



Veľkosť frakcie a frakčného zloženia v interakcii s kvalitou drevených brikiet

Miloš MATÚŠ^{1}, Peter KRIŽAN¹, Juraj BENIAK¹*

¹ Slovenská technická univerzita v Bratislave, Strojnícka fakulta, Námestie slobody 17, 812 31 Bratislava

* Email: milos.matus@stuba.sk

Veľkosť frakcie a frakčné zloženie suroviny má na produkciu tuhých biopalív výrazný vplyv. Počas procesu zhutňovania sa medzi časticami partikulárnej látky vytvárajú rôzne príťažlivé sily a tvarové väzby. Ich charakter priamo závisí od frakčného zloženia suroviny. To zároveň ovplyvňuje hustotu, mechanickú odolnosť a rozmerovú stabilitu tuhých biopalív ako aj samotný výrobný proces. Tento príspevok sa venuje experimentálnemu výskumu vplyvu veľkosti frakcie a frakčného zloženia drevených pilín na výslednú kvalitu drevených brikiet. Experimenty sú založené na jednoosovom lisovaní smrekových pilín hydraulickým lisom pri izbovej teplote (bez extra ohrevu). Skúmaný je vplyv veľkosti frakcie a frakčného zloženia na ukazovatele kvality brikiet vrátane ich hustoty, kvality povrchu, pevnosti v tlaku a odolnosti proti nárazom. Výsledky experimentov ukazujú rozsahy veľkosti frakcie a frakčného zloženia suroviny vhodné na produkciu brikiet s dobrou kvalitou. Na základe vyhodnotenia experimentov je optimalizovaná veľkosť frakcie testovaného materiálu za účelom produkcie biopalíva s najvyššou kvalitou. Vysokou hustotou brikiet sa tiež dosahuje vysoký energetický obsah vzťahnutý na jednotku objemu paliva. Požadovaná veľkosť frakcie má priamy vplyv na stroje na úpravu veľkosti frakcie a spotrebu energie v celom procese produkcie biopalív.

Kľúčová slova: biomasa, briketa, zhutňovanie, veľkosť frakcie, frakčné zloženie

1 Úvod

Biomasa pre energetické zhodnotenie (najmä drevený a poľnohospodársky odpad) v neupravenom stave má vlastnosti, ktoré často obmedzujú jej skladovanie, transport a využitie. Tieto problémy pomáha riešiť jej transformácia do formy vysoko kvalitných tuhých biopalív. Zvyšovanie objemovej a energetickej hustoty má za následok znižovanie nákladov na prepravu, manipuláciu a skladovanie a na zvyšovanie účinnosti energetickej premeny [1].

Pevnosť a mechanická odolnosť zhutnených produktov je závislá na fyzikálnych silách, ktoré vytvárajú väzby medzi jednotlivými časticami. Tieto väzobné sily sú kategorizované v piatich skupinách [2, 3, 4]. Sú to (i) mostíky tuhého charakteru, (ii) príťažlivé sily medzi tuhými časticami, (iii) mechanické tvarové väzby, (iv) adhézne a kohézne sily, a (v) medzifázové sily a kapilárne tlaky.



Frakčné zloženie suroviny významne ovplyvňuje kvalitu výlisoku. Prítomnosť väčšieho množstva jemnozrnných častíc umožňuje lepšie zhutnenie materiálu. Výlisok je súdržnejší, kvalitnejší a dosahuje vyššie hodnoty objemovej hustoty. Čím je vstupná frakcia väčšia, tým je potrebný aj väčší výkon na zhutnenie, pretože daný výlisok má nižšiu homogenitu. S rastúcou veľkosťou frakcie klesajú väzbové sily, čo má za následok skorý rozpad výlisoku počas procesu horenia. Minimalizácia veľkostí frakcie tak proporcionálne vplyva na pokles lisovacieho tlaku, ako aj na zvýšenie pevnosti a objemovej hustoty výlisoku. Na strane druhej sú s minimalizáciou frakcie spojené vyššie náklady na spotrebu energie v procese dezintegrácie.

