

LATVIJAS LAUKSAIMNIECĪBAS UNIVRSITĀTE  
TEHNISKĀ FAKULTĀTE  
MEHĀNIKAS INSTITŪTS  
LATVIA UNIVERSITY OF AGRICULTURE  
FACULTY OF ENGINEERING  
INSTITUTE OF MECHANICS



Promocijas darba izstrāde un noformēšana līdzfinansēta  
no Eiropas Savienības Sociālā fonda

Mg.sc.ing. **Imants Nulle**

**BIOMASAS ĪPAŠĪBU UN MAISIĀJUMU  
GATAVOŠANAS PROCESA IZPĒTE**

**INVESTIGATION OF BIOMASS PROPERTIES AND  
PRODUCTION PROCESS OF BIOMASS COMPOSITIONS**

**Promocijas darba  
KOPSAVILKUMS**

Dr.sc.ing. zinātniskā grāda iegūšanai

**Promotion paper  
RESUME**

For awarding the scientific degree Dr.sc.ing.

**Jelgava 2008**

**Darbs izpildīts** Latvijas Lauksaimniecības universitātē, Tehniskās fakultātes Mehānikas institūtā.

**Darba zinātniskais vadītājs:** asociētais profesors, Dr.sc.ing. Aivars Kaķītis

**Konsultants:** profesors, Dr.sc.ing. Ēriks Kronbergs.

**Oficiālie recenzenti:**

Prof., Dr.sc.ing. Ainārs Galiņš, Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Tehniskā fakultāte, Latvija.

Dr.sc.ing. Arvīds Vilde, Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Lauksaimniecības tehnikas zinātniskais institūts, Latvija.

Prof. Dr.habil.geol. Gotfrīds Noviks, Rēzeknes augstskola, Latvija.

**Promocijas darba aizstāvēšana notiks** LLU Lauksaimniecības nozares Inženierzinātņu apakšnozares promocijas padomes atklātā sēdē 2008. gada 16. maijā plkst. 13<sup>00</sup>, Jelgavā, J.Čakstes bulv. 5, Tehniskajā fakultātē, 410. auditorijā.

**Ar promocijas darbu, pielikumu un kopsavilkumu var iepazīties LLU fundamentālajā bibliotēkā,** Jelgavā, Lielā ielā 2.

**Atsauksmes sūtīt:** promocijas padomes sekretāram, profesoram, Dr.sc.ing. Imantam Ziemeļim, LLU, Tehniskā fakultāte, J.Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV – 3001.

**Padomes priekšsēdētājs:** profesors, Dr.sc.ing. Juris Priekulis.

**The research is carried out** at the Latvia University of Agriculture, the Institute of Mechanics of the Faculty of Engineering.

**The scientific advisor of the research:** associated professor, Dr.sc.ing. Aivars Kaķītis

**Consultant:** professor, Dr.sc.ing. Ēriks Kronbergs.

**The official reviewers:**

Prof., Dr.sc.ing. Ainārs Galiņš, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, Latvia.

Dr.sc.ing. Arvīds Vilde, Latvia University of Agriculture, Research institute of Agricultural Machinery, Latvia.

Prof. Dr.habil.geol. Gotfrīds Noviks, Rezekne Higher Education institution, Latvia.

**The Promotion Paper will be defended** in an open meeting of the Promotion Council of the sub-branch of Engineering Sciences of the branch Agriculture, at the Latvia University of Agriculture on 16 May 2008 at 13<sup>00</sup>. Venue – Jelgava, 5 J.Čakstes blvd., Faculty of Engineering, room 410.

**The promotion Paper, the annex and resume are available at the Fundamental library of the Latvia University of Agriculture** located at 2 Lielā street, the city of Jelgava.

**References should be sent to** the secretary of the Promotion Council Professor, Dr.sc.ing. Imants Ziemeļis. Address – Faculty of Engineering of the Latvia University of Agriculture, 5 Čakstes blvd., the city of Jelgava, LV – 3001 (LLU, Tehniskā fakultāte, J.Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV – 3001).

**Head of the Council:** professor, Dr.sc.ing. Juris Priekulis.

## Saturs

Darba aktualitāte .....	4
Pētījuma mērķis un uzdevumi .....	6
Darba zinātniskā novitāte .....	6
Zinātniskā darba aprobācija .....	7
Darba izpildes metodika .....	8
1. Teorētiskie pētījumi .....	8
1.1. Glabāšanas tvertnes dinamiskais modelis .....	9
1.2. Jaunas konstrukcijas rotoru dozatora izveide .....	11
1.3. Maisījuma kvalitātes novērtējums .....	14
2. Eksperimentālie pētījumi .....	17
2.1. Berzes koeficients .....	17
2.2. Dozatoru parametri .....	18
2.2.1. Trumuļa dozators .....	18
2.2.2. Rotoru dozators .....	20
2.3. Glabāšanas tvertnes dinamiskā modeļa eksperimentālais novērtējums .....	22
2.4. Briķešu noturības eksperimentālā noteikšana .....	23
3. Ekonomiskais novērtējums .....	24
Secinājumi un ieteikumi ražošanai .....	27
Izmantotie informācijas avoti .....	56
Publikāciju saraksts .....	57

## Content

Topicality of the work .....	29
The aim of the research and the tasks .....	31
Scientific novelty of the research .....	32
Approbation of the scientific work .....	32
Methods of work .....	34
1. Theoretical research .....	34
1.1. Storage bin dynamic model .....	34
1.2. Development of a new construction rotary feeder .....	37
1.3. Evaluation of the composition quality .....	40
2. Experimental research .....	44
2.1. Friction coefficient .....	44
2.2. Feeder parameters .....	45
2.2.1. Drum feeder .....	45
2.2.2. Spool feeder .....	47
2.3. Experimental evaluation of the storage bin dynamic model .....	48
2.4. Experimental determination of briquette durability .....	50
3. Economic evaluation .....	51
Conclusions and proposals for production .....	54
Sources of information .....	56
List of publications .....	57

## Darba aktualitāte

Eiropas Savienība savu stratēģisko mērķi definēja Eiropas Komisijas Baltā grāmatā (1997. gads), kur noteica, ka atjaunojamo resursu daļa Eiropas Savienības primāro resursu bilancē jāpalielina no 6% 1997. gadā līdz 12% 2010. gadā. Šis uzdevums ir virzīts gan uz enerģijas apgādes drošības paaugstināšanu, gan ilgtspējīgas enerģijas resursu attīstības atbalstīšanu. Nākošais solis šīs politikas turpināšanā bija Direktīva 2001/77/EC par tādas elektroenerģijas pielietojumu veicināšanu iekšējā elektroenerģijas tirgū, kas ražota izmantojot neizsīkstošus enerģijas avotus. Direktīvas mērķis ir palielināt no AER saražoto daļu līdz 22,1% no kopējā Eiropas Savienības elektroenerģijas patēriņa 2010. gadā [1]. EK paziņojums COM (2004) 366 Par atjaunojamo energoresursu izmantošanu ES izvērtē šīs direktīvas indikatīvā mērķa sasniegšanas iespējas. Paziņojumā secināts, ka dažādu AER ieteicamais ieguldījums ir 50% vēja enerģijai, 10% hidroresursiem, ģeotermālai un saules enerģijai, 40% no biomasas iegūtai elektroenerģijai. Uzsvērts, ka biomasas ieguldījuma palielināšana ir prioritāra, un īpaša uzmanība tiks pievērsta jaunajām ES dalībvalstīm, kurās ir ievērojami biomasas resursi [1].

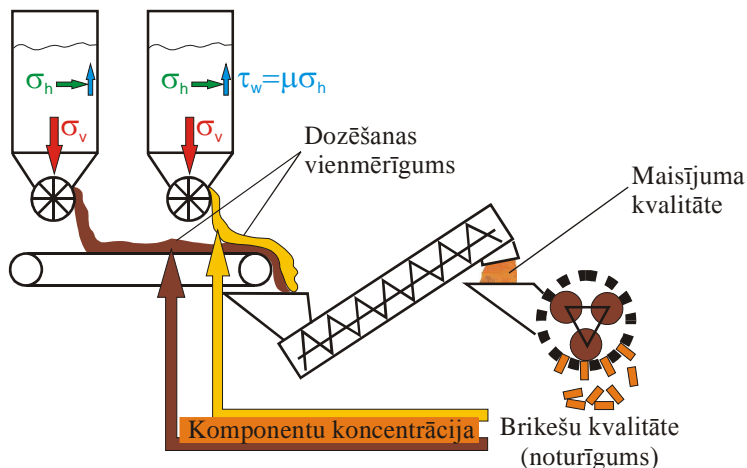
Biomasas maisījumu veidošana ir aktuāla, jo koksnes biomasā (ar mizu un skujiņām/lapām) un stiebraugu biomasā ir augsts metālu sārmi un hlorklora saturs. Atkarībā no degšanas procesa, metālu sārmi var tikt oksidēti vai arī tie var veidot sulfātus vai hlorklorīdus. Ja tiek dedzinātas tikai koksnes skaidas vai stiebraugu biomasas, sēra saturs ir zems un veidojas hlorklorīdi. Hlorklorīdi kondensējas uz kurtuves siltumpārnēsnes virsmām, palēninot siltumpārnēsi un palielinot augstas temperatūras korozijas risku. Ja sēra saturs kurināmajā tiek palielināts, piemēram, veidojot kūdras un koksnes vai stiebraugu biomasas maisījumus, hlorklorīdu vietā veidojas sulfāti un tiek samazināts augstas temperatūras korozijas risks [2, 3].

Analizējot maisīšanas procesus, atklājās vairākas priekšrocības biomasas maisīšanai ar nepārtrauktas darbības maisītāju. Lai pilnvērtīgāk varētu spriest par vienu vai otru maisīšanas procesa priekšrocībām, nepieciešama šo abu tehnoloģisko procesu (cikliskas un nepārtrauktas darbības maisīšanas) ekonomiskā novērtēšana.

Nepārtrauktas darbības maisītājam nepieciešama salīdzinoši augsta dozēšanas precizitāte (dozēšanas konstante atkarībā no biomasas veida 5 – 10% robežās). Tāpēc ir svarīgi noskaidrot, vai ir iespējams pietiekoši precīzi dozēt smalcinātu biomasu, lai to varētu kvalitatīvi samaisīt plūsmā (1. att.). Pieejamā literatūrā apskatīto dozatoru piemērotība smalcinātu stiebraugu un kūdras dozēšanai nav aprakstīta. Nav uzrādīta arī dozatoru relatīvā dozēšanas konstante. Tāpēc, pēc ekspertu metodes izvērtējumiem un par piemērotākiem atzītiem dozatoriem, nepieciešams veikt eksperimentālus pētījumus, ar kuru palīdzību tiktu noteikta dozatoru relatīvā dozēšanas konstante, dozatora raksturlielne un piemērotība smalcinātai stiebraugu biomasai un kūdrai.

Uz tvertnē iebūvētu dozatoru darbojas smalcinātās biomasas radītie vertikālie spriegumi  $\sigma_v$ . Lai noteiktu šo spriegumu ietekmi atkarībā no masas augstuma tvertnē, nepieciešama spriegumu sadalījuma izpēte tvertnē un tvertnes

matemātiskā modeļa izveide (1. att.). Ar tvertnes matemātisko modeli varētu aprēķināt spriegumu vērtības, kas darbojas uz dozatoru. Tas ir svarīgi dozatora piedziņai nepieciešamā griezes momenta aprēķinam. Lai varētu izstrādāt šādu modeli, nepieciešama biomasas fizikāli mehānisko īpašību (berzes koeficienta  $\mu$ , šķērsprieguma koeficienta  $\lambda$ ) noteikšana.



1. att. **Biomases maisījumu veidošanas procesu ietekmējošie parametri**

No literatūras apskata varam secināt, ka ir pietiekoši daudz dažādu statistisku metožu, ar kuru palīdzību var novērtēt maisījuma homogenitāti, zinot komponentu izmaiņas atsevišķos paraugos. Taču ir grūtības noņemt pietiekoši daudz paraugus un noteikt komponentu koncentrāciju tajos. Tāpēc tiek izvirzīts uzdevums, izstrādāt pieņemamu metodi paraugu noņemšanai, apstrādei un biomasas maisījumu homogenitātes noteikšanai.

Lai atbilstoši organizētu maisīšanas procesu, kā arī noteiktu maisījuma homogenitāti, būtiska nozīme ir komponentu proporcijai. Svarīgi noteikt optimālo maisījuma proporciju, izejot no briekšu stiprības parametriem. Tāpēc ir nepieciešami biomasas briekšu stiprības noteikšanas eksperimentālie pētījumi.

Cietā kurināmā un biokurināmā standartī paredz briekšu un granulu noturības pārbaudes ar dažādām metodēm, kas prasa lielu daudzumu granulu un briekšu. Ņemot vērā, ka brieketes noturība mainās atkarībā no biomasas veida, komponentu proporcijas, daļiņu lieluma un daudziem citiem parametriem, laboratorijas apstākļos nepieciešama briekšu pārbaudes metode, kas ar nelielu briekšu skaitu var noteikt attiecīgās stiprības izmaiņas atkarībā no briketējamo komponentu daļiņu lieluma, mitruma, koncentrācijas vai citām izmaiņām.

# Pētījuma mērķis un uzdevumi

## Pētījumu mērķis

Novērtēt biomasas maisījumu gatavošanas tehnoloģiskos procesus un tehnoloģisko iekārtu projektēšanai nepieciešamos biomasu raksturotājus.

## Pētījumu uzdevumi

1. Noteikt biomasas (kūdras, stiebraugu) fizikāli mehāniskās īpašības, kas nepieciešamas biomasas glabāšanas tvertnes matemātiskā modeļa izstrādei.
2. Izveidot smalcinātas biomasas glabāšanas tvertnes matemātisko modeli un eksperimentāli pārbaudīt šī modeļa atbilstību.
3. Teorētiski novērtēt biomasas dozēšanai piemērotākos dozatoru veidus.
4. Eksperimentāli noteikt dozēšanas precizitāti un dozatoru raksturlīknes.
5. Izstrādāt jaunas konstrukcijas smalcinātas biomasas dozatoru.
6. Izstrādāt metodi biomasas paraugu noņemšanai, apstrādei un biomasas maisījumu homogenitātes novērtēšanai.
7. Novērtēt biomasas briekšu noturību atkarībā no tās daļiņu izmēriem un maisījuma sastāva.
8. Salīdzināt cikliskas un nepārtrauktas darbības biomasas maisījumu gatavošanas tehnoloģijas pēc to ekonomiskā izdevīguma.

## Darba zinātniskā novitāte

Promocijas darba zinātniskā novitāte ir saistīta ar sekojošu jautājumu izpēti.

- Izstrādāts smalcinātas biomasas glabāšanas tvertnes matemātiskais modelis, vertikālā sprieguma noteikšanai tvertnes atverē, datorprogrammā *Matlab-Simulink* un veikta modeļa eksperimentālā pārbaude.
- Izstrādāta metodika biomasas maisījumu (salmi – kūdra, niedres – kūdra) kvalitātes novērtēšanai ar attēlu analīzes palīdzību datorprogrammā *Matlab*.
- Eksperimentāli noteikti, modeļa izstrādei nepieciešamie, biomasas fizikāli-mehāniskie parametri: dabīgā nogrūvuma leņķis, šķērssprieguma koeficients un berzes koeficients.
- Eksperimentāli noteiktas dozatoru (rotoru, gliemeža un trumuļa) relatīvās dozēšanas konstantes un dozatoru raksturlīknes dozējot smalcinātu biomasu.
- Izveidots rotoru dozatora modelis, ar kura palīdzību var modelēt dozatora ražīgumu atkarībā no tā ģeometriskajiem parametriem un rotācijas frekvences.
- Jaunas konstrukcijas smalcinātas biomasas dozatora izstrāde (Latvijas patents LV-13597 B. SPK G01F11/10, 26.02.2007.).

## Zinātniskā darba aprobācija

Pētījumi veikti laika posmā no 2001. līdz 2007. gadam. Iegūtie rezultāti apkopoti 19 publikācijās, kuras atbilst Latvijas Zinātnes padomes vispārārstīto zinātnisko izdevumu prasībām. Disertācijas tēmas pētījumu rezultātu aprobācija tika veikta uzstājoties sekojošās starptautiskās zinātniskās konferencēs.

1. Estimation of homogeneity stage of biomass mixtures. International Scientific and Practical Conference „*Environment. Technology. Resources.*” Rēzekne, Latvia, June 20 – 22, 2007.
2. Rotary spool feeder for biomass dosage. 6<sup>th</sup> International Scientific conference “*Engineering for rural development*”, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, May 24 – 25, 2007.
3. Mechanical properties of biomass compositions for solid biofuel production. 15th European Biomass Conference “*Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*”. Germany 7-11 May 2007.
4. Drum feeder for biomass dosage. Research papers 8. Lithuanian University of Agriculture, Faculty of Agricultural Engineering, *Transport and Power Machinery Department – 60 year anniversary*. Lithuania, September 20 – 21, 2007.
5. Biomass conditioning for solid biofuel compositions. 2<sup>nd</sup> *International Baltic Bioenergy Conference*. Germany, Fachhochschule Stralsund – University of Applied Sciences. Nov. 02. – 04. 2006.
6. Determination of parameters for chopped biomass feeders. International Scientific Conference “*Engineering for rural development*” Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 18 – 19, 2006.
7. Stress modelling of chopped biomass. International Scientific Conference “*Research For Rural Development 2006*” Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Department of Post - Graduate Studies, 19 – 22.05.2006.
8. Dosage of chopped biomass. International Scientific Conference “*Opportunities and problems of economic development*”. Rēzeknes Augstskola, Rēzekne. 24.03.2006.
9. Internal stresses of biomass compositions. International Scientific Conference “*Research For Rural Development 2005*” Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Department of Post - Graduate Studies, 19 – 22.05.2005.
10. Friction of chopped straw. International scientific conference “*Agricultural Engineering Problems*”, Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, 2-3.06. 2005.
11. Biomassu maisījumu fizikāli mehāniskās īpašības. Starptautiska zinātniskā konference “*Vide. Tehnoloģija. Resursi.*” Rēzekne, Latvia, Rēzeknes augstskola, 16-18.03.2005.
12. Separation of chopped reed particles. International scientific conference “*Research for rural development 2004*”, Jelgava, Latvia, 19-22 May, 2004.

13. Evaluation of durability of biomass briquettes, International scientific conference “*Advanced technologies for energy producing and effective utilization*” Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, 28-29 June, 2004
14. Durability of stalk material briquettes, International scientific conference “*Enabling environment for society wellbeing*” Rezekne, Latvia, Rezeknes Higher Education Institution, 4-5 March 2004.

## **Darba izpildes metodika**

Promocijas darba mērķa sasniegšanai izmantota diferenciālvienādojumu risināšanas metode un matemātiskā modelēšana datorprogrammā Matlab-Simulink. Eksperimentos izmantotas Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības Mašīnu Mehānismu zinātniskās laboratorijas (LMMZL) tehniskā bāze un laboratorijas iekārtas (materiālu pārbaudes mašīna Zwick Z 2.5, kompāniju Picotech, DataQ u.c. virtuālie instrumenti). Mērīšanai tika izmantoti licencēti mērinstrumenti. Tika veikts nepieciešamo mērījumu atkārtojumu skaits, lai nodrošinātu pietiekošu mērījumu rezultātu ticamību. Rezultātu novērtēšanai tika izmantota statistiskās datu apstrādes programma MS Excel, ar kuras palīdzību tika noteikti tādi datu statistiskie raksturotāji, kā determinācijas koeficients, standartnovirze, variācijas koeficients u.c.

