all grasses during all years of its use, but not all crop growth was significant or cost effective.

In the variants of nitrogen mineral fertilizers, the average dry matter yield was averaged from 6.18 t ha⁻¹ (lowest level), whereas the highest level was 9.62 t ha⁻¹. The use of nitrogen fertilizer for grasses averaged over all years of use of grassland, which resulted in the following increase in dry matter yield: cocksfoot grass – 3.48 t ha⁻¹ (57% compared to non-nitrogen fertilizer), for timothy – 2.55 t ha⁻¹ (+51%), for meadow fescue – 2.33 ha⁻¹ (+52%), for festulolium – 2.24 t ha⁻¹ (+57%), for tall fescue – 1.99 t ha⁻¹ (+38%) and for reed canary grass – 1.93 t ha⁻¹ (+37%)

The results of the experiment show that **tall fescue** and **festulolium** were responsive to nitrogen fertilization and the increase in nitrogen content also significantly increased the dry matter yield (Fig. 1).

In the first year of use of tall fescue, the increase in yield ($p<0.05$) was significant when nitrogen norm of 60 kg ha⁻¹ N was used, then the dry matter yield reached 6.15 t ha⁻¹. A further increase of nitrogen norm up to 180 kg ha⁻¹ N contributed to a significant increase in yield – even 8.64 t ha⁻¹ of dry matter. Also, the increase of dry matter yield ($p<0.05$) for festulolium continued to increase to 180 kg ha⁻¹ N, providing 8.11 t ha⁻¹ of dry matter yield. In the following years, with the development of a denser sward, festulolium yielded a dry matter of >8.0 t ha⁻¹ with lower nitrogen norms than it was required in the first year of use.

In the second year of sward of tall fescue, in its second year of use of the grassland, a significant increase ($p<0.05$) was observed at the nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N and the increase in the nitrogen norm continued to provide a significant yield increase of up to 60 kg ha⁻¹ N, but a further increase in the nitrogen norm resulted in an insignificant crop growth. Also, in the third year of the use of grassland, tall fescue gained a significant increase in dry crop at the nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N, as well as at fertilization rates of 120 and 180 kg ha⁻¹ N. In the fourth year of the use of grassland, a significant increase ($p<0.05$) was gained at nitrogen norms 60, 120 and 180 kg ha⁻¹ N. In the fifth year of the use of the grassland, a significant increase in yield was obtained at nitrogen norm of 60 and 120 kg ha⁻¹ N.

From the agronomic point of view, in the first year of use of the tall fescue, it is necessary to use high nitrogen norms (>150 kg ha⁻¹ N) in order to exceed the yield of dry matter 8.0 t ha⁻¹. With the age of grassland, when it becomes stronger and denser to hold a dry matter of over 8.0 t ha⁻¹, it is necessary for tall fescue to use nitrogen 120 kg ha⁻¹ N and more.

With the help of linear decomposition of polynomials, the study determined interaction effects of factors, i.e. how the years of use and growth

conditions affected the efficiency of increasing nitrogen fertilizer norms and to what extent it was useful to increase them (Fig. 2).

Using linear regression coefficients it was found that tall fescue achieved the highest nitrogen efficiency at the nitrogen norm of 180 kg ha⁻¹ N in the first year of use of the grassland, in the second and fourth year with the nitrogen norm 60 kg ha⁻¹ N, in the third – with the nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N and in the fifth – with a nitrogen norm of 120 kg ha⁻¹ N.

The evaluation of linear coefficients confirmed fluctuations in the significance of the previously observed and described dry matter yields. In its turn, the highest efficiency of increasing nitrogen norms in the first year of use of the grassland for festulolium was achieved with nitrogen norm of 120 kg ha⁻¹ N, in the second – 30 kg ha⁻¹ N and from the third to the fifth year of use of grassland with 60 kg ha⁻¹ N.

Timothy dry matter yield was significantly increased ($p < 0.05$) by nitrogen fertilizer (Fig. 4). Already at the nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N, the yield of dry matter, on average during three years, reached 5.86 t ha⁻¹ (+ 18%). Using nitrogen fertilizer at the rate of 180 kg ha⁻¹ N in the background of phosphorus and potassium fertilizers, on average over three years, made it possible to obtain a yield of 8.60 t ha⁻¹, which was 2.27 times higher than that in which the fertilizer was not used. In all three years of use of timothy, nitrogen at the rate of 180 kg ha⁻¹ N gave the highest yields: from 2.70 t ha⁻¹ (+ 47%) to 4.59 t ha⁻¹ (+ 118%).

Meadow fescue was responsive to nitrogen fertilizer, which allowed significantly ($p < 0.05$) to increase the yield of dry matter. Starting with a nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N, and with each subsequent step of the nitrogen norm, the dry matter yield increased substantially and the highest dry matter yield was 8.13 t ha⁻¹ (on average for three years) using a nitrogen norm of 180 kg ha⁻¹ N (Fig. 4)

Reed canary grass dry matter yields obtained maximum with a nitrogen norm of 60 kg ha⁻¹ N in all the years of use (Fig. 4), but a further increase in the norm did not result in a significant increase in yield.

By linear regression of polynomials, using linear regression coefficients, it was found that nitrogen fertilizer highest efficiency for the **timothy** during the years of use varied. In the first year of use, the highest nitrogen efficiency was reached with nitrogen rate of 30 kg ha⁻¹ N (Fig. 5), whereas in the second year, nitrogen was needed much more – 120 kg ha⁻¹ N, and in the third year the highest effectiveness was reached at a nitrogen level of 60 kg ha⁻¹.

Using linear regrouping of polynomials, linear regression coefficients showed that the highest efficiency of nitrogen increase in the meadow fescue during the first and third year of use of the grassland was with a nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N (Fig. 6) and in the second - with a nitrogen norm of 60 kg ha⁻¹ N.

Using linear regression of polynomials, the coefficients revealed that the reed canary grass achieved the highest nitrogen fertilizer efficiency at a nitrogen norm of 60 kg ha⁻¹ N in the first and second year of use of the grassland, and in the third year it was sufficient to use the nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N (Fig. 7).

2. Fertilizer Efficiency in Grass Growing

For cereal grass, the highest nitrogen efficiency from 1 kg nitrogen was achieved using low nitrogen norms of 30–60 kg ha⁻¹ N (Fig. 8).

Using average nitrogen fertilizer norms (from 90 to 120 kg ha⁻¹ N), the amount of dry matter yield obtained in almost all cases decreased, with the exception of timothy in the second year of use. Using high nitrogen fertilizer rates (150–180 kg ha⁻¹ N) showed a steady increase in dry matter growth during the first year of use of grassland. The obtained results showed that tall fescue was the most sensitive species of grasses to nitrogen fertilizer at the beginning of the development, when the dry matter yield per 1 kg N increased at all levels of N rates.

In the first year of use of the grassland, timothy used nitrogen better with low nitrogen fertilization rates than using medium and high norms, but tall fescue had higher utilization efficiency at high nitrogen norms. In the second year of use of grassland, for both cereal grass species, the use of nitrogen was in proportion to the reverse position in the first year of use.

The use of the highest nitrogen nutrients for reed canary grass was detected with a nitrogen fertilizer norm of 60 kg ha⁻¹ N (mean 37.2%).

On average, timothy used nitrogen from 41.7 to 43.1% at nitrogen rate of 90–120 kg ha⁻¹ N in the two years of use, despite the differences in growing conditions. The average nitrogen utilization of the meadow fescue was observed on average for two years with a nitrogen norm of 60 kg ha⁻¹ N – 41.8%.

3. Evaluation of Grass Biomass Fuel Quality Indicators

The moisture content of biomass is variable and it affects the quality and cost of fuel. In order to reduce the moisture content, it is necessary to invest a significant amount of energy, which forms one of the largest expenditure positions in the fuel production process. In the study, prior to pelletizing, the moisture content of grasses was 9.00% (from 8.10% of meadow fescue to 10.40% of festulolium), but for timber – 7.82% (from 7.00% for osier to 8.50% for hybrid aspen and birch) and met standard requirements. The moisture content of cereal grass and timber biomass mixtures was also below 10%, and

the moisture content decreased as the amount of wood increased. Adding 1/3 of timber biomass mixture decreased the moisture content by 5% on average, but adding half or 2/3 of timber, moisture of the mixture decreased by 15% and 20%, respectively.

The ash builds melt particles, which results in a faster obstruction of the combustion chamber and convective part of the boiler and therefore more frequent mechanical cleaning is required.

The average ash content of cereal grass biomass ranged from 6.60% for timothy to 8.05% for tall fescue, which is close to the ash content mentioned in different other sources (Beidermann, Obernberger, 2005; Bakker, Elbersen, 2005).

The lowest ash content for grass biomass was detected from 4.99% for timothy in 2013 to 7.93% for tall fescue in 2012, and the highest from 6.83% for timothy in 2013 to 8.92% tall fescue in 2012. On average, from all the fertilizer variants included in the experiment, the ash content was 8.05% for tall fescue, 7.36% for reed canary grass, 7.27% for festulolium, 7.14% for meadow fescue and 6.60% for timothy.

Standard requirements stipulate that the ash content of the reed canary grass biomass cannot exceed 8.0%. Nutrient nitrogen norms $\geq 60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ for reed canary grass have contributed to a decrease in the ash content below the standard size of 8.0% for both years of use of grassland. For other cereal grasses such as festulolium and timothy, the ash content was below 8.0%, and in some cases the observed deviation was not explained as a probable regularity.

Regression analysis showed that the ash content increased with potassium ($R^2 = 0.86$; $p = 0.01$), phosphorus ($R^2 = 0.62$; $p = 0.01$), chlorine ($R^2 = 0.71$; $p = 0.01$) and nitrogen ($R^2 = 0.74$; $p = 0.01$) in dry matter of biomass. This is due to the fact that these elements form constituent compounds in the ash in the burning process of the biomass fuel (Vassilev, Vassilev, Song et al. 2017).

Ash content in cereal grasses and timber compositions decreases in proportion to the increase in timber share, because on average, timber biomass has 70–80% less ash compared to grasses. The analysis of the composition of grass and timber biomass shows that the grasses, after adding one third of timber, reduce the ash content by 20%, whereas a mix of 1/1 or two thirds of timber reduce ash content by 40% and 55%, respectively. The best (lowest) ash content was observed in festulolium and reed canary grass mixture (1/3) with osier – 2.30% and 2.63%, tall fescue and osier or birch - 2.5% and timothy with grey alder – 2.9% (Fig. 9)

When assessing the suitability of cereal grasses for fuel production, it should be taken into account that the ash content may change from year to year, also due to other factors, but proportional changes remain. Observations indicate dependence of ash content on species and agro meteorological conditions.

