

## Problematika lisování jemnozrnných materiálů

RNDr. Ing. Josef Valeš, Jaroslav Kusý, Ing. Lukáš Anděl

Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most, vales@vuuh.cz

Přijato: 8. 4. 2011, recenzováno: 8. 5. a 11. 5. 2011

### Abstrakt

V článku jsou shrnuty technologické poznatky z briketování kvalitativně a materiálově různých druhů jemnozrnných materiálů a jejich vzájemných směsí. Je popisována příprava lisovacích směsí, jejich homogenizace a zvlhčení přidávkou technologickou vodou. Jsou uvedeny změny pevnostních charakteristik v prostém tlaku dle normy ČSN CEN ISO/TS17892-7 a pevnosti v tlaku stanovené kolmo na průměr brikety testerem AK-14-E po vysušení, následném nasáknutí vzdušnou vlhkostí, po tepelném šoku při teplotě 800 °C a po vyžhání při teplotě 1 000 °C po dobu 45 min.

### Pressing of fine grained materials

The paper summarizes technological findings on briquetting fine grained materials of different quality as well as their mixtures. The preparation of briquetting mixtures, their homogenization, and moistening with technological water is described. The paper presents the changes of uniaxial compressive strength according to the Czech standard ČSN CEN ISO/TS17892-7 and changes of compression strength determined vertically to the diameter of the briquette using the AK-14-E tester, performed after drying, after subsequent saturation with air moisture, after thermal shock at 800 °C, and after annealing treatment at 1 000 °C performed for 45 minutes.

### Problematik des Pressens von feinkörnigen Materialien

Im Artikel werden technologische Erkenntnisse aus der Brikettierung der aus der Sicht der Qualität und des Materials unterschiedlichen feinkörnigen Materialarten und deren Gemische zusammengefasst. Es wird die Vorbereitung der Pressegemische, deren Homogenisierung und Benetzung mit zusätzlichem technologischem Wasser beschrieben. Weiter sind angeführt Änderungen der Festigkeitscharakteristiken im einfachen Druck nach der Norm ČSN CEN ISO/TS17892-7 und der Druckfestigkeit, die senkrecht auf den Brikettdurchschnitt mithilfe des Testers AK-14-E nach der Austrocknung, anschließenden Anziehung der Luftfeuchtigkeit, nach dem Wärmeshock bei der Temperatur von 800 °C und nach dem Ausglühen bei der Temperatur von 1 000 °C in der Dauer 45 Minuten bestimmt wurde.

**Klíčová slova:** druhy lisovaného materiálu, lisovací tlak a teplota, zhutňovací proces.

**Keywords:** types of pressed material, compacting pressure and temperature, compacting process.

## 1 Úvod

V řadě průmyslových odvětví vznikají potřeby přepracování prachových nebo jemnozrnných materiálů, které jsou v původním stavu nepoužitelné, na finální produkty požadovaných technologických vlastností a tvarů. Požadavky na finální podobu a vlastností přepracovaných jemnozrnných materiálů jsou vyvolány celou řadou faktorů: změnou fyzikálních vlastností, technologickými požadavky následného použití, bezpečnostními a ekonomickými aspekty. K přepracování jemnozrnných materiálů je možné použít rozdílné technologické postupy: peletování, lisování (briketování) nebo aglomerace. Volba vhodného postupu přepracování vychází z materiálových charakteristik zpracová-

vaných surovin a požadavků kladených na konečný produkt. Při řešení problematiky využití energetického obsahu odpadních hmot byly studovány vlastnosti a posuzovány možnosti využití palivových směsí, které jsou vytvořeny ze zrnitých palivových složek různého charakteru a vlastností. Následnou transformací jemně zrnité palivové směsi lisováním (briketováním) lze vytvořit pevné palivo požadované zrnitostní skladby ve formě briket [1]. Brikety (výlisky) představují alternativu ke tříděným druhům fosilních paliv, které jsou předepisovány výrobcí kotlů pro malé tepelné spotřebiče.

