



## Vplyv parametrov lisovania a lisovaného materiálu na zmenu výslednej hustoty výliskov z fytomasy

*Peter KRÍŽAN<sup>1,\*</sup>, Miloš MATÚŠ<sup>1</sup>, Juraj BENIAK<sup>1</sup>, Michal SVÁTEK<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažmentu kvalitu, Námestie Slobody 17, 81231 Bratislava, Slovensko*

\* **Email:** peter.krizan@stuba.sk

*Cieľom tohto príspevku je prezentovať výsledky výskumu týkajúceho sa stanovenia vplyvu parametrov lisovania a lisovaného materiálu na zmenu výslednej hustoty výliskov z vybraných druhov fytomasy. Rôznorodosť lisovaného materiálu so sebou nesie rozdielnosť vplyvu materiálových parametrov, ale aj parametrov lisovania na výslednú hustotu výliskov. Autori v príspevku popisujú výsledky experimentálneho stanovenia vplyvu lisovacieho tlaku, lisovacej teploty a veľkosti frakcie na zmenu výslednej hustoty výliskov z fytomasy po stabilizácii. Experimentálny výskum prebiehal na laboratórnom experimentálnom lisovacom stende a zvolené druhy fytomasy pre experiment boli pšeničná slama, seno a lucerka.*

**Kľúčové slová:** fytomasa, rastlinná biomasa, zhutňovanie, hustota výliskov, lisovací tlak, lisovacia teplota, veľkosť frakcie

### 1 Úvod

Vývoj nových konštrukcií zhutňovacích strojov si vyžaduje aj podrobný výskum rôznych druhov materiálov, ktoré budú danými technológiami spracovávané. Touto problematikou sa na našom pracovisku zaoberáme už niekoľko rokov. V rôznych projektoch je možné sa stretnúť aj s rôznymi druhmi lisovaných materiálov a konštrukcie zhutňovacích strojov musia byť schopné daný materiál zhutniť. Z rozvojom technológie energetického zhodnocovania biomasy a s postupným znižovaním množstiev využiteľnej drevnej biomasy, rastú aj požiadavky na spracovanie iných druhov biomasy, napr. rôzne druhy fytomasy. Každý druh lisovaného materiálu ma svoje špecifické vlastnosti a chemické zloženie a každá aj malá zmena vlastností lisovaného materiálu môže ovplyvniť výslednú kvalitu výliskov. Rôznorodosť vlastností lisovaného materiálu si vyžaduje rôzne podmienky a nastavenie technológie zhutňovania. Z dôvodu návrhu ekonomicky efektívneho spôsobu spracovania biomasy je nutné poznať a stanoviť optimálne parametre pre zhutňovanie, vzhľadom na lisovaný druh materiálu. Na druhej strane, sú platné technické normy pre hodnotenie kvality výliskov z biomasy a tieto musia byť dodržané. Preto je dôležité a opodstatnené venovať sa aj experimentálnemu výskumu vplyvu dôležitých parametrov na výslednú kvalitu výliskov z fytomasy. Cieľom tohto príspevku je prezentovať výsledky experimentálneho stanovenia vplyvu parametrov lisovania a lisovaného materiálu na výslednú hustotu z vybraných druhov fytomasy - pšeničná slama, seno a lucerka.



## 2 Sledované závislé premenné - parametre

Na základe skúseností, ktoré máme z predchádzajúcich realizovaných projektov a experimentálnych výskumov, aj na základe realizovaných podrobných analýz vplyvu parametrov počas procesu zhutňovania, boli zvolené pre opisovaný výskum nasledujúce závislé premenné - lisovací tlak, lisovacia teplota, veľkosť frakcie, druh fytohmoty. Všetky uvedené parametre ovplyvňujú podmienky v lisovacej komore počas zhutňovania a tým zároveň ovplyvňujú výslednú kvalitu výliskov a taktiež dobu stabilizácie výliskov. Základným cieľom bolo stanoviť ich vplyv a významnosť v procese zhutňovania. Uvedené výsledky sú dôležité pre konštrukciu zhutňovacích strojov, ale aj pre návrh správnej technológie zhutňovania daných druhov fytohmoty. Po spracovaní a vyhodnotení výsledkov známymi štatisticko-matematickými metodikami, bude možné navrhnúť matematický model. Tento bude popisovať vplyv jednotlivých parametrov v procese zhutňovania, vzájomný vplyv interakcií a predikovať výslednú kvalitu pri variabilnom nastavení parametrov s ohľadom na dané požiadavky definované technickými normami. Avšak matematický model nie je predmetom tohto príspevku.

## 3 Podmienky experimentálneho výskumu

Pre tento experiment boli zvolené 3 druhy rastlinnej biomasy - pšeničná slama, lucerka a seno. Tieto typické poľnohospodárske plodiny sú často pestované na Slovensku ako zdroje stravy hospodárskych zvierat. Vzorky z uvedených druhov fytohmoty sme získali z poľnohospodárskej spoločnosti pôsobiacej na južnom Slovensku. Chemické zloženie zvolených vzoriek je vidieť v tabuľke 1. Obsah lignínu, celulózy a hemicelulózy hrajú dôležitú úlohu počas zhutňovania. Prispievajú a ovplyvňujú vznik väzbových mechanizmov medzi časticami a vláknami materiálu.