Carbon (C) is one of the chemical elements that determines the amount of heat energy generated by the fuel. Carbon content in plants is an important indicator because C is a combustible element. The higher the carbon content of the plant, the higher the combustion heat.

The carbon content of the studied cereal grasses was on average from 44.5% in tall fescue to 45.3% in timothy. The carbon content of reed canary grass dry matter on average was 45.11% in all variations (from 42.69% in 2013 to 47.58% in 2012). On average, the content of C in reed canary grass dry matter was 45.11% (from 42.69% in 2013 to 47.58% in 2012). The C content of non-fertilized yield was 44.93% on average (from 42.90% to 47.43%).

In the samples of timber, the highest carbon content was in aspen – 48.90%, but the lowest in birch – 46.10%. Carbon content in cereal grasses in the 1st and 2nd year of use varied from 42.00% of meadow fescue in 2013 to 48.97% of timothy in 2012.

Summarizing the results for all types of cereal grasses, that is, in variants using nitrogen fertilizers $\geq 120 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$, the carbon content was on average above 45%.

The highest carbon content of festulolium was in a mix with osier, in proportion 1/3 – 46.6%, reed canary grass mix with grey alder – 46.9%. On the other hand, the lowest rates were for festulolium (3/1) with hybrid aspen (43.7%) and reed canary grass (3/1) with osier (43.4%).

The hydrogen content (H) in the fuel determines its calorific value: the more hydrogen, the higher the calorific value.

The hydrogen content in the analysed timber and cereal grass samples was from 5.48% for timothy to 5.93% for tall fescue, and from 6.39% for grey alder to 6.83% for birch. The hydrogen content of the studied cereal grasses was on average 6% lower than that of timber biomass samples. In general, the hydrogen content was similar in the studied biomass, in the cereal grasses H content variation was within 10%. Hydrogen content was on average higher in timber biomass.

The H/C ratio (1.51–1.52) of some grasses such as festulolium, reed canary grass and tall fescue was similar to that of aspen, hybrid aspen and grey alder biomass (H/C – 1.52). The highest H/C index was for osier and birch – 1.54. H/C index increased in aspen mixture with cereal grasses with the increase in the amount of timber, but the increase in H/C is not high, 0.5% to 2%.

Hydrogen and carbon content indicates the energy content of the fuel, which is characterized by the atomic ratio H/C of these elements. The more hydrogen in relation to carbon, the lower the degree of oxidation, the more energy will be released in the oxidation reaction. So, the higher the atomic H/C ratio, the more energy is released in the fuel burning process. The average H/C ratio for lignocellulosic biomass is 1.5 (Lehmann, Joseph, 2009). In this study, the highest ratio of H/C among the cereal grasses was 1.52 for tall fescue and

the lowest 1.45 for timothy. Among the timber biomass, the highest ratio of H/C was in birch - 1.54. In general, the H/C ratio did not differ radically for the biomass studied, the average H/C ratio for cereal grasses was 2.3% lower than for timber.

Nitrogen (N), when fuel is combusted, forms volatile nitrogen compounds that enter the atmosphere with untreated flue gases, therefore, in vegetation biomass as a fuel should not exceed 0.6% (Oberberger, Brunner, Barnthaler, 2006). In its standard (LVS EN 14961 - 2 - 2012 (LVS EN ISO 17225 - 6: 2014), the nitrogen content in the dry matter cannot exceed 2.0%.

In the culm, the nitrogen content, depending on the year and the species of cereal grasses, ranged from 0.63% of the meadow fescue in 2012 to 2.59% of the meadow fescue in 2013. On average, from all fertilizer variants of the experiment, the nitrogen content of the meadow fescue was 1.71%, timothy – 1.32%, festulolium – 1.18%, reed canary grass – 1.13%, and tall fescue – 1.05%.

The nitrogen content in the timber samples was 0.3% to 0.6%, whereas reed canary grass and festulolium were 1.3% and 1.1%, respectively.

In the timber and cereal grass mixture, the nitrogen content increased with the increase in the proportion of cereal grasses in it. In the proportion of the mixture 3/1 (75% timber and 25% grasses), the N content increased on average by 23%, but in proportions 1/1 and 1/3 - by 36% and 56%, respectively.

The greatest reduction in the nitrogen content was achieved in biomass mixtures 3/1 (timber / grasses) – festulolium 80% (0.42%), reed canary grass – 70% (0.49%) in a mixture with osier. The lowest nitrogen content for cereal grasses was in the mixture of grey alder, averaging 5%, 0.67% festulolium and 0.95% reed canary grass, although in all cases the N content was below the EU-standard critical limit, which means: the lower the nitrogen biomass, the lower the NO_x emission quantity in the atmosphere.

Phosphorus (P), like potassium, when it is combusted, forms simple salts that are part of the ash composition.

The content of phosphorus, depending on the year and the species of cereal grasses, ranged from 0.20% for timothy and meadow fescue in 2012 to 0.47% for meadow fescue in 2013. On average, from all the nitrogen fertilizer variants in the experiment, the phosphorus content of the meadow fescue was 0.34%, reed canary grass and festulolium - 0.28%, tall fescue - 0.27%, and timothy - 0.26%.

On the other hand, on average, from all nitrogen fertilizer variants, biomass phosphorus content was 0.35% (+9% compared to non-nitrogen fertilizer), festulolium 0.28% (+ 17%), reed canary grass 0.28% (-3%), but timothy and tall fescue 0.26% (-7% and -10% respectively).