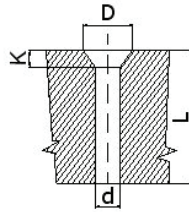
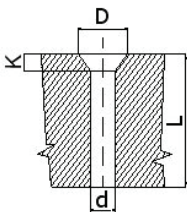
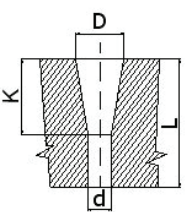
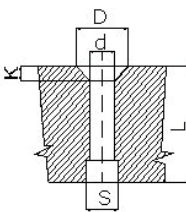
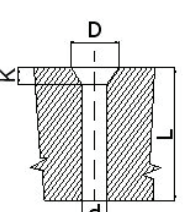
## 2 Obecné parametry a faktory ovlivňující lisování (briketování)

Briketování je mechanický proces zhutňování briketovací směsi jemnozrnných materiálů tlakem, při kterém se nemění chemické složení výchozích surovin. Briketovací lis stlačuje zpracovávaný materiál v lisovací formě, v důsledku toho se jemnozrnné částice vzájemně přibližují a působením vazebných sil se spojují do hrubozrnného agregátu – brikety. Rozměr a tvar finálního výlisku (brikety) je určený tvarem a rozměrem lisovací formy [2]. Výsledné vlastnosti vylišané brikety jsou ovlivňovány následujícími faktory:

- použité briketovací zařízení (lis) - lisovací tlak, hustota výlisku, flexibilita ke změně vlastností zpracovávané suroviny,

Pozn.:

Někteří výrobci označují lisy jako peletizační. Podle probíhajícího procesu zhutňování materiálu lisem, tj. mechanickým protlačováním materiálu kanály matrice (raznice), dochází k jeho stlačování a z lisu vystupuje briketa. Její průměr je dán průměrem otvorů v matici a délka pak nastavením odřezávacího (lámacího) nože. Proces peletizace, jehož produktem jsou pelety přibližně kulového tvaru, je založen na nabalování a nalepování zrn peletizovaného materiálu (směsi) na rotujícím, šikmo uloženém talíři peletizačního stroje. Ke zhutnění materiálu dochází vlivem odvalování vznikající kulové pelety, působením narůstající vlastní hmotnosti a podílu vertikální složky odstředivé síly. Technickou praxí bývají velice často pojmy zaměňovány. Brikety malých rozměrů jsou v mnoha případech označovány jako pelety, bez ohledu na zcela odlišný technologický princip vzniku. Jedná se o terminologickou nepřesnost.

| Č.1-KAHL                                                                          | Č.2-KAHL                                                                          | Č.3-STOZA                                                                         | Č.4-STOZA                                                                          | Č.5-KAHL                                                                            |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Profil lisovacího kanálu:                                                         | Profil lisovacího kanálu:                                                         | Profil lisovacího kanálu:                                                         | Profil lisovacího kanálu:                                                          | Profil lisovacího kanálu:                                                           |    |
|  |  |  |  |  |    |
| D                                                                                 | 12                                                                                | D                                                                                 | 12                                                                                 | D                                                                                   | 15 |
| d                                                                                 | 10                                                                                | d                                                                                 | 8                                                                                  | d                                                                                   | 10 |
| L                                                                                 | 90                                                                                | L                                                                                 | 36                                                                                 | L                                                                                   | 45 |
| K                                                                                 | 4                                                                                 | K                                                                                 | 20                                                                                 | K                                                                                   | 4  |
|                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   | S                                                                                  | 11,4                                                                                |    |
| lisovací poměr:                                                                   | lisovací poměr:                                                                   | lisovací poměr:                                                                   | lisovací poměr:                                                                    | lisovací poměr:                                                                     |    |
| 1:09                                                                              | 01:04,5                                                                           | 01:04,5                                                                           | 01:04,5                                                                            | 01:04,2                                                                             |    |

Obr. 1: Ukázka rozměrů různých druhů používaných matic.