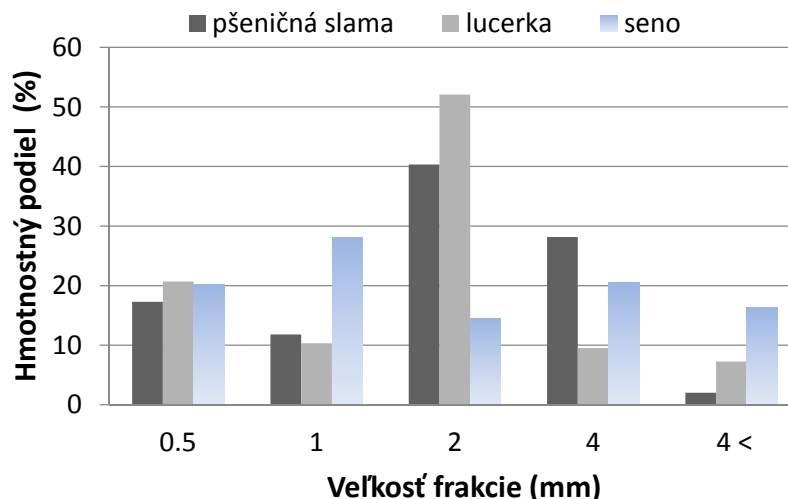
Tab.1 Chemické zloženie zvolených druhov rastlinných plodín [12]

Plodina	Obsah hemicelulózy (%)	Obsah Celulózy (%)	Obsah lignínu (%)
Pšen. slama	45.20	33.82	10.98
Lucerka	49.10	35.20	15.50
Sena	25.19	31.98	12.19

Balíky rastlinných plodín boli dezintegrované pomocou strižného mlynu s  $\phi$  5 mm sitom. Následne bolo zistené rozloženie a obsah veľkosti častíc pomocou vibračnej preosievačky AS 200. Rozloženie veľkosti častíc bolo prepočítané na objem, vid' obrázok 1. pre experimentálny výskum sme zvolili veľkosti frakcií 0,5, 1, 2, 4 mm a frakciu väčšiu ako 4 mm. Obsah vlhkosti dezintegrovaných vzoriek bol zistených prostredníctvom váhy pre stanovenie obsahu vlhkosti a sušiny MRS 120-3. Tento prístroj stanovuje obsah vlhkosti na základe gravimetrickej metódy. Z dôvodu komplikovanosti zmien vlhkosti počas prípravy materiálu a na základe časových obmedzení sme použili pre experimentálny výskum iba jednu úroveň tohto parametra ( $w_r = 8\%$ ). Takže vplyv obsahu vlhkosti nebol predmetom bádania popisovaného experimentálneho výskumu.



Výlisky boli vytvorené lisovaním na experimentálnom lisovacom stende, ktorý je vertikálnej konštrukcie, t.z. s vertikálnou osou lisovania. Zdroj pre vyvodenie lisovacej sily je hydraulický agregát. experimentálny lisovací stend pozostáva zo základného rámu, z valcovej lisovacej komory  $\phi$  20 mm, z výhrevného zariadenia s teplotným senzorom pre reguláciu teploty v lisovacej komore a z protitlakovej zátky.



Obr. 1 Hmotnostný podiel jednotlivých veľkostí frakcií [12]