Payne vo svojej publikácii [6] odporúča pre peletovanie ako vhodnú stredne a jemne mletú frakciu suroviny, nakoľko častice s menšími rozmermi poskytujú väčší povrch pre naparenie v kondicionéri, čo umožní tvorbu väčšieho počtu väzieb. Väčšie častice vytvárajú tzv. body zlomu vo výliskoch, ktoré spôsobujú trhliny a praskliny [7]. Shen [8] potvrdzuje, že drevné pelety vyrobené z frakcie s veľkosťou častíc do 1,7 mm vykazujú vyššiu kvalitu ako pelety z frakcie s veľkosťou častíc do 5,0 mm. Lindley a Vosoughi [9] výskumom zistili, že zmenšenie veľkostí frakcie biomasy sa prejaví zvýšením hustoty brikiet, zvýšením ich mechanickej odolnosti a odolnosti voči absorpcii vody. Turner [10] odporúča veľkosť frakcie pre kvalitné pelety 0,6 až 0,8 mm. Franke a Rey [11] odporúčajú pre produkciu peliet s vysokou mechanicou odolnosťou veľkosť frakcie od 0,5 do 0,7 mm. Tiež upozorňujú, že veľkosť frakcie nad 1 mm bude v peletách spôsobovať body zlomu. Hoci so zmenšovaním frakcie sa zvyšuje hustota a mechanická odolnosť biopalív, z hľadiska produkcie je zmenšovanie frakcie nežiaduce kvôli nárastu výrobných nákladov. Zmes rôzneho frakčného zloženia vedie k optimálnej mechanickej odolnosti tuhých biopalív, pretože zmes častíc rôznych veľkostí napomáha k tvorbe tvarových väzieb zaklinením a takmer úplným vyplnením priestoru medzi nimi [6, 7, 12, 13]. Práve zastúpenie všetkých frakcií pevných častíc biomasy v lisovanej surovine, t.j. častíc rôznych veľkostí, a tým aj rôznorodejších tvarov, umožňuje dosiahnuť vyššiu kvalitu výlisokov.

Na základe vyššie uvedenej analýzy vplyvu veľkosti frakcie je cieľom tejto štúdie stanovenie optimálneho frakčného zloženia pre smrekové piliny za účelom dosiahnutia najvyššej kvality brikiet. Na zhutňovanie biomasy v uvedenej štúdii bol použitý vysoko tlakový proces zhutňovania prostredníctvom hydraulického lisu (piest-hubica). Použitý bol konvenčný produkčný hydraulický briketovací lis. Zhutňovací proces tohto lisu umožňuje dosiahnuť vysoký a rovnomerný lisovací tlak, vďaka ktorému je možné produkovať kvalitné a pevné brikiety aj pri teplote okolia bez extra ohrevu resp. bez akéhokoľvek spojiva.

2 Materiál a metódy experimentu

2.1 Surovina

Čerstvé smrekové piliny (*Picea abies*) pochádzajúce zo západného Slovenska boli zaobstarané z drevospracujúceho podniku, kde boli vysušené na hodnotu 8,2 % relatívnej vlhkosti a rozmerovo upravené na kladivovom mlyne. Použitú smrekovú pilinu neobsahovali kôru.

Materiál bol pred experimentmi skladovaný v laboratóriu v big-bagoch po dobu 6 mesiacov. Počiatočná vlhkosť suroviny bola tesne pred experimentmi zhutňovania upravená na optimálnu hodnotu 13 %. Piliny boli preosiate na zariadení Retsch Vibratory Sieve Shaker AS 200 digit a rozdelené na päť veľkostí frakcie: 0,0-0,5 mm, 0,5-1,0 mm, 1,0-2,0 mm, 2,0-4,0 mm a viac ako 4,0 mm. Následne bolo pripravených 17 kategórií vzoriek frakčného



zloženia zmiešaním jednotlivých veľkostí frakcie v presných hmotnostných pomeroch. Frakčné zloženia suroviny pre experimenty boli pripravené podľa tabuľky 1.