Potassium (K) content is a significant indicator of the biomass quality, since alkali metals – potassium and sodium reduce the ash melting temperature, which in turn leads to the formation of slag layer on the walls of combustion chamber.

The content of potassium, depending on the year and the species of grasses, ranged from 1.37% of the meadow fescue in 2012 to 3.69% of the meadow fescue in 2013. On average, from all the fertilizer variants of the experiment, the potassium content of the meadow fescue was 2.69%, festulolium – 2.61%, timothy – 2.52%, tall fescue – 2.45%, and reed canary grass – 2.21%.

The correlation analysis showed that there is a slight positive correlation between K content in plants and fertilizer norm ($r = 0.31$; $p = 0.1$).

On average, from all the types of nitrogen fertilizer variants, biomass potassium content was 2.70% for meadow fescue, 2.66% for festulolium, 2.55% for timothy, 2.50% for tall fescue and 2.33% for reed canary grass.

Potassium content was more affected by meteorological conditions in a particular year. In 2012, in the intensive vegetation period of the grassland, when there was a lot of precipitation, potassium content in grass biomass, depending on the species, ranged from 1.37% in meadow fescue to 2.31% in tall fescue, but in the dry year of 2013, from 1.95% of reed canary grass to 3.69% of meadow fescue. It only confirms the opinion of other researchers that increased soil moisture reduces accumulation of potassium in the tissues and may even rinse potassium from plants (Notalapati, Gupta, Moghtaderi et al 2007).

Potassium content of cereal grasses with timber decreased systematically for both species. With 1/3 of timber, the concentration of K decreased by 30% on average, but with a half and 2/3, by 80% and 200%, respectively.

Sulfur (S) is one of the undesirable elements, as it causes corrosion of heating equipment, and sulfur dioxide enters the atmosphere with flue gases. The sulfur content of plants, including grasses, is very variable.

In this study, sulfur content in cereal grasses ranged from 0.036% in 2012 to 0.180% in 2013.

The sulfur content of cereal grasses biomass was on average about 4 times higher than in timber. In the timber and cereal grass mixture, the sulfur content was low, from 0.03% to 0.06%. In most cases, the sulfur content of the blends decreased with the increase in the amount of timber. The lowest sulfur ratios for festulolium were in a mixture (3/1; 1/1) with birch (1/1) – 0.031% and reed canary grass mix (1/1) with hybrid aspen – 0.031%.

Chlorine (Cl), like sulfur, causes corrosion of the equipment and releases HCl, chlorinated dioxin, dibenzofuran and Cl precipitating salts in the ash (Rosendahl, 2013) going into the atmosphere with untreated flue gases.

The chlorine content of timber and cereal grasses in the samples was from 0.008% to 0.012% in timber and 0.50% to 0.74% in cereal grasses respectively. The chlorine content in the cereal grasses was 2.5 to 3.5 times the standard 0.2% limit (LVS EN 14961-6-2012). In its turn, chlorine content in timber was 1.5 to 2.5 times lower than the standard (LVS EN 14961-2-2011), set to 0.02%. Chlorine content in cereal grass is significantly higher than in timber. In the

cereal grasses, chlorine content ranged from 0.50% festulolium to 0.74% in reed canary grass. The lowest chlorine content in the timber was 0.008% for aspen, the highest for osier and birch – 0.012%. In cereal grass and timber mixtures the chlorine content decreased as the amount of timber increased, as the Cl content varied more than 10 times between timber and cereal grasses.

The lowest chlorine content for festulolium was found in a mixture (1/3) with birch – 0.18%, reed canary grass with hybrid aspen – 0.25%, tall fescue and timothy with grey alder – 0.22% and 0.17%.

According to chlorine content, the lowest potential for the formation of slag is timber biomass, since its Cl content is lower. The contents of the mixture have lower mean values of Cl for festulolium and reed canary grass.

4. Biomass Combustion Parameters

The calorific energy from the fuel is characterized by the gross calorific value (Q_a). For cereal grass biomass, the highest Q_a value was found for timothy – 16.9 MJ kg⁻¹, which is 1.2–2.3% less than that for hybrid aspen, which had the lowest heating value of all the timber biomass included in the study, or 9.6% less than for birch, which had the highest Q_a value. In contrast, the lowest Q_a value was for tall fescue – 15.2 MJ kg⁻¹, which was 11.1–12.6% less than hybrid aspen and 18.7% less than birch. In mixtures of timber and cereal grasses biomass, the higher heating value increased with increasing proportion of timber in the mixture (Fig. 10). The highest heating value for a mixture ratio of 1/3 (25% timber + 75% grasses) was from 15.8 MJ kg⁻¹ tall fescue mixture with aspen and hybrid aspen to 17.3 MJ kg⁻¹ timothy mixture with osier, grey alder and birch, but for a mixture ratio of 3/1 (75% timber + 25% grasses), the highest heating values were from 16.8 MJ kg⁻¹ a mixture of tall fescue with a hybrid aspen to 18.3 MJ kg⁻¹ timothy mixture with birch.

The correlation analysis revealed a significant ($p = 0.01$) negative calorific value correlation with the ash content ($R^2 = 0.45$) correlation with the ash content and Cl ($R^2 = 0.47$), whereas the correlation with lignin was positive ($R^2 = 0.46$).