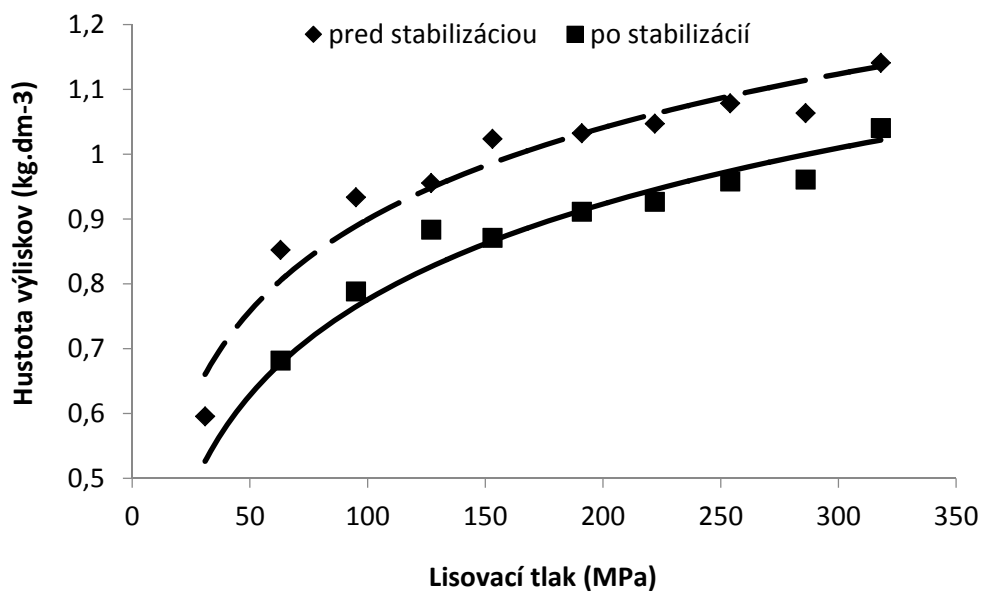
Hydraulický lis, do ktorého je vložený experimentálny lisovací stend je schopný vyvodit' v daných podmienkach lisovací tlak v rozmedzí od 31 MPa do 318 MPa. Pre dodržanie experimentálneho plánu a zaručenie korektných výsledkov, bolo nutné vylisovavať pre každé nastavenie 7 výliskov. Toto je minimálny počet hodnôt pre spracovanie pomocou známych štatisticko-matematických metód [8]. Opísané zariadenia poskytuje široké nastavenie pre experimentálny výskum aj pre parameter lisovací tlak, aj pre lisovaciú teplotu. Výskum bol realizovaný aj v troch úrovniach lisovacej teploty (25 °C, 85 °C and 115 °C). Lisovanie, resp. zhutnenie bolo realizované postupne, pre zachovanie korektnosti získavania výsledných hodnôt. Kvalita výliskov je definovaná viacerými parametrami, avšak v našom prípade sme použili ako hodnotiaci parameter hustotu výliskov. Hustota výliskov bola vypočítaná na základe pomeru hmotnosti výlisku a objemu výlisku. Pre každý výlisok bola zmeraná jeho hmotnosť, dĺžka a priemer. Objem výlisku bol vypočítaný ako objem valca (dĺžka a priemer) podľa normy EN 16127 [3]. Pre každé nastavenie bola vypočítaná priemerná hodnota získanej hustoty. Všetky výsledky v tomto príspevku sú prezentované vzhľadom na výslednú hustotu výliskov a sú znázornené graficky prostredníctvom závislostí.

#### 4 Výsledky experimentu a diskusia

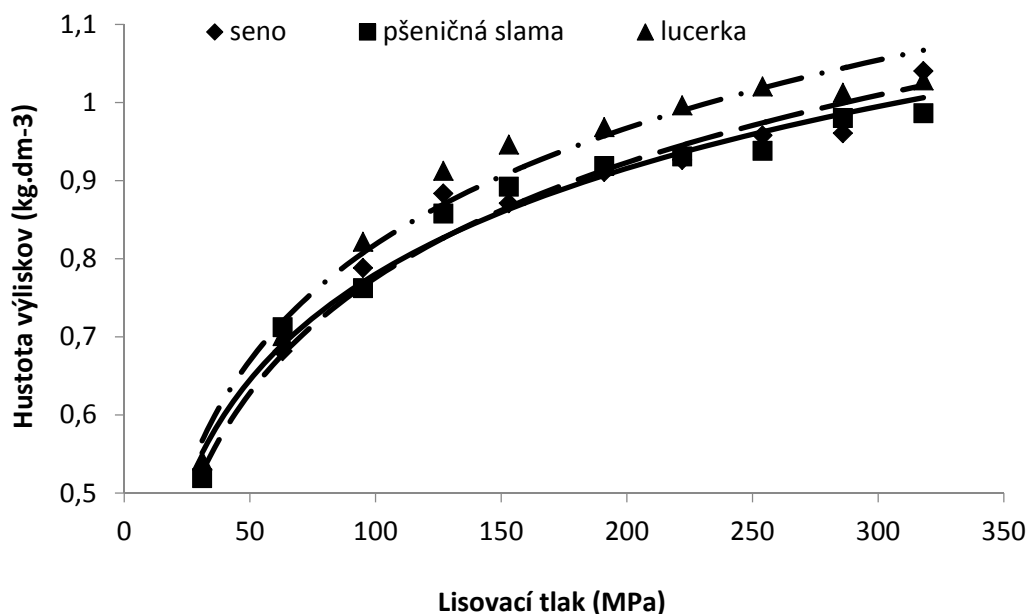
Vplyv lisovacieho tlaku na hustotu výliskov zo sena je vidieť na obrázku 2. So zvyšovaním sa lisovacieho tlaku, rástla aj hustota výliskov. Táto závislosť znázorňuje a poukazuje aj na dôležitosť doba stabilizácie výliskov. Doba stabilizácie je časový interval počas ktorej dochádza k dilatácii výliskov. Norma DIN 52182 [1] opisuje podmienky a proces stanovenia hustoty výliskov po dobe stabilizácie. Po zhutnení, musia byť výlisky uložené do prostredia s konštantnými klimatickými podmienkami, kde dochádza k stabilizácii. Počas tejto doby sú často merané parametre výlisku (dĺžka a priemer) a je hodnotená ich hmotnosť a hustota. Ak sa hmotnosť výlisku zmení od predchádzajúceho merania (24 hod.) najviac o 0,1%, považuje