Tab. 1. Frakčné zloženie smrekových pilín

Kategória	Veľkosť frakcie (mm)				
	0,0 - 0,5 mm	0,5 - 1,0 mm	1,0 - 2,0 mm	2,0 - 4,0 mm	over 4,0 mm
Hmotnostný pomer (%)					
A	100	0	0	0	0
B	0	100	0	0	0
C	0	0	100	0	0
D	0	0	0	100	0
E	0	0	0	0	100
F	20	20	20	20	20
G	10	40	40	10	0
H	40	10	40	10	0
I	40	10	10	40	0
J	20	30	40	10	0
K	50	20	20	10	0
L	70	20	10	0	0
M	40	40	10	10	0
N	20	30	30	20	0
O	30	40	20	10	0
P	20	40	30	10	0
R	10	50	20	20	0

2.2 Proces zhutňovania

Brikety boli produkované v procese priemyselnej produkcie na produkčnom hydraulickom briketovacom lise BrikStar 200 (BRIKLIS, s.r.o., Česká republika) vybavenom valcovou otvorenou lisovacou komorou priemeru 50 mm a dĺžky 340 mm (Obr. 1). Zhutnenie biomasy je vyvolané pohybom piesta na jednej strane lisovacej komory a trecím odporom brikiet v komore. Zväčšovanie trenia, ktoré je závislé od dĺžky komory, spôsobuje nárast lisovacieho tlaku na zhutňovaný materiál.

Po tom, čo je materiál prostredníctvom podávacej závitovky distribuovaný do lisovacej komory a predzhotnený bočným piestom, je vyvolaný lisovací tlak hlavným piestom. Keď lisovací tlak dosiahne požadovanú hodnotu, hlavný piest sa okamžite vracia späť bez akéhokoľvek času výdrže brikety pod tlakom.

Hydraulický lis umožňuje nastaviť dĺžku brikiet a použitie zveru briketovacej hubice. Dĺžka brikiet závisí od vlastností lisovaného materiálu a nastavených parametrov plnenia lisovacej komory. Pri realizovaných experimentoch bola nastavená konštantná dĺžka brikiet (30% ich maximálnej dĺžky), konštantné parametre plnenia a maximálny tlak pracovného aparátu 16,5 MPa. Počas procesu zhutňovania nebol použitý zver briketovacej hubice. V priebehu briketovania bola meraná teplota brikiet, ktorá nadobúdala hodnoty do 30 °C.



Obr. 1 Pracovný aparát produkčného hydraulického briketovacieho lisu

2.3 Odoberanie vzoriek

Keď bol dosiahnutý stabilný stav procesu briketovania a brikety s rovnakým frakčným zložením dosahovali totožný vzhľad, bola odobratá vzorka 40 brikiet. Tridsať z nich bolo vybratých na meranie fyzikálnych parametrov a desať z nich na meranie zmeny vlhkosti počas skladovania. Takéto odoberanie vzoriek sa opakovalo sedemnásťkrát samostatne pre každú pripravenú vzorku suroviny s rozdielnym frakčným zložením. Všetky vzorky brikiet boli označené a uskladnené v laboratóriu pri 20 °C. Spolu bolo odobratých 17 x 40 brikiet.

2.4 Hmotnosť, rozmery a hustota

Na meranie hmotnosti, dĺžky a priemeru každej brikety bolo použité digitálne posuvné meradlo a elektronické váhy. Hustota brikiet bola vypočítaná na základe pomeru medzi hmotnosťou a ich objemom vrátane objemu vnútorných pórov. Objem brikiet bol vypočítaný ako objem valca s rozmermi (dĺžka a priemer) meranými podľa vyššie opísaného, v súlade s EN 16127:2012 [16]. Priemerná hustota bola potom počítaná pre každú vzorku 30 brikiet s rozdielnym frakčným zložením.