The melting point of the ash is characterized by four phases: the initial deformation temperature (DT), the start of melting (ST), the hemispherical point (HT), the flowing temperature (FT), when the ash flows over the surface. Among the cereal grasses, the highest DT was with reed canary grass (1240 °C), the others were from 1020 to 1120 °C. The timber biomass DT had boundaries from 1390 to 1460 °C. The study evaluated the difference between the initial temperature of deformation of timber and grasses mixtures for biomass of timber and timber-grass mixture. It was found that adding reed canary grass to timber biomass reduced the biomass DT by only 14% on average. Adding

timothy, festulolium and tall fescue to timber reduced the DT of the resulting mixture by 26%, 28% and 39%, respectively.

The correlation analysis did not indicate the relationship between ash melting temperature and other specified parameters. The difference in the melting temperatures of the ash is explained by the chemical composition of the plants or individual elements which, due to high temperature, cause certain chemical reactions even within the same species (Kaķītis, Šmits, Belicka, 2009). It has been found that as the content of potassium increases, the ash melting temperature will decrease (Kalnačs, Grehovs, Grigale, etc., 2008).

5. Energy Value of Biomass Fuel Raw Materials

The amount of energy derived from the studied cereal grasses was directly dependent on yield. In 2012-2013, the highest amount of energy was obtained from grassland biomass ranging from 120.7 GJ ha⁻¹ (tall fescue) to 146.8 GJ ha⁻¹ (timothy), variant F + N180. In the absence of fertilizer, the amount of energy obtained from different cereal grass species varied from 49.0 GJ ha⁻¹ meadow fescue to 67.2 GJ ha⁻¹ reed canary grass. The amount of energy obtained from phosphorus and potassium fertilizers was from 69.3 GJ ha⁻¹ meadow fescue (+41% in comparison with the control variant) to 79.3 GJ ha⁻¹ (+19%) for festulolium.

Nitrogen fertilizers contributed not only to the increase in dry matter yield, but also to the amount of energy produced. On average, the amount of energy received from all nitrogen-norm variants ranged from 103.5 GJ ha⁻¹ (tall fescue) to 126.8 GJ ha⁻¹ (timothy) with an increase in the corresponding energy output from 33% to 64%. The largest amount of energy was produced with osier on average in 2012-2013 (Fig. 11). Osier was blended with all types of cereal grasses in a ratio of 3/1 (75% timber + 25% grasses), i.e., with a predominance of timber and exceeding 140 GJ ha⁻¹ (from 141.9 GJ ha⁻¹ in tall fescue to 146.4 GJ ha⁻¹ mixed with timothy). As the share of timber in the mix decreased, not only the gross calorific value decreased, but also the amount of energy produced.

6. Production Costs of Biomass Fuel Raw Materials

In this study, the agrotechnical methods of grasses were the same and comparable in order to evaluate their effect on the productivity of grasses and to find differences in nuances in different fertilizer variants. In turn, timber biomass production costs were obtained on the basis of literature references.

As the results of calculations show, on average, per year, the least expenditure on grass biomass was in the non-fertilizer application

122.82 EUR ha⁻¹ (Fig. 12), phosphorus and potassium (P80K120) fertilizer variant was 347.82 EUR ha⁻¹ and in the variant with nitrogen fertilizer the costs of biomass was from 394.22 EUR ha⁻¹ (with a nitrogen norm of 30 kg ha⁻¹ N) to 551.20 EUR ha⁻¹ (with a nitrogen norm of 180 kg ha⁻¹ N). The use of fertilizers not only ensures increase in the dry matter yield, but also raises production costs.

In order to estimate the cost of timber for the dissertation work, for each type of timber, the highest values were applied, which were attributed to the life cycle of the respective wood production: for osier, hybrid aspen and grey alder, 20 years, and for birch 40 years as average values for 1 year, so that they could compare with the cost of production of grasses, because grasses are harvested every year, but wood only periodically. The management costs of grey alder were calculated from the average costs osier, birch and hybrid aspen. Based on this assumption, the total cost of the cycle for the production of energy timber biomass for osier was 6574.75 EUR ha⁻¹ (average per year 328.74 EUR ha⁻¹), birch – 7515.70 EUR ha⁻¹ (average per year 187.89 EUR ha⁻¹), hybrid aspen – 9891.50 EUR ha⁻¹ (average per year 494.58 EUR ha⁻¹) and grey alder – 6899.43 EUR ha⁻¹ (average per year 344.97 EUR ha⁻¹).

Calculations show that the cereal grass and timber biomass analysed have a low cost of energy (≤ 0.8 eurocents kWh⁻¹). From the analysed timber, the highest cost of energy was for hybrid aspen (0.8 eurocents kWh⁻¹) (Fig. 13), whereas the lowest was for birch (0.28 eurocents per kWh). In turn, the energy cost of grasses was similar (from 0.69 to 0.74 eurocents per kWh) (Fig. 13).

The highest cost of energy was when phosphorus and potassium fertilizers were used to grow cereal grasses. Using phosphorus, the energy cost of biomass of 80 kg ha⁻¹ P₂O₅ and potassium 120 kg ha⁻¹ K₂O increased on average by 2.27 times (from 1.96 times for meadow fescue to 2.59 times for reed canary grass) compared to the control variant. Adding nitrogen to phosphorus and potassium fertilizers to the grass biomass decreased the cost of energy. A 20% reduction in the energy cost was detected in timothy starting from the nitrogen norm of 90 kg ha⁻¹ N and higher nitrogen norms compared to the non-nitrogen fertilizer variant. On the other hand, the cost of tall fescue, irrespective of whether small (30–60 kg ha⁻¹) nitrogen norms were used, or average (90–120 kg ha⁻¹) or high (150–180 kg ha⁻¹), energy costs were similar to 0.12–0.13 eurocents per kWh.

For the production of mixtures of timber and grasses biomass, the lowest cost of energy was for an osier and birch mixture with cereal grasses ranging from 0.06 to 0.10 eurocents per kWh (Fig. 14).

The energy costs from grey alder and cereal grass mixtures ranged from 0.09 to 0.10 eurocents per kWh, hybrid aspen mixed with cereal grasses of about 0.10 eurocents per kWh, and for aspen mixtures with cereal grasses from 0.11 to 0.12 eurocents per kWh.

Summarizing the study results of the gross calorific value (Q_a) and energy costs of cereal grasses, the following trend was observed: the higher the calorific value, the cheaper the energy (Fig. 15).

The lowest cost price of energy was obtained from timothy 3.68 EUR GJ⁻¹, which also had the highest calorific value – 16.88 MJ kg⁻¹ from all the studied cereal grass species. A high calorific value was also obtained from festulolium – 16.46 MJ kg⁻¹, which does not differ much from reed canary grass – 16.36 MJ kg⁻¹. The cost of the energy thus obtained was similar – 3.91 and 3.87 EUR GJ⁻¹. The tall fescue and meadow fescue biomass had the lowest calorific value, 15.24 and 15.71 MJ kg⁻¹, respectively, while the cost of energy was 13% and 19% higher than timothy (lowest cost of energy).

CONCLUSIONS

1. Nitrogen fertilizer, regardless of the size of the norm, increased the yield of dry matter for cereal grasses. In contrast, the effectiveness of nitrogen was different both between the grass species and between the years of use of the grassland. In all trial variants, the dry matter yield for cereal grasses was 6.08 t ha⁻¹ on average during the first year of use, with 7% increase during the second year of use, 11% in the 3rd year of use, 18% in the 4th year of use, and 14% in the 5th year of use compared to the first year of use. Differences in the efficiency of nitrogen fertilizer rates over the years of use of grassland are confirmed by the linear regression coefficients of polynomial distribution.
2. The highest dry matter yield from 1 kg N was obtained from cocksfoot grass and meadow fescue, on average, 60.44 kg and 28.96 kg, respectively, when nitrogen norm was 30 kg ha⁻¹ N. Conversely, using 60 kg N rate increased the dry matter yield of festulolium to 36.48 kg, for timothy up to 30.50 kg, reed canary grass up to 30.20 kg and tall fescue until 24.40 kg.
3. The use of nitrogen from fertilizers for dry matter yield was 61.3%, in timothy – on average in festulolium – 50.6%, meadow fescue – 41.7%, tall fescue – 28.0% nitrogen fertilizer norm 90 kg ha⁻¹ and reed canary grass 40.3% nitrogen fertilizer norm 60 kg ha⁻¹.
4. The highest yield of cereal grasses from 1 kg of NPK was obtained in the fertilizer variant N60P80K120: for cocksfoot grass – 34.7 kg, for reed canary grass – 27.0 kg, for festulolium – 26.6 kg, for timothy – 26.1 kg, for tall fescue – 25.8 kg, and meadow fescue – 23.9 kg.
5. In the 1st year of grassland use, ash content in grasses did not exceed 8.92%, but in the 2nd year it did not exceed 7.91%. The lowest ash content in the mixture of timber and cereal grasses in the proportion of 3/1 was osier with festulolium and reed canary grass – 2.30–2.63%, for osier and birch with tall fescue – 2.5%.

6. The highest calorific value of cereal grasses was found from 15.24 MJ kg⁻¹ (tall fescue) to 16.88 MJ kg⁻¹ (timothy). The highest calorific value (≥18.0 MJ kg⁻¹) was found in biomass mixtures of birch and osier with reed canary grass, festulolium and timothy in a ratio of 3/1 (75% timber + 25% grasses).
7. The highest ash melting temperature (DT) was detected with reed canary grass (1240 °C), whereas the highest values (greater than 1100 °C) for timber and cereal grass biomass mixtures were detected when reed canary grass, festulolium or timothy was added to timber.
8. The amount of energy produced for cereal grasses ranged from 93.6 GJ ha⁻¹ (meadow fescue) to 112.1 GJ ha⁻¹ timothy. The amount of energy produced from grass was on average 21% lower than that produced from timber. In the form of timber blends with cereal grasses, more energy was obtained from mixtures of tall fescue and timothy with timber in the proportion of 3/1 (75% timber + 25% grasses): 141.9–146.4 GJ ha⁻¹.
9. For cereal grasses, the cost of energy varied from 0.69 to 0.74 eurocents per kWh, but for timber from 0.28 eurocents per kWh birch to 0.8 eurocents per kWh hybrid aspen. For energy mixes of timber and grass biomass, the energy costs varied from 0.06 eurocents per kWh (for osier and birch timber blends with cereal grasses) up to 0.12 eurocents per kWh for aspen mixture with cereal grasses. The cost of energy for cereal grasses was also affected by fertilizer norms.