### **1. Teorētiskie pētījumi**

Darba teorētiskie pētījumi izriet no promocijas darba pirmajā nodaļā noteiktajiem uzdevumiem. Darba gaitā risinātos teorētiskos pētījumus var iedalīt četrās apakšnodaļās. Pirmajā apakšnodaļā tiek pētīts spriegumu stāvoklis birstošos materiālos un birstošo materiālu radītie spriegumi glabāšanas tvertnēs.

Otrajā apakšnodaļā tiek izveidots matemātiskais modelis programmā *Matlab-Simulink* vertikālo spriegumu noteikšanai uz tvertnē iemontētu dozatoru.

Trešajā apakšnodaļā tiek aprakstīts jaunas konstrukcijas dozators birstošiem materiāliem. No dozatora darba tilpuma ģeometriskiem vienādojumiem tiek izveidots modelis programmā *Matlab-Simulink*, ar kura palīdzību var noteikt dozatora darba tilpumu atkarībā no dozatora parametriem. No eksperimentāliem pētījumiem, zinot šī dozatora ražīguma izmaiņu, atkarībā no rotācijas frekvences, iespējams modelēt dažādu gabarītu dozatoru ražīgumus.

Ceturtajā apakšnodaļā tiek konstatēti kritēriji, kas nosaka salmu-kūdras un niedru-kūdras maisījumu proporciju un nepieciešamo maisīšanas precizitāti. Tiek izstrādāta metodika maisījuma koncentrācijas noteikšanai paraugos un maisījuma homogenitātes noteikšanai ar attēlu analīzes palīdzību.

## 1.1. Glabāšanas tvertnes dinamiskais modelis

Glabāšanas tvertnes dinamiskais modelis tika izveidots lai noteiktu biomasas piepildīšanas laikā radīto spriegumu uz tvertnē iemontētu dozatoru. Tas nepieciešams, lai varētu noteikt griezes momentu dozatora piedziņai.

### Spriegumu aprēķinu metodes

No augstāk apskatītajām situācijām varam izdalīt trīs dažādus gadījumus, kas būtu jāņem vērā aprēķinot spriegumus glabāšanas tvertnēs:

- Spriegumi tvertnes vertikālajā daļā;
- Spriegumi piltuvē (aktīvais spriegumstāvoklis - piepildīšana);
- Spriegumi piltuvē (pasīvais spriegumstāvoklis - iztukšošana).

### Spriegumu aprēķināšana tvertnes vertikālajā daļā

Spriegumi vertikālajā tvertnes daļā (aktīvajā spriegumstāvoklī) var tikt aprēķināti ar Jansena (*Janssen*) formulu [6], izmantojot bezgalīgi plāna elementa metodi. Tiek apskatīts masas elements tvertnes šķērsriezuma formā ar bezgalīgi mazu augstumu  $dz$ , kuram ir tāds pats šķērsriezuma laukums  $A$ , kā tvertnes cilindriskai daļai. Pieņemot, ka apkārt izgrieztajam elementam ir konstants vertikālais spriegums  $\sigma_v$  un nemainīgs blīvums  $\rho_b$ , spēku līdzsvaru  $z$  ass virzienā izsaka vienādojums [5]:

$$A\sigma_v + g\rho_b Adz = A(\sigma_v + d\sigma_v) + \tau_w Udz, \quad (1.1)$$

kur  $A$  – šķērsriezuma laukums,  $m^2$ ;  
 $\sigma_v$  – vertikālais spriegums, Pa;  
 $g$  – brīvās krišanas paātrinājums,  $m\ s^{-2}$ ;  
 $\rho_b$  – masas blīvums,  $kg\ m^{-3}$ ;  
 $\tau_w$  – bīdes spriegums uz tvertnes sienām, Pa;  
 $U$  – perimetrs, m;

Pārveidojot izteiksmi iegūsim:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \sigma_v \lambda \frac{U}{A} \operatorname{tg}(\varphi_x) = g\rho_b \quad (1.2)$$

kur  $\varphi_x$  – berzes leņķis;

No berzes koeficienta raksturlieknes iegūstam salmu berzes koeficienta izmaiņas funkciju atkarībā no sprieguma:

$$\operatorname{tg}(\varphi_x) = 0.317\sigma_h^{-0.075} = 0.317(\lambda\sigma_v)^{-0.075}, \quad (1.3)$$

un kūdras berzes koeficienta izmaiņas funkciju atkarībā no sprieguma:

$$\operatorname{tg}(\varphi_x) = -0.219\sigma_h^2 + 0.465\sigma_h + 0.137 = -0.219(\lambda\sigma_v)^2 + 0.465(\lambda\sigma_v) + 0.137 \quad (1.4)$$

Pārveidojot diferenciālvienādojumu (1.2) tā, lai tas ievērtētu smalcinātu salmu berzes koeficienta atkarību no sprieguma, iegūstam diferenciālvienādojumu salmu tvertnes (1.5) un kūdras tvertnes aprēķiniem (1.6):

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + 0.317(\sigma_v\lambda)^{0.925} \frac{U}{A} = g\rho_b \quad (1.5)$$

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + (-0.219(\lambda\sigma_v)^3 + 0.465(\lambda\sigma_v)^2 + 0.137\lambda\sigma_v) \frac{U}{A} = g\rho_b \quad (1.6)$$

### Spriegumu noteikšana piltuvē

Spriegumus piltuvē aprēķina izmantojot izgriezta elementa metodi. Spēku līdzsvaru izgrieztajam elementam izsaka diferenciālvienādojums [5, 6]:

$$d(A\sigma_v) + g\rho_b Adz = \sin(\Theta)\sigma_w dA_M + \cos(\Theta)\tau_w dA_M \quad (1.7)$$

kur  $\Theta$  – piltuves leņķis pret vertikāli, grādos;  
 $\sigma_w$  – sienu normālspriegumi, Pa;  
 $A_M$  – elementa sānu virsma, m<sup>2</sup>;  
 $z$  – vertikālā virziena koordināta, m;

Ieviešot koeficientu  $u$  un pārveidojot izteiksmi iegūstam diferenciālvienādojumu sekojošā formā [5]:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} - u \frac{\sigma_v}{z} = -g\rho_b, \quad (1.8)$$

kur

$$u = (m+1) \left[ K \left( 1 + \frac{\operatorname{tg}(\varphi_x)}{\operatorname{tg}(\Theta)} \right) - 1 \right], \quad (1.9)$$

kur  $K$  – sieniņu normālsprieguma attiecība pret vertikālā sprieguma vidējo vērtību piltuvē;

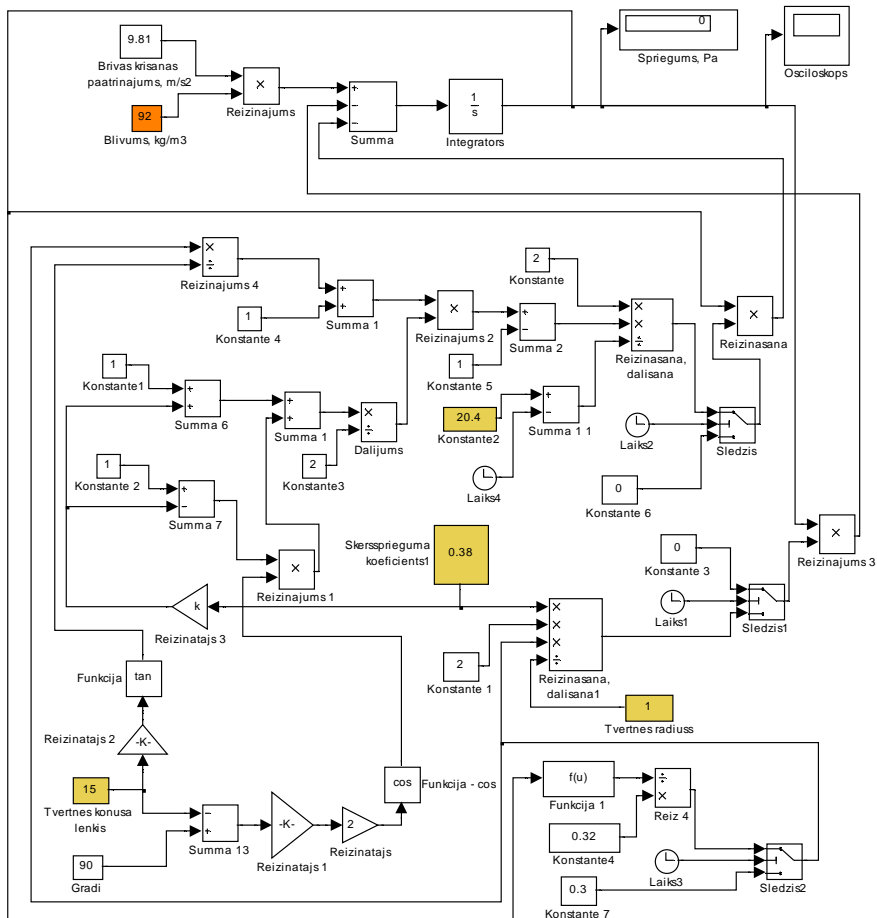
$m$  – parametrs, kas ievērtē piltuves šķērsriezuma formu.

Ievērtējot (1.9) formulā eksperimentāli noteikto berzes koeficientu vērtības izmaiņu atkarībā no sprieguma starp berzes virsmām, iegūstam jaunus koeficienta  $u$  izteiksmes atsevišķi salmiem (1.10) un kūdrai (1.11):

$$u = (m+1) \left[ K \left( 1 + \frac{0.317(\sigma_w)^{-0.075}}{\operatorname{tg}(\Theta)} \right) - 1 \right] \quad (1.10)$$

$$u = (m+1) \left[ K \left( 1 + \frac{-0.219\sigma_w^2 + 0.465\sigma_w + 0.137}{\operatorname{tg}(\Theta)} \right) - 1 \right] \quad (1.11)$$

2. attēlā redzams modelis, kas ievērtē berzes koeficienta izmaiņu. Lai to īstenotu, bija jāizmaina modeļa principiālā darbība, izmainot  $z$  virzienu. Dotais modelis attēlo vertikālo spriegumu masā noteiktā dziļumā. Tas nozīmē, ka, norādot attiecīgās integrācijas robežas ( $z$  vērtības), ar šo modeli var noteikt vertikālo spriegumu arī tvertnes apakšā (pie atveres).

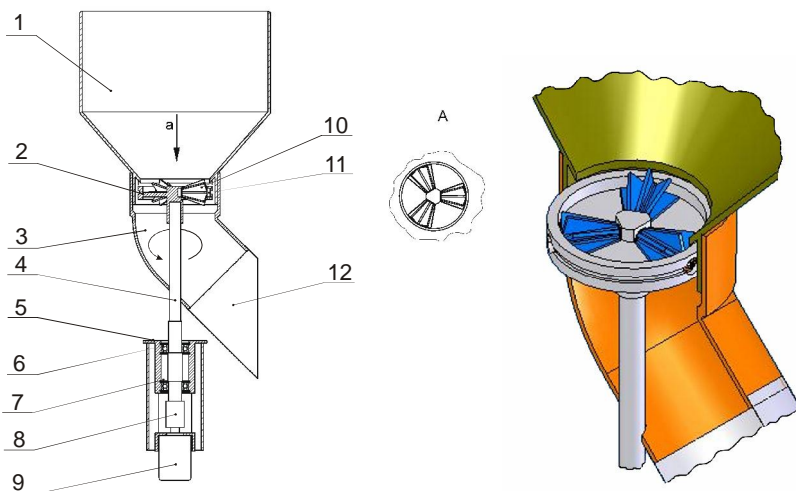


2. att. **Biomases tvertnes matemātiskais modelis, ievērtējot berzes koeficienta izmaiņu atkarībā no sprieguma**

## 1.2. Jaunas konstrukcijas rotoru dozatora izveide

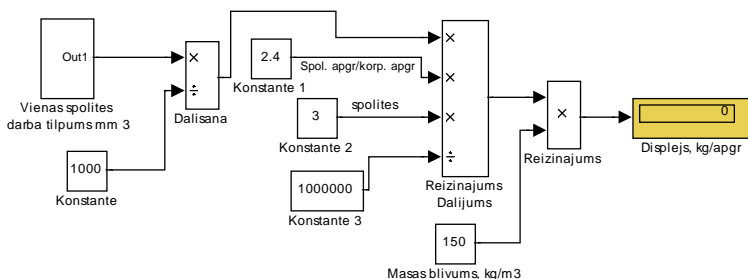
Balstoties uz izvirzīto uzdevumu, tika izprojektēts jauna veida dozators ar paaugstinātu dozēšanas precizitāti (3. att.). Dozators funkcionāli projektēts tā, lai tas patērētu pēc iespējas mazāk enerģijas. Dozatoram rotējot, spolītes veļas pa dozējamo masu, tādējādi tiek novērsta berze starp dozatoru un dozējamo masu. Spolīšu diametrs un konusa leņķis ir saskaņoti tā, lai konusam, veļoties pa materiālu, nenotiktu spolītes izslīdēšana visā tās garumā.

Dozatora rotējošā korpusā radiāli nostiprinātas rotējošas konusveida spolītes (3. att. Patents Nr. 13597, SPK G01F11/10 (26.02.2007.)). Korpusam rotējot ap savu asi, korpusā ievietotās spolītes sāk griezties ap radiāli novietotajām asīm un sektoros iekļuvušais birstošais materiāls tiek izvadīts no tvertnes. Dozatora precizitātes paaugstināšanu nosaka spolīšu sektoru tilpuma samazināšana, aizvietojojot vienu lielu spolīti ar vairākām. Dozatora ražīgumu var regulēt mainot korpusa rotācijas ātrumu, tā izmainot arī spolīšu rotācijas ātrumu.



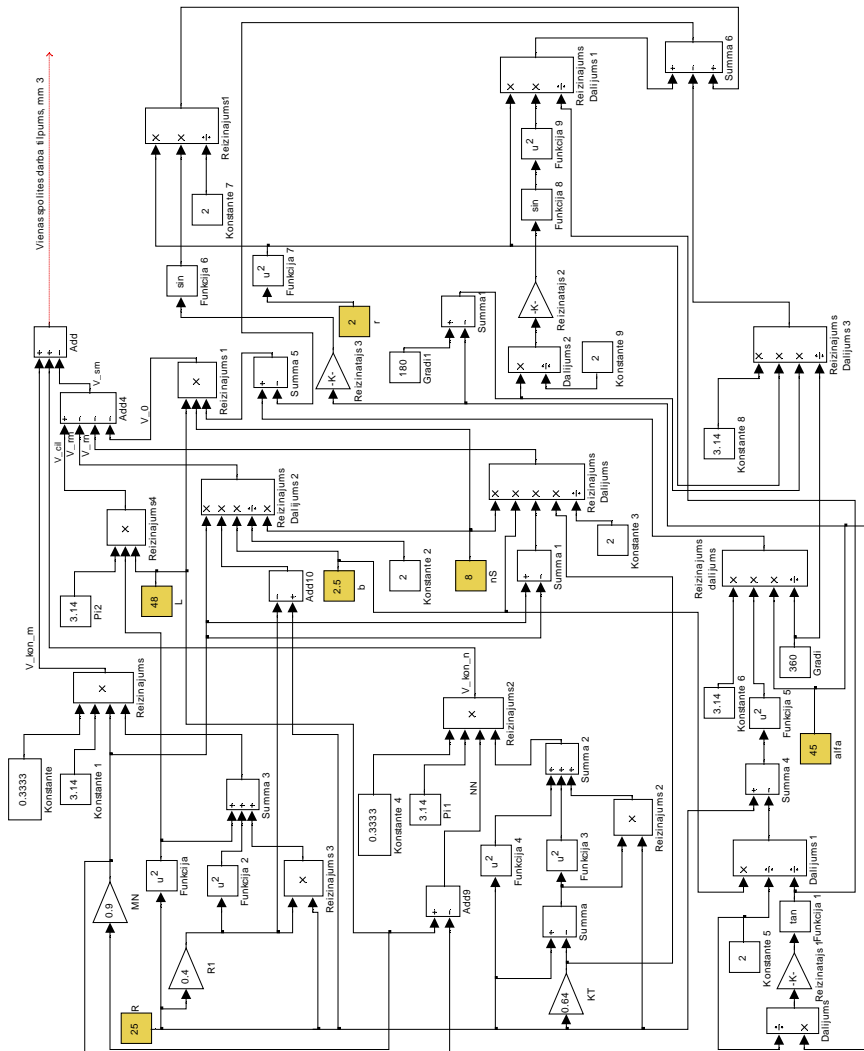
3. att. Rotoru dozators

No dotajām ģeometriskajām sakarībām tika izveidots modelis datorprogrammā *Matlab-Simulink* (5. att.). Tajā, izmainot tādus parametrus, kā spolītes garums, rādiuss, sektora leņķis, sektora sieniņas biezums, sektoru skaits un rievas noapaļojuma rādiuss, var noteikt vienas spolītes darba tilpumu  $\text{mm}^3$ .



4. att. Dozatora ražīguma noteikšana

4. attēlā spolītes ģeometriskais modelis apzīmēts ar izeju 1 (Out 1). Veicot matemātiskus pārveidojumus, iegūstam dotās masas daudzumu kilogramos, ko dozators var teorētiski izdot viena apgrieziena laikā. Ievērtējot dozatora spolīšu piepildīšanās koeficienta izmaiņu atkarībā no rotācijas frekvences doto modeli (4. att.) var izmantot dozatora ražīguma aprēķiniem pie atšķirīgiem spolīšu parametriem.



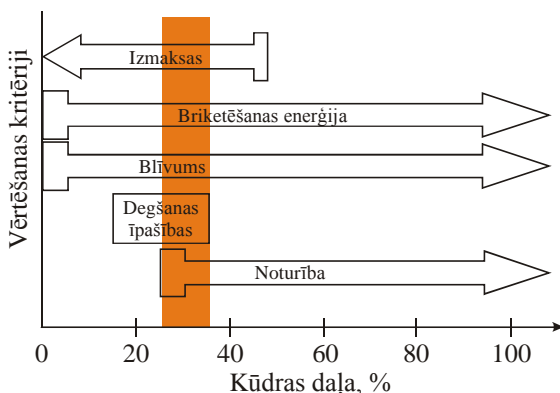
5. att. Spolītes ģeometriskais modelis

### 1.3. Maisījuma kvalitātes novērtējums

Veidojot maisījumus, ir svarīgi zināt, cik homogēns maisījums ir nepieciešams un kāda būs komponentu proporcija. Jo homogēnāks maisījums, jo lielākas izmaksas šī procesa realizācijai. Tāpēc, izvērtējot galaproduktu (granulas, briketes), maisījuma homogenitātes pakāpes un komponentu proporcijas noteikšanai, tika izvirzīti sekojoši kritēriji (6. att.):

- **komponentu izmaksas** – tas nozīmē, ja kāda no komponentēm ir salīdzinoši dārgāka, tad tās pārdozēšana sadārdzinās produkta izmaksas;
- **briketēšanas enerģija** – palielinot komponentes, kuru briketēšanai nepieciešama mazāka enerģija, proporciju maisījumā ietaupītu enerģiju briketēšanas procesā;
- **blīvums** – pie vienādiem briketēšanas apstākļiem, briketējot dažādus biomasas materiālus, iegūsim dažādus blīvumus. Komponentes būtu jāizvēlas tā, lai maisījuma briketes vai granulas blīvums sasniegtu standartos uzrādīto  $1 \text{ g cm}^{-3}$ ;
- **degšanas īpašības** – komponentu proporcijas izmaiņa maisījumā ietekmē arī degšanas īpašības un apkures katlu kalpošanas laiku;
- **noturība** – briķešu un granulu noturības paaugstināšanai pievienotās komponentes proporcijai jābūt pietiekošai, lai tās atbilstu standarta prasībām.

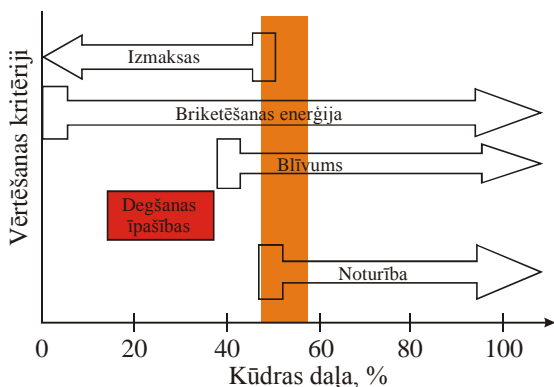
6. attēlā attēloti niedru un kūdras maisījuma proporcijas un maisījuma homogenitātes kritēriji. Pašreiz ir grūti spriest par niedru ieguves izmaksām salīdzinot ar kūdras izmaksām  $10 \text{ Ls t}^{-1}$ . Taču ņemot vērā, ka, atšķirībā no kūdras, niedru sadedzināšanas procesā izdalītais  $\text{CO}_2$  netiek uzskatīts par siltumnīcas efektu radošo gāzi, jo augs sadegot izdala to  $\text{CO}_2$ , ko augšanas procesā uzņēmis, tad ieteicams kūdras daļu tomēr samazināt.



6. att. Maisījuma proporcijas un homogenitātes pakāpes kritēriji niedru-kūdras maisījumam

No briketēšanas enerģijas viedokļa, kūdras daļa maisījumā jāpalielina, jo tad samazinās briketēšanai nepieciešamā enerģija [4]. Arī brikešu blīvums, pievienojot kūdru, tikai pieaug. Sadedzinot stiebraugu biomasu ieteicams pievienot kūdru (15 – 35%), lai novērstu apkures katlu koroziju. Lai niedru briketēm nodrošinātu noturību, kāda tā ir kokskaidu briketēm, jāpievieno ap 30% kūdras.

Izanalizējot iegūto attēlu redzam, ka pašreiz ir divi limitējošie faktori: brikešu noturība un degšanas īpašības. Secinājums no šī attēla ir, ka kūdras daļai niedru-kūdras maisījumā vajadzētu būt ap  $30 \pm 5\%$ .



### 7. att. Maisījuma proporcijas un homogenitātes pakāpes kritēriji salmu-kūdras maisījumam

Apskatot 7. attēlu, salmu un kūdras maisījuma proporcijas un maisījuma homogenitātes kritēriji, var secināt, ka salmu briketēm kūdras proporcijai jāsasniedz  $50 \pm 5\%$ . Tik liela kūdras daļa nepieciešama, lai varētu nodrošināt brikešu noturību. Ja rūpnieciski izgatavojot briketes secinātu, ka briketēm ar mazāku kūdras daļu ir pietiekoša noturība, to (kūdras daļu) varētu samazināt. Noturības izmaiņas ir iespējamās, jo atšķirīgos brikešu presēšanas procesos notiek dažādas maisījuma fizikāli mehānisko īpašību izmaiņas.

7. attēlā redzams, ka oranžais laukums neskar degšanas īpašību aizņemto diapazonu. No pirmajā nodaļā veiktā literatūras apskata var secināt, ka degšanas īpašības maisījumam ar lielāku kūdras daļu nepasliktinās. Tāpēc pašreizējā situācijā rekomendējamā kūdras daļa salmu-kūdras maisījumiem būtu 50%.

**Maisījuma homogenitātes un proporcijas novērtējumu var veikt pēc dažādiem parametriem, piemēram:**

- maisījuma blīvums;
- brikešu noturība;
- komponentu proporcija noteiktā tilpuma vienībā;
- vizuālais novērtējums.

## Attēlu analīze

Datorprogrammā *Matlab* izveidota komandu rinda, ar kuras palīdzību attēlu var ievadīt dotajā programmā un pārvērst programmai saprotamā valodā. Attēli tika pārveidoti melnbaltā formātā, tas nozīmē, ka katrs pikselis pieņem vienu no divām vērtībām vai nu 1 vai 0. Attēlu apzīmēšanai tiek ieviests turpmāk izmantots binārā attēla apzīmējums *bw*. Nosakot salmu-kūdras maisījumu kvalitāti, salmu daļiņas tiek pārveidotas par baltām un pieņem vērtību 1, bet kūdras daļiņas – par melnām, pieņem vērtību 0 un ir saprotams kā fons.

Attāluma pārveidošana starppunktu attālumu mērīšanu attēlā. Attēla apstrādes rīki (**Image Processing Toolbox**) ar funkcijas *bwdist* palīdzību dod iespēju aprēķināt attālumu starp katru pikseli (pixel) un citu tuvāko pikseli, kas atšķiras no 0 bināros attēlos. Funkcija *bwdist* atbalsta dažādas attālumu mērīšanas metodes. Euclidean metode tiek piedāvāta, kā noklusētā (ieteicamā) attāluma pārveidojuma metode, taču iespējams pielietot arī citas.

*Matlab* programma ar funkcijas  $y = \text{std}(D1)$  aprēķina standartnovirzi par skaitļu rindu pārveidotajiem attālumiem. Standartnovirzes tiek aprēķinātas katrai attēla pikseļu kolonai atsevišķi. Lai noskaidrotu kopējo attēla stāvokli (maisījuma kvalitāti), tika aprēķināta standartnoviržu vidējā vērtība.

Ar *Matlab* programmas palīdzību tika noteikts salmu daļiņu aizņemtais laukums pikseļos. Izdalot to ar kopējo attēla pikseļu skaitu, tika iegūta salmu proporcija maisījumā, kas pēc tam tika salīdzināta ar teorētisko maisījuma komponentu proporciju un iegūta to standartnovirze  $S$ .

Standartnovirze nepieciešama, lai noteiktu samaisīšanas pakāpi, kas bāzēta uz Roses formulu:

$$M = 1 - \frac{S}{S_0}, \quad (1.12)$$

kur

$$S_0 = \sqrt{p_T(1 - p_T)}, \quad (1.13)$$

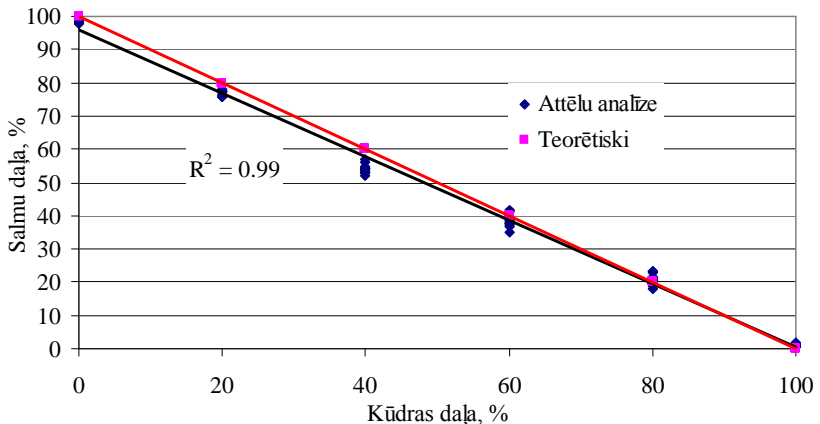
kur  $p_T$  – teorētiski iegūstama laukumu attiecība.

Lai noteiktu salmu-kūdras maisījuma piemērotību augstāk aprakstītai maisījuma kvalitātes izvērtēšanas sistēmai, tika izveidoti seši dažādi salmu un kūdras maisījumi: tikai salmi, 80% salmi un 20% kūdra, 60% salmi un 40% kūdra, 40% salmi un 60% kūdra, 20% salmi un 80% kūdra un tikai kūdra. Komponentu daļiņu lielums bija 1 – 2 mm, maisījuma mitruma sastāvs 12%. Komponentes tika maisītas, līdz daļiņas bija vienmērīgi izkliedētas visā tilpumā (homogēns maisījums).

Salmu (1 – 2 mm) un kūdras (1 – 2 mm) maisījumu attēlu analīzes rezultāti ir ļoti tuvi teorētiski iegūtajiem. Lielāka neprecizitāte novērojama diagrammas sākumā un beigās (100% salmi, 100% kūdra), bet taišņu vidusdaļas praktiski sakrīt. Šī tendence ir saistīta ar krāsu transformāciju: pārvēršot tīru salmu attēlu uz

melnbaltu, tas nebija 100% balts, tāpat arī ar kūdru (nebija 100% melns). Teorētiskās un attēlu analīzes vidējo vērtību atšķirība ir aptuveni 7%.

Krāsu transformācijas ieviesto kļūdu praktiski var novērst ar matemātisku pārveidošanu (8. att.). Šajā gadījumā rezultātu standartnovirze no teorētiskā vidējā nepārsniedz 5%, bet vidējās vērtības (teorētiskās un attēlu analīzes) praktiski sakrīt. Biomases materiāliem, kur maisījuma homogenitāte ir atkarīga no daudziem parametriem (daļiņu lieluma, daļiņu lieluma izkliedes, daļiņu lielumu attiecības komponentēm un citām birstošo materiālu īpašībām), standartnovirze 5% ir pieņemams rādītājs. Lielu ietekmi uz datu precizitāti atstāj daļiņu orientācija. Ja daļiņas ir tievas un garas, tad sānu virsmas laukums ievērojami pārsniedz gala virsmas laukumu.

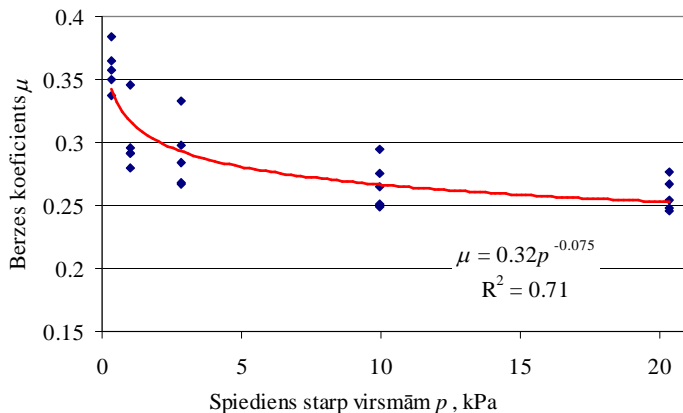


8. att. **Matemātiski pārveidoto un teorētisko attēlu analīzes datu salīdzināšana** [8]

## 2. Eksperimentālie pētījumi

### 2.1. Berzes koeficients

9. attēlā parādīta sakarība starp statisko berzes koeficientu un spriegumu starp berzes virsmām (eksperimentā tika izmantoti smalcināti salmi 2 – 3 mm un cinkota skārda plāksne). Mainot spriegumus starp virsmām mēs iegūstam būtisku atšķirību pie zemiem un augstiem spriegumiem. Spriegumam paaugstinoties, berzes koeficients starp salmu daļiņām un cinkotā skārda plāksni samazinās. Mainot normālspriegumu no 0,3 līdz 20 kPa tika iegūtas statistiskā berzes koeficienta vērtības no 0,25 līdz 0,35. Testa ātrums 2 mm min<sup>-1</sup> un virsmu pārbīdes garums 10 mm. Mērījumu precizitāte ir ±0.018 (ticamība 95%).



9. att. Smalcinātu salmu (2 – 3 mm) un cinkota skārda statistiskais berzes koeficients

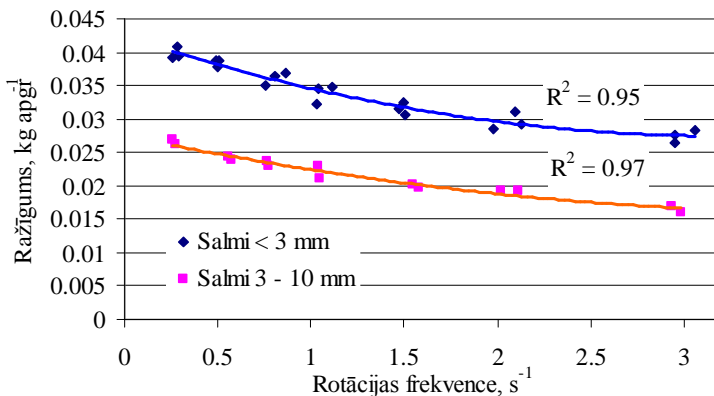
## 2.2. Dozatoru parametri

### 2.2.1. Trumuļa dozators

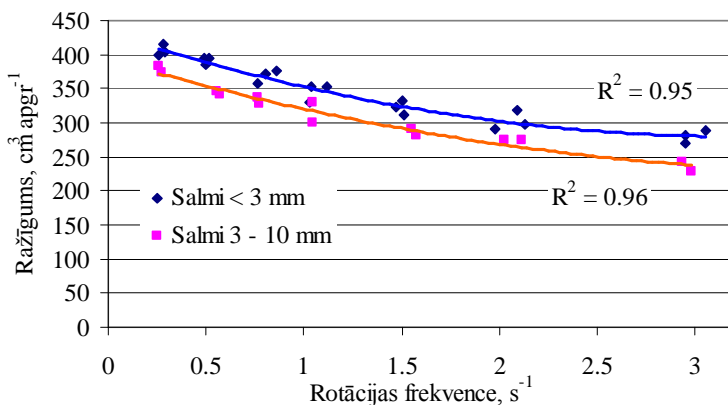
Attēlā 10. varam novērot, ka īpatnējais ražīgums ir atkarīgs no trumuļa griešanās frekvences. Pieaugot frekvencei no 0.25 līdz 3 s<sup>-1</sup>, īpatnējais ražīgums samazinās par 0.01 kg apgr<sup>-1</sup>. Novērotā tendence attiecas gan uz salmiem līdz 3 mm, gan 3 – 10 mm. Dozējot salmus ar izmēriem no 3 – 10 mm, īpatnējais ražīgums ir ievērojami zemāks nekā salmiem līdz 3 mm. Tas saistīts ar to dažādo blīvumu, jo, salīdzinot sadozētās tilpuma vienības uz vienu apgriezieni (11. att.), redzam, ka atšķirība ir samazinājusies no 40 uz 7%.

Īpatnējā ražīguma samazināšanos (10. un 11. att.) izraisa masas vertikālais spriegums, kas samazinās, jo rotācijas ātrumam pieaugot no tvertnes tiek izpludināts aizvien lielāks materiāla tilpums, taču jauns materiāls no tvertnes augšējiem slāņiem pieplūst nepietiekami ātri, lai radītu masas spriegumu uz dozatoru, kāds darbojas pie mazas rotācijas frekvences.

Relatīvā dozēšanas konstante dozēšanas procesā svārstās no 3 līdz 11%. Relatīvās dozēšanas konstantes izmaiņu, jeb dozēšanas vienmērīgumu, ietekmē dozējamā masa: smalcināti salmi atšķiras pēc to izmēriem un var dažādāk noorientēties uz dozatora, izraisot plūsmas intensitātes maiņu. Plūsmas nevienmērīgumu izraisa arī mainīgais spriegums, masai pieplūstot pie rotējošā dozatora.

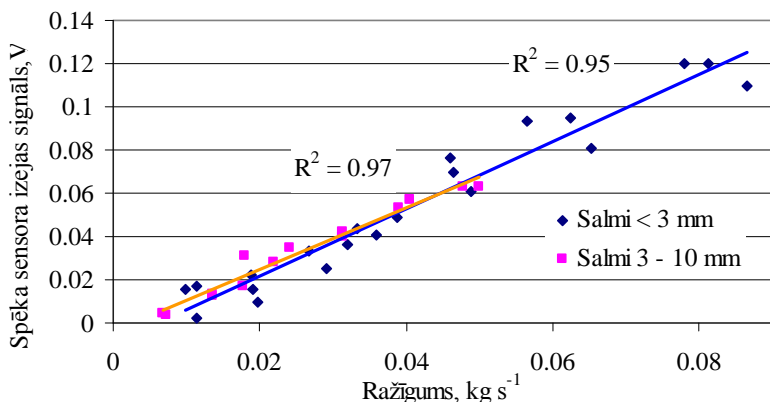


10. att. Īpatnējais ražīgums atkarībā no trumuļa griešanās frekvences [9]



11. att. Īpatnējais ražīgums atkarībā no trumuļa griešanās frekvences [9]

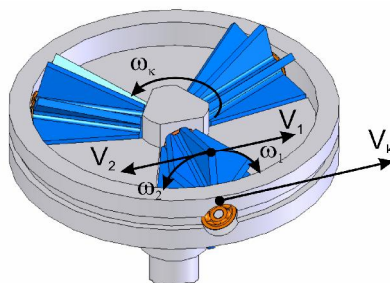
Plūsmas izmaiņas tika noteiktas ar spēka sensora palīdzību. Masai atsitoties pret spēka sensora plāksni tika izmantīts sensora izejas spriegums. Pēc 12. attēla varam secināt, ka sensora rādījumus neietekmē daļiņu lielums, jo abām daļiņu lielumu grupām rādījumi ir līdzīgi un taisnes praktiski sakrīt. Tas nozīmē, ka šāda veida sensori var tikt izmantoti smalcinātu salmu dozēšanas procesa kontrolei.



12. att. Spēka sensora vidējo rādījumu atbilstība ražīgumam [9]

### 2.2.2. Rotoru dozators

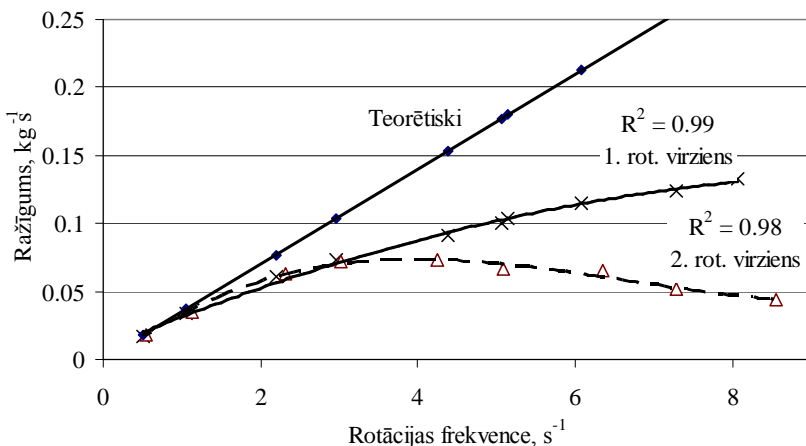
Kā redzams no 14. attēla rotoru dozatora (13. att.) ražīgums ir atkarīgs no rotoru griešanās virziena un ātruma. Spolīšu griešanās virzienu nosaka to piedziņas novietojums (virs vai zem spolītēm). Pieaugot spolīšu rotācijas ātrumam, samazinās to piepildīšanās koeficients un pieaug atšķirība no teorētiskā ražīguma (14. att.). Ja spolīšu piedziņa ir izvietota zem spolītēm, tad spolīšu darbīgo daļu virsmas lineārais ātrums  $V_1$  ir vērsts dozatora korpusa ātruma  $V_k$  virzienā (1. rotācijas virziens) – spolīte ar savām ribiņām ietver sevī materiālu. Novietojot spolīšu piedziņu augšpusē, spolīšu darbīgo daļu virsmas lineārais ātrums  $V_2$  ir vērsts pretēji dozatora korpusa ātruma virzienam (2. rotācijas virziens) – spolītes veļas pa dozējamo materiālu. Īpatnējais ražīgums augstāks ir pirmajā gadījumā, jo virs dozatora atrodošais materiāls rada papildus spriegumu spolīšu piepildīšanās virzienā. Ja spolītes veļas 2. virzienā, birstošais materiāls (kūdra) rada spriegumu vertikālā virzienā, palīdzot materiālam iespieties spolītes sektoros, taču spolītei, turpinot velties uz materiāla daļiņām, iedarbojas centrālās spēki, kas cenšas izgrūst daļiņas no spolītes sektoriem.



13. att. Spolīšu rotācijas virzieni [10]

Ražīgums, atkarībā no griešanās virziena, rotācijas frekvencei sasniedzot  $8 \text{ s}^{-1}$ , atšķiras aptuveni 3 reizes (14. att.). Ražīgums nav atkarīgs no griešanās

virziena, ja rotācijas frekvence ir 0.5 to 3 s<sup>-1</sup>. Ja pietiek ar dozatora ražīgumu, kas atbilst rotācijas frekvencei 3 s<sup>-1</sup>, tad ieteicamāks ir 2. rotācijas virziens, jo šajā virzienā rotējot, dozators patērē mazāk enerģijas.



14. att. **Rotoru dozatora ražīgums** [10]

Relatīvā dozēšanas konstante dozēšanas procesā ir ~5%.

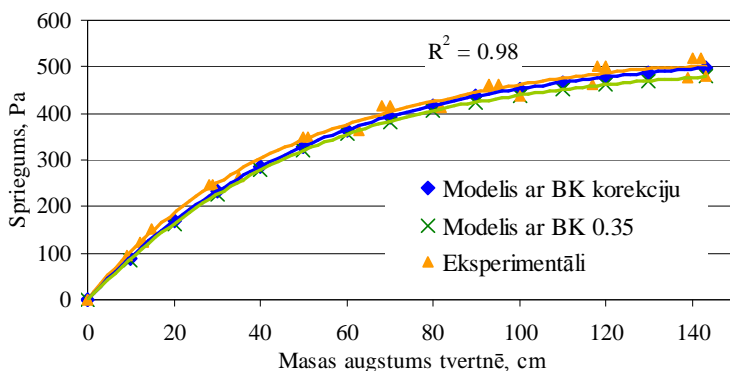
Dozēšanas vienmērīgums ietekmē maisītāja izmērus un veidu. Neliela izmēra maisītājam, ar nelielu masas uzturēšanās laiku tajā un ierobežotu aksiālo samaisīšanos, nepieciešama augsta dozēšanas precizitāte pat lielā laika periodā.

Smalcinātu stiebraugu dozēšanai piemērots ir trumuļa dozators. Tam ir pietiekoša dozēšanas precizitāte (relatīvā dozēšanas konstante svārstās no 3 – 11% dozējot līdz 10 mm garus salmus un 3 – 7% dozējot kūdru), un ar attiecīga izmēra trumuļi var sasniegt nepieciešamo ražīgumu. Ražīgumu var izmainīt, izmainot trumuļa virsmas profilu un tā parametrus. Dozatora atverē sasmalcināto stiebru daļiņas no dozatora iznāk 3 – 7 mm kārtiņā visā trumuļa platumā. Situācijā, kad plūsmā jāsamaisa divas komponentes, šāds dozēšanas veids var būt piemērots, jo, sapludinot masas kārtiņas no diviem dozatoriem, var panākt komponentu samaisīšanos. Ja komponentes ir pietiekoši samaisījušās, maisītājs nav nepieciešams, ja maisījums nav pietiekoši homogēns, tad var izmantot maisītāju, kas ar nelielu enerģijas patēriņu nodrošina komponentu papildus samaisīšanos.

Radiāli izvietoto rotoru dozators ir precīzāks, salīdzinot ar trumuļa dozatoru (dozēšanas konstante ≈ 5% dozējot kūdru). Taču rotoru dozators dotajā izpildījumā nav piemērots smalcinātu stiebraugu dozēšanai. Rotoru dozators ir piemērotāks smalku, labi plūstošu materiālu dozēšanai. Šāda veida dozators iesakāms, ja briketējamam sastāvam nepieciešams pievienot kādu piedevu, nelielā apjomā.

### 2.3. Glabāšanas tvertnes dinamiskā modeļa eksperimentālais novērtējums

15. attēlā parādītas teorētiski (no modelēšanas) un eksperimentāli iegūtās vertikālo spriegumu līknes atkarībā no birstošā materiāla (smalcināti salmi) augstuma tvertnē (ar cilindrisko un konisko daļu). Tā kā dotajā gadījumā modelēšanai ar konstanto berzes koeficientu tika izvēlētas vidējam vertikālam spriegumam atbilstošās berzes koeficienta vērtības, tad modeļu izrēķinātie spriegumi praktiski neatšķiras. Taču modelis ar automātisko berzes korekciju ir ieteicamāks, jo neveicot eksperimentus, iepriekš nebūs zināmas maksimālās spriegumu vērtības, un nepareizi izvēlēts berzes koeficients ieviesīs kļūdu vertikālo spriegumu noteikšanā.



#### 15. att. Vertikālā sprieguma noteikšana ar smalcinātiem salmiem piepildītā tvertnē (cilindriska tvertne ar konisku piltuvi)

Kūdras radītais vertikālais spriegums, pie vieniem un tiem pašiem apstākļiem, ir 1.5 reizes augstāks nekā salmiem. To var izskaidrot ar kūdras salīdzinoši augstāko blīvumu  $140 \text{ kg m}^{-3}$ .

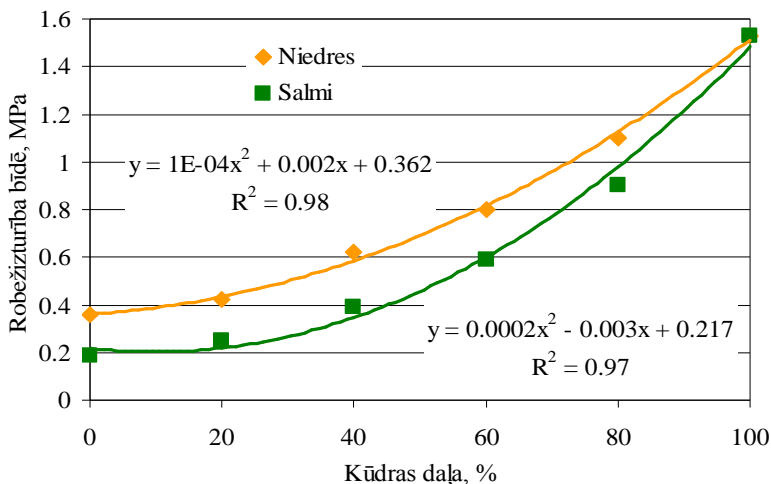
Masai sasniedzot augstumu tvertnē, kas ir vienāds ar apmēram 4 tvertnes diametriem, masas augstums vairs neietekmē vertikālā sprieguma  $\sigma_v$  lielumu – tas paliek konstants (15. att.). Maksimālais vertikālais spriegums mainās atkarībā no tvertnes diametra, jo lielāks diametrs, jo lielāks vertikālais spriegums. Tvertnei ar diametru 0,26 m maksimālais vertikālais spriegums glabājot smalcinātus salmus sasniedz 0.5 kPa, bet tvertnei ar diametru 1 m vertikālais spriegums sasniedz 1.8 kPa. Tas nozīmē, ka mazāka diametra tvertnēm zemāk nekā liela diametra tvertnēm sienu berze pilnībā līdzsvaro pienākošās masas radītos vertikālos spriegumus (tvertnes apakšā spriegums paliek konstants). Tāpēc tvertnes parasti veido ar mazāku diametru un augstas.

Modelējot tvertni ar diametru 1 m, būtiski pieauga atšķirība starp vertikālo spriegumu vērtībām ar automātiski koriģēto berzes koeficientu un konstanto berzes

koeficientu (0.32). Masai, sasniedzot augstumu 10 m, atšķirība starp modeļiem pieaug pat līdz 10%. Tvertnē palielinājies tilpums, kurā darbojas salīdzinoši augstāki spriegumi, līdz ar to berzes koeficienta vidējā vērtība (ja berzes koeficients tiek automātiski koriģēts) samazinās. Blīvākiem materiāliem vertikālo spriegumu atšķirība, izvēloties neprecīzi berzes koeficienta vērtību, ir ievērojamāka, tā var pārsniegt 30%. Tāpēc prognozējot iespējamo spiediena diapazonu tvertnē, ieteicams eksperimentāli noteikt berzes koeficienta vērtības atkarībā no sprieguma, un modeļi ievietot sakarības, kas automātiski izdod atbilstošās berzes koeficienta vērtības.

## 2.4. Briekšu noturības eksperimentālā noteikšana

16. attēlā ir salīdzinātas dažādu smalkumu salmu briketes, to robežizturības izmaiņa atkarībā no pievienotās kūdras daudzuma. Smalcinātu salmu briekšu robežizturība nav atkarīga no salmu smalkuma pakāpes, ja daļiņu garums ir no 0.5 līdz 3 mm, bet, pievienojot kūdru (3 mm), salmu briekšu robežizturība bīdē (perpendikulāri briketēšanas virzienam) ievērojami pieaug, t.i., no 0,2 (tūriem salmiem) līdz 1,55 MPa (kūdrai). Tā kā Latvijā ik gadus tiek iegūts ap 500 000 tonnu kūdras, tad kūdras pievienošana salmu briketēm varētu būt labs paņēmieni, kā uzlabot salmu briekšu un granulu noturību, kā arī kurināmā degšanas īpašības.

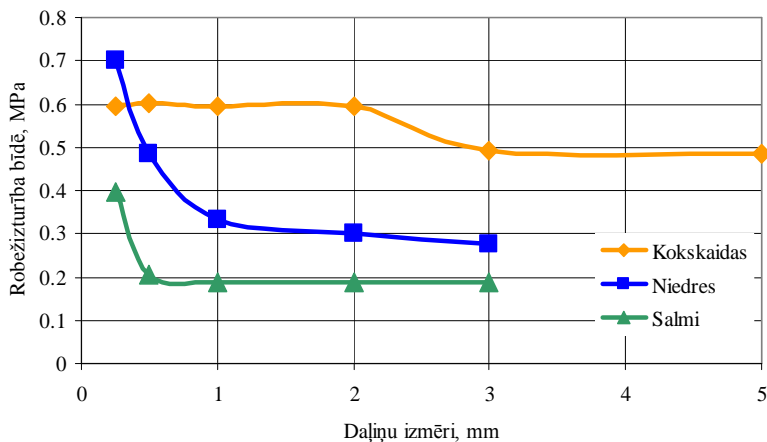


16. att. Niedru un salmu briekšu bīdes robežizturība atkarībā no kūdras daļas [11]

Smalcinātu niedru daļiņu (1 – 2 mm) briekšu robežizturība bīdē ir ~0.35 MPa (16. att.), tā ir aptuveni divas reizes augstāka kā salmu briketēm. 16. attēlā varam redzēt arī niedru briekšu robežizturības izmaiņu atkarībā no pievienotās

kūdras daudzuma. Pievienojot niedru briketēm 30% kūdras, to robežizturība bīdē sasniedz tādu pašu vērtību, kāda ir kokskaidu briketēm (daļiņu lielums 3 – 5 mm).

Tā kā kokskaidu briketes un granulas tiek sekmīgi izgatavotas, tad to mehānisko īpašību skaitliskās vērtības var tikt izmantotas citu brikešu salīdzināšanai. Atsevišķu valstu standartos noteiktais brikešu blīvums ir lielāks par  $1.0 \text{ g cm}^{-3}$ . Niedru briketes (no 1 – 2 mm daļiņām) šādu blīvumu pie dotajiem briketēšanas apstākļiem sasniedz bez kūdras pievienošanas. Brikešu robežizturība palielinās, pieaugot brikešu blīvumam [4].

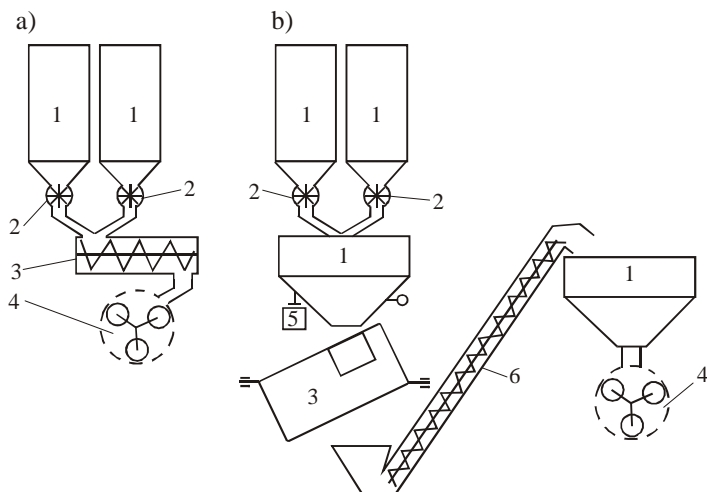


17. att. Daļiņu izmēra ietekme uz briketes robežizturību bīdē [11]

Palielinoties daļiņu lielumam kokskaidu briketēs, to robežizturība bīdē samazinās. Kokskaidu briketēm ar daļiņu lielumu  $> 2 \text{ mm}$  robežspriegums bīdē sasniedz  $0.6 \text{ MPa}$  (17. att.). Niedru briketes šādu robežspriegumu var sasniegt, ja to daļiņas ir mazākas par  $0.5 \text{ mm}$ . Robežspriegumu  $0.6 \text{ MPa}$  salmu briketes sasniedz, ja tām pievieno  $\sim 60\%$  kūdras. Nepieciešamo blīvumu  $> 1.0 \text{ g cm}^{-3}$  salmu briketes sasniedz, ja tām pievieno  $35\%$  kūdras [4]. Tieši šāds kūdras daudzums ( $35\%$ ) tiek rekomendēts pievienot dažādam biomasas kurināmajam, lai uzlabotu to degšanas īpašības.

### 3. Ekonomiskais novērtējums

Tehnikas izmaksu aprēķinam tiek izmantota Rietumeiropā pieņemtā tehnoloģisko procesu ekonomiskās novērtēšanas metodika [7], ievērtējot gan patērēto degvielu, tehnikas cenu, renovācijas izmaksas, darba algu apkalpojošam personālam, remonta izmaksas, bankas kredītaizņēmuma procentus un daudzus citus svarīgus rādītājus.

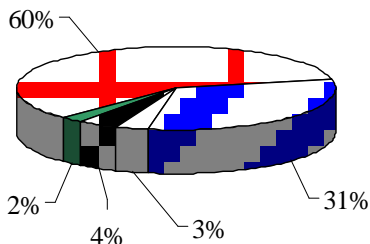


18. att. **Nepārtraukta (a) un cikliska (b) maisīšanas tehnoloģiskā procesa salīdzinājums**

1 – tvertne; 2 – dozators; 3 – maisītājs; 4 – granulators;  
5 – spēka sensors; 6 – transportieris.

Granulu ražošanas procesā, pēc 18. attēlā parādītās shēmas, vienu no lielākajām izmaksu daļām sastāda granulēšana (19. un 20. att.). Granulēšanas procesam ar nepārtrauktas darbības maisīšanu granulēšanas izmaksas sastāda 60%, bet ar cikliskas darbības maisītāju aptuveni 56%. Līdzīgas izmaksas ir arī darbaspēka algošanai, atkarībā no procesa tās sastāda 29 - 30% no kopējām izmaksām. Kopējās izmaksas briketēšanas procesam ir par aptuveni 6% mazākas,

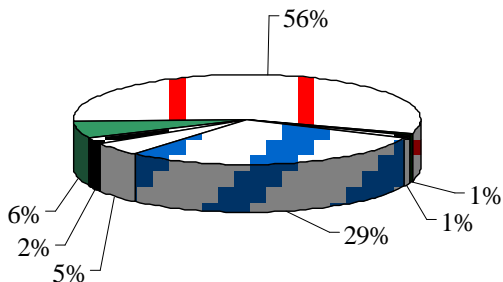
□ Tvertne      □ Dozators      ■ Maisītājs  
□ Granulators      ■ Darbaspēks



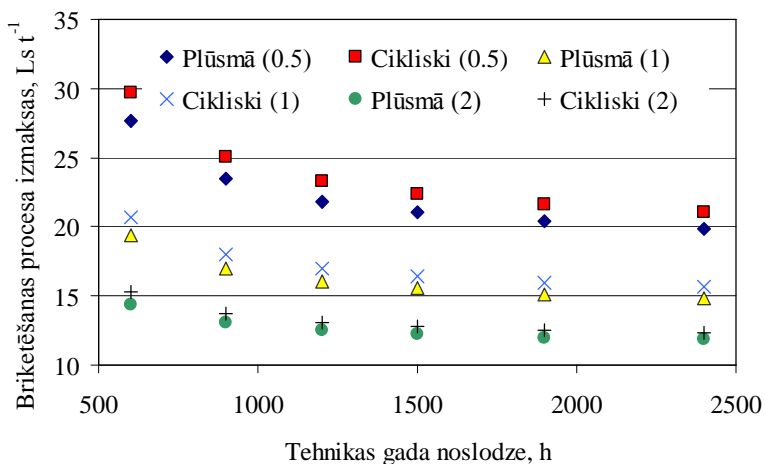
19. att. **Briketēšanas procesa izmaksu procentuālās sastāvs (ar maisīšanu plūsmā)**

ja tajā lietots nepārtrauktas darbības maisītājs (21. att.). Briketēšanas izmaksas samazinās, izmantojot augstāzīgākas iekārtas, piemēram, salīdzinot iekārtas ar ražīgumu 0.5 un 2 t h<sup>-1</sup>, izmaksas samazinās par 40%. Briketēšanas procesa izmaksas samazinās aptuveni par 30%, ja izstrādes stundas palielinās no 600 uz 2400. Briketēšanas vai granulēšanas procesu sadārdzina augstā iekārtu cena.

- Tvertne
- Dozators
- Maisītājs
- Granulators
- Sistēma svara noteikšanai
- Transportieris
- Darbaspēks

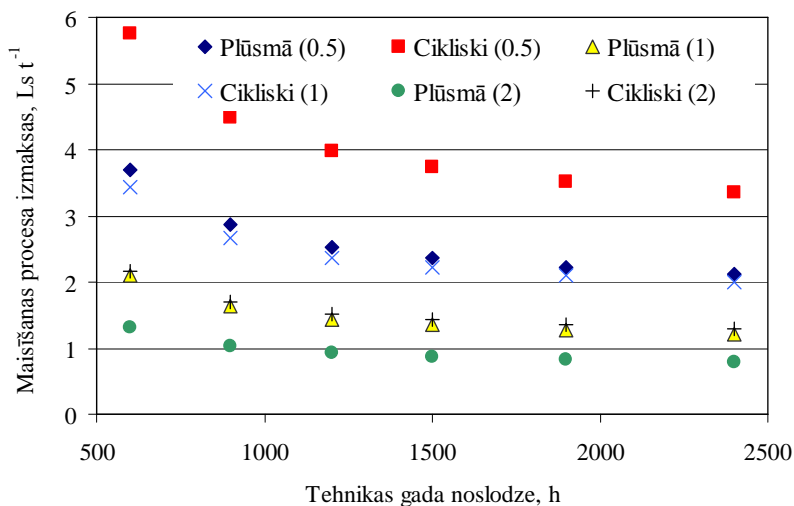


20. att. Briketēšanas procesa izmaksu procentuālas sastāvs (ar ciklisku maisīšanu)



21. att. Vienas tonnas masas briketēšanas procesa izmaksas (ieskaitot maisīšanu un dozēšanu)

Neņemot vērā briketēšanu un darbaspēka izmaksas, nepārtrauktas darbības maisīšanas procesa izmaksas ir par 38 % zemākas kā cikliskas darbības maisīšanai (22. att.). Nepārtrauktas darbības maisīšanas procesā salīdzinoši lielākas izmaksas sastāda dozēšana, jo nepieciešama augstāka dozēšanas precizitāte. Līdz ar to, arī iekārtas izmaksas ir augstākas. Taču lielāka ekonomija ir uz maisīšanas procesu, jo nepārtrauktas darbības maisītāja piedziņai nepieciešama mazāka elektroenerģijas jauda, kā arī pats maisītājs izmaksā mazāk, jo ir vienkāršāks pēc konstrukcijas un mazāks pēc izmēriem. Saskaņojot dozatoru, maisītāja un briketētāja ražīgumus, nav nepieciešamas tvertnes masas uzglabāšanai starp procesiem, kas arī samazina procesa izmaksas.



22. att. Vienas tonnas masas maisīšanas izmaksas

### Secinājumi un ieteikumi ražošanai

1. Tehnoloģisko iekārtu projektēšanai nepieciešamie raksturotāji ir statistiskais un dinamiskais berzes koeficients, kā arī šķērsprieguma koeficients:
  - smalcinātu salmu statistiskais berzes koeficients ir atkarīgs no normālsprieguma, ja šis spriegums ir 0.3 kPa, tad berzes koeficienta vērtība uz cinkota skārda virsmas ir 0.35, bet, ja spriegums ir 20 kPa – 0.25;
  - dinamiskais berzes koeficients ir atkarīgs no spiediena un ātruma starp berzes virsmām. Smalcinātiem salmiem uz cinkota skārda virsmas maksimālā dinamiskā berzes koeficienta vērtība (0.38) tiek sasniegta pie

- eksperimentos izmantotā minimālā spiediena 0.3 kPa un maksimālā ātruma  $800 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , bet minimālā vērtība (0.22) pie maksimālā spiediena 20 kPa un minimālā ātruma  $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ;
- eksperimentāli iegūtais šķērssprieguma koeficients salmu daļiņām ir atkarīgs no daļiņu lieluma, un tā vērtība mainās no 0.45 (daļiņām ar izmēru 0.25 mm) līdz 0.3 (daļiņām ar izmēru 7 mm);
  - šķērssprieguma koeficients kūdrai izmainās no 0.47 (daļiņām, kas mazākas par 0.5 mm) līdz 0.4 (daļiņām ar izmēru 5 mm).
2. Novērtējot biomasas brikešu noturību atkarībā no biomasas daļiņu izmēriem un maisījuma sastāva secinām, ka:
    - kokskaidu brikešu, ar daļiņu lielumu  $< 2 \text{ mm}$ , robežspriegums bīdē ir  $> 0.6 \text{ MPa}$ . Niedru briketes šādu robežizturību sasniedz, ja to daļiņu lielums ir  $< 0.5 \text{ mm}$ , bet rupjāka smalcinājuma niedrēm (līdz 3mm) piejaucot  $\approx 30\%$  kūdras, salmu briketes šo vērtību sasniedz, ja tām pievieno  $\approx 60\%$  kūdras;
    - salmu brikešu robežizturība ir  $\approx 0.2 \text{ MPa}$ , ja daļiņu lielums ir no 0.5 – 3mm, bet izmantojot smalkākas salmu daļiņas ( $< 0.5 \text{ mm}$ ) robežizturība pieaug līdz 0.4MPa;
    - pievienojot salmiem kūdru, brikešu robežizturība bīdē pieaug no 0.2MPa (kūdra 0%) līdz 1.55MPa (kūdra 100%).
  3. Pievienojot salmu briketēm 40% kūdras, to blīvums pārsniedz cietā kurināmā standartos noteikto minimālo blīvumu  $1.0 \text{ g cm}^{-3}$ .
  4. Izmantojot attēla analīzi, kūdras un salmu maisījuma homogenitātes noteikšanai pēc komponentu aizņemtajiem laukumiem, standartnovirze nepārsniedz 5%, tāpēc šī metode rekomendējama salmu – kūdras un niedru – kūdras maisījumu homogenitātes noteikšanai.
  5. Glabāšanas tvertnes matemātiskais modelis *Matlab-Simulink* programmatūrā rekomendējams vertikālā sprieguma noteikšanai glabāšanas tvertnes atverē nosakot spriegumu uz tvertnē iemontētu dozatoru un aprēķinot dozatora darbināšanai nepieciešamo griezes momentu.
  6. Rotoru dozatora dozēšanas konstante ir 5% dozējot kūdru ar daļiņu lielumu  $< 3 \text{ mm}$ .
  7. Izmainot rotoru dozatora spoļišu rotācijas virzienu, dozatora raksturīgāne rotācijas frekvenču diapazonā no 0.5 līdz  $3 \text{ s}^{-1}$  nemainās, bet, pieaugot rotācijas ātrumam līdz  $8 \text{ s}^{-1}$ , dozatora ražīgums 1. rotācijas virzienam ir 3 reizes lielāks kā 2.
  8. Smalcinātu stiebraugu dozēšanai piemērots ir trumuļa dozators. Tā relatīvā dozēšanas konstante svārstās no 3 – 11% dozējot līdz 10 mm garus salmus un 3 – 7% dozējot kūdru.
  9. Dozējot ar trumuļa dozatoru stiebru daļiņas no dozatora iznāk 3 – 7 mm kārtiņā visā trumuļa platumā, sapludinot masas kārtiņas no diviem dozatoriem, var panākt komponentu samaisīšanos bez maisītāja.

10. Nepārtrauktas darbības maisīšanas procesa mašīnizmaksas ir par 38 % zemākas kā cikliskas darbības maisīšanai.
11. Granulu ražošanas procesam, ar nepārtrauktas darbības maisīšanu, granulēšanas mašīnizmaksas sastāda 60% no kopējām ekspluatācijas izmaksām, bet ar cikliskas darbības maisītāju – 56%. Līdzīgas izmaksas ir arī darbaspēka algošanai, atkarībā no procesa tās sastāda 29 – 30% no kopējām ekspluatācijas izmaksām.
12. Kopējās ekspluatācijas izmaksas briketēšanas procesam, lietojot nepārtrauktas darbības maisītāju, ir aptuveni 6% mazākas nekā izmantojot cikliskas darbības maisītāju.
13. Ņemot vērā komponentu izmaksas, briketēšanas enerģiju, brikešu blīvumu, degšanas īpašības un brikešu noturību, kūdras daļai niedru-kūdras maisījumā vajadzētu būt  $30\pm 5\%$ , bet salmu-kūdras maisījumā  $50\pm 5\%$ .
14. Izstrādāta rotoru dozatora konstrukcija, kurai piešķirts patents (Patents Nr. 13597, SPK G01F11/10 (26.02.2007.)).

### **Topicality of the work**

The European Union defined its strategic aim in the European Commission White Paper (1997) where it was determined that the part of the renewable resources in the balance of the European Union primary resources should be increased from 6% in 1997 to 12% in 2010. This task is steered at improvement of energy supply safety as well as at supporting of sustainable development of energy resources. The next step in the prosecution of this policy was the Directive 2001/77/EC On promotion of application of electro energy in the domestic electro energy market that is produced using inexhaustible sources of energy. The aim of the directive is to increase the part produced from RER (renewable energy resources) up to 22, 1% of the total European Union electro energy consumption in 2010 [1]. The EC declaration COM (2004) 366 On Utilization of Renewable Energy Resources in the EU evaluates the possibilities to achieve the indicative aim of this directive. In the declaration it is concluded that the advisable contribution of different RER is 50% of wind energy, 10% of hydro resources, geothermal and solar energy, 40% of electro energy obtained from biomass. It has been underlined that the increase of the biomass contribution is the priority and that special attention will be paid to the new EU member states where there are considerable resources of biomass [1].

Production of biomass compositions is topical as in wood pulp biomass (with bark and needles/leaves) and herbaceous biomass there is a rich content of metal alkali and chloride. Depending on the process of burning metal alkali can be oxidized or it can form sulphates or chlorides. If only wood chips or culmiferous plant biomass are burned the content of sulphur is low and chlorides are formed. Chlorides condense on the heat transfer surfaces of the furnace making the heat carrying slower and increasing the risk of high temperature corrosion. If the

content of sulphur in fuel is increased, for instance, producing peat and wood or herbaceous biomass compositions instead of chlorides sulphates are formed and the high temperature corrosion risk is reduced [2, 3].

Analyzing the mixing processes several advantages for mixing biomass with a in-flow or continuous mixer were discovered. In order to consider the advantages of one or the other mixing process more accurately it is necessary to evaluate economically both technological processes (cyclical and in-flow mixing).

For the in-flow mixer comparatively high precision of feeding is necessary (the feed constancy depending on the kind of biomass in the range of 5 – 10%). Therefore, it is important to clarify whether it is possible to measure granulated biomass precisely enough for qualitative mixing in the process (Fig. 1). In the literature available the suitability of the above described feeders for dosing of chopped herbaceous biomass and peat is not discussed. The feeder relative feed constancy is not indicated as well. Therefore, it is necessary to carry out experimental research in the feeders evaluated according to the expert method and approved being suitable by help of what the relative feed constancy, characteristic and suitability of the feeders for herbaceous biomass and peat could be determined.

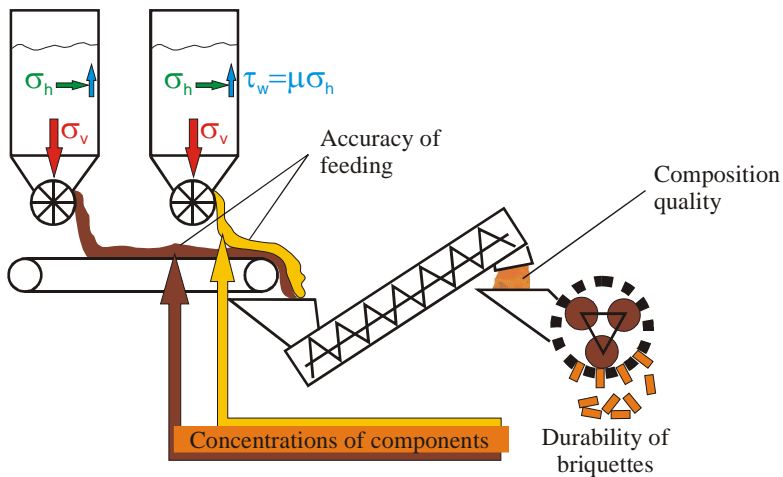


Figure 1. **Parameters influencing the biomass composition production processes**

The vertical stress  $\sigma_v$  created by the granulated biomass acts on the feeder built in the container. In order to determine the influence of this stress depending on the height of the mass in the bin it is necessary to research in the distribution of the stress in the bin and to develop a mathematical model of the bin (Fig. 1). By help of the mathematical model of the bin it would be possible to calculate the vertical stress that is acting on the feeder. It is important for calculation of the

driving torque of feeders. In order to develop such a model it is necessary to determine the physical – mechanical properties of biomass (friction coefficient  $\mu$ , stress ratio  $\lambda$ ).

Analyzing the literature a conclusion can be drawn that there are sufficiently enough different statistic methods by help of which the homogeneity of the composition can be evaluated knowing the changes of the components in separate samples. Nevertheless, it is difficult to take a sufficient number of samples and to state the concentration of the components in them. Due to this reason a task is set to develop an acceptable model for taking and processing of samples and determining the homogeneity of the biomass compositions.

In order to organize the mixing process adequately as well as to state the homogeneity of the composition the proportion of the components plays a significant role. It is important to determine the optimal proportion of the composition considering the briquette durability parameters. Therefore, it is necessary to carry out the experimental research in determination of the biomass briquette durability.

The solid fuel and biomass fuel standards provide for testing of briquette durability with the application of different methods that require a large amount of pellets and briquettes. Considering that the briquette durability varies depending upon the kind of biomass, proportion of the components, size of the particles and many other parameters, a briquette testing method is needed for laboratory conditions by means of which it would be possible to state the respective durability changes depending on the size of the composition particles, moisture or other changes having a small number of briquettes.

## **The aim of the research and the tasks**

### **The aim of the research**

To evaluate the biomass composition preparation technological processes and the biomass characteristic features necessary for designing of the technological equipment.

### **The tasks of the research**

1. To determine the physical – mechanical properties of biomass (peat, herbaceous biomass) that are necessary for the development of the mathematical model of the biomass storage bin.
2. To develop a mathematical model of chopped biomass storage bin and test experimentally the adequacy of this model.
3. To evaluate theoretically the kinds of feeders most suitable for biomass dosing.
4. To determine experimentally the precision of feeding and the characteristics of feeders.

5. To develop a new construction chopped biomass feeder.
6. To elaborate a method for taking and processing of biomass samples and evaluating of biomass composition homogeneity.
7. To evaluate the durability of biomass briquettes depending on the size of the particles and the proportion of the composition.
8. To compare the continuous and discontinuous biomass composition production technologies according to their economic profitability.

### **Scientific novelty of the research**

The scientific novelty of the promotion work is related to the research in the following issues.

- A mathematical model of chopped biomass storage bin has been elaborated for determination of the vertical stress in the opening of the bin, based on computer software *Matlab-Simulink* and experimental testing of the model has been carried out.
- Methods for evaluation of the biomass composition (straw – peat, reed – peat) quality by means of image analysis in software *Matlab* have been elaborated.
- The biomass physical – mechanical parameters necessary for development of the model have been experimentally stated: angle of repose, stress ratio and friction coefficient.
- The feeder (rotary spool, screw and drum) relative feed constancy and the feeder characteristic curves dosing chopped biomass have been experimentally determined.
- A rotary feeder model has been designed by means of which the feeder productivity can be modelled depending on its geometrical parameters and rotation frequency.
- Development of a new construction granulated biomass feeder (Latvian patent LV-13597 B. SPK G01F11/10, 26.02.2007.).

### **Approbation of the scientific work**

The research was performed during the period of time from 2001 to 2007. The obtained results are summarised in 19 publications that are in compliance with the general requirements of the Latvian Scientific Council for scientific editions. Approbation of the research results of the dissertation theme was carried out presenting them in the following international scientific conferences.

1. Estimation of homogeneity stage of biomass mixtures. International Scientific and Practical Conference „*Environment. Technology. Resources.*” Rēzekne, Latvia, June 20 – 22, 2007.

2. Rotary spool feeder for biomass dosage. 6<sup>th</sup> International Scientific Conference “*Engineering for Rural Development*”, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 24 – 25, 2007.
3. Mechanical properties of biomass compositions for solid biofuel production. 15th European Biomass Conference “Biomass for Energy, Industry and Climate Protection”. Germany 7-11 May 2007.
4. Drum feeder for biomass dosage. Research papers 8. Lithuanian University of Agriculture, Faculty of Agricultural Engineering, *Transport and Power Machinery Department – 60 year anniversary*. Lithuania, September 20 – 21, 2007.
5. Biomass conditioning for solid biofuel compositions. 2<sup>nd</sup> *International Baltic Bioenergy Conference*. Germany, Fachhochschule Stralsund – University of Applied Sciences. Nov. 02. – 04. 2006.
6. Determination of parameters for chopped biomass feeders. International Scientific Conference “*Engineering for Rural Development*” Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. May 18 – 19, 2006.
7. Stress modelling of chopped biomass. International Scientific Conference “*Research For Rural Development 2006*” Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Department of Post - Graduate Studies, 19 – 22.05.2006.
8. Dosage of chopped biomass. International Scientific Conference “*Opportunities and Problems of Economic Development*”. Rēzeknes Augstskola, Rēzekne. 24.03.2006.
9. Internal stresses of biomass compositions. International Scientific Conference “*Research For Rural Development 2005*” Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Department of Post - Graduate Studies, 19 – 22.05.2005.
10. Friction of chopped straw. International Scientific Conference “*Agricultural Engineering Problems*”, Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, 2-3.06. 2005.
11. Biomasu maisījumu fizikāli mehāniskās īpašības. Starptautiska zinātniskā konference “*Vide. Tehnoloģija. Resursi.*” Rezekne, Latvia, Rēzeknes augstskola, 16-18.03.2005.
12. Separation of chopped reed particles. International scientific conference “*Research for Rural Development 2004*”, Jelgava, Latvia, 19-22 May, 2004.
13. Evaluation of durability of biomass briquettes, International scientific conference “*Advanced Technologies for Energy Producing and Effective Utilization*” Jelgava, Latvia, Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering, 28-29 June, 2004
14. Durability of stalk material briquettes, International scientific conference “*Enabling Environment for Society Wellbeing*” Rezekne, Latvia, Rezeknes Higher Education Institution, 4-5 March 2004.

## **Methods of work**

To reach the aim of the promotion work the method of solving differential equations and mathematical modelling based on software *Matlab-Simulink* were applied. In experiments the technical aids and appliances of the Scientific Laboratory of Agricultural Machines and Mechanisms (LMMZL) of the Latvia University of Agriculture and laboratory equipment (material testing machine Zwick Z 2.5, virtual instruments of the companies Picotech, DataQ and others) were used. For measurements licensed measuring instruments were used. The necessary number of measurements was repeated in order to ensure sufficient validity of the measuring results. For evaluation of the results the statistic data processing software MS Excel was used by means of which such statistic data characteristics as the determination coefficient, standard deviation, variation coefficient etc. were determined.

### **1. Theoretical research**

The theoretical research of the work results from the tasks stated in Chapter 1 of promotion paper. The theoretical investigations carried out in the course of work can be divided in four subchapters. In the first subchapter the condition of stress in bulk materials and the stresses in the storage bins created by bulk materials are investigated.

In the second subchapter the mathematical model based on *Matlab-Simulink* for determination of the vertical stresses on the feeder mounted in the bin is developed.

The third subchapter describes a new construction feeder for bulk materials. Based on the feeder operation capacity geometric equations the model in the software *Matlab-Simulink* is developed by means of what it is possible to determine the operational capacity of the feeder depending on the feeder parameters. Based on the experimental research knowing the variation of the feeder capacity depending on the rotation frequency it is possible to model the capacity of feeders of different dimensions.

In the fourth subchapter the criteria are stated that determine the proportion of straw – peat and reed – peat mixtures and the necessary precision of mixing. The methods for determination of the mixture concentration in samples and the homogeneity by help of image analysis are elaborated.

#### **1.1. Storage bin dynamic model**

The storage bin dynamic model was developed for determination of the stress created during feeding of biomass on the feeder mounted in the bin. It is necessary for determination of the torsion moment for driving the feeder.

## Stress calculation methods

It is possible to distinguish between three different cases in the above described situations that should be considered calculating the stresses in the storage bins:

- Stresses in the vertical part of the bin;
- Stresses in the hopper (active stress condition – filling);
- Stresses in the hopper (passive stress condition – draining).

### Calculation of stress in the vertical part of the bin

Stresses in the vertical part of the bin (in the active stress condition) can be calculated by Janssen formula [6] applying the method of infinite element. A mass element in the shape of the bin cross-section with infinitely small height  $dz$  having the same cross-section area  $A$  as the cylindrical part of the bin is considered. Assuming that there is constant vertical stress  $\sigma_v$  around the slice element and constant density  $\rho_b$  the balance of forces  $z$  in the direction of the axis can be expressed by the equation [6]:

$$A\sigma_v + g\rho_b Adz = A(\sigma_v + d\sigma_v) + \tau_w Udz, \quad (1.1)$$

where  $A$  – cross-section area,  $m^2$ ;

$\sigma_v$  – vertical stress, Pa;

$g$  – free fall acceleration,  $m\ s^{-2}$ ;

$\rho_b$  – mass density,  $kg\ m^{-3}$ ;

$\tau_w$  – shear stress on the bin walls, Pa;

$U$  – perimeter, m;

Transforming the expression we get:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \sigma_v \lambda \frac{U}{A} \operatorname{tg}(\varphi_x) = g\rho_b, \quad (1.2)$$

where  $\varphi_x$  – friction angle;

From the friction coefficient characteristic curve the straw friction coefficient variation function depending on stress:

$$\operatorname{tg}(\varphi_x) = 0.317\sigma_h^{-0.075} = 0.317(\lambda\sigma_v)^{-0.075}, \quad (1.3)$$

and peat friction coefficient variation function depending on stress are obtained :

$$\operatorname{tg}(\varphi_x) = -0.219\sigma_h^2 + 0.465\sigma_h + 0.137 = -0.219(\lambda\sigma_v)^2 + 0.465(\lambda\sigma_v) + 0.137 \quad (1.4)$$

Transforming the differential equation (1.2) so that it considers the dependence of the chopped straw friction coefficient on the stress a differential equation for calculation of the straw bin (1.5) and the peat bin (1.6) is obtained:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + 0.317(\sigma_v\lambda)^{0.925} \frac{U}{A} = g\rho_b \quad (1.5)$$

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + (-0.219(\lambda\sigma_v)^3 + 0.465(\lambda\sigma_v)^2 + 0.137\lambda\sigma_v) \frac{U}{A} = g\rho_b \quad (1.6)$$

### Determination of stress in the hopper

Stresses in the hopper are calculated applying the slice element method. The balance of forces for the slice element is expressed by the differential equation [5, 6]:

$$d(A\sigma_v) + g\rho_b Adz = \sin(\Theta)\sigma_w dA_M + \cos(\Theta)\tau_w dA_M \quad (1.7)$$

where  $\Theta$  – hopper angle against the vertical, degrees;

$\sigma_w$  – normal stresses of the walls, Pa;

$A_M$  – side surface of the element, m<sup>2</sup>;

$z$  – vertical direction coordinate, m;

Introducing the coefficient  $u$  and transforming the expression we get the differential equation in the following form [5]:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} - u \frac{\sigma_v}{z} = -g\rho_b, \quad (1.8)$$

where

$$u = (m+1) \left[ K \left( 1 + \frac{\operatorname{tg}(\varphi_x)}{\operatorname{tg}(\Theta)} \right) - 1 \right], \quad (1.9)$$

where  $K$  – ratio of the wall normal stress against the average value of the vertical stress in the hopper;

$m$  – parameter evaluating the cross-section shape of the hopper.

Inserting the experimentally stated variation of the friction coefficient value depending on the stress between the friction surfaces in formula (1.9), new coefficient  $u$  expressions are obtained separately for straw (1.10) and peat (1.11):

$$u = (m+1) \left[ K \left( 1 + \frac{0.317(\sigma_w)^{0.075}}{\operatorname{tg}(\Theta)} \right) - 1 \right] \quad (1.10)$$

$$u = (m+1) \left[ K \left( 1 + \frac{-0.219\sigma_w^2 + 0.465\sigma_w + 0.137}{\operatorname{tg}(\Theta)} \right) - 1 \right] \quad (1.11)$$

Figure 2 shows a model considering the friction coefficient variation. In order to develop it the principal operation of the model had to be changed by changing the  $z$  direction. The given model depicts the vertical stress in the mass in a definite depth. It means that indicating the respective integration limits ( $z$  values) it is possible to determine the vertical stress also in the bottom of the bin (at the opening) by means of this model.

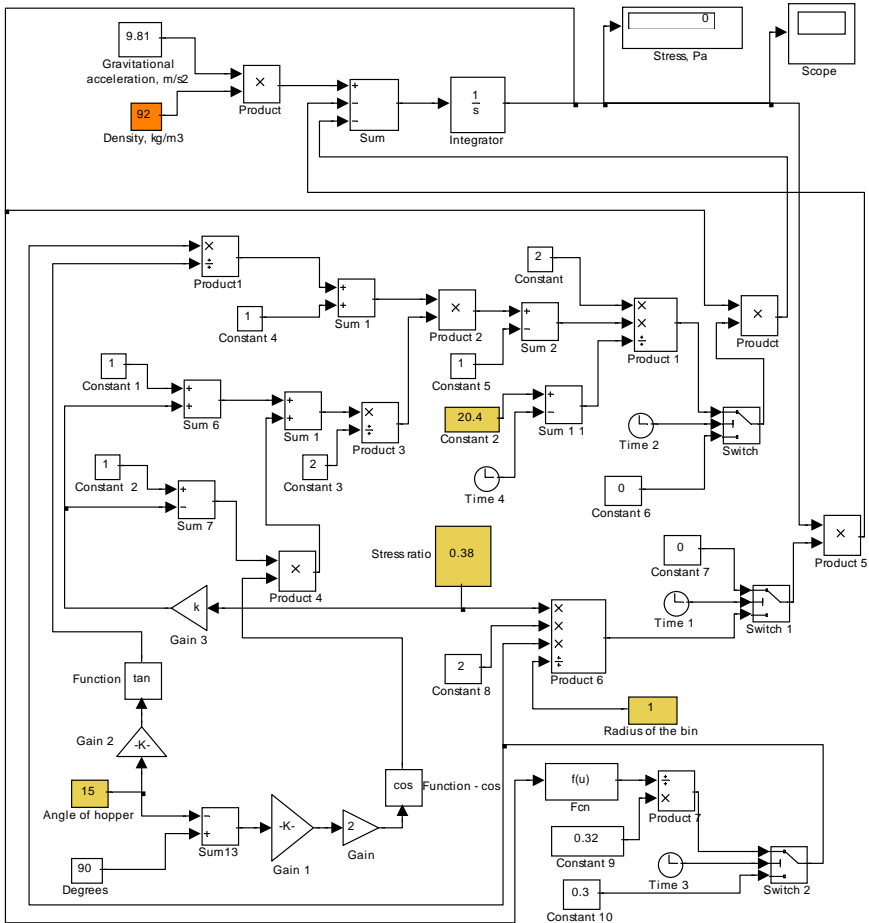


Figure 2. Biomass bin mathematical model considering the friction coefficient variation depending on stress

## 1.2. Development of a new construction rotary pool feeder

Based on the set task a new kind feeder with improved precision of dosage was developed (Fig. 3). The feeder is functionally designed in a way that it consumes possibly less energy. With the feeder rotating the spools roll along the dosed bulk material, therefore friction between the feeder and the dosed bulk material is eliminated. The spool diameter and the cone angle are aligned so that with the cone rolling along the material the spool does not slide out within its whole length.

In the rotary body of the feeder rotating conical spools are fastened (Fig. 3. Patent Nr. 13597, SPK G01F11/10 (26.02.2007.)). With the body rotating around its axle the spools that are placed in the body start rotating around the radially placed axles and the loose material that has got into the sectors is discharged from the bin. The increase of the feeder accuracy is determined by the reduction of the spool sector volume replacing one large spool by several spools. The productivity of the feeder can be controlled changing the rotation speed of the body thus changing also the rotation speed of the spools.

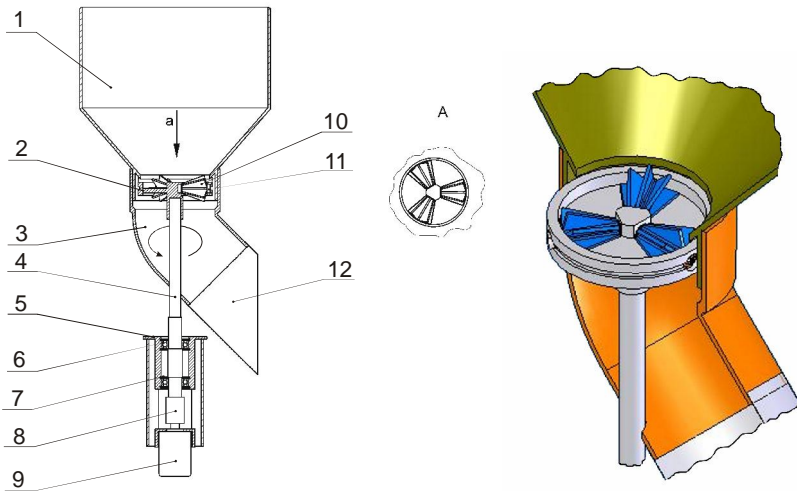


Figure 3. **Rotary spool feeder**

Based on the given geometrical correlations a model in *Matlab-Simulink* was developed (Fig. 4). In it changing such parameters as the length of the spool, radius, sector angle, thickness of the sector wall, the number of the sectors and the groove roundup radius it is possible to determine the operational capacity of one spool in  $\text{mm}^3$ .

On Figure 5 the geometrical model of the spool is marked with outlet 1 (Out 1). Through mathematical transformations we get the amount of the given mass in kilograms that the feeder can theoretically put out during one revolution. Considering the change of the feeder spool filling coefficient depending on the rotation frequency, the given model (Fig. 5) can be used for calculation of the feeder capacity at different spool parameters.

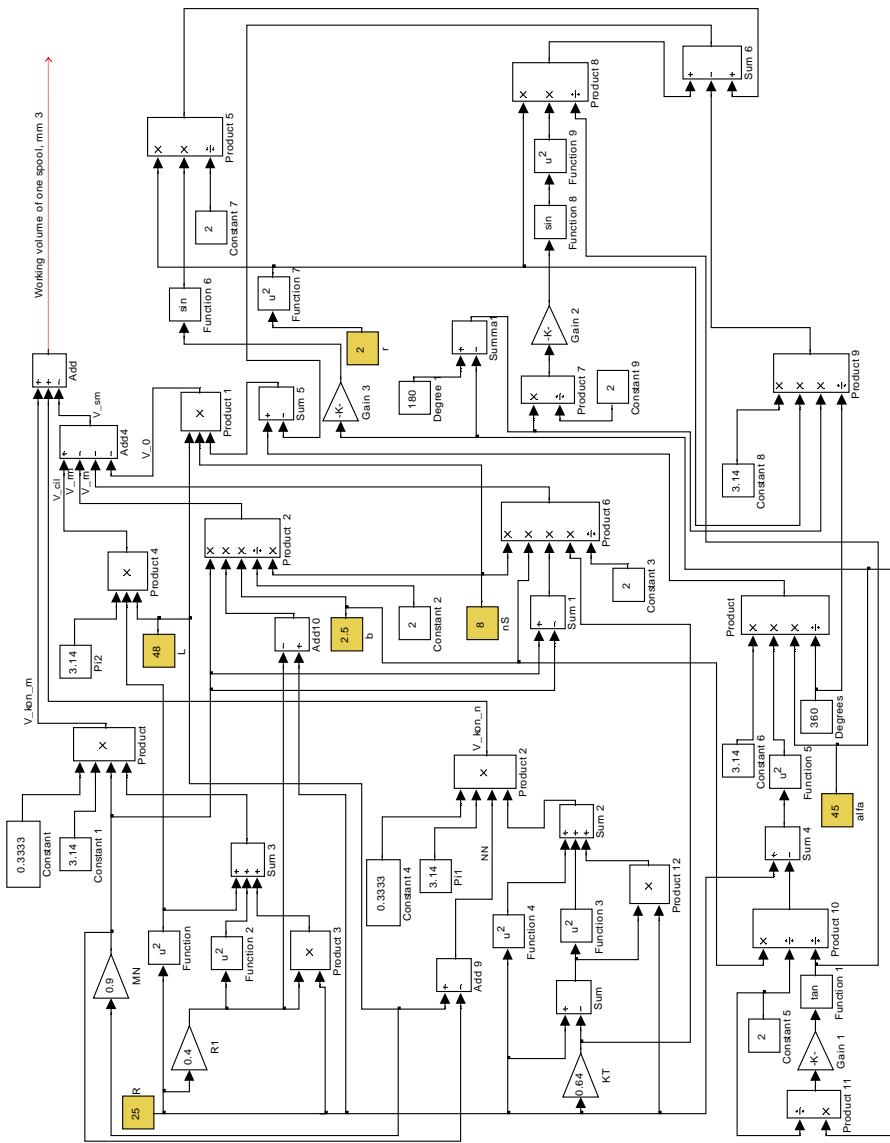


Figure 4. Geometric model of the spool

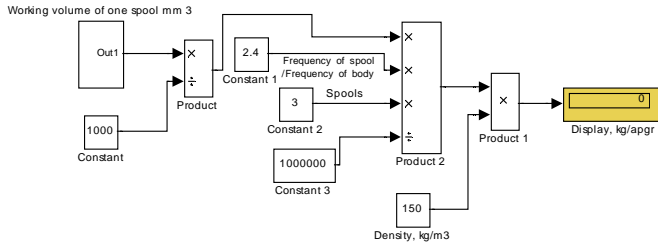


Figure 5. **Determination of feeder capacity**

### 1.3. Evaluation of the composition quality

Preparing compositions it is important to know how homogeneous it should be and what the proportion of the components will be. The more homogeneous the composition, the higher the costs for implementation of the process. Therefore, evaluating the final product (granules, briquettes) for determination of the mixture homogeneity level and the proportion of the components the following criteria were set up (Fig. 6 and 7):

- **component costs** – it means that if any of the components is comparatively more expensive, its overdosing will make the product costs higher;
- **briquetting energy** – increasing the proportion of the components for briquetting of which less energy is needed in the mixture energy would be saved in the briquetting process;
- **density** – at equal briquetting conditions, briquetting different biomass materials different density will be obtained. The components should be selected in the way that the density of the mixture briquette or granule reaches  $1 \text{ g cm}^{-3}$  that is indicated in the standards.
- **burning properties** – the change of the component proportion in the mixture influences also the properties of burning and the life time of the boilers;
- **durability** – for improvement of briquette and granule durability the proportion of the added component should be sufficient to comply with the standard requirements.

Figure 6 presents the proportions of reed and peat mixture and the mixture homogeneity criteria. At present it is difficult to judge about the costs for reed production in comparison to the peat costs  $10 \text{ Ls t}^{-1}$ . However, if considering that, unlike with peat,  $\text{CO}_2$  discharged in the process of burning reed is not considered to be the gas causing the greenhouse effect as the plant burning discharges that  $\text{CO}_2$  which it has taken up during the process of growing, it is still advisable to reduce the proportion of peat.

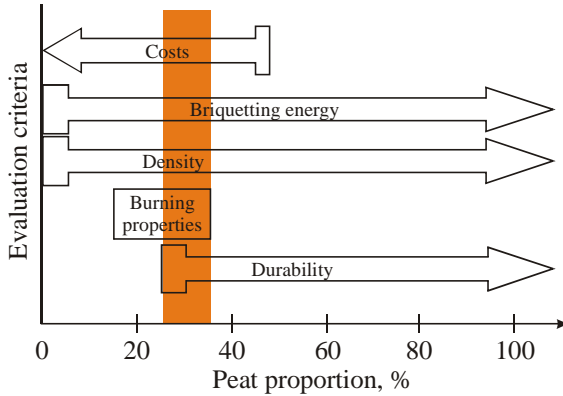


Figure 6. **Mixture proportion and homogeneity level criteria for reed – peat mixture**

From the point of view of briquetting energy the proportion of peat in the mixture should be increased as in this case the energy necessary for briquetting reduces [4]. The same, the density of briquettes increases adding peat. Burning herbaceous biomass it is advisable to add peat (15 – 35%), in order to prevent corrosion of the boilers. To ensure the durability of reed briquettes as it is in wood chip briquettes about 30% of peat should be added.

Analysing the obtained figure it can be seen that at present there are two limiting factors: the briquette durability and burning properties. A conclusion can be drawn based on this figure that the proportion of peat in the reed – peat mixture should be approximately 30±5%.

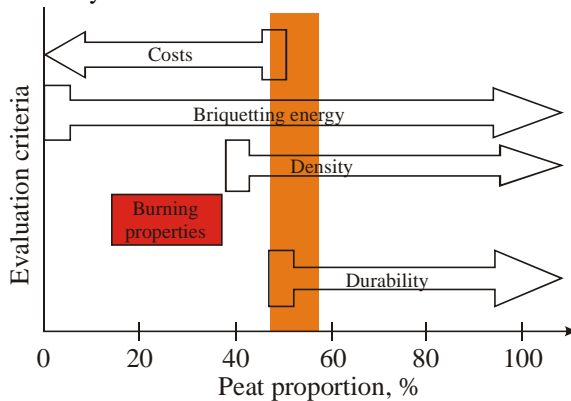


Figure 7. **Mixture proportion and homogeneity level criteria for straw – peat mixture**

Examining Figure 7 - Mixture proportion and homogeneity level criteria for straw – peat mixture – it can be concluded that for straw briquettes the proportion of peat should reach  $50 \pm 5\%$ . Such large proportion of peat is necessary in order to ensure the briquette durability. If producing briquettes industrially it could be concluded that briquettes with less proportion of peat are stable enough, it (the proportion of peat) could be reduced. Variations in durability are possible as in different briquette compacting processes various changes in the physical – mechanical properties of the mixture take place.

It can be seen in Figure 7 that the orange area does not touch the diapason taken up by the burning properties. From the analysis of literature in Chapter 1 of promotion paper it can be concluded that the burning properties do not become worse for a mixture with a larger proportion of peat. Therefore, at the present situation the recommended proportion of peat for straw – peat mixtures could be  $50 \pm 5\%$ .

**The evaluation of the mixture homogeneity and proportion can be carried out according to different parameters, for example:**

- mixture density;
- briquette durability;
- proportion of components in a definite unit of volume;
- visual estimation (image analyze).

### **Image analyze**

In software *Matlab* a line of orders is formed by help of which the image can be put in the given software and transferred into understandable for the program. The images were transformed into black-and-white format, it means that every pixel takes one of the two values, either 1 or 0. For marking the images further used binary symbol *bw* is introduced. Determining the straw – peat mixture quality the straw particles are transferred into white and they take the value 1, but the peat particles – into black; they take the value 0 and are to be understood as a background.

Distance transforms allows for the measuring of the distance between the intermediate points in the image. The image processing tools (**Image Processing Toolbox**) by help of the function *bwdist* ensure a possibility to calculate the distance between every pixel and the other closest pixel that differs from 0 in binary figures. The function *bwdist* supports different distance measuring methods. The Euclidean method is offered as the default distance transformation method. Nevertheless, it is possible to use also other methods.

Matlab program with the function  $y = \text{std}(D1)$  calculates the standard deviation in the transformed distances within the range of images. The standard deviations are calculated for every image pixel column separately. In order to state the total condition of the image (the mixture quality), the standard deviation average value was calculated.

Based on *Matlab* the area occupied by the straw particles in pixels was determined. Dividing it by the total number of the image pixels the proportion of straw in the mixture was calculated what was afterwards compared to the proportion of the theoretical components of the mixture and the standard deviation  $S$  was obtained.

The standard deviation is necessary to determine the degree of mixing that is based on the Rose formula:

$$M = 1 - \frac{S}{S_0}, \tag{1.12}$$

where

$$S_0 = \sqrt{p_T(1 - p_T)}, \tag{1.13}$$

where  $p_T$  – theoretically calculated proportion of the areas.

In order to state the suitability of the straw – peat composition for the above described mixture quality evaluation system six different straw and peat compositions were made: only straw, 80% straw and 20% peat, 60% straw and 40% peat, 40% straw and 60% peat, 20% straw and 80% peat and only peat. The size of the component particles was 1 – 2 mm; the moisture content of the mixture was 12%. The components were mixed until the particles were uniformly dispersed in the whole volume (homogeneous mixture).

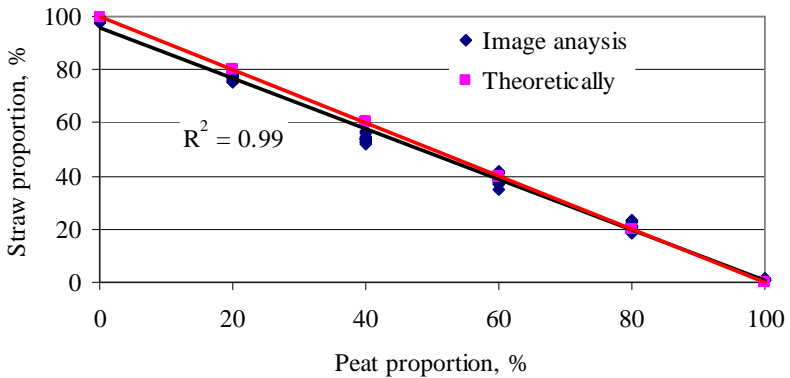


Figure 8. Comparison of the data of mathematically transformed and theoretical image analysis [8]

The results of the analysis of the images of straw (1 – 2 mm) and peat (1 – 2 mm) compositions are very close to the ones obtained theoretically. Bigger inaccuracy can be observed at the beginning and at the end of the diagram (100% straw, 100% peat) but the middle parts of the straight lines practically coincide.

This tendency is related to the transformation of colors: transforming the pure straw figure to black-and-white it was not 100% white, the same with peat (it was not 100% black). The difference of the average values of the theoretical and figure analysis is approximately 7%.

The error caused by the color transformation can practically be eliminated by mathematical transformation (Figure 8). In this case the standard deviation of the results from the theoretical mean does not exceed 5%, But the mean values (of theoretical and figure analysis) practically coincide. For biomass materials the homogeneity of the mixtures of which depends on many parameters (size of the particles, particle size dispersion, particle size proportion of the components and other loose material properties) the standard deviation 5% is an acceptable index. Orientation of the particles greatly influences the accuracy of the data. If the particles are thin and long, the area of the side surface will considerably exceed the area of the end surface.

## 2. Experimental research

### 2.1. Friction coefficient

Figure 9 shows the correlation between the static friction coefficient and stress between the frictional surfaces (in the experiment chopped straw 2 – 3 mm and a galvanized iron plate were used). Changing the stresses between the surfaces we get an essential difference at low and high stresses. If the stress increases the

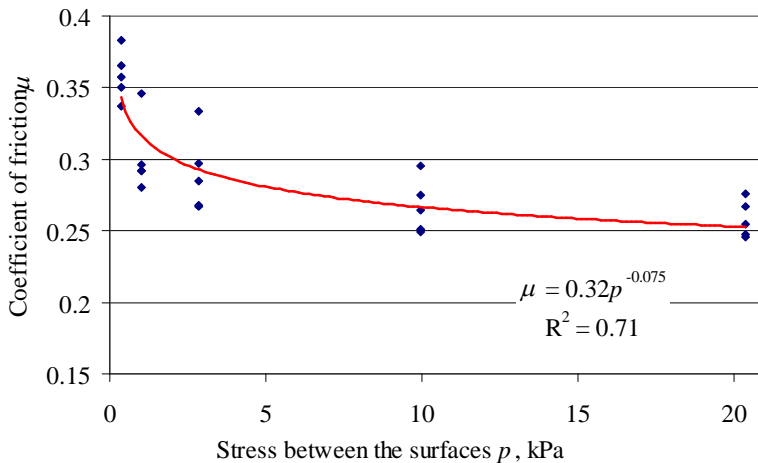


Figure 9. **Statistic friction coefficient of chopped straw (2 – 3 mm) vs. galvanized iron plate**

friction coefficient between the straw particles and the galvanized iron plate decreases. Changing the normal stress from 0.3 to 20 kPa the static friction coefficient values from 0.25 to 0.35 were obtained. The testing speed  $2 \text{ mm min}^{-1}$  and the surface shifting length 10 mm. Measuring accuracy  $\pm 0.018$  (validity 95%).

## 2.2. Feeder parameters

### 2.2.1. Drum feeder

On Figure 10 we can observe that the specific throughput depends on the drum rotating frequency. If the frequency increases from 0.25 to  $3 \text{ s}^{-1}$ , the specific throughput decreases by  $0.01 \text{ kg rev}^{-1}$ . The observed tendency relates to straw up to 3 mm, as well as to 3 – 10 mm. Feeding straw with the size from 3 – 10 mm, the specific throughput is considerably lower than for straw up to 3 mm. It is related to their different density as comparing the dosed volume units per one revolution (Figure 11) we can see that the difference has reduced from 40 to 7%.

The reduction of the specific throughput (Figures 10 and 11) is caused by the vertical stress of the mass that reduces as with the increase of the rotation speed more and more bigger material volume is discharged from the bin, though new material from the upper layers of the bin does not flow sufficiently fast to create the stress of the mass on the feeder that operates at low rotation frequency.

The relative feed constancy in the process varies from 3 to 11%. The variation of the relative feed constancy or the accuracy of feeding is influenced by the dosed mass: chopped straw differ in the sizes and can be differently oriented on the feeder causing the change in the intensity of flow. The inaccuracy of the flow is caused also by the varying stress when the mass flows to the rotating feeder.

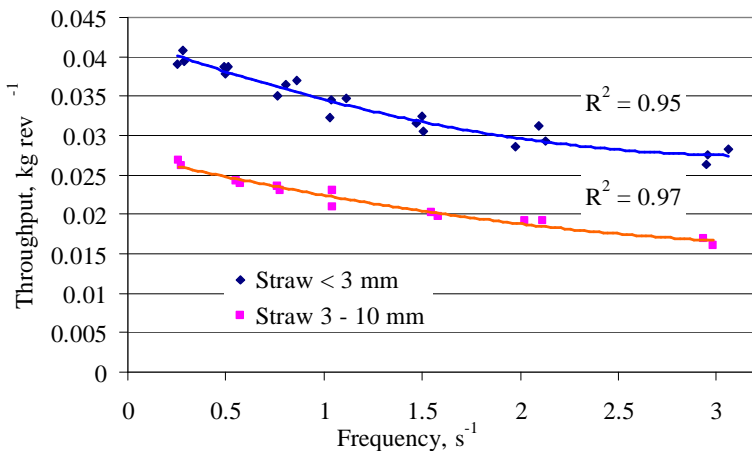


Figure 10. Specific throughput depending on the drum rotation frequency [9]

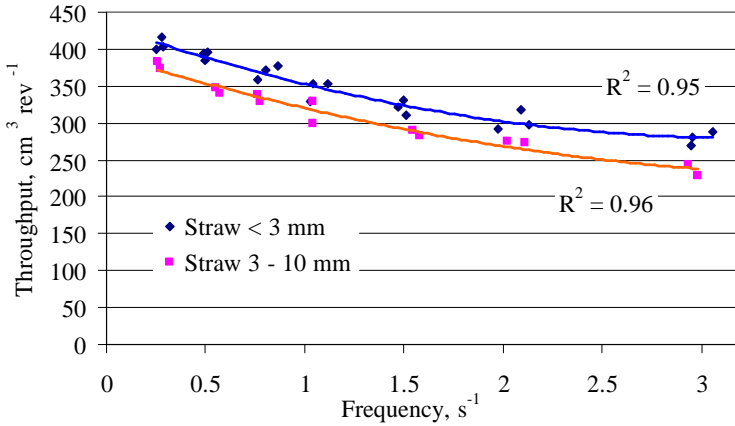


Figure 11. **Specific throughput depending on the drum rotation frequency** [9]

The variations of the flow were determined by means of the force sensor output. The mass running against the plate of the force sensor changed the sensor outlet voltage. According to Figure 12 we can conclude that the sensor readings are not influenced by the size of the particles as for both particle size groups the readings are similar and the straight lines practically coincide. It means that the sensors of this kind can be used to control the feeding process of chopped biomass.

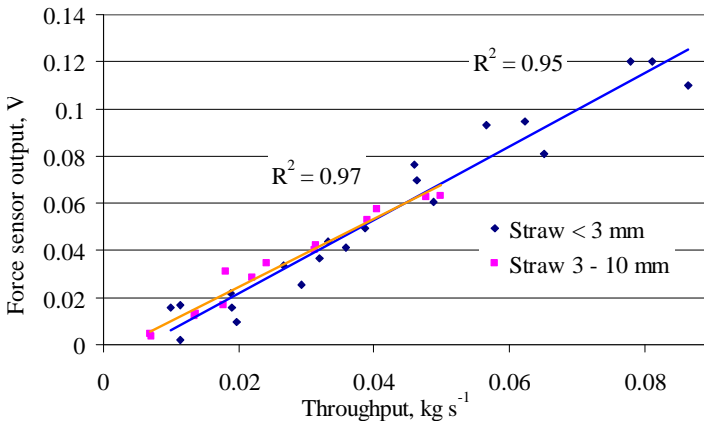


Figure 12. **Force sensor output voltage vs. mass throughput** [9]

## 2.2.2. Spool feeder

As it can be seen on Figure 14 the capacity of the drum feeder (Figure 13) depends on the direction and speed of the feeder rotation. The direction of spool rotation is determined by the position of their drive (above or under the spools). If the spool rotation speed increases their filling coefficient reduces and the difference from the theoretical capacity increases (Figure 14). If

the spool drive is positioned under the spools the linear speed of the operating parts of the spools  $V_1$  is directed in the direction of the feeding body speed  $V_k$  (first rotation direction) – the spool with its ribs embraces the material. Positioning the spool drive on the upper side the linear speed of the operating parts of the spools  $V_2$  is directed opposite the feeder body speed direction (second rotation direction) – the spools are rolling along the material to be fed. The specific throughput is higher in the first case as the material that is above the feeder causes additional stress in the direction of the spool filling. If the spools roll in the direction 2 the bulk material (peat) causes stress in the vertical direction helping the material to penetrate into the sectors of the spools, but with the spool continuing to roll on the particles of the material centrifugal forces start to work on it trying to push the particles out of the spool sectors.

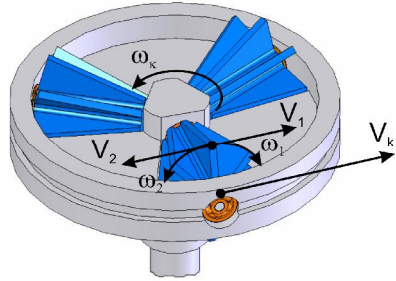


Figure 13. Spool rotation directions [10]

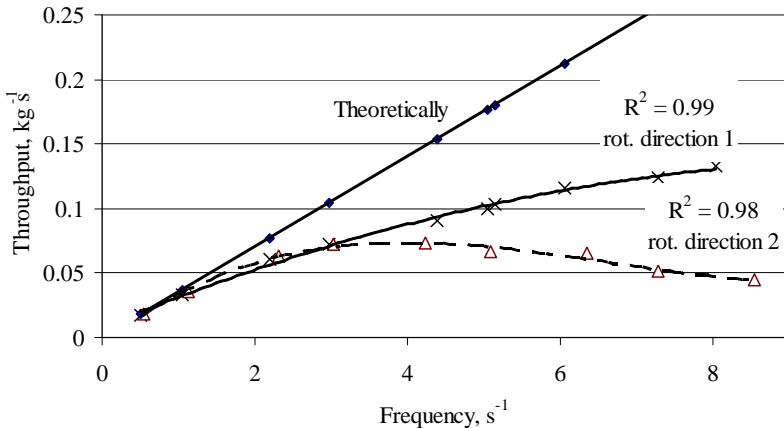


Figure 14. Throughput of the spool feeder [10]

The throughput depending on the direction of rotation with the rotation frequency reaching  $8 \text{ s}^{-1}$ , differs approximately 3 times (Figure 14). The capacity does not depend on the direction of rotation if the rotation frequency is  $0.5$  to  $3 \text{ s}^{-1}$ . If it is enough to have a feeder capacity that corresponds to the frequency  $3 \text{ s}^{-1}$ , the second rotation direction is advisable as rotating in this direction the feeder consumes less energy.

The relative feed constancy in the process of feeding is  $\sim 5\%$ .

The feeding accuracy influences the size and the kind of the mixer. For a feeder of a small size with short time of mass being in it and limited axial mixing high feeding accuracy is needed even for a longer period of time.

For feeding of chopped herbaceous biomass a drum feeder is suitable. It has sufficient feeding accuracy (the relative feeding constant varies from  $3 - 11\%$  feeding  $10 \text{ mm}$  long straw and  $3 - 7\%$  feeding peat) and by a drum of a corresponding size the necessary capacity can be reached. The capacity can be changed by changing the profile of the drum surface and its parameters. The particles of chopped stalks from the feeder get in the opening of the feeder in a  $3 - 7 \text{ mm}$  thick layer in the whole width of the drum. In a situation when in the flow two components have to be mixed this kind of feeding can be suitable as blending the layers of the mass from two feeders mixing of the components can be achieved. If the components are sufficiently mixed, the mixer is not needed; if the mixture is not sufficiently homogeneous, the mixer that with low consumption of energy ensures additional mixing of the components can be used.

The feeder with radially positioned rotors is more precise compared to the drum feeder (the feeding constant  $\approx 5\%$  feeding peat). Though, the rotary feeder in the given version is not suitable for feeding chopped stalks. The rotary feeder is more suitable for feeding fine, well flowing bulk material. This kind of feeder is advisable if it is necessary to add some additive in a small amount to the briquetting composition.

### **2.3. Experimental evaluation of the storage bin dynamic model**

Figure 15 shows the vertical stress curves obtained theoretically (from modeling) and experimentally depending on the height of the loose material (chopped straw) in the bin (with the cylindrical and conical part). As in the given case for modeling with the constant friction coefficient the friction coefficient values corresponding to the average vertical stress were chosen, the calculated stresses of the models practically did not differ. Nevertheless, the model with automatic friction correction is more advisable because without experimenting the maximal stress values will not be known beforehand and the friction coefficient that is chosen incorrectly will cause an error in determination of the vertical stresses.

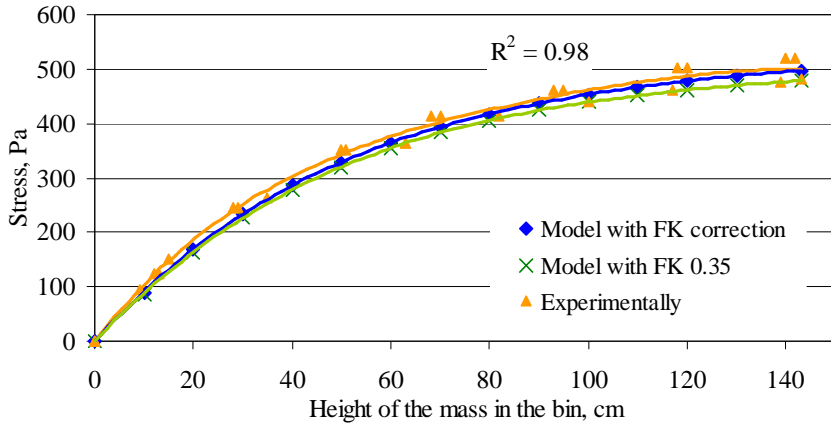


Figure 15. **Determination of the vertical stress in a bin filled with chopped straw (cylindrical bin with a conical hopper)**

The vertical stress caused by peat at the same conditions is 1.5 times higher than for straw. It can be explained by the fact that peat has comparatively high density  $140 \text{ kg m}^{-3}$ .

With the mass reaching the height in the bin that is equal to approximately four diameters of the bin the height of the mass do not influence the value of the vertical stress  $\sigma$ , any more – it remains constant (Figure 15). The maximal vertical stress varies depending on the diameter of the bin – the bigger the diameter, the higher the vertical stress. For a bin with the diameter 0.26 m the maximal vertical stress storing chopped straw reaches 0.5 kPa, but for a bin with the diameter 1 m the vertical stress reaches 1.8 kPa. It means that for bins with a smaller diameter in comparison to bins with a large diameter the friction of the walls completely balances the vertical stress caused by the incoming mass (at the bottom of the bin the stress remains constant). Therefore, bins are usually made high with a smaller diameter.

Modeling a bin with a diameter 1 m the difference between the vertical stress values with the automatically corrected friction coefficient and the constant friction coefficient (0.32) increased essentially. With the mass reaching the height 10 m the difference between the models increases even up to 10%. The volume has increased in the bin in which comparatively higher stresses are acting and due to this the average value of the friction coefficient (if the friction coefficient is automatically corrected) decreases. For more compact materials the difference of the vertical stresses if the friction coefficient values are inaccurately chosen is more considerable, it can exceed 30%. Therefore, prognosticating the possible range of the stress in the bin it is advisable to determine the friction coefficient

values depending on the stress experimentally and to insert the correlations in the model that automatically produce the friction coefficient values.

## 2.4. Experimental determination of briquette durability

In Figure 16 straw briquettes of different fineness and their ultimate shear stress variation depending on the amount of the added peat are compared.

The ultimate shear stress of chopped straw briquettes does not depend on the degree of straw fineness if the length of the particles is from 0.5 to 3 mm, but adding peat (3 mm) the ultimate shear stress (perpendicular to the direction of briquetting) of straw briquettes considerably increases, i.e., from 0.2 (for pure straw) to 1.55 MPa (for peat).

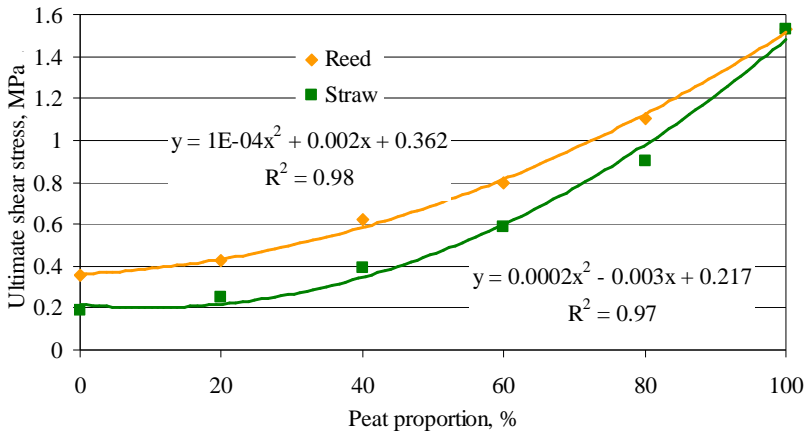


Figure 16. Ultimate shear stress of reed and straw briquettes depending on the proportion of peat [11]

As every year in Latvia about 500 000 tons of peat are extracted, adding of peat to the straw briquettes could be a good way to improve the durability of straw briquettes and granules as well as the burning properties of fuel.

The ultimate shear stress of chopped reed particle (1 – 2 mm) briquettes is ~0.35 MPa (Figure 16); it is approximately two times higher as straw briquettes. In Figure 16 we can see also the variation of reed briquette ultimate shear stress depending on the amount of the added peat. Adding 30% of peat to reed briquettes their ultimate shear stress reaches the same value as it is for wood chip briquettes (the size of particles 3 – 5 mm).

As the wood chip briquettes and granules are successfully produced, the figural values of their mechanical properties can be used for comparison of other briquettes. The briquette density determined in the standards of some countries is

higher than  $1.0 \text{ g cm}^{-3}$ . The reed briquettes (from 1 – 2 mm particles) reach this density at the given briquetting conditions without adding of peat. The briquette ultimate shear stress increases if the briquette density increases [4].

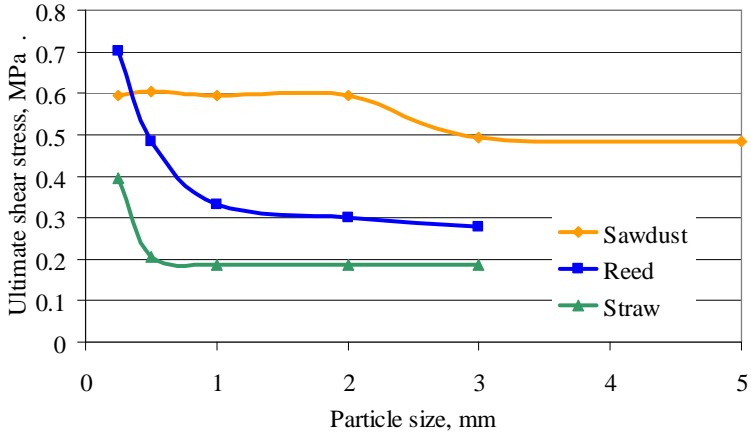


Figure 17. **Influence of particle sizes on briquettes ultimate shear stress** [11]

With the increase of the particle size in wood chip briquettes their ultimate shear stress reduces. For wood chip briquettes with the particle size  $> 2 \text{ mm}$  the ultimate shear stress reaches  $0.6 \text{ MPa}$  (Figure 17). Reed briquettes can reach such ultimate shear stress if their particles are less than  $0.5 \text{ mm}$ . Straw briquettes reach the ultimate shear stress  $0.6 \text{ MPa}$  if about  $\sim 60\%$  peat is added. Straw briquettes reach the necessary density  $> 1.0 \text{ g cm}^{-3}$  if  $35\%$  peat is added [4]. Exactly such amount of peat ( $35\%$ ) is recommended to be added to different biomass fuels in order to improve their burning properties.

### 3. Economic evaluation

For calculation of the machinery costs the methods of economic evaluation of technological processes established in Europe are applied [7] considering the consumed fuel, machinery costs, renovation costs, salaries for the employees, repair costs, bank credit interest and many other important factors.

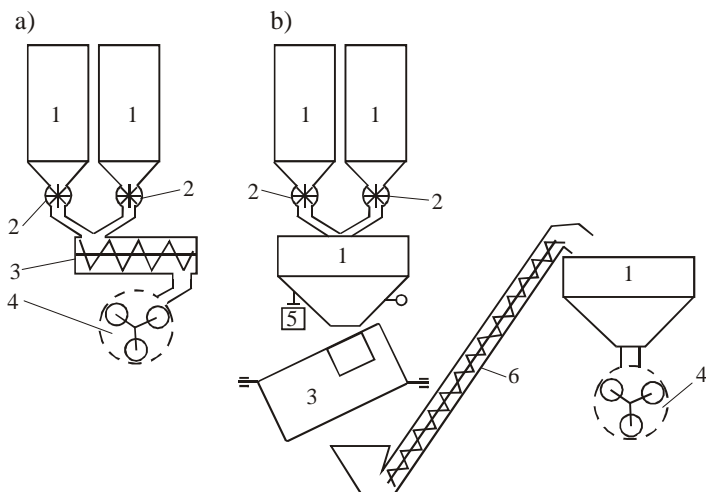


Figure 18. **Comparison of in-flow (a) and discontinuous (b) mixing technological processes**

1 – bin; 2 – feeder; 3 – mixer; 4 – granulator;  
5 – weight sensor; 6 – conveyer.

In the granule production process according to the scheme shown in Figure 18 one of the largest parts of costs is comprised by granulation (Figures 19 and 20). For the granulation process with in-flow mixer the granulation costs comprise 60% but with cyclic mixer – approximately 56%. The costs are similar for paying to the employees; depending on the process they comprise 29 – 30% of the total costs. The total costs for the briquetting process are approximately by 6% lower if the

□ Bin                      ■ Feeder                      ■ Mixer  
■ Granulator            □ Labor force

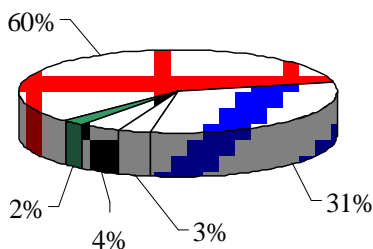


Figure 19. **Briquetting process costs percental (with mixing in-flow)**

in-flow mixer is used (Figure 21). The briquetting costs reduce using more productive equipment, for instance, comparing the equipment with the productivity 0.5 and 2 t h<sup>-1</sup>, the costs reduce by 40%. The briquetting process costs reduce by approximately 30% if the working hours increase from 600 to 2400. The briquetting or granulation processes are made more expensive by the high price of the equipment.

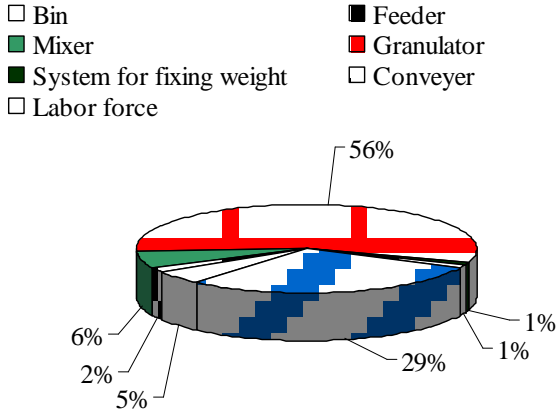


Figure 20. **Briquetting process costs percental (with cyclic mixing)**

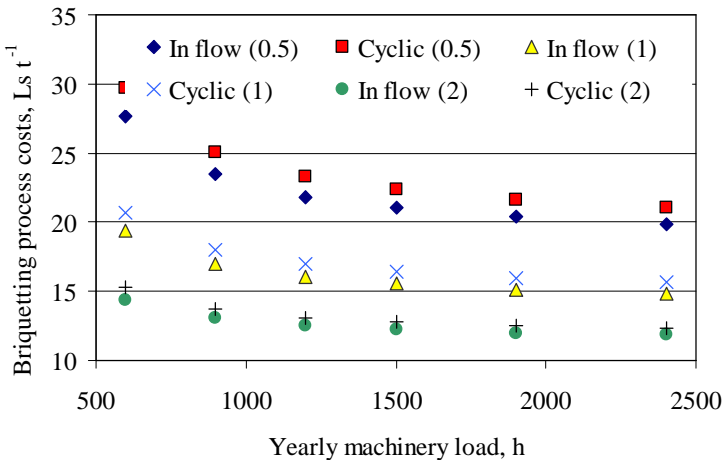


Figure 21. **Briquetting process costs per one ton of mass (including mixing and feeding)**

Discounting the briquetting and labour force costs the in-flow mixing process costs are by 38% less that for the discontinuous mixing (Figure 22). In the continuous run mixing process comparatively higher costs are comprised by feeding as higher feeding accuracy is needed. With this, also the equipment costs are higher. Though, more economy is achieved in the process of mixing as for driving of the in-flow mixer less power of electro energy is needed; also the mixer itself costs less as it is of simple construction and less in size. Aligning the capacities of the feeder, mixer and briquette maker there is no need for bins for storing in between the processes what also reduces the costs of the process.

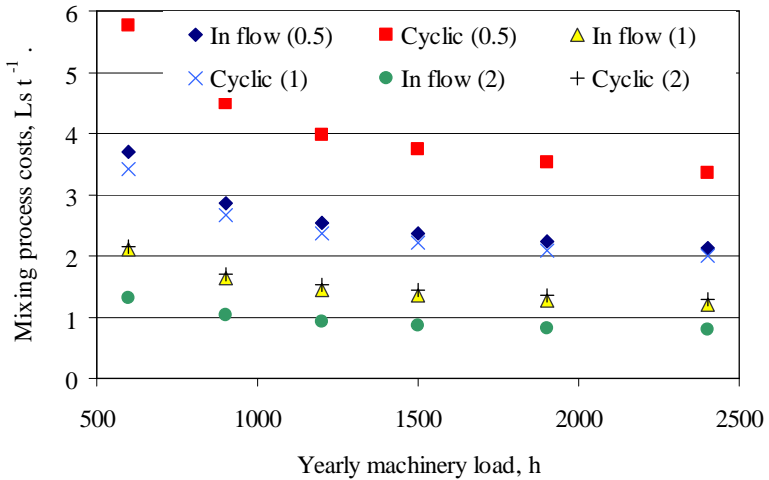


Figure 22. **Mixing process costs per one ton of mass**

## Conclusions and proposals for production

- The characteristic factors necessary for designing of the technological equipment are the statistic and dynamic friction coefficients as well as the stress ratio:
  - the statistic friction coefficient of chopped straw depends on the normal stress; if this stress is 0.3 kPa, the value of the friction coefficient on galvanized iron surface is 0.35, but if the stress is 20 kPa – 0.25;
  - the dynamic friction coefficient depends on the pressure and speed between the friction surfaces. The maximal dynamic friction coefficient value (0.38) of chopped straw on galvanized iron surface is reached at the

maximal pressure 0.3 kPa and maximal speed  $800 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  used in the experiments, but the minimal value (0.22) at the maximal pressure 20 kPa and the minimal speed  $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$

- the experimentally obtained stress ratio for the straw particles depends on the size of the particles, and its value varies from 0.45 (for particles with the size 0.25 mm) to 0.3 (for the particles with the size 7 mm);
  - the stress ratio for peat varies from 0.47 (for the particles with the size less than 0.5 mm) to 0.4 (for the particles with the size 5 mm).
2. Evaluating the durability of biomass briquettes depending on the size of the biomass particles and the structure of the composition it can be concluded that:
    - the ultimate shear stress of wood chip briquettes with the size of the particles  $< 2 \text{ mm}$  is  $> 0.6 \text{ MPa}$ . Reed briquettes reach such ultimate shear stress if the size of their particles is  $< 0.5 \text{ mm}$ , but for coarser reed (up to 3 mm) adding  $\approx 30\%$  peat, straw briquettes reach this value if  $\approx 60\%$  of peat is added;
    - the ultimate shear stress of straw briquettes is  $\approx 0.2 \text{ MPa}$ , if the particle size is from 0.5 – 3 mm, but using finer straw particles ( $< 0.5 \text{ mm}$ ) the ultimate shear stress increases up to 0.4 MPa;
    - adding peat to straw the ultimate shear stress of briquettes increases from 0.2 MPa (peat 0%) to 1.55 MPa (peat 100%).
  3. Adding 40% of peat to straw briquettes their density exceeds the determined in the standards minimal hard fuel density  $1.0 \text{ g cm}^{-3}$ .
  4. Using the image analysis for the determination of the peat and straw mixture homogeneity according to the covered areas the standard deviation does not exceed 5%, therefore this method is recommended for determination of the straw – peat and reed – peat mixture homogeneity.
  5. The storage bin mathematical model based on *Matlab-Simulink* is recommended for determination of the vertical stress in the opening of the storage bin stating the stress on the feeder mounted into the bin and calculating the driving torque of the feeder.
  6. The rotary spool feeder dozing constant is 5% feeding peat with the particle size  $< 3 \text{ mm}$ .
  7. Changing the direction of the rotary spool feeder spool rotation the feeder characteristic curve in the rotation frequency range from 0.5 to  $3 \text{ s}^{-1}$  does not change, but increasing the speed of rotation up to  $8 \text{ s}^{-1}$ , the capacity of the feeder for the rotation direction one is three times higher than for second.
  8. For feeding of chopped stalk material the drum feeder is suitable. Its relative feeding constant varies from 3 – 11% feeding straw with the length up to 10 mm and 3 – 7% feeding peat.
  9. Feeding with a drum feeder the stalk particles are discharged from the feeder in a 3 – 7 mm thick layer in the whole width of the drum; mixing the layers of mass from two feeders the components can be mixed without the help of a mixer.

10. The machine costs of the in-flow mixing process are by 38 % lower than for the discontinuous mixing.
11. For the granule production process with in-flow mixing the granulation machine costs comprise 60% of the total operation costs, but with a cyclic mixer – 56%. The costs for the payment for the employees are also similar; depending on the process they comprise 29 – 30% of the total operation costs.
12. The total operation costs for the briquetting process using a in-flow mixer are approximately 6% less than using a cyclic mixer.
13. Considering the costs of the components, briquetting energy, briquette density, burning properties and briquette durability the proportion of peat should be 30±5% in the reed – peat mixture and 50±5% in the straw – peat mixture.
14. A rotary feeder construction has been designed for what the patent is obtained (Patent Nr. 13597, SPK G01F11/10 (26.02.2007.)).

## Izmantotie informācijas avoti

### Sources of information

1. *Atjaunojamo energoresursu izmantošanas pamatnostādnes* [tiešsaiste]: Latvijas Republikas, Ekonomikas ministrija [ skatīts: 2007-04-12]. Pieejams: <http://www.em.gov.lv/em/2nd/?cat=14281&lng=lv>
2. *Quality guidelines for fuel peat – preparation started* [tiešsaiste]: Newsletter 2 on standards for bioenergy in the Baltic Sea Area [skatīts 2006-12-18]. Pieejams: <http://www.cbss.st/basrec/documents/bioenergy/dbaFile8466.pdf>
3. Alakangas E., Agar D., Leppänen M. *Report of the seminar presentations and study tour* [tiešsaiste]: Biomass Logistics and Combustion [skatīts 2007-04-14]. Pieejams: [www.opet-chp.net](http://www.opet-chp.net)
4. Kronbergs E., Kakitis A., Smits M., Nulle I. Biomass conditioning for solid biofuel compositions. **In:** *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Baltic Bioenergy Conference*. Germany, Fachhochschule Stralsund – University of Applied Sciences. Stralsund: LAiV, 2006, p. 81 – 90.
5. Schulze D. *Stresses in Silos* [tiešsaiste]: [skatīts 2007-17-05]. Pieejams: [www.dietmar-schulze.de/spanne.html](http://www.dietmar-schulze.de/spanne.html)
6. Schulze D. *Fundamentals of Bulk Solids Mechanics* [tiešsaiste]: [skatīts 2006-01-23]. Pieejams: <http://www.dietmar-schulze.de/grdle1.html>
7. Priekulis J. *Racionāla tehnoloģija un mehanizācija piena lopkopībā*. Jelgava: ŪZZI, 2000. 148 lpp.
8. Kaķītis A., Nulle I. Estimation of homogeneity stage of biomass mixtures. **In:** *Environment. Technology. Resources.*: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, Rēzekne: RA, 2007, p. 23 – 30.
9. Kaķītis A., Nulle I. Drum feeder for biomass dosage. **In:** Proceedings of Lithuanian University of Agriculture, Faculty of Agricultural Engineering,

Transport and Power Machinery Department – 60 year anniversary. Research papers 8. Akadēmija: LUA, 2007, p. 29 -32.

10. Kaķītis A., Nulle I. Rotary spool feeder for biomass dosage. **In:** *Engineering for rural development.*: Proceedings of 6<sup>th</sup> International Scientific conference Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava: LLU, 2007, p.114 – 118.
11. Kakitis A., Nulle I. Evaluation of durability of biomass briquettes. **In:** *Advanced technologies for energy producing and effective utilization.*: Proceedings of International scientific conference. Jelgava: LUA, Faculty of Engineering, 2004, p. 92-98.

## Publikāciju saraksts

### List of publications

#### Publikācijas vispārattītos recenzējamās zinātniskos izdevumos

1. Kaķītis A., Nulle I. Estimation of homogeneity stage of biomass mixtures. **In:** *Environment. Technology. Resources.*: Proceedings of International Scientific and Practical Conference, Rēzekne: RA, 2007, p. 23 – 30.
2. Smits M., Kakitis A., Kronbergs E. and Nulle I. Mechanical properties of biomass compositions for solid biofuel production. **In:** *15th European Biomass Conference “ Biomass for Energy, Industry and Climate Protection”*. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference. Berlin: 2007, p. 314-317.
3. Kaķītis A., Nulle I. Drum feeder for biomass dosage. **In:** Proceedings of Lithuanian University of Agriculture, Faculty of Agricultural Engineering, Transport and Power Machinery Department – 60 year anniversary. Research papers 8. Akadēmija: LUA, 2007, p. 29 -32.
4. Kaķītis A., Nulle I. Rotary spool feeder for biomass dosage. **In:** *Engineering for rural development.*: Proceedings of 6<sup>th</sup> International Scientific conference Latvia University of Agriculture, Faculty of Engineering. Jelgava: LLU, 2007, p.114 – 118.
5. Kronbergs E., Kakitis A., Smits M., Nulle I. Biomass conditioning for solid biofuel compositions. **In:** *Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Baltic Bioenergy Conference.* Germany, Fachhochschule Stralsund – University of Applied Sciences. Stralsund: LAiV, 2006, p. 81 – 90.
6. Nulle I., Kaķītis A. Determination of parameters for chopped biomass feeders. **In:** *Engineering for rural development.*: Proceedings of International Scientific Conference. Jelgava: LUA, Faculty of Engineering, 2006, pp. 186 – 193.
7. Nulle I., Kaķītis A.. Stress modelling of chopped biomass. **In:** *Research For Rural Development 2006.*: Proceeding of International Scientific Conference. Jelgava: LUA, Department of Post - Graduate Studies, 2006, p. 42 – 46.
8. Kaķītis A., Nulle I. Dosage of chopped biomass. **In:** *Opportunities and problems of economic development.*: Proceeding of International Scientific Conference. Rēzekne: RA, 2006, p. 418 – 423.

9. Nulle I., Kakitis A. Internal stresses of biomass compositions. **In:** *Research For Rural Development 2005*: Proceeding of International Scientific Conference. Jelgava: LUA, Department of Post - Graduate Studies, 2005, p. 61 – 66.
10. Kakitis A., Nulle I. Friction of chopped straw. **In:** *Agricultural Engineering Problems*: Proceeding of International scientific conference. Jelgava, LUA, Faculty of Engineering, 2005, p.143-148.
11. Kaķītis A., Nulle I. Biomasu maisījumu fizikāli mehāniskās īpašības. *Vide. Tehnoloģija. Resursi.*: Starptautiski zinātniskās konferences rakstu krājums. Rezekne: RA, 2005, 249. – 256. lpp.
12. Nulle I., Kakitis A. Separation of chopped reed particles. **In:** *Research for rural development 2004*: Proceedings of International scientific conference. Jelgava: LUA, 2004, p. 32-36.
13. Kakitis A., Nulle I. Evaluation of durability of biomass briquettes. **In:** *Advanced technologies for energy producing and effective utilization*: Proceedings of International scientific conference. Jelgava: LUA, Faculty of Engineering, 2004, p. 92-98.
14. Kakitis A., Nulle I. Durability of stalk material briquettes. **In:** *Enabling environment for society wellbeing*: Proceedings of International scientific conference. Rezekne, Rezeknes Higher Education Institution, 2004, p. 26-31.
15. Kakitis A., Kronbergs E., Nulle I., Smits M. Compacting energy of stalk material compositions. **In:** *Engineering the Future: International scientific conference*. Leuven: Technologisch Institut vzw, 2004, p. 932 – 933.
16. Kronbergs E., Kakitis A., Nulle I., Smits. Stalk material compositions as solid biofuel resource. **In:** *2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*: Proceedings of International scientific conference. Rome: Grafica Lito, 2004, p. 117 – 120.
17. Kaķītis A. Nulle I., Biomasas briekšu noturība. *Vide. Tehnoloģija. Resursi.*: Rēzeknes augstskolas 3. starptautiskā Zinātniski – praktiskā konferences rakstu krājums. Rēzekne: Rēzeknes augstskolas izdevniecība, 2003., 139 -144. lpp.
18. Kronbergs E., Kakitis A., Smits., Nulle I. Mechanisation of biomass agro-ecotechnologies. **In:** *Safe and economical agricultural Technologies*: Proceedings of International scientific conference. Priekuli: LLU, 2002, p. 186 – 188.

#### **Patenti (Patents):**

1. Kaķītis, I. Nulle. Rotortipa dozators. Latvijas patents LV-13597 B. SPK G01F11/10, 26.02.2007. Patenti un preču zīmes. *Latvijas Republikas patentu valdes oficiālais vēstnesis* – Nr. 11, 2007., 1356 – 1357 lpp.