Hustoty jednotlivých brikiet boli merané 5 minút po ich vytlačení z lisovacej komory. Ostatné vlastnosti brikiet boli testované 48 hodín potom čo boli brikety vyprodukované a uskladnené v laboratóriu. Meranie hustoty po 5 minútach bolo zvolené preto, lebo najväčšie dilatčné zmeny v objeme brikiet nastávajú práve v tomto časovom intervale od vytlačenia z lisovacej komory.

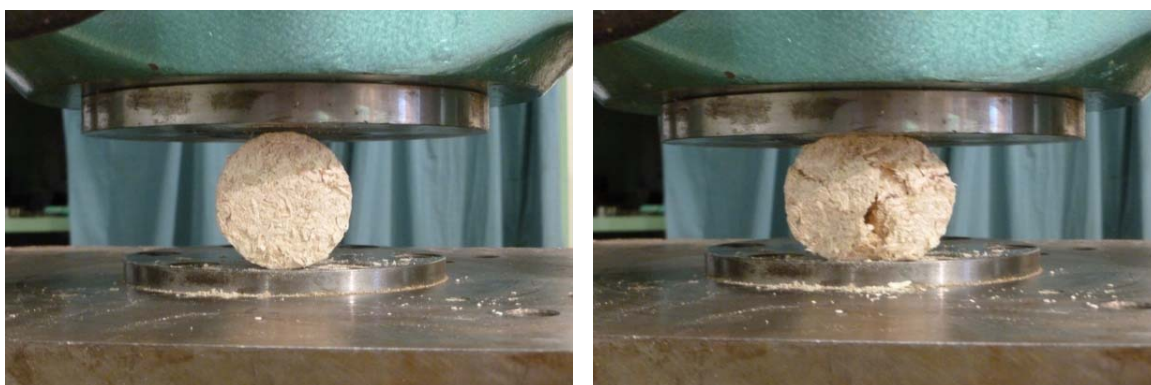
2.5 Odolnosť v tlaku

Odolnosť v tlaku predstavuje maximálne zaťaženie brikety, ktoré je briketa schopná preniesť pred porušením. Test odolnosti v tlaku simuluje tlakové zaťaženie brikiet spôsobené hmotnosťou vrchných brikiet na spodné brikety počas skladovania, transportu a manipulácie. Odolnosť v tlaku zhutnených produktov sa stanovuje testom odolnosti brikety v rozštepe. Počas testu je briketa umiestnená medzi dve rovné paralelné platne ktorých plocha musí byť



väčšia ako priemet brikety na ne. Následne je briketa zaťažovaná konštantne narastajúcim zaťažením až do chvíle, kedy testovaná briketa praskne, alebo sa poruší. Veľkosť zaťaženia v čase prasknutia brikety je zaznamenaná deformačnou krivkou. Pevnosť v tlaku brikety zodpovedá maximálnemu dosiahnutému zaťaženiu, ktoré sa udáva ako sila alebo napätie [1].

Na stanovenie odolnosti v tlaku bol použitý hydraulický lis (obr. 2). 10 brikiet z každej vzorky s rôznym frakčným zložením bolo testovaných 2 dni po ich vytvorení. Odolnosť v tlaku pre každú briketu bola vypočítaná ako pomer maximálnej zaťažujúcej sily dosiahnutej v čase porušenia brikety a dĺžky brikety. Následne boli z každej skupiny vzoriek testovaných brikiet vylúčené dve extrémne hodnoty nameranej odolnosti v tlaku (maximálna a minimálna hodnota série). Výsledná hodnota odolnosti v tlaku každej skupiny brikiet bola vypočítaná ako aritmetický priemer ôsmych samostatných hodnôt.