PROPOSALS

1. By expanding the range of using cereal grasses - not only the traditional use of fodder (green mass, hay, silage) but also for energy (biogas, fuel) and evaluating calorific characteristics of cereal grass biomass, the hypothesis was confirmed: grasses can be used as solid fuel raw materials that meet the requirements of standards in Latvia.
2. Since wood biomass is slowly growing and can be obtained periodically, but grassland biomass can be produced annually, using the potential of cereal grasses biomass can help to solve the demand for biomass resources (as raw material) for the production of heat energy.
3. In order to obtain fuel raw materials, it is advisable to form a mixture of cereal grasses and timber biomass with up to 25% of grass biomass.
4. The obtained calorific value characteristics indicate that the most promising cereal grasses for solid fuels are cocksfoot grass, reed canary grass, timothy and festulolium, therefore they are recommended to be used as an additive for the production of timber pellets.

PROMOCIJAS DARBA APROBĀCIJA / APPROBATION OF THE DOCTORAL THESIS

Pētījuma rezultāti atspoguļoti 14 zinātniskās publikācijās, kuras iekļautas *SCOPUS* un/vai *Web of Science* datu bāzēs, un vienas konferences tēzēs. Par pētījuma rezultātiem ziņots 20 starptautiskajās zinātniskajās konferencēs.

Based on the research results 14 articles for *SCOPUS* and/or *Web of Science* indexed scientific journals have been prepared. The results of the research have been presented at 20 international scientific conferences.

Zinātniskās publikācijas, kas indeksētas *SCOPUS* un/vai *Web of Science* datu bāzēs

Scientific papers indexed in *SCOPUS* and/or *Web of Science* data bases

1. **Platace R.**, Adamovics A., Ivanovs S., Gulbe I. (2017). Assessment of Ash Melting Temperature of Birch and Grass Biomass Pellet Mixtures. In: *16th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*: Proceedings. May 24.-26.05.2017, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Vol. 16, p. 103-107.
2. Adamovics A., **Platace R.**, Gulbe I., Ivanovs S. (2017). Influence of Fertilizers on Chemical Content of Energy Grass Biomass. In: *16th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*: Proceedings. May 24.-26.05.2017, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture Faculty of Engineering, Vol. 16, p. 98-102.
3. **Platace R.**, Adamovics A., Kalnacs J. (2016). Production of Reed Canary Grass-Wood Pellets. In: *15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*: Proceedings. May 25.-27.05.2016, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, p. 371-374.
4. Adamovics A., **Platace R.**, Ivanovs S. (2016). Influence of Nitrogen Fertilizers on Chemical Composition of Energy Grass. In: *15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*: Proceedings. May 25.-27.05.2016, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, p. 1085-1089.
5. Bumane S., **Platace R.**, Poisa L., Adamovics A. (2016). Analysis of Reed Canary Grass Chemical Content. In: *15th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*: Proceedings. May 25.-27.05.2016, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 15, p. 923-927.
6. Adamovics A., **Platace R.**, Sivicka I. (2015). Influence of Nitrogen Fertilizer on Perennial Grass Dry Matter Yield and Suitability for Heat Production. In: *Nordic View to Sustainable Rural Development: Proceedings of the 25th NJF Congress*. June 16-18, 2015. Riga. Latvia, p.

- 165-169. ISBN 978-9934-14-548-3 (printed); ISBN 978-9934-14-549-0 (electronic).
7. Būmane S., Poiša L., Čubars E., **Platače R.** (2015). The Analysis of Carbon Content in Different Energy Crops. In: *Nordic View to Sustainable Rural Development: Proceedings of the 25th NJF Congress*. June 16-18, 2015. Riga. Latvia, p. 156-160. ISBN 978-9934-14-548-3 (printed); ISBN 978-9934-14-549-0 (electronic).
 8. Adamovics A., **Platače R.** (2015). Flue Gases Emitted by Timothy and Meadow Fescue Pellets. In: 14th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. May 20-22, 2015, Jelgava. Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 14, p. 536-540. ISSN 1691-5976.
 9. **Platače R.**, Adamovics A., Poisa L., Cubars E., Bumane S. (2015). Ash Content in Grass Biomass Yielded in 1st and 2nd Cultivation Year and Evaluation of Suitability Thereof for Pellet Production. In: 14th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”: Proceedings. May 20-22, 2015, Jelgava. Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 14, p. 541-545. ISSN 1691-5976.
 10. **Platače R.**, Adamovics A. (2014). Indicators Characterising Calorific Value of Reed Canary Grass and Last Year’s Grass. In: *13th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*: Proceedings. May 29-30, 2014, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Vol. 13, p. 440-443.
 11. **Platače R.**, Adamovics A. (2014). Content of Lignin and Ash in Grass Biomass Depending on Fertiliser Type and Rate. In: *13th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*: Proceedings. May 29-30, 2014, Jelgava, Latvia. Latvia University of Agriculture. Faculty of Engineering. Jelgava, 2014. Vol.13, p. 444-449.
 12. **R. Platače**, Adamovičs A. (2014). The Evaluation of Ash Content in Grass Biomass Used for Energy Production. In: *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. Vol. 190 (2): Proceedings of the 1st International conference "Energy production and management in the 21st century: the quest for sustainable energy", p. 1057-1065.
 13. **Platače R.**, Adamovičs A. (2013). Evaluation of Ash Content Grass Plant Biomass used for Energy. In: *The 6th International Scientific Conference "Rural Development 2013: proceedings*. 28-29 November, 2013, Akademija, Kaunas district, Lithuania. Aleksandras Stulginskis University. Vol. 6: Innovations and sustainability, book 3, p. 114-118. ISSN 2345-0916
 14. **Platače R.**, Adamovics, A., Gulbe, I. (2013). Lignocellulosic Biofuels and Grass Plants Used in Production of Pellets. In: *The International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies 2013” proceedings*,

October 14-16, Institute of Energy Systems and Environment of Riga Technical University, p. 66-71.