sa výlisok za stabilizovaný. Dilatácia výlisok je dej, počas ktorého sa menia geometrické parametre výlisok (dĺžka a priemer) aj hmotnosť výlisok. Tieto zmeny sú ovplyvňované nastavenými parametrami procesu zhutňovania aj parametrami lisovaného materiálu. Dilatácia má priamy vplyv na výslednú hustotu výlisok, pretože hustota sa počíta z vyššie uvedených parametrov výlisok. Dilatáciu možno pozorovať po uvoľnení lisovacieho tlaku, t.z. keď lisovací tlak prestane pôsobiť na výlisok. Vplyv a veľkosť dilatácie je výsledkom vzájomného pôsobenia lisovacieho tlaku, lisovacej teploty, vlhkosti a veľkosti frakcie na výlisok, a ich vzájomnej interakcie. Na obrázku 2 je vidieť 2 závislosti, jedna je pre hustoty výlisok vypočítaných pred stabilizáciou (ihneď ako výlisok opustí lisovaciu komoru) a druhá pre hustoty výlisok vypočítaných po stabilizácii. Zmena hustoty po stabilizácii je významná a dilatácia v tomto prípade pôsobí negatívne, t.z. hodnoty hustôt výlisok po stabilizácii sú nižšie.

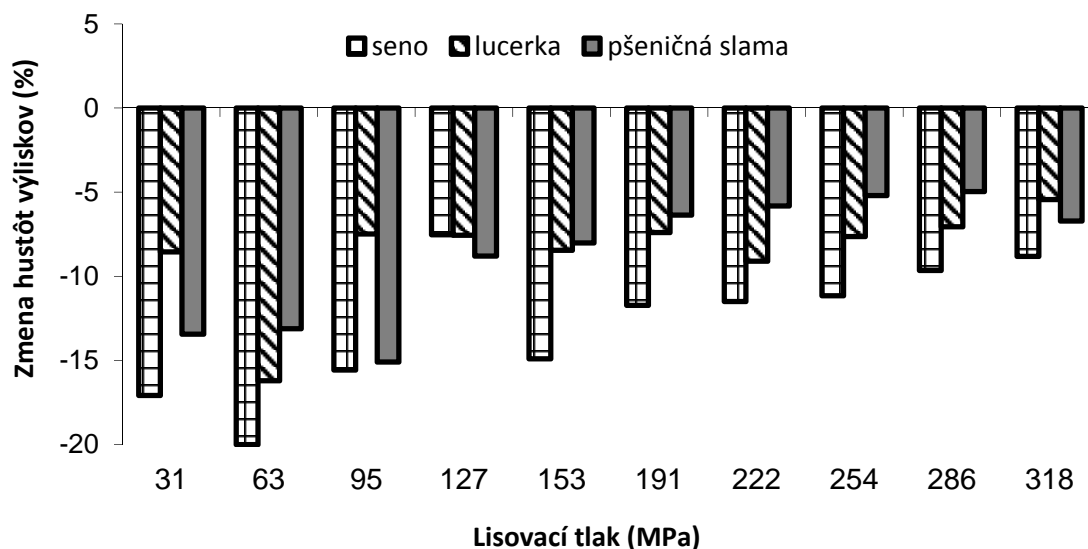


Obr. 2 Závislosť hustoty výlisok zo sena od lisovacieho tlaku ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w_r = 8\%$ ;  $L = 2\text{ mm}$ ) [12]

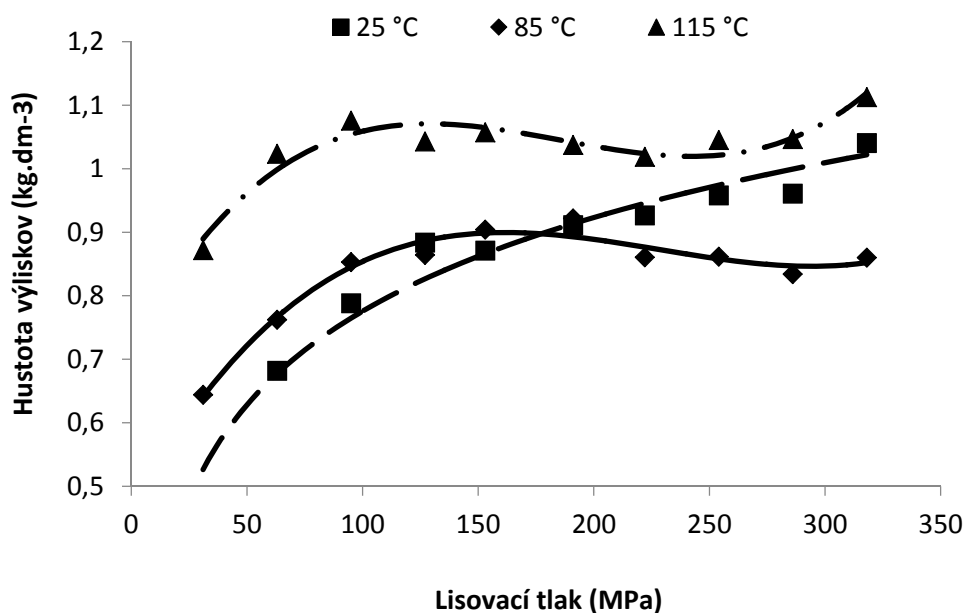


Obr. 3 Závislosť hustoty výliskov od lisovacieho tlaku ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w_r = 8\%$ ;  $L = 2\text{ mm}$ ) [12]

Na obrázku 3 je vidieť závislosť hustoty výliskov od lisovacieho tlaku pre všetky 3 sledované druhy rastlinných plodín. Závislosti potvrdzujú fakt, že s nárastom lisovacieho tlaku rastie aj hustota výliskov. Rozdiely medzi hustotami vychádzajú z rozdielov chemického zloženia uvedených materiálov. Najvyššie hodnoty hustôt boli zaznamenané pri lisovaní lucerky. Na nasledujúcom obrázku 4 sú graficky znázornené zmeny hustôt (po stabilizácii) pre sledované druhy materiálu. Hustoty výliskov bola pri všetkých druhoch materiálu po stabilizácii nižšia. Avšak je možné pozorovať, že so zvyšovaním lisovacieho tlaku sa znižuje veľkosť dilatácie. Je nutné poznamenať, že tieto výsledky boli získané pri lisovaní bez použitia lisovacej teploty, t.z. pri  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

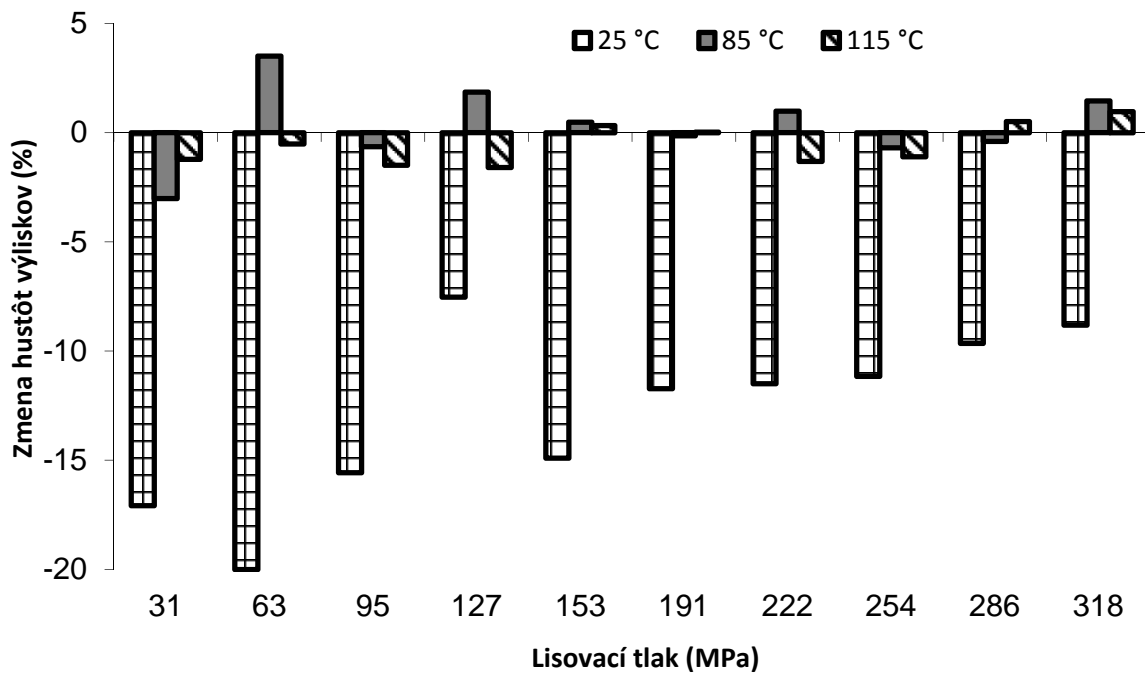


Obr. 4 Závislosť zmeny hustôt výliskov od lisovacieho tlaku ( $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $w_r = 8\%$ ;  $L = 2\text{ mm}$ )



Obr. 5 Závislosť hustoty výliskov zo sena od lisovacieho tlaku v troch úrovniach lisovacej teploty ( $w_r = 8\%$ ;  $L = 2 \text{ mm}$ ) [12]

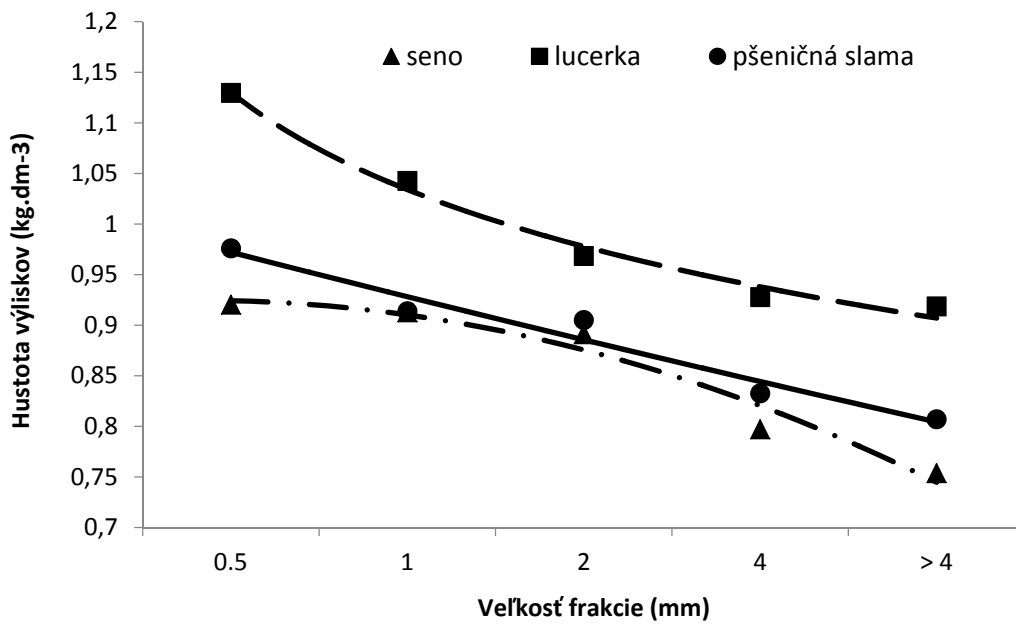
Výsledky znázornené na obrázku 5 boli získané po zhutňovaní sena na troch úrovniach lisovacej teploty (25, 85 a 115 °C). Tento obrázok dokazuje pozitívny vplyv nárastu lisovacej teploty na výslednú hustotu výliskov. S nárastom lisovacej teploty a lisovacieho tlaku, rastie aj hustota výliskov. Lisovacia teplota má pozitívny vplyv na lignínovú zložku lisovaného materiálu, teda v procese zhutňovania ovplyvňuje plastifikáciu lignínu [4, 6, 11]. So zvyšovaním lisovacej teploty sa lignín stáva plastickejšim, čo ovplyvňuje potom počas pôsobenia lisovacieho tlaku vznik pevnejších väzbových mechanizmov [6, 11]. Efektívne vytvorenie pevných väzieb počas zhutňovania a plastifikácia lignínu je podmienené pôsobením vyššej lisovacej teploty. [4, 7]. Závislosti s podobným charakterom výsledkov, teda pozitívnym vplyvom lisovacej teploty na hustotu výliskov, boli zaznamenané aj zvyšných dvoch druhoch lisovaného materiálu.



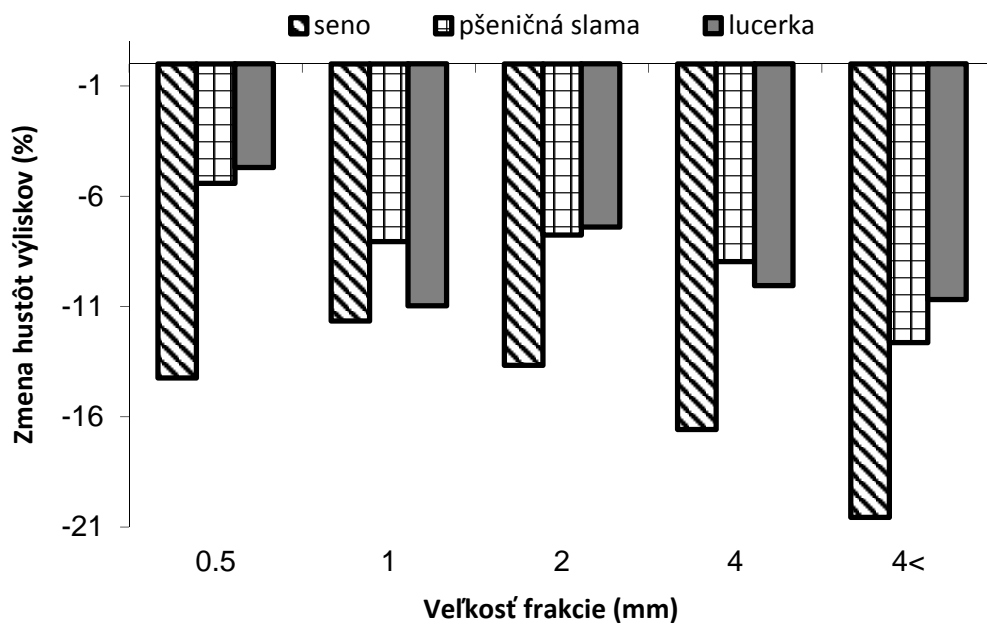
Obr. 6 Závislosť zmeny hustôt výliskov od lisovacieho tlaku pri troch úrovniach lisovacej teploty ( $w_r = 8\%$ ;  $L = 2\text{ mm}$ )