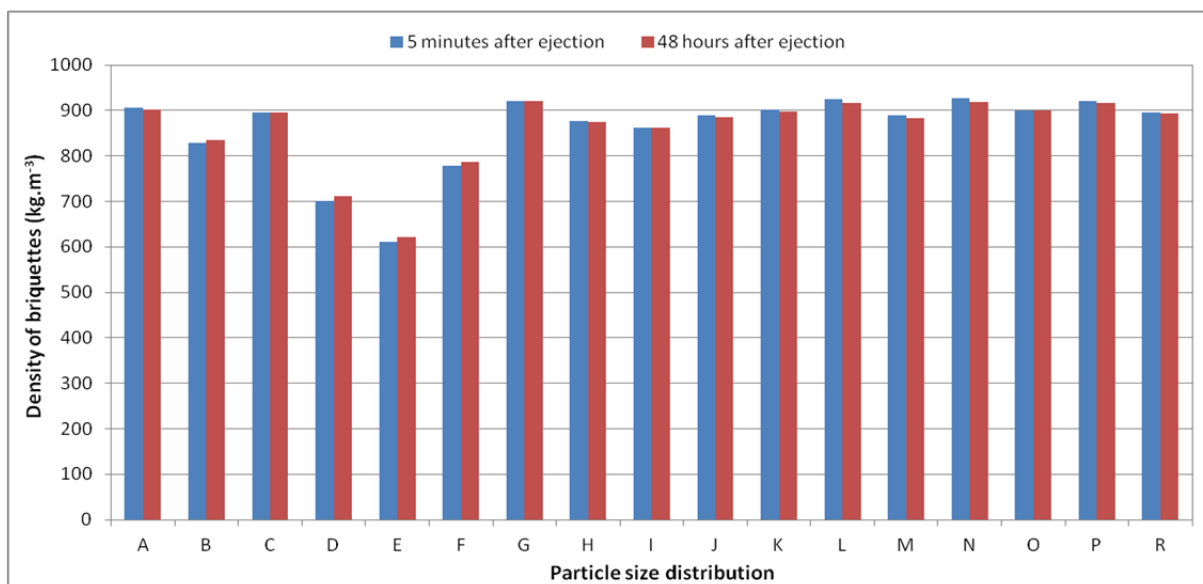
Obr. 2: Meranie odolnosti v tlaku brikiet (počiatočné zaťaženie a maximálne zaťaženie)

Test odolnosti v tlaku poskytuje rýchle stanovenie kvality brikiet krátko po vyprodukovaní z briketovacieho lisu a pomáha nastaviť proces briketovania za účelom zvýšenia kvality brikiet. Li a Liu [1] použili na meranie odolnosti v tlaku brikiet metódu ASTM C39-96 vyvinutú pre betónové brikety [5].