**Ziņojumi starptautiskajās zinātniskajās konferencēs un kongresos.
Reports at international scientific conferences and congresses.**

1. **Platače R**, Adamovičs A. (2018). Mēslojuma ietekme uz zālaugu sausas ražu, biomasas kvalitāti un augu barības elementu iznesi. / Influence of fertilizer on grass dry matter gain, quality of biomass and depletion of plant nutrition elements. *Līdzsvarota lauksaimniecība*, Zinātniski praktiskās konferences tēzes, Jelgava, LLU, Latvia. [in latvian]
2. **Platace R.**, Adamovics A., Ivanovs S., Gulbe I. (2017). Assessment of Ash Melting Temperature of Birch and Grass Biomass Pellet Mixtures. *16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*. May 24.-26.05.2017, Jelgava, Latvia.
3. Poisa L., Adamovics A., **Platace R.** (2017). Evaluation of chemical content in different energy crops. Rual Development 2017: Bioeconomy challenges. 8th international scientific conference. 24th November, 2017, Aleksandras Stulginskis University, Akademija, Kaunas district, Lithuania.
4. Adamovics A., **Platace R.**, Gulbe I., Ivanovs S. (2017). Influence of Fertilizers on Chemical Content of Energy Grass Biomass. *16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*. May 24.-26.05.2017, Jelgava, Latvia.
5. .Poisa L., Bumane S., Cubars E., **Platace R.** (2017). Evaluation of Sulphur Content in Different Energy Crops. In: *16th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*: Proceedings. May 24.-26.05.2017, Jelgava, Latvia.
6. **Platace R.**, Adamovics A., Kalnacs J. (2016). Production of Reed Canary Grass-Wood Pellets. *15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*. May 25.-27.05.2016, Jelgava, Latvia.
7. Adamovics A., **Platace R.**, Ivanovs S. (2016). Influence of Nitrogen Fertilizers on Chemical Composition of Energy Grass. *15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*. May 25.-27.05.2016, Jelgava, Latvia.
8. Bumane S., **Platace R.**, Poisa L., Adamovics A. (2016). Analysis of Reed Canary Grass Chemical Content. *15th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*. May 25.-27.05.2016, Jelgava, Latvia.
9. Adamovics A., **Platace R.**, Sivicka I. (2015). Influence of Nitrogen Fertilizer on Perennial Grass Dry Matter Yield and Suitability for Heat Production. *Nordic View to Sustainable Rural Development*. 25th NJF Congress. June 16-18, 2015. Riga, Latvia.

10. Būmane S., Poiša L., Čubars E., **Platače R.** (2015). The Analysis of Carbon Content in Different Energy Crops. *Nordic View to Sustainable Rural Development*. 25th NJF Congress. June 16-18, 2015, Riga, Latvia.
11. Adamovics A., **Platače R.** (2015). Flue Gases Emitted by Timothy and Meadow Fescue Pellets. *14th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*. May 20-22, 2015, Jelgava, Latvia.
12. **Platače R.**, Adamovics A., Poisa L., Cubars E., Bumane S. (2015). Ash Content in Grass Biomass Yielded in 1st and 2nd Cultivation Year and Evaluation of Suitability Thereof for Pellet Production. *14th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*. May 20-22, 2015, Jelgava.
13. **Platače R.**, Adamovics A. (2014). Indicators Characterising Calorific Value of Reed Canary Grass and Last Year's Grass. *13th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*. May 29-30, 2014, Jelgava, Latvia.
14. **Platače R.**, Adamovics A. (2014). Content of Lignin and Ash in Grass Biomass Depending on Fertiliser Type and Rate. *13th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*. May 29-30, 2014, Jelgava, Latvia
15. **Platače R.**, Adamovičs A. (2014). The Evaluation of Ash Content in Grass Biomass Used for Energy Production. *1st International Conference on Energy Production and Management in the 21st Century: The Quest for Sustainable Energy*. 23 - 25 April, 2014, Ekaterinburg, Russian Federation.
16. **Platače R.**, Adamovičs A. (2013). Evaluation of Ash Content Grass Plant Biomass used for Energy. *The 6th International Scientific Conference "Rural Development 2013*. 28-29 November, 2013, Akademija, Kaunas district, Lithuania.
17. **Platače R.**, Adamovics A., Gulbe I. (2013) Evaluation of Factors Influencing Calorific Value of Reed Canary Grass Spring and Autumn Yield. *12th International Scientific Conference "Engineering for Rural Development"*. May 23-24, 2013, Jelgava, Latvia.
18. **Platače R.**, Adamovics A., Gulbe I. (2013). Assessment of factors influencing potassium content in reed canary grass/poplar pellets and grass plants. *13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference & EXPO - SGEM 2013 "Energy and Clean technologies"*. June 16-22, 2013, Albena, Bulgaria.
19. **Platače R.**, Adamovics, A., Gulbe, I. (2013). Lignocellulosic Biofuels and Grass Plants Used in Production of Pellets. Conference *Proceedings of the International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies 2013"* October 14-16, Riga Technical University.