Závislosti znázornené na obrázku 6 dokazujú pozitívny vplyv lisovacej teploty na dilatáciu výliskov. Vidíme, že zvyšovaním lisovacej teploty a lisovacieho tlaku klesá veľkosť dilatácie. Závislosti s podobným charakterom výsledkov, teda pozitívnym vplyvom lisovacej teploty na hustotu výliskov, boli zaznamenané aj zvyšných dvoch druhoch lisovaného materiálu.

Dôležitou časťou experimentálneho výskumu bolo aj stanovenie vplyvu zmeny veľkosti frakcie na hustotu výliskov a taktiež na dilatáciu výliskov. Na obrázku 7 je vidieť vplyv veľkosti frakcie na hustotu výliskov. Pozorujeme, že znižovanie veľkosti frakcie lisovaného materiálu pozitívne ovplyvňuje hustotu výliskov pre všetky sledované druhy fytomasy [9]. Závislosť ukazuje, že zo zmenou veľkosti frakcie sa mení aj hustota výliskov. Je nutné poznamenať, že výsledky znázornené na obrázku 7 boli získané pri lisovaní bez pôsobenia lisovacej teploty a na jednej (zvolenej) úrovni lisovacieho tlaku. Najvyššie hodnoty hustoty boli získané pri lisovaní lucerky. Veľkosť frakcie a hmotnostný podiel frakcií ovplyvňuje veľkosť vzniknutých väzieb vo výlisku počas zhutňovania [7, 9]. Dilatácia výliskov klesá so znižovaním veľkosti frakcie. Toto je možné vidieť na obrázku 8. Najväčšia dilatácia bola zaznamenaná pri zhutňovaní sena. Napriek faktu, že so znižovaním veľkosti frakcie sa znižovala aj dilatácia výliskov, stále bola zmena hustoty vysoká (negatívna). Preto bolo dôležité overiť v tejto fáze aj vplyv lisovacej teploty. Na obrázku 9 je znázornená zmena hustôt výliskov pri vyššej úrovni pôsobiacej lisovacej teploty. Vidíme, že sa potvrdil pozitívny vplyv vyššej lisovacej teploty. So znižovaním veľkosti frakcie a zvyšovaním lisovacej teploty rastie výsledná hustota výliskov a klesá veľkosť dilatácie. V tomto prípade vidíme, že najväčšia zmena hustôt výliskov (však teraz v pozitívnom smere) bola zaznamenaná pri zhutňovaní sena.

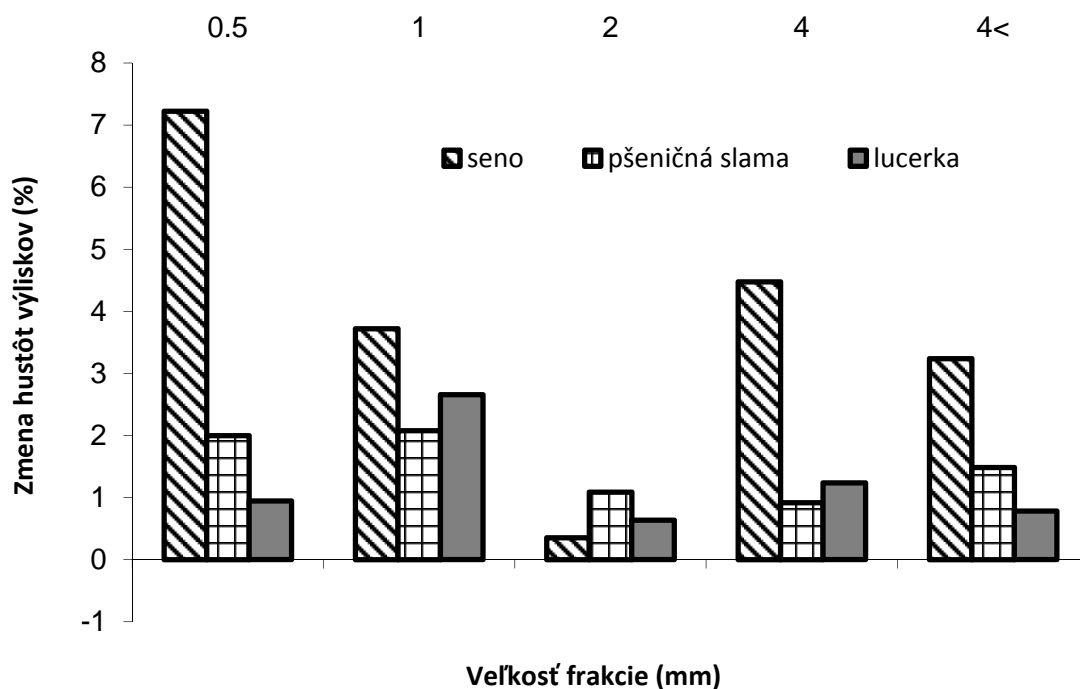


Obr. 7 Závislost hustoty výliskov od veľkosti frakcie ( $w_r = 8\%$ ;  $p = 191 \text{ MPa}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ )



Obr. 8 Závislost zmeny hustôt výliskov od veľkosti frakcie ( $w_r = 8\%$ ;  $p = 191 \text{ MPa}$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ )





Obr. 9 Závislosť zmeny hustôt výliskov od veľkosti frakcie ( $w_r = 8\%$ ;  $p = 191$  MPa,  $T = 115^\circ\text{C}$ )

## 5 Záver

Cieľom prezentovaného experimentálneho výskumu bolo stanoviť vplyv parametrov zhutňovania a parametrov lisovaného materiálu na výslednú hustotu výliskov a dilatáciu výliskov, pri zhutňovaní vybraných druhov rastlinnej biomasy (seno, pšeničná slama, lucerka). Hlavné poznatky získané experimentálnym výskumom môžu byť zhrnuté do nasledujúcich záverov:

- Všetky sledované premenné (parametre) majú výrazný vplyv na výslednú hustotu výliskov. Zvyšovaním lisovacieho tlaku, zvyšovaním lisovacej teploty a znižovaním veľkosti frakcie je možné zvýšiť hustotu výliskov z rastlinnej biomasy.
- Hodnota hustoty výliskov definovaná technickými normami môže byť dosiahnutá správnym nastavením sledovaných premenných (parametrov).
- Skupina sledovaných premenných (lisovací tlak, lisovacia teplota, veľkosť frakcie) výrazne ovplyvňujú dilatáciu výliskov počas doby stabilizácie. Pozitívna dilatácia, ktorej výsledkom je zvýšenie hustoty výliskov, môže byť dosiahnutá iba počas pôsobenia lisovacej teploty.

## PodĎakovanie

V tomto príspevku sú prezentované výsledky projektu APVV-0857-12, Výskum trvanlivosti nástrojov progresívnej konštrukcie zhutňovacieho stroja a vývoj adaptívneho riadenia procesu zhutňovania, financovaný Agentúrou pre podporu vedy a výskumu.



## Použitá literatúra

- [1] DIN 52182. Bestimmung der Rohdichte; Deutsches Institut für Normung: Berlin, Germany, (1976). (In German)
- [2] EN 14774-3:2009. Solid Biofuels - Determination of Moisture Content-oven Dry Method Part 3: Moisture in General Analysis Sample; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, (2009).
- [3] EN 16127:2012. Solid Biofuels - Determination of Length and Diameter of Pellets; European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, (2009).
- [4] P. Križan, The Densification Process of Wood Waste, 1st ed.; De Gruyter Open: Berlin, Germany, 2015; ISBN 978-3-11-044002-7, pp. 184.
- [5] P. Križan, M. Svátek and M. Matúš: Analysis of the significance of technological parameters at briquetting of selected types of hardwood and softwood. In: Journal of Applied Mathematics – Aplimat. Bratislava: FX s.r.o., ISBN 978-80-89313-51-8, pp. 395-404. (2011)
- [6] N.P.K. Nielsen, D.J. Gardner and T. Poulsen: Importance of Temperature, Moisture Content, and Species for the Conversion Process of Wood Residues into Fuel Pellets. Wood and Fiber Science, 41(4), pp. 414-415. (2009)
- [7] C. Serrano, E. Monedero, M. Lapuerta and H. Portero: Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. Fuel Processing & Technology. 92, pp. 699-706. (2011)
- [8] P. Križan, M. Svátek, Research of densification process of various type of biomass, 1st ed.; Bratislava : FX s.r.o., 2014; ISBN 978-80-89313-60-0, pp. 182. (in Slovak)
- [9] M. Matúš, P. Križan, M. Kováčová and J. Beniák: The influence of size fraction on the compressibility of pine sawdust and the effectiveness criterion for densification. In Acta Polytechnica. Vol. 54, No. 1, ISSN 1210-2709, pp. 52-58. (2014)
- [10] P. Križan, M. Matúš, J. Beniák and M. Kováčová: Stabilization time as an important parameter after densification of solid biofuels. In Acta Polytechnica. Vol. 54, No. 1, ISSN 1210-2709, pp. 35-41. (2014)
- [11] P. Križan, L. Šooš, M. Matúš, J. Beniák and M. Svátek: Research of significant densification parameters influence on final briquettes quality. In: Wood research, ISSN 1336-4561, Vol.60, No.2 (2015)
- [12] M. Ondruška: Research of selected types of phytomass densification, Diploma work, ÚSETM Sjf STU Bratislava, Thesis supervisor: P. Križan, pp.84, (2010). (in Slovak)