3 Výsledky a diskusia

3.1 Vplyv frakčného zloženia na hustotu

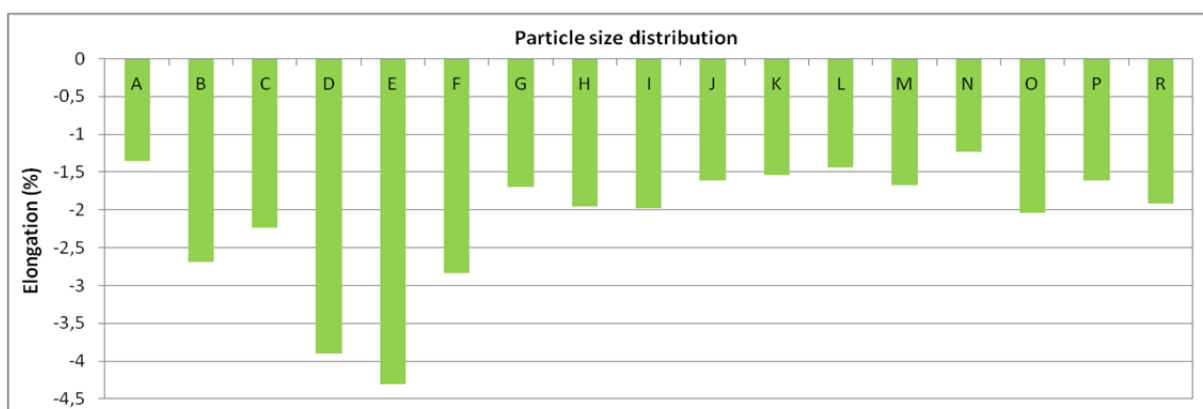
Vplyv frakčného zloženia na hustotu brikiet bol sledovaný v dvoch časových úrovniach: (i) 5 minút po vylisovaní, a (ii) 2 dni po vylisovaní. Obrázok 3 zobrazuje obe hustoty brikiet (5 minút po vylisovaní a 2 dni po vylisovaní) vyprodukovaných pri prevádzkovom tlaku 16,5 MPa bez doby výdrže ako funkciu frakčného zloženia lisovaného materiálu. Na obrázku 3 možno pozorovať vcelku zanedbateľnú zmenu hustoty brikiet po 2 dňoch vo všetkých testovaných kategóriách frakčného zloženia. Brikety s rovnomernejším zastúpením rôznych frakčných zložení, ale s väčšinovým zastúpením hmotnostného pomeru veľkosti frakcie 0,5 – 1,0 mm a 1,0 – 2,0 mm dosahovali vyššiu hustotu a taktiež ich povrch bol hladší bez viditeľných trhlín. Brikety v kategóriách frakčného zloženia G, N, L a P dosahovali najvyššiu hustotu. Frakčné zloženie s dominantným hmotnostným pomerom väčšej frakcie (kategórie D, E, F) spôsobilo pokles hustoty a drsný povrch brikiet. Brikety týchto kategórií mali tendenciu absorbovať atmosférickú vlhkosť a rýchlo expandovať, čím sa stali počas skladovania krehkými.



Obr. 3 Závislosť hustoty brikiet od rôzneho frakčného zloženia smrekových pilín lisovaných pri 16,5 MPa a počiatkovej vlhkosti 13% (kategórie frakčného zloženia sú uvedené v tab.1)

3.2 Dilatácia

Brikety vyrobené z väčšieho podielu jemnej frakcie dosahovali vyššiu hustotu a dlhodobú tvarovú a rozmerovú stálosť. Tento fenomén je uvedený na obrázku 4, kde je zobrazená dilatácia brikiet zo smrekových pilín s rôznym frakčným zložením meraná po 48 hodinách. Pozdĺžne predĺženie po 2 dňoch bolo vypočítané na základe dĺžok brikiet meraných 5 minút po vylisovaní a následne premerané o 2 dni neskôr. Predĺženie po 2 dňoch sa zmenšovalo s narastajúcim hmotnostným pomerom jemnej frakcie. Na druhej strane kategórie frakčného zloženia s najvyšším hmotnostným pomerom hrubej frakcie a minimálnym hmotnostným pomerom jemnej frakcie (kategórie D, E, F) vykazujú najvýraznejšie zmeny rozmerov brikiet počas skladovania. Experimenty dokázali, že počas 2 dní dochádza ku skráteniu brikiet (negatívne predĺženie) vo všetkých kategóriách. Toto bolo spôsobené hodnotou počiatkovej vlhkosti 13% a skladovacími podmienkami. (teplota 23 °C a relatívna vlhkosť iba 50 – 60 %).

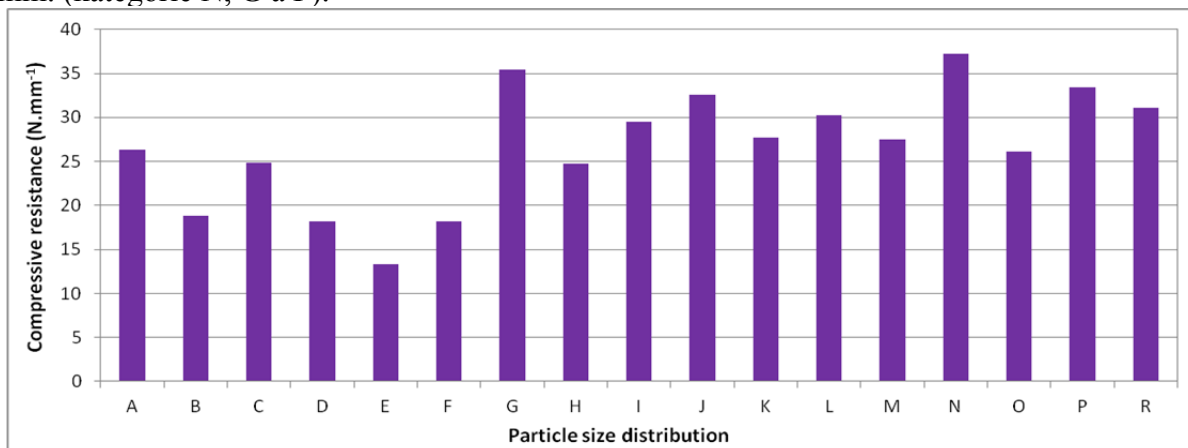


Obr. 4 Závislosť predĺženia brikiet od rôzneho frakčného zloženia po 48 hodinách (kategórie frakčného zloženia sú uvedené v tab.1)

3.3 Vplyv frakčného zloženia na odolnosť v tlaku



Najvyššia hodnota odolnosti v tlaku ($37,2 \text{ N.mm}^{-1}$) bola dosiahnutá pri briketách vyrobených z pilín s frakčným zložením kategórie N. Ako je vidno z obrázka 5, brikety s frakčným zložením kategórií D, E, F dosahovali nižšiu odolnosť v tlaku, čo môže mať za následok rýchly rozpad brikiet počas manipulácie a skladovania. Experimenty všeobecne dokázali, že odolnosť v tlaku brikiet klesá s narastajúcim hmotnostným pomerom hrubšej frakcie. Avšak najvyššie hodnoty odolnosti v tlaku neboli dosiahnuté pri briketách s najvyšším hmotnostným pomerom jemnej frakcie, ale pri briketách vyrobených s rôznou veľkosťou frakcií, kde hmotnostnú prevahu zastupovala veľkosť 0,5 – 1,0 mm a 1,0 – 2,0 mm. (kategórie N, G a P).



Obr. 5 Závislosť odolnosti v tlaku od frakčného zloženia smrekových pilín

4 Záver

Smrekové piliny ako drevný odpad môže byť zhutnený do formy vysokokvalitných brikiet prostredníctvom vysokotlakového lisovania. Brikety boli produkované v priemyselnom meradle hydraulickým briketovacím lisom. Pre produkciu všetkých sledovaných brikiet boli dodržané rovnaké technické a technologické parametre okrem frakčného zloženia pilín. Uvedený výskum dokazuje, že frakčné zloženie má výrazný vplyv na kvalitu brikiet. Vhodné frakčné zloženie pre produkciu brikiet dobrej kvality zahŕňa rôzne veľkosti frakcií s dominanciou hmotnostného pomeru jemnejšej frakcie. Zmes rôznych frakčných zložení vedie k optimálnej mechanickej odolnosti tuhých biopalív. Väčšie častice predstavujú vystužujúce vlákna a jemné častice vyplňujúcu maticu. Keď hmotnostný pomer frakčného zloženia je blízky kategóriám N, G a P je možné vyprodukovať brikety tlakom $16,5 \text{ MPa}$ s hustotou v suchom stave vyššou ako $0,8 \text{ kg.dm}^{-3}$ (mokrú hustotu vyššia ako $0,9 \text{ kg.dm}^{-3}$).