- druh zpracovávaného materiálu a jeho charakteristiky - zrnitost, vlhkost, lepidlost, smáčivost apod.,
- materiálová homogenita lisovací směsi,
- rovnoměrné zvlhčení (zpracování) přídavné technologické vody,
- použití vhodných pojiv a plastifikátorů.

Obecně platí zásada, že při použití vyšších lisovacích tlaků vznikají pevnější výlisky, s vyšší hustotou a sypnou hmotností, a snižuje se jejich náchylnost k pohlcování vzdušné vlhkosti při skladování [3].

### 3 Experimentální briketovací testy

Cílem testů bylo ověření technologické vhodnosti různých materiálů k lisování, určení podmínek technologického procesu briketování (návrh receptury lisovací směsi) a stanovení kvalitativních parametrů finálních produktů, tj. briket. K experimentálnímu ověření vhodnosti materiálových vzorků k lisování byl použit laboratorní briketovací lis s plochou, pevnou lisovací maticí Kahl 14–175, který umožňuje vyrábět brikety ve vhodném

zrnitostním rozsahu, podle zvolených lisovacích matic. Ty se liší průměrem lisovacích otvorů, délkou lisovacích kanálů a velikostí náběhových úhlů kanálů. Průměr lisovacího kanálu  $d$  k jeho délce  $L$  udává tzv. lisovací poměr (stupeň zhutnění), viz obr. č. 1.

Princip lisování spočívá v tom, že lisovací směs je dávkována do vnitřního prostoru lisu, kde padá na plochou lisovací matici, po které se otáčí drážkovaná lisovací a dodrcovací kola. Materiál je zatlačován do volného prostoru lisovacích kanálů, které jsou kónické, a je v nich postupně zhutňován. Potřebná míra zhutnění je dána celkovou velikostí vznikající třecí síly zhutňovaného materiálu o stěny lisovacího kanálu. Zásadní roli sehrává celková vlhkost lisovací směsi a délka lisovacího kanálu. Při lisovacích testech jsou používány různé typy matic, které se liší délkou lisovacího kanálu a velikostí náběhového úhlu. Správná volba matrice má vliv na celkové zhutnění materiálu v briketě, tj. pevnostní charakteristiky výlisků.

#### 3.1 Testované materiály a jejich směsi

Pro technologické testování a návrhy výrobních receptur briket byly použity vzorky různých druhů materiálů odlišných kvali-

Tab. 1: Charakteristiky palivových složek.

| Palivová složka        | Zrnitost [mm] | Obsah vody analytické $W^a$ (hm. %) | Obsah síry v bezvodém stavu $S^d$ (%) | Výhřevnost $Q^d_i$ [MJ/kg] |
|------------------------|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| tvrdé dřevo            | > 0,5         | 7,32                                | 0,007                                 | 20,12                      |
| papír odpadní (směs)   | > 0,5         | 5,70                                | 0,09                                  | 12,9                       |
| sláma mletá (pšeničná) | > 0,5         | 6,40                                | 0,05                                  | 15,45                      |
| polokoks hnědé uhlí    | > 3,0         | 3,15                                | 0,71                                  | 31,77                      |
| piliny měkké dřevo     | > 2,0         | 5,48                                | 0,18                                  | 19,20                      |
| černouhelný kal        | > 0,5         | 1,28                                | 0,75                                  | 28,73                      |
| kal z ČOV upravený     | nestanoveno   | 15,14                               | 1,40                                  | 10,27                      |

tativních vlastností. Ověřované receptury zohledňovaly cílové použití výlisků, tzn. zvýšení kusovitosti a hmotnosti, snížení prašnosti, homogenitu pro spalování apod. K přípravě lisovacích směsí bylo použito: sběrového papíru, polokoksu, slámy, černého uhlí, pilin z měkkého i tvrdého dřeva, kalů z čistírny odpadních vod (předupravených) a zemité fosfátové rudy. Zrnitostní skladba testovaných materiálů v původním stavu byla značně rozdílná. Pro přípravu lisovacích směsí byla zrnitost vzorků upravena drcením, mletím a tříděním na velikost 0 – 2 mm s následným vytríděním podílů pod 0,5 mm. U vzorků testovaných materiálů byly stanoveny požadované kvalitativní parametry. Maximální velikost zrna ve směsi by měla odpovídat cca 1/5 průměru zvoleného lisovacího kanálu [4].

### 3.2 Lisovací směsi a jejich příprava

K přípravě lisovacích směsí bylo použito zrnitostně upravených vzorků s výjimkou předupraveného čistírenského kalu, který byl použit v původním stavu s přihlédnutím k jeho vysokému obsahu vody. Směsi byly připravovány jako materiálově jedno nebo více-složkové. U vícesložkových směsí, které jsou tvořeny z různých hmotnostních podílů materiálů odlišného charakteru a vlastností (objemová hmotnost, vlhkost, hustota apod.), je nezbytné zajistit jejich homogenní materiálovou skladbu (složení). Dosažená úroveň homogenity směsi má přímý vliv na kvalitu a vlastnosti finálního výlisku (pevnost, hustotu, vznik predisponovaných ploch porušení apod.). K homogenizaci lisovací směsi bylo použito laboratorního míšiče (mixéru) Eirich R 02 (obr. č. 2), který umožňuje dokonalou homogenizaci materiálových složek.

V průběhu lisování dochází k zahřívání lisovací matrice, dodrcovacích kol a následně pláště lisu teplem, které vzniká přeměnou dodávané mechanické energie na teplo v důsledku tření lisované směsi o stěny lisovacího kanálu při jejím zhutňování. Přeměna mechanické energie v teplo bývá výrazná a dochází k ní až v lisovacím kanále. Uvolňované teplo často převyšuje hodnoty skupenského tepla přeměny vody v páru. Technologická přídatná voda vázaná na povrchu směsi zrn odchází v podobě páry, vlhkost směsi klesá a odpor třením narůstá. Důsledkem je ucpání (zapečení) matrice a nutnost odstavení lisu. Výlisky vystupující z lisu jsou horké a musí se chladit.

### 3.3 Stanovení vlastností výlisků

U briket vyrobených podle požadavků jejich koncového využití (palivo, chemický a hutní průmysl apod.) byly sledovány jejich kvalitativní a mechanické parametry. U výlisků jedno a více-



Obr. 2: Laboratorní mixér R-02 f. Eirich.

složkových směsí určených ke spalování, tj. k uvolnění a využití jejich energetického obsahu, byly sledovány zejména kvalitativní parametry, tj. výhřevnost, obsah síry a těžkých kovů dle příslušných norem ČSN-ISO [7,8,9,10,11]. Pevnostní charakteristiky a mechanické vlastnosti briket byly stanoveny ručním tvrdoměrem „Pellet Hardnes tester AK-14–E, model 12/2006“ a převedeny na průměrné hodnoty deformační síly  $N$  a tlaku [MPa], při kterých dochází ke ztrátě soudržnosti briket. Zařízení je určeno pro rychlé provozní určení pevnosti briket. Testování se provádí ručně na zvoleném počtu výlisků. Deformační síla je do briket přiváděna kolmo na její průměr (tzn. v příčném směru na delší osu briket). Naměřené hodnoty jsou vyhodnoceny jako aritmetický průměr. Vzorek válcové briky je vložen do půlkruhového vybrání kovadlinky testeru a pomocí fixačního šroubu je briky přitlačena na plochu tlačného pístu. Při dosažení správného výchozího nastavení přitlaku briky na plochu tlačného pístu

Tab. 2: Pevnostní charakteristiky briket.

| Skladba briketovací směsi       | Skladba lisovací směsi (hm. %) | Průměr briky [mm] | Deformační síla (průměrná hodnota) [N] | Deformační tlak [MPa] |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------|
| tvrdé dřevo                     | 100                            | 8                 | 224,6                                  | 7,94                  |
| tvrdé dřevo                     | 100                            | 4                 | 166,8                                  | 5,89                  |
| tvrdé dřevo : papír             | 75 : 25                        | 8                 | 234,5                                  | 8,28                  |
| tvrdé dřevo : polokoks ze dřeva | 93 : 7                         | 8                 | 255,1                                  | 9,01                  |
| tvrdé dřevo : sláma upravená    | 75 : 25                        | 8                 | 450,8                                  | 15,95                 |



Tab. 3: Kvalitativní charakteristika briket ze čtyřsložkové směsi.

| Ev. číslo<br>vzorku briket | $W^a$<br>(%) | $W_t^r$<br>(%) | $A^r$<br>(%) | $A^d$<br>(%) | $Q_s^r$<br>[MJ/kg] | $Q_s^d$<br>[MJ/kg] | $Q_i^r$<br>[MJ/kg] | $Q_i^d$<br>[MJ/kg] | $H^r$<br>(%) | $H^d$<br>(%) | $S^r$<br>(%) | $S^d$<br>(%) | $S_m^r$<br>(%) |
|----------------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 66485                      | 4,59         | 4,92           | 21,69        | 22,81        | 18,23              | 19,17              | 17,21              | 18,22              | 4,12         | 4,33         | 0,19         | 0,20         | 0,11           |

se matice fixačního šroubu začne protáčet. Takto je nastaven výchozí stav měření. Otáčením tlakového šroubu je stlačována pružina, která přenáší vznikající přítlak, vyjádřený v [kg] na plochu tlačného pístu, do testované brikety. Deformační síla působící na briketu je stanovována ve směru kolmém na podélnou (delší) osu brikety (tzn. kolmo na její průměr). Ručním tlakovým šroubem je na vzorek zvyšován přítlak až do okamžiku ztráty pevnosti (porušení celistvosti vzorku brikety). Na indikátoru, který se v okamžiku deformace testované brikety zastaví, se odečte hmotnost přítlaku, při níž došlo k porušení soudržnosti brikety. Velikost odečteného přítlaku se přepočte pomocí gravitačního zrychlení  $g = 9,81$  na sílu v [N]. Plocha tlačného pístu má  $\varnothing 6$  mm, tomu odpovídá plocha  $28,27 \text{ mm}^2$ . Z průměrných hodnot naměřených deformačních sil a plochy pístu se stanoví hodnota tlaku v MPa [ $\text{N/mm}^2$ ], při které dochází k porušení soudržnosti brikety. Stanovené pevnostní parametry vzorků briket testerem AK-14-E (kolmo na průměr brikety) uvádí tabulky č. 2, 6 a 7. V závislosti na materiálové skladbě brikety se liší i způsob jejího porušení, tzn. ztráta celistvosti výlisku od křehkého lomu přes oblast pružné deformace až k porušení celistvosti podél sdružených smykových ploch. U briket fosfátové rudy byla stanovována pevnost v tlaku i podle normy ČSN CEN ISO/TS17892–7 na zkušebních těliscích.

#### 4 Experimentálně dosažené výsledky briketovacích testů

##### 4.1 Energetické brikety

Vzorky briket o průměru 4 a 8 mm, délce 12 – 25 mm vyrobené z lisovacích směsí, jejichž dominantní materiálové zastoupení tvoří biomasa (tvrdé dřevo) a minoritní podíl pak sběrový papír, koks ze dřeva a sláma, poskytují výlisky o vysoké pevnosti, které jsou houževnaté, nelámavé a nerozpadavé [3].

Lisovací směs tvrdé dřevo: mletá, neupravená sláma poskytuje brikety, které po průchodu lisovacím kanálem a tlakovém

odