

# BIOMASU MAISĪJUMU FIZIKĀLI MEHĀNISKĀS ĪPAŠĪBAS PHYSICAL PROPERTIES OF BIOMASS COMPOSITIONS

AIVARS KAĶĪTIS, IMANTS NULLE

Latvijas Lauksaimniecības universitāte, Mehānikas institūts

Čakstes bulv. 5, Jelgava, LV-3001, Latvija

Tālr.: + 371 3005671, e-pasts: Aivars.Kakitis@llu.lv

---

**Abstract.** *The main resources for biomass agro-ecotechnologies are cereal straw residues, energy crops and emergent vegetation from wetlands. The herbaceous biomass is a material with low density ( $20 - 60\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) therefore new mobile equipment and technologies for biomass communitation and densification have to be worked out. The storage, dosage and mixing before compacting is necessary. Because of this we must have a working knowledge of the bulk properties of materials. The angle of repose was investigated of straw, reed and peat particles. It was stated that angle of repose of straw and reed varies between  $54 - 55$  degrees. Angle of repose of peat particles varies between  $40 - 60$  degrees. In a bin filled with solid bulk material this material acts on the walls with the horizontal stress. The stress ratio between horizontal and vertical stress is important for equipment design. This ratio was investigated for different size particles of straw, reed and peat. Stress ratio of straw and reed particles varies between  $\sim 0.6 - 0.7$ .*

**Keywords:** *stalk materials, biomass conditioning, biomass briquettes, angle of repose, bulk properties.*

---

## Ievads

Ekonomiskā un ekoloģiskā situācija pasaulē palielina atjaunojamo enerģijas resursu izmantošanas nepieciešamību. Attīstot enerģētisko augu audzēšanu un lauksaimnieciskās ražošanas atlikumu utilizāciju enerģijas ieguvei, samazinātos naftas cenu svārstību ietekme uz Latvijas ekonomiku un rastos jaunas darba vietas lauku apvidos. Apgūstot racionālas tehnoloģijas ekonomiskai aizaugušo platību un ezeru apauguma izmantošanai enerģijas ieguvei, tiktu sakārtota apkārtējā vide un samazinātos ar kūlas dedzināšanu saistīto nelaimes gadījumu skaits.

Izmantojamās biomasas – salmi, niedres un enerģētiskie augi - ir ar mazu blīvumu ( $20 - 60\text{ kg m}^{-3}$ ), kas samazina biomasu transportēšanas efektivitāti lielos attālumos. Lai palielinātu stiebraugu biomasu kurināmā blīvumu, nepieciešams to kompaktēt briketējot vai granulējot. Iepriekš veiktie pētījumi parādīja, ka stiebraugu briketēšana nenodrošina standartiem atbilstošu briķešu blīvumu un noturību. Briķešu blīvumu un noturību var ievērojami palielināt pievienojot saistvielas (kūdras, spropeli u.c.).

Salmu un niedru briķešu izturību var palielināt pievienojot masai kūdras. Izturības robežspriegums bīdē salmu-kūdras briķetēm ar kūdras saturu 50% palielinās 2.2 reizes.

Lai veidotu biomasu maisījumus ar noteiktu sastāvu, nepieciešams nodrošināt to sastāvdaļu precīzu dozēšanu un vienmērīgu sajaukšanu. Briketējamās masas sastāvdaļas ir jāuzglabā tvertnēs un jāpadod uz tehnoloģiskajām iekārtām. Daudzas ražošanas problēmas saistītas ar masas plūsmu uzkrāšanas un dozēšanas iekārtās. Lai novērstu materiāla iesprūšanu un salipšanu jāveic pētījumi par iekārtu izmēru un formas atbilstību maisījuma īpašībām. Viena no tām ir iekšējās berzes leņķis jeb dabīgā nogrūvuma leņķis. Dabīgā nogrūvuma leņķis tiek ņemts vērā pie tvertņu konusa slīpuma leņķa izvēles. Tvertnē esošā birstošā materiāla īpašības iespaido arī virs tā esošā materiāla spiediens. No šī spiediena materiāls iegūst noteiktu izturību un, tvertnes iztukšošanas laikā, var veidoties velves. Lai noteiktu velvju sabrukšanas parametrus glabāšanas tvertņu konusus, jāzina birstošā materiāla vertikālo un horizontālo spriegumu attiecība. To var raksturot ar šķērsspriegumu koeficientu  $\lambda$ . Šī koeficienta noteikšanai eksistē vairākas metodes. Vienkāršākā no tām ir dabīgā nogrūvuma leņķa metode. Uzskata, ka dabīgā nogrūvuma leņķis raksturo iekšējos spriegumus materiālā, bet praksē ir pierādīts, ka iegūtie rezultāti ir visai aptuveni. Otra metode, precīzāka un sarežģītāka, ir tiešā šķērspiediena mērīšana.

LLU Mašīnu mehānikas zinātniskajā laboratorijā noteiktas nobiruma leņķa  $\varphi$  un šķērsspriegumu koeficienta  $\lambda$  izmaiņas likumsakarības dažāda smalkuma salmu, niedru un kūdras daļiņām izmantojot abas iepriekšminētās metodes.

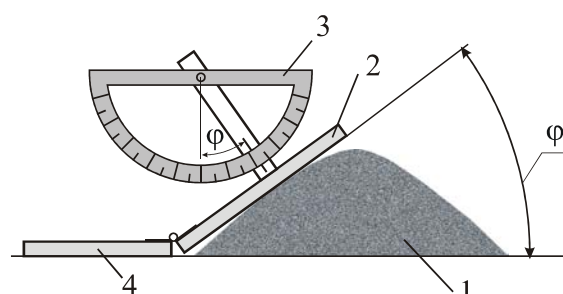
### Materiāli un metodes

Salmu, niedru un citu stiebru materiālu brikešu blīvums un noturība lielā mērā atkarīga no materiāla sasmalcināšanas pakāpes. Lai iegūtu pietiekošu brikešu blīvumu un mehānisko izturību, salmu daļiņu izmēram jābūt mazākam par 1 mm. Augsta smalcināšanas pakāpe palielina enerģijas patēriņu brikešu ražošanā un samazina to ekonomisko efektivitāti. Brikešu blīvumu un noturību var ievērojami palielināt pievienojot saistvielas (kūdru, sapropeli u.c.). Iepriekšējos eksperimentos tika noteikts kviešu salmu izturības robežspriegums stiepē ( $118.7 \pm 8.63 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ), bīdē ( $8.47 \pm 0.56 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ) un elastības modulis ( $13.1 \pm 1.34 \text{ GPa}$ ).

Brikešu izgatavošanas procesā nepieciešams uzglabāt, dozēt un sajaukt saistvielas un sasmalcinātos stiebraugus. Lai varētu aprēķināt nepieciešamo iekārtu parametrus, jāzina masas īpašības, kuras nosaka tās mijiedarbību ar mašīnu daļām. Eksperimentāli tika noteikts nogrūvuma leņķis un iekšējo spriegumu attiecība dažāda smalcinājuma stiebru daļiņām. Pētījumi tika veikti ar salmiem, niedrēm un kūdru. Stiebru materiāli tika sasmalcināti un, izsijājot caur sietiem, sadalīti smalkuma grupās ar daļiņu izmēriem 3-5, 2-3, 1-2, 0.5-1 un <0.5mm.

Stiebru materiāla nogrūvuma leņķis tika mērīts ar laboratorijā izgatavotu ierīci, kura sastāv no pieskares lineāla 2 un leņķa mērīšanas skalas 3 (1. att.). Sasmalcinātais materiāls tika iepildīts cilindrā un, paceļot cilindru uz augšu, izbērts uz horizontālas plaknes (2. att.).

Eksperimenta rezultātu precizitāte tika nodrošināta izdarot pietiekošu mērījumu atkārtojumu skaitu (ne mazāk par 11 atkārtojumiem) un veicot datorizētu datu apstrādi.



1.attēls. Nobiruma leņķa noteikšanas ierīce:

- 1 – materiāls, 2 - pieskares lineāls,  
3 – leņķa mērīšanas skala, 4 – atbalsts



2.attēls. Nobiruma konusa veidošana

Nogrūvuma leņķis  $\varphi$  ir atkarīgs no materiāla iekšējās berzes koeficienta. Iekšējās berzes koeficientu  $f$  aprēķina no vienādojuma:

$$f = \text{tg}\varphi. \quad (1)$$

Ja birstošs materiāls atrodas noslēgtā telpā un tiek saspiests vertikālā virzienā, tajā rodas normālie spriegumi  $\sigma_v$ . Šie spriegumi izsauc perpendikulārā virzienā vērstus spriegumus  $\sigma_h$  (3. att.). Šo spriegumu lielums atkarīgs no spriegumu  $\sigma_v$  lieluma un masas plūstamības. Spriegumu attiecību  $\lambda$  aprēķina pēc Kezdi vienādojuma [1]:

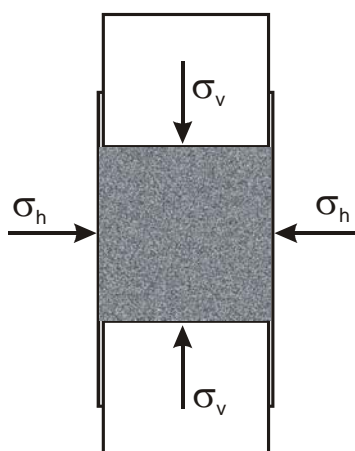
$$\lambda = 1 - \sin \varphi, \quad (2)$$

kur  $\varphi$  - materiāla iekšējās berzes leņķis.

Vācu standarts DIN 1055 (6. nodaļa, slodzes tvertnēs) [2] rekomendē vienādojumu (3), kas izveidots no vienādojuma (2):

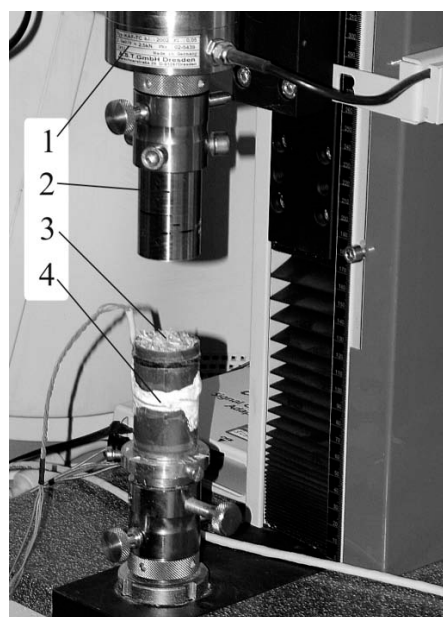
$$\lambda = 1.2 \cdot (1 - \sin \varphi). \quad (3)$$

Šāds pārveidojums izdarīts pamatojoties uz secinājumiem no prakses, kas pierāda, ka slodze uz tvertnes sienām ir lielāka, nekā aprēķināts pēc spriegumu attiecības  $\lambda$  [3, 4]. Neatbilstība izskaidrojama ar to, ka nosakot iekšējās berzes leņķi  $\varphi$  pastāvošās metodikas, netiek ņemti vērā daudzi faktori, kas darbojas reālā situācijā. ISO direktīva TC98/SC3/WG5 rekomendē spriegumu attiecību noteikt tieši izmērot radiālajā virzienā vērstos spriegumus centriskajā spiedē [5]. Eksperimentu veic izmantojot iekārtu, kas sastāv no plānsienu tērauda cilindra, kurā tiek saspiesta pētāmā biomasa. Cilindra deformācija tiek mērīta ar tenzorezistoriem 4 (4.att.). Izmantojot ZWICK materiālu testēšanas iekārtu pētāmā biomasa tika saspiesta ar noteiktu spēku vertikālā virzienā. Saspiešanas rezultātā masā rodas spriegumi  $\sigma_v$ , kas rada spriegumus  $\sigma_h$  (3.att.).



3. attēls. Spriegumu sadalījuma shēma:

$\sigma_v$  – spriegumi, ko masā rada centriskās spiedes spēks,  $\sigma_h$  – spriegumi, kas rodas šķērsvirzienā.



4. attēls. Horizontālo spriegumu noteikšanas iekārta: 1 – spēka sensors, 2 – virzulis, 3 – materiāls, 4 – mērcilindrs ar tenzorezistoriem.

Tenzorezistoru tilta izejas spriegums tika reģistrēts izmantojot virtuālo mēriekārtu komplektu *PicoScope - 212*.

Eksperimenti tika veikti ar sasmalcinātām un frakcionētām salmu, niedru un kūdras daļiņām ar mitrumu 10%. Sasmalcinātais materiāls tika izsijāts un sadalīts smalkuma grupās ar daļiņu izmēriem 5 – 7, 3-5, 2-3, 1-2 un 0.25 - 0.5 mm.

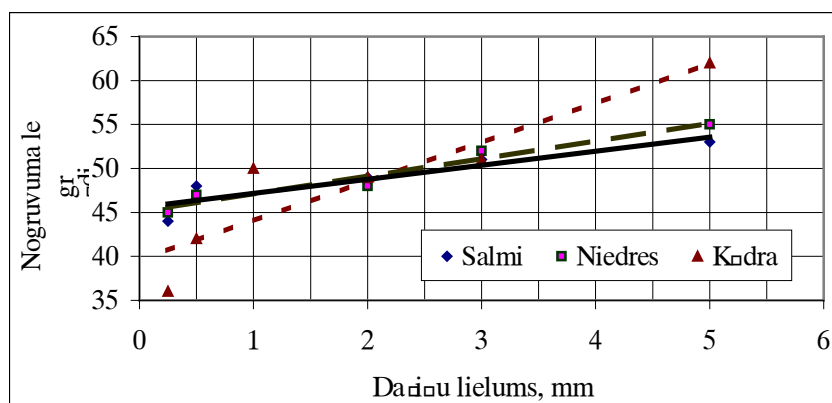
Ierīce tika kalibrēta radot eļļas spiedienu mērcilindrā. Spriegumi  $\sigma_h$  tika aprēķināti izmantojot kalibrēšanas taisnes vienādojumu. Spriegumu attiecību  $\lambda$  aprēķina pēc vienādojuma 4:

$$\lambda = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}. \quad (4)$$

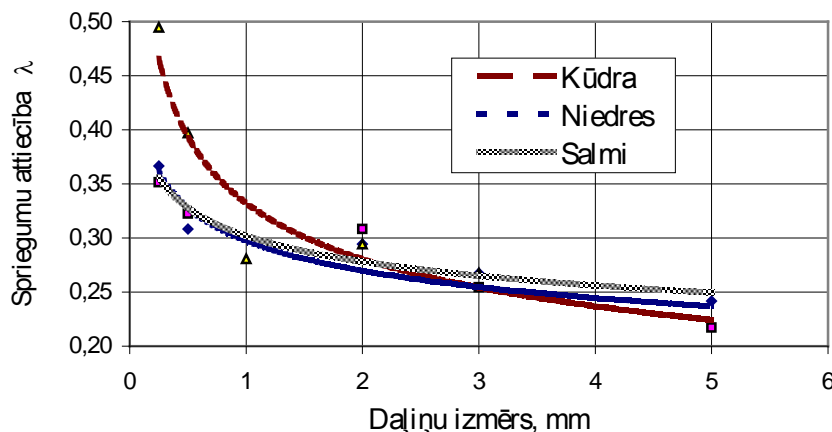
Vertikālā spiediena  $\sigma_v$  izmaiņas robežas no 0.54 līdz 2.7 Mpa.

### Rezultāti un to izvērtējums

Praktiski nosakot dabīgo nogrūvuma leņķi  $\phi$  redzams, ka gan salmu, gan niedru daļiņu lielums būtiski ietekmē tā vērtību. Daļiņas, kas smalkākas par 1 mm uzrādīja  $\phi \approx 45^\circ$ , bet daļiņas, kas lielākas par 5 mm  $\phi \approx 55^\circ$ . Salīdzinot vērtības redzam, ka salmu un niedru daļiņu dabiskā nogrūvuma leņķis noteikta izmēra daļiņām ir aptuveni vienāds. Kūdras daļiņu izmēram palielinoties nogrūvuma leņķis pieaug ievērojami straujāk un pārsniedz  $60^\circ$  kūdrai ar daļiņu izmēru 5 mm. Pēc vienādojuma (3) aprēķinātā spriegumu attiecības  $\lambda$  izmaiņa atkarībā no daļiņu izmēra redzama 6. att. Redzam, ka daļiņu izmēram palielinoties virs 1.5 mm, šķērsspriegumu koeficients samazinās un kļūst aptuveni vienāds visiem pētītajiem materiāliem. Kūdras daļiņām ar izmēru  $<1$  mm šķērsspriegumu koeficients pieaug straujāk nekā salmiem un niedrēm un sasniedz  $\lambda=0.5$  daļiņām ar izmēru 0.25 – 0.5 mm.



5.attēls. Dabīgais nogrūvuma leņķa izmaiņa atkarībā no niedru daļiņu lieluma

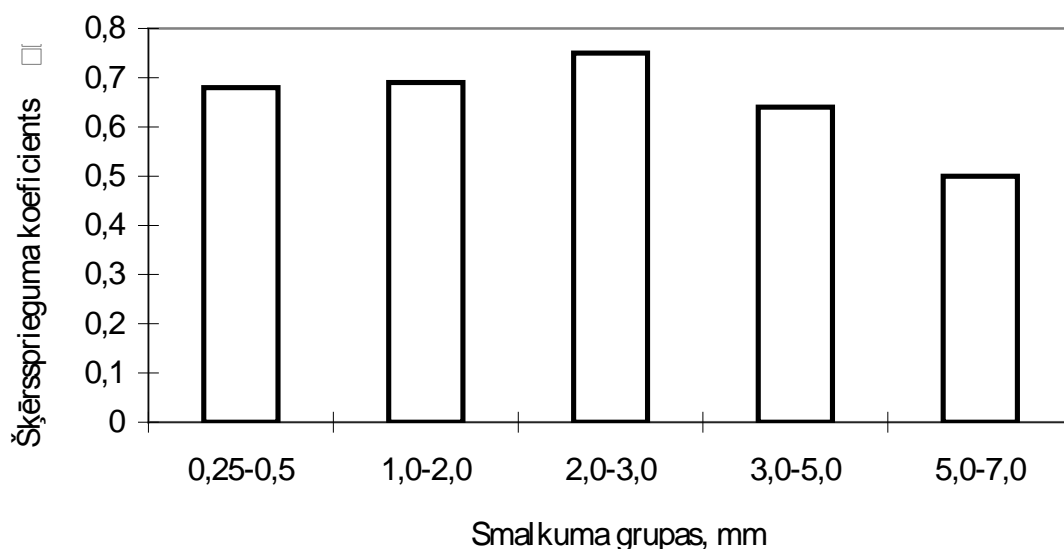


6.attēls. Šķērssprieguma koeficienta  $\lambda$  izmaiņa atkarībā no stiebru materiāla daļiņu izmēra.

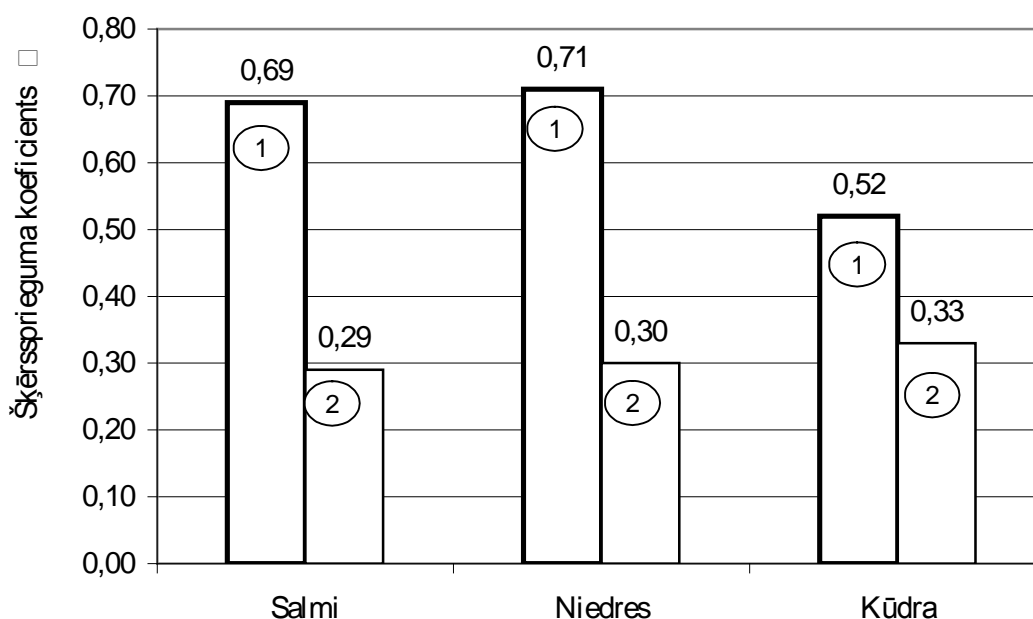
Ņemot vērā ISO direktīvas TC98/SC3/W65 ieteikumus aksiālo un radiālo spriegumu attiecība tika noteikta izmantojot laboratorijā izgatavotu mēriekārtu. Iegūtie rezultāti parādīja, ka šķērssprieguma koeficienta vērtība mainās atkarībā no materiāla sasmalcināšanas pakāpes. Salmiem un niedrēm ar daļiņu izmēru 0.25 – 5 mm netika novērota būtiska šķērssprieguma izmaiņa. Tas atradās robežās no 0.62 – 0.71 (7.att.). Rupji smalcinātiem salmiem ar daļiņu izmēru 5 - 7 mm šķērsspriegumu koeficients samazinājās līdz  $\lambda=0.52$ .

Salīdzinot  $\lambda$ -testā iegūtās šķērsspriegumu vērtības ar  $\lambda$  vērtībām, kas aprēķinātas pēc dabīgā nogrūvuma leņķa (formula 3), redzam, ka iegūtā koeficienta vērtība, ir ievērojami lielāka nekā koeficienta vērtība, kas iegūta pēc nogrūvuma leņķa metodes (8.att.). Rezultātu atšķirība bija

sagaidāma, jo par to liecināja literatūrā sastopamie citu zinātnieku pētījumu rezultāti dažādiem birstošiem materiāliem (smiltīm, graudiem un miltiem u.c.).



7.attēls. Šķērssprieguma koeficienta izmaiņa sasmalcinātie m salmiem



8.attēls. Šķērssprieguma koeficients dažādiem materiāliem (daļiņu izmērs 1 – 2 mm)

1. Mērot tiešā veidā ( $\lambda$  - tests)
2. Aprēķinot pēc dabīgā nogrūvuma leņķa.

Veicot eksperimentu pēc nogrūvuma leņķa metodes materiālā darbojas ļoti nelieli spriegumi, kas rodas masas pašsvara rezultātā. Ārpusē esošie materiāla slāņi ir ļoti irдени un tieši tie formē nogrūvuma leņķi (2.att.). Šajā gadījumā daļiņas kopā satur to savstarpējā saķeršanās nelīdzenumu un formas izciļņu dēļ.

Tiešā veidā mērot spriegumus radiālā virzienā, masā darbojas ievērojami aksiālie spriegumi, kas izsauc materiāla plūstamību deformācijai perpendikulārā virzienā. Tā rezultātā koeficienta  $\lambda$  vērtības ir ievērojami lielākas nekā iepriekšējā gadījumā. Fizikālie procesi, kas notiek

deformējamā materiāla slānī, precīzāk atbilst procesiem, kas norit tehnoloģiskajās iekārtās (presēs, transportieros, glabāšanas tvertnēs u. c.).

Dabīgā nogrūvuma leņķim ir būtiska nozīme tvertnes iztukšošanas konusa aprēķinos, jo iztukšošanās beigās materiāla daudzums tvertnē ir neliels un tajā darbojas necīgi aksiālie spriegumi.

### Secinājumi

Dabīgā nogrūvuma leņķis sasmalcinātiem stiebru materiāliem un kūdrai ir atkarīgs no smalcinājuma pakāpes un mainās robežās no 45° līdz 55° (salmiem un niedrēm) un no 40° līdz 60° (kūdrai).

Aprēķinot šķērsspriegumu koeficientu salmiem un niedrēm  $\lambda$  pēc dabīgā nogrūvuma leņķa iegūst ~2.4 reizes mazāku vērtību nekā tā tiek iegūta tiešos mērījumos. Kūdrai  $\lambda$  vērtības atšķiras 1.58 reizes. Tiešos šķērssprieguma mērījumos salmiem un niedrēm ar daļiņu izmēru 0.25 – 5 mm iegūtās  $\lambda$  vērtības atrodas robežās no 0.62 – 0.71.

Tiešos mērījumos iegūtās koeficienta  $\lambda$  vērtības rekomendējamas izmantošanai smalcināto biomasu glabāšanas un apstrādes iekārtu konstrukciju aprēķinos.

### Pateicība

Pētījumi veikti pateicoties LZP Fundamentālo un lietišķo pētījumu projekta 01.0790 “Biomassas resursi un mehānizācija kondicionēšanas procesos” finansējumam.

### Summary

Development of energy crops and agricultural residue utilization for energy are important goals of the rural policy. Mainly heat and electricity energy production from dry solid biomass is planned using it as biofuel. As chemical fertilizer production and usage corresponds to the consumption of oil fuel, biomass usage directly for energy production or as fertilizer are activities with equal importance for fossil fuel substitution.

Previous analysis allow to conclude that in rural ecosystems herbaceous biomass as cereal crop straw (mainly wheat straw), common reeds, rape straw and reed canary grass are the most prospective stalk materials for solid biofuel production. The herbaceous biomass is a material of low density (20 – 60 kg·m<sup>-3</sup>) therefore new mobile equipment and technologies for biomass comminution and densification have to be worked out. To guarantee the quality of biomass briquettes in the handling and usage process, sufficient durability of briquettes should be provided.

Former experimentally were stated values for wheat stalks [4] ultimate tensile (118.7 ± 8.63 N·mm<sup>-2</sup>) and shear (8.47 ± 0.56 N·mm<sup>-2</sup>) strength, modulus of elasticity (13.1 ± 1.34 GPa) and shear modulus (0.643 ± 0.043 GPa) in order to find methods for mechanical conversion with minimal energy consumption. Previously was stated that compacted with pressure 230 MPa compositions of straw particles from two fineness groups (2-3 mm and < 0.5 mm) have density > 1.0 g cm<sup>-3</sup>, if fineness proportion (amount of particles < 0.5) exceed 25%. Density 1.0 g cm<sup>-3</sup> has been obtained in densification of straw and reed stalk material particle compositions with peat, if peat proportion exceeds 20%.

Dependence of ultimate shear stress on wheat stalk material particle size in biomass briquettes was previously investigated. It was stated that ultimate shear stress increases for particle size in briquettes less than 0.5 mm. Peat additive improves the density and ultimate shear strength of briquettes, but peat in combustion process increases the ash content. Therefore it is not necessary to add peat more than 50% in briquetting composition.

Stalk biomass and peat is necessary to storage, load and dispense before the producing of briquettes. The loading, storage container discharging and automatic feeding process depends on internal stresses acting in biomass volume.

Knowledge of the stresses acting in chopped biomass is important for many applications:

- Storage container and hopper design for strength,
- Storage container and hopper design for flow,
- Loads on feeders and inserts,
- Driving torque of feeders.

Hoppers are used in industry for protection and storage of powdered and granulated materials. Hoppers must be designed such that they are easy to load. More importantly, hoppers must be designed such that they are easy to unload. The way the hopper is designed affects how much of the stored material can discharge and whether they're mixing of solid sizes or dead space that reduces the effective holding capacity of the hopper.

To design storage hoppers, the following material properties are needed:

- Internal friction coefficient,
- Wall friction coefficient,
- Permeability,
- Compressibility.

Other factors that should be considered include temperature and moisture content along phase diagram if caking may be a problem.

In contrast of pure fluids, the flow behavior of bulk solids cannot be described by only knowing the name and chemical structure of the material under consideration. This is obvious from the large number of additional parameters, besides the chemical composition, which have an influence on the flow behavior of the bulk solid. Some of these parameters are:

- Particle size distribution,
- Particle shape (e.g. spherical, rod-shaped),
- Particle surface (smooth, rough, sharp edges),
- Moisture content.

Mentioned before factors and properties of solid bulk material are referable to the compositions of granulated and chopped stalk materials and additives (peat) used for biomass briquettes.

Mechanical properties of stalk material were experimentally determinate in order to find methods for mechanical conversion with minimal energy consumption. These parameters of mechanical properties are necessary for mechanization equipment design.

To determine bulk properties of biomass chopped reed and straw particles with moisture content less than 10% was sieved and divided into fines groups: 3-5 mm, 2-3 mm, 1-2 mm, 0.5-1 mm and <0.5 mm.

Experimentally was stated two bulk properties of chopped stalk materials and peat: angle of repose and horizontal and vertical stress ratio.

The angle of repose is a characteristic of solids, which characterizes the pilling of stacking nature of the particles. The angle of repose is considered to be mostly a measure of the internal friction between the particles as a whole, but not between individual particles.

The angle of repose was investigated of straw, reed and peat particles. Experimental design for estimating of angle of repose is shown in Fig. 1 and 2. It was stated that angle of repose of straw and reed particles varies between 45 – 55 degrees. It depends on size of particles, increasing of particle size leads to increasing of angle of repose (see Fig. 5). Angle of repose of peat particles varies between 40 – 60 degrees.

The best use of angle of repose is to determine the size of a pile of chopped biomass. Angle of repose is not recommended to use for designing of bottom of a hopper to ensure proper discharge.

In a bin filled with solid bulk material this material acts on the walls with the horizontal stress. The stress ratio between horizontal and vertical stress is important for storage equipment design. Often the equation of Kèzdi (2) is used for the estimation of the stress ratio  $\lambda$ . The values of the stress ratio which are calculated according to equation (3) are not correct in any case because the stress ratio depends on a lot of parameters that are not taken into account in eq. (3). According to

ISO-guideline TC98/SC3/W65 stress ratio was measured directly from a uniaxial compression test. Experimental design for estimating of stress ratio  $\lambda$  is shown in Figure 4. Horizontal stresses were measured directly on the walls of cylinder 4 using strain gauges (see Fig. 4). This ratio was investigated for different size particles of straw, reed and peat. Stress ratio of straw and reed particles varies between  $\sim 0.62 - 0.71$  for particle size  $0.25 - 5$  mm.

Obtained stress ratio values are recommended to use for chopped stalk biomass storage equipment design.

#### Literatūra

1. Kezdi, A.: Erddrucktheorien, Springer Verlag Berlin 1962.
2. DIN 1055, Teil 6 Lasten in Silozellen, Deutsche Norm, 1987.
3. Zachary, L. W., Lohnes, R. A.: A confined compression test for bulk solids, Proc. 13th Annual Powder & Bulk Solids Conf., May 1988, Rosemont, IL, USA.
4. Kwade, A., Schulze, D., Schwedes, J.: Determination of the Stress Ratio in Uniaxial Compression Tests Part 1 and 2, Powder Handling & Processing 6 (1994) 1, pp. 61 – 65 and 2, pp. 199 – 203.