Najvyššia hustota, odolnosť v tlaku, kvalita povrchu a minimálne fyzikálne zmeny brikiet je možné dosiahnuť v kategóriách frakčného zloženia G, N, P (tabuľka 2).

Tab. 2. Optimálne frakčné zloženie smrekových pilín

Kategória	Veľkosť frakcie (mm)				
	0,0 - 0,5 mm	0,5 - 1,0 mm	1,0 - 2,0 mm	2,0 - 4,0 mm	over 4,0 mm
	Hmotnostný pomer (%)				
G	10	40	40	10	0
N	20	30	30	20	0
P	20	40	30	10	0

Pod'akovanie



Tento príspevok vznikol na základe výsledkov výskumu realizovaného projektu č. APVV-0857-12 s názvom "Výskum trvanlivosti nástrojov progresívnej konštrukcie zhutňovacieho stroja a vývoj adaptívneho riadenia procesu zhutňovania" finančne podporeného Agentúrou na podporu výskumu a vývoja.

Použitá literatúra

- [1] Li Y, Liu H. High-pressure densification of wood residues to form an upgraded fuel. *Biomass and Bioenergy* 2000;19:177–86.
- [2] Pietsch W. Agglomeration processes – phenomena, technologies, equipment. Weinheim: Wiley-VCH; 2002.
- [3] Rumpf H. The strength of granules and agglomeration. In: Knepper WA, editor. *Agglomeration*. New York: John Wiley; 1962. p. 379–418.
- [4] Kaliyan N, Morey RV. Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy* 2009; 33:337-59.
- [5] Matúš, M., Križan, P., Kováčová, M., Beniak, J.: The Influence of Size Fraction on the Compressibility of Pine Sawdust and the Effectiveness Criterion for Densification. In: *Acta Polytechnica*. - ISSN 1210-2709. - Vol. 54, No. 1 (2014), s. 52-58.
- [6] Payne, F. A. Improving quality of pelleted feeds. In: *Milling Feed and Fertilizer* 1978; 161(5), pp. 34-41.
- [7] MacBain, R. *Pelleting Animal Feed*. Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association, 1966.
- [8] Shen, K. C. Development of a waterproof densified solid fuel pellet from forestry residues.. London,UK, Elsevier Applied Science, 1987, pp. 209-213.
- [9] Lindley JA, Vossoughi M. Physical properties of biomass briquettes. *Transactions of the ASAE* 1989;32:361–6.
- [10] Turner, R. Bottomline in feed processing : achiving optimum pellet quality. *Feed Manage* 1995, 46(12), pp. 30-33.
- [11] Franke, M., Rey, A. Pelleting quality. *World Grain*, May 2006, pp. 78-79.
- [12] Grover, P. D., Mishra, S. K. *Biomass Briquetting: Technology and Practices*. Regional Wood Energy Development Programme in Asia, Field Document No. 46. Bangkok, Thailand: Food and Agricultural Organization of the United Nations, 1996.
- [13] Lisý, M., Baláš, M., Špiláček, M., Skála, Z.: Techical and Economic Optimization of Cogeneration Technology using Combustion and Gasification. In: *Acta Polytechnica*. - ISSN 1210-2709. - Vol. 54, No. 1 (2014), s. 42-51.
- [14] Pietsch, W. *Size enlargement by agglomeration*. New York, John Willy & Sons 1991.
- [15] Kaliyan N, Morey RV. *Densification of Biomass: Mechanisms, Models, and Experiments on Briquetting and Pelleting of Biomass*. VDM Verlag Dr. Muller 2010.
- [16] EN 16127:2012, *Solid biofuels– Determination of length and diameter of pellets*, European Committee for Standardization, rue de Stassart 36, B-1050 Brussels, Belgium, 2012.