



## Vplyv frakčného zloženia vstupnej suroviny a kvality smrekových peliet na spaľovací proces v domácich kotloch

*Peter KRÍŽAN<sup>1,\*</sup>, Miloš MATÚŠ<sup>1</sup>, Juraj BENIAK<sup>1</sup>, Jozef BÁBICS*

<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 poukázať na vzťah medzi kvalitou peliet, ktorá je reprezentovaná hlavne fyzikálnymi vlastnosťami peliet a spaľovaním peliet zo smrekových pilín. Hlavným cieľom tejto štúdie je určiť vzťah medzi rozložením veľkosti častíc smrekových pilín, ktoré ovplyvňuje kvalitu peliet a emisie znečisťujúcich látok, ktoré vznikajú pri ich spaľovaní v domácom peletovacom kotly. Výsledky prezentované v tomto príspevku vznikli zo vzájomnej medzinárodnej spolupráce Strojníckej fakulty STU v Bratislave a Instituto Superior Tecnico v Lisabone. Hlavné závery tejto štúdie sú: 1. všetky študované pelety spĺňali fyzikálne a mechanické požiadavky na nepriemyselné pelety; 2. veľkosť častíc surovej biomasy ovplyvnila fyzikálne a mechanické vlastnosti peliet; a 3. emisie plynných a PM nie sú významne ovplyvnené distribúciou veľkosti častíc suroviny používanej na výrobu peliet.*

**Kľúčové slová:** pelety, sytná hustota, veľkosť frakcie, domáci kotol, tuhé znečisťujúce častice

### 1 Úvod

Peletovanie biomasy je proces zhutňovania hmoty a energie materiálov, ktoré majú nízku objemovú hustotu. Počas peletovania biomasy výrazne ovplyvňujú rôzne technologické premenné a parametre materiálu finálnu kvalitu tuhých biopalív (peliet) [1]. Kvalita peliet je určená požiadavkami koncového užívateľa na vykurovací systém a vlastnosťami manipulácie s peletami [2]. Kvalita peliet vo všeobecnosti závisí od vlastností surovín - typu biomasy, obsahu vlhkosti a veľkosti častíc - a riadenia kvality výrobného procesu - prevádzkové podmienky, technologické premenné, typ peletovacieho lisu a spojivo [3]. Pelety s nízkou kvalitou môžu spôsobiť prevádzkové problémy v spaľovacích systémoch vrátane nežiaducich účinkov v zariadeniach, ako je nalepovania, zanášania alebo korózie a môžu spôsobiť značné množstvo emisií plynných a tuhých častíc [4,5]. Čo sa týka plynných emisií druh pelety má významný vplyv na emisie CO, HC a NO<sub>x</sub>, hoci výkon kotla nie je výrazne ovplyvnený [5,6]. Na strane emisií tuhých častíc sa pozorovalo, že jemné frakcie sú zvlášť škodlivé pre ľudské zdravie [5,6].

Prezentovaný článok je výsledkom výskumnej spolupráce medzi Strojníckou fakultou STU Bratislava a Instituto Superior Tecnico v Lisabone, čiastočne financovaná Agentúrou pre výskum a vývoj (Slovakia) a Fundação para a Ciência e Tecnologia (Portugalsko). Hlavným



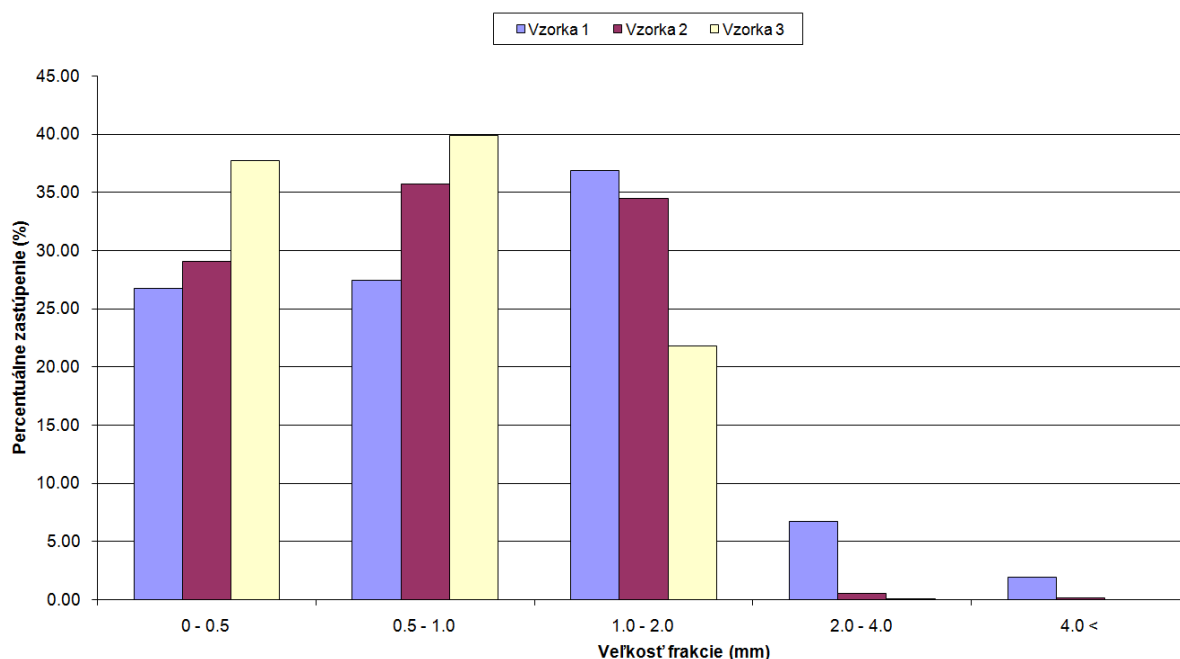
cieľom štúdie je určiť vzťah medzi rozložením veľkosti častíc smrekových pilín použitých pri výrobe peliet a emisiami znečisťujúcich látok, ktoré vznikajú pri spaľovaní v domácom peletovacom kotly. Bol určený vplyv distribúcie veľkosti častíc na fyzikálne vlastnosti peliet (mechanická pevnosť, sypná hustota, atď.), ale aj na emisie plynov a tuhých znečisťujúcich častíc.

## 2 Materiály a metódy

### 2.1 Vlastnosti vstupného materiálu

Surové smrekové piliny (*Picea Abies*), bez kôry, pôvodom zo západného Slovenska boli získané od lokálneho spracovateľa dreva. Najprv sa analyzovala distribúcia veľkosti častíc pomocou zariadenia RETSCH Vibrating Sieve Equipment AS 200. Tri rôzne rozdelenia veľkosti častíc boli pripravené kladivovým mlynom Stoza ŠV 5 s použitím sita  $\varnothing$  4 mm. Pri výrobe peliet boli použité neupravené smrekové piliny (vzorka 1), smrekové piliny jedenkrát podrvené (vzorka 2) a smrekové piliny dvakrát podrvené (vzorka 3). Obrázok 1 ukazuje rozdelenie veľkosti častíc surovín troch použitých vzoriek.

Obsah vlhkosti smrekových pilín pred drvením a peletovaním sa stanovil pomocou váh na meranie vlhkosti Kern MRS 120-3. Toto meranie spočívalo v zahriatí pilín (gravimetrická metóda merania obsahu vlhkosti) [7] na teplotu  $105 \pm 2$  ° C, kým sa nedosiahla konštantná hmotnosť. Z dôvodu zložitého procesu zmeny obsahu vlhkosti sa v tejto štúdii použila iba jedna úroveň obsahu vlhkosti. Boli použité iba smrekové piliny s obsahom vlhkosti 9,8% a maximálne boli zvlhčené pred drvením a peletovaním na vlhkosť 14,3%.



Obrázok 1. Rozloženie veľkosti frakcií v objeme pre všetky analyzované vzorky



## 2.2 Výroba peliet

Pre výrobu peliet bol použitý vertikálny peletovací lis KAHL 33-390 s plochou okrúhlou matricou (pozri obrázok 2). Počas peletovania bola použitá matrica s otvormi  $\varnothing$  6 mm. Peletovanie prebiehalo pri konštantných prevádzkových parametroch peletovacieho lisu, t.z. lisovací tlak (12 MPa), lisovacia teplota ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a obvodová rýchlosť valcov ( $2,2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) sa nemenila.



Obrázok 2. Peletovací lis KAHL 33-390 (vľavo) a pohľad na lopatkový homogenizátor s vodnou tryskou (vpravo)

Interakcia medzi obsahom vlhkosti surovín, lisovacím tlakom a lisovacou teplotou počas peletovania biomasy je veľmi dôležitá [8,9]. Ak je obsah vlhkosti v lisovanom materiály veľmi nízky alebo veľmi vysoký, častice sa stávajú nerovnomerne usporiadané a výsledné pelety sa stávajú nestabilnými [9,10]. Doterajší výskum ukázal, že vlhkosť pilín má vplyv na plastifikáciu lignínu. V prezentovanej štúdií bol obsah vlhkosti smrekových pilín nízky (9,8%) z pohľadu technológie peletovania, z tohto dôvodu bola pridávaná voda prostredníctvom homogenizátora s vodnou tryskou, na zvýšenie obsahu vlhkosti piliny pred peletovaním. Táto dodatočná voda však neovplyvňuje kvalitatívne piliny, je tu potrebná iba z dôvodu plynulejšieho procesu zhutňovania.

Primeraná lisovacia teplota zaisťuje, že lignín zmäkne v lisovanom materiály a optimálny lisovací tlak zabezpečuje spojenie častíc materiálu a zhutnenie suroviny [11, 12]. Určitá úroveň vlhkosti spôsobuje vyššiu teplotu v procese peletovania a tým aj vyššiu kvalitu peliet [13]. Optimálna úroveň vlhkosti zlepšuje peletovanie pilín a tým zlepšuje súdržnosť peliet. Na obrázku 3 je vidieť vyrobené pelety a ich povrch pre tri vyrobené vzorky.



### 2.3 Skúšky spaľovania

Skúšky spaľovania boli realizované v experimentálnom zariadení simulujúcom domáci peletovací kotol na spaľovanie drevných peliet s núteným ťahom a maximálnym tepelným výkonom 22 kW. Obrázok 4 znázorňuje schému tohto experimentálneho zariadenia. Toto experimentálne zariadenie sa často používalo na spaľovanie aj v iných výskumných [4,5], kde je aj podrobne opísané. Pelety sa ručne vkladajú do násypky s kapacitou 45 kg a privádzajú sa do horáka cez závitkový podávač, ktorý pracuje impulzne. Rýchlosť dodávky peliet je regulovaná zaťažením kotla a miera spotreby peliet, a meria sa technikou stratovej hmotnosti, keďže je kotol namontovaný na váhe.



a) pelety – vzorka 1



b) priblížený pohľad (40x) na povrch peliet pozdĺž osi pelety - vzorka 1



c) pelety – vzorka 2



d) priblížený pohľad (40x) na povrch peliet pozdĺž osi pelety - vzorka 2

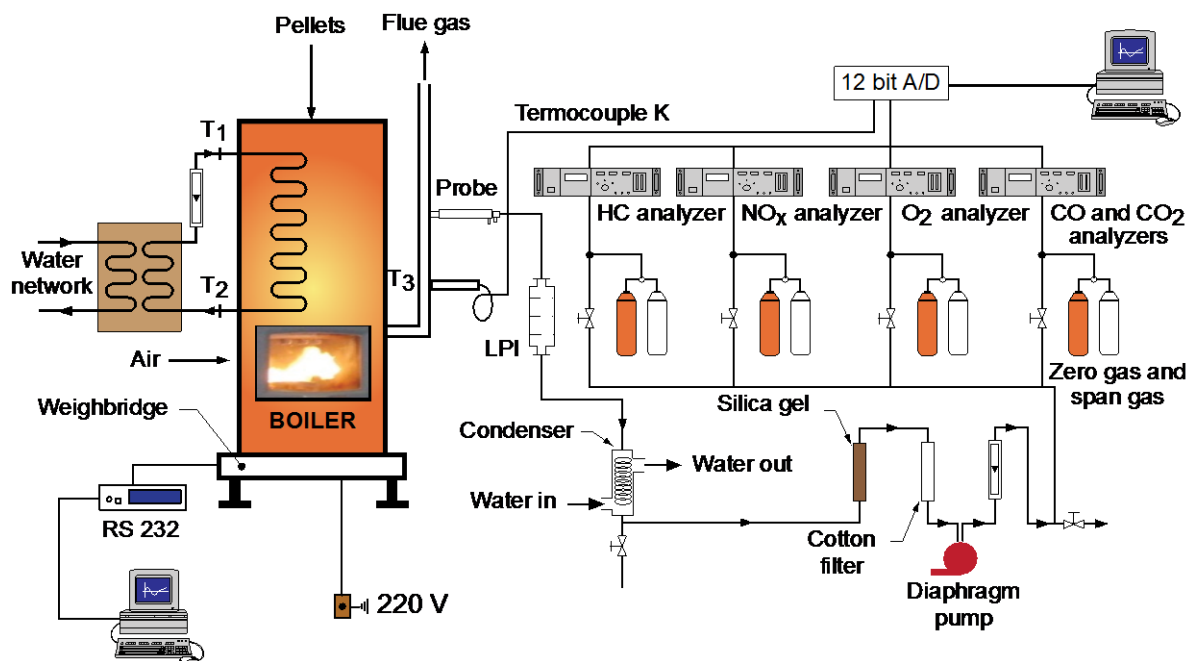


e) pelety – vzorka 3



f) približený pohľad (40x) na povrch peliet pozdĺž osi pelety - vzorka 3

Obrázok 3. Smrekové pelety s rozdielnym rozložením veľkosti častíc



Obrázok 4. Schéma experimentálneho zariadenia (domáci kotol) a prepojenie meracej techniky

Spaľovanie peliet prebiehalo v hemisférickej komore o priemere 120 mm s horákom. Do komory boli pelety dopĺňané pomocou závitkového dopravníka. Zapaľovanie sa uskutočňuje pomocou elektrického odporu umiestneného v komore a primárny vzduch je dodávaný ventilátorom do priestoru spaľovacej komory cez niekoľko malých otvorov



umiestnených v spodnej časti komory. Výsledné horúce plyny zo spaľovania ohrievajú vodu cirkulujúcu vo výmenníku tepla, umiestneného v hornej časti spaľovacej komory. Teplo prenášané do vody v kotly sa rozptýli cez doskový výmenník tepla pomocou vonkajšieho vodného okruhu. Prietok vody cirkulujúci vo vnútornom okruhu kotla bol meraný rotametrom a vstupné a výstupné teploty boli merané s termočlánkami typu K, T1 a T2 na obrázku 4.

Koncentrácie spalín z O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, uhlíkov (HC) a NO<sub>x</sub> sa merali, aby sme získali informácie o podmienkach spaľovania. Tieto merania sa dosiahli pomocou sondy z nehrdzavejúcej ocele, ktorá bola navrhnutá tak, aby minimalizovala hlavné zdroje neistoty. Analytické prístroje od firmy Horiba (Kjóto, Japonsko) pozostávajú z paramagnetického analyzátora pre merania O<sub>2</sub>, z nedisperzného analyzátora infračerveného plynu na meranie CO<sub>2</sub> a CO, z plameňového ionizačného detektora pre merania HC a chemiluminiscenčného analyzátora pre merania NO<sub>x</sub>. Kalibrácie nulového a kalibračného plynu so štandardnými zmesami boli vykonané pred a po každom meraní. Teplota spalín sa merala pomocou termočlánku typu K, T3, pozri obrázok 4. Analógové výstupy analyzátorov a termočlánku sa prenášali cez A / D dosky do počítača, kde sa signály spracovávali a zaznamenané hodnoty sa dôkladne uchovávali.

Pre stanovenie obsahu tuhých častíc boli vždy izokineticky odobraté vzorky, pre charakterizáciu veľkosti častíc pomocou kaskádového nárazového zariadenia s nízkym tlakom v troch stupňoch (LPI, TCR Tecora, Miláno, Taliansko) s prietokom 10 l .min<sup>-1</sup> (STP). Tuhé častice boli odoberané z osi výfukovej trubice, pričom LPI bol umiestnený horizontálne. Použitý LPI umožnil zhromaždiť tri veľkosti častíc počas rovnakého odberu vzoriek: tuhé častice s priemerom nad 10 μm (PM10), tuhé častice s priermi medzi 2,5 μm a 10 μm a tuhé častice s priermi pod 2,5 μm (PM2,5). Aby sa zabránilo kondenzácii pozdĺž výstupnej sondy od vstupného impaktora, a tiež vo vnútri impaktora, sa počas odberu používal vyhrievací plášť (model Winkler WOTX1187). Toto zariadenie umožňuje ohrev vzorky až do 150 ° C. Pred začiatkom odberu sa kotol prevádzkoval počas 60 minút, aby sa dosiahli rovnovážne podmienky. Systém odberu vzoriek tuhých častíc bol potom prevádzkovaný počas 45 minút. tuhé častice sa zhromaždili na kremičitých mikrovláknitých filtroch, ktoré sa sušili v peci a vážili pred každým testom. Po každom teste boli filtre opäť vysušené, aby sa odstránila vlhkosť a vážili sa na stanovenie množstva zachytených tuhých častíc.

### 3 Výsledky a diskusia

#### 3.1 Vplyv veľkosti vstupnej frakcie na fyzikálne vlastnosti peliet

Veľkosť častíc vstupných pilín má dôležitý vplyv na proces zhutňovania, pretože väčšie častice zvyšujú energiu potrebnú na zhutnenie. Navyše pelety zhutnené z veľkých častíc majú nižšiu homogenitu a pevnosť [13]. Veľká časť jemných častíc umožňuje lepšie zhutnenie surovín. Výsledné pelety sú homogénne, vysoko kvalitné a dosahujú vyššiu objemovú hustotu [9]. S rastúcou veľkosťou frakcie sa pevnosť väzby medzi časticami znižuje, čo spôsobuje ich rozpad [8]. Z hľadiska zhutňovania je veľmi dôležité, aby sa medzi časticami vytvorili vnútro väzbové sily. Pevnosť výsledných väzieb sa zvyšuje s klesajúcou veľkosťou frakcie. Je známe, že veľkosť väzieb medzi časticami a distribúciou veľkosti častíc ovplyvňuje fyzikálne vlastnosti peliet. Pri peletovaní, najmä bez prídavných látok, musia byť povrchy častíc v kontakte na čo najväčších možných plochách [13]. Veľkosť tejto kontaktnej plochy sa zvyšuje, keď sa veľkosť častíc znižuje a sú aplikované vyššie lisovacie tlaky.



Tab. 1. Fyzikálne vlastnosti vzoriek peliet

Parameter	Pelety (vzorka 1)	Pelety (vzorka 2)	Pelety (vzorka 3)
Obsah vlhkosti (%)	6.3	7.7	8.0
Sypná hustota ( $\text{kg m}^{-3}$ )	655.6	661.0	660.7
Mechanická pevnosť (%)	99.0	99.2	99.1
Oter peliet (%)	1.4	1.0	1.0
Tvrdosť peliet (N)	231.0	236.8	235.5

V tabuľke 1 sú uvedené fyzikálne vlastnosti vyrobených a analyzovaných vzoriek peliet. Je zrejmé, že pri znižovaní veľkosti častíc sa menili fyzikálne vlastnosti peliet. Preto je dôležité skúmať vplyv veľkosti častíc na fyzikálne vlastnosti peliet a tým na kvalitu peliet. Tabuľka 1 ukazuje, že fyzikálne vlastnosti peliet 2 a 3 sú veľmi podobné napriek tomu, že ich pôvodná distribúcia veľkosti častíc je odlišná. Je dôležité zdôrazniť, že všetky pelety, ktoré sú tu analyzované, splnili fyzikálne a mechanické kvalitatívne požiadavky na priemyselné pelety dané technickými normami.

### 3.2 Vplyv rozloženia veľkostí frakcií v peletách na spaľovací proces

V tabuľke 2 sú zhrnuté výsledky merania emisií plynov a emisií tuhých častíc pre tri typy vzorky peliet a tabuľka 3 ukazuje rozloženie veľkosti tuhých častíc pre skúmané prevádzkové podmienky kotla. Všimnite si, že zmeny tepelného príkonu sú sprevádzané zmenami prebytočného vzduchu, pretože tok spaľovacieho vzduchu je udržiavaný konštantný bez ohľadu na rýchlosť posuvu peliet. Z tohto dôvodu tabuľka 3 odhaľuje, že koncentrácia  $\text{O}_2$  spalín klesá s tepelným príkonom a dosahuje minimálne 15%, čo zodpovedá tepelnému príkonu kotla 14 kW pre vzorku peliet 2.

Pelety 2 vykazujú vyššie emisie CO, HC a  $\text{NO}_x$  ako pelety 1 a 3. Emisie tuhých častíc sledujú rovnaký trend ako emisie CO a HC. Ako sa očakávalo [4], pretože emisie týchto znečisťujúcich látok súvisia s nedokonalým spaľovaním [4]. Upozorňujeme však, že emisie HC sú vždy skôr malé pre všetky testované pelety. V tabuľke 3 je zrejmé, že pri rozložení frakcií emisií tuhých častíc dominujú hlavne častice s veľkosťou pod  $2,5 \mu\text{m}$  bez ohľadu na tepelný príkon.

Tab. 2. Emisie plynov a emisie tuhých častíc

	Tepelný príkon (kW)	Pelety 1	Pelety 2	Pelety 3
Teplota spalín ( $^{\circ}\text{C}$ )	10	138.8	138.8	135.8
	14	160.5	174.7	161.5
$\text{O}_2$ (% v suš.)	10	17.4	17.0	17.8
	14	15.9	15.0	16.1
$\text{CO}_2$ (% v suš.)	10	3.0	3.4	2.5
	14	4.5	5.3	4.4
CO (% v suš.)	10	150.3	252.3	140.4



	14	137.0	171.7	89.7
HC (ppm v suš.)	10	3.2	9.4	4.1
	14	2.1	3.5	3.1
NO <sub>x</sub> (ppm % v suš.)	10	31.7	53.3	19.6
	14	42.8	74.2	30.8
PM (mg/Nm <sup>3</sup> )	10	17.6	34.7	18.1
	14	29.5	46.2	18.5

Tab. 3. Rozloženie veľkosti tuhých častíc

	Tepelný príkon (kW)	Pelety 1	Pelety 2	Pelety 3
PM10 (mg/Nm <sup>3</sup> )	10	0.38	0.56	0.82
	14	0.36	2.22	0.02
PM2.5-PM10 (mg/Nm <sup>3</sup> )	10	0.42	0.98	0.29
	14	0.62	2.36	0.02
PM2.5 (mg/Nm <sup>3</sup> )	10	16.84	33.16	17.02
	14	28.56	41.58	18.44

## 4 Záver

Hlavné poznatky a závery, ktoré je možné konštatovať na základe tejto štúdie, sú nasledovné:

- všetky analyzované pelety spĺňali fyzikálne a mechanické kvalitatívne požiadavky na priemyselné pelety dané normami.
- veľkosť frakcie a rozloženie frakcií vo vstupnej surovine ovplyvnila fyzikálne a mechanické vlastnosti peliet.
- emisie plynov a emisie tuhých častíc nie sú významne ovplyvnené rozložením veľkosti frakcií vstupnej suroviny používanej na výrobu peliet.

## Podakovanie

Tento príspevok vznikol za podpory projektu VEGA 1/0420/16 - Stanovenie a výskum vplyvu parametrov v procese zhutňovania odpadovej biomasy na výslednú kvalitu výliskov, financovaného Ministerstvom školstva SR a Slovenskou akadémiou vied.





---

## Použitá literatura

- [1] Kaliyan, N. and Morey Vance, R.: Factors affecting strength and durability of densified biomass products, *Biomass and Bioenergy*, 33 (3), 337-359, 2009.
- [2] Holm, J.; Henriksen, U.; Hustad, J. and Sorensen, L.: *Toward an understanding of controlling parameters in softwood and hardwood pellets production*, American Chemical Society, published on web 09/09/2006.
- [3] Križan, P.: *The densification process of wood waste*. Berlin De Gruyter open. ISBN 978-3-11-044001-0. 2015.
- [4] Fernandes, U. and Costa, M.: Particle emissions from a domestic pellets-fired boiler, *Fuel Process. Technol.*, 103, 51-56, 2012.
- [5] Fernandes, U. and Costa, M.: Formation of fine particulate matter in a domestic pellet-fired boiler, *Energy Fuels*, 27, 1081-1092, 2013.
- [6] Garcia.Maraver, A., Zamorano, M.; Fernandes, U.; Rabacal, M. and Costa, M.: Relationship between fuel quality and gaseous and particulate matter emissions in a domestic pellet-fired boiler, *Fuel*, 119, 141-152, 2014.
- [7] EN ISO 18134-3 Solid biofuels - determination of moisture content-oven dry method part 3: moisture in general analysis sample, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2015.
- [8] Nielsen, N.P.K., Gardner, D.J. and Poulsen, T.: Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets, *Wood and Fiber Science*, 41(4), 414-415, 2009.
- [9] Thoreson, C.P., Webster, K. E., Darr, M. J. and Kapler, E.J.: Investigation of process variables in the densification of corn stover briquettes, *Energies*, 7(6), 4019-4032, 2014.
- [10] Križan, P., Šooš, L., Matuš, M., Beniak, J. and Svátek, M.: Research of significant densification parameters influence on final briquettes quality, *Wood research*, 60, 2, 301-315. 2015.
- [11] Križan, P., Matuš, M., Šooš, L. and Beniak, J.: Behavior of beech sawdust during densification into a solid biofuel, *Journal Energies*, 8, 7, 6382-6398, 2015.
- [12] Matuš, M. and Križan, P.: Influence of structural parameters in compacting process on quality of biomass pressing, *Aplimat – Journal of Applied Mathematics*, 3, 3, 87-96, 2010.
- [13] Mani, S., Tabil, L. G. and Sokhansanj, S.: Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses, *Biomass & Bioenergy*, 30, 648-654, 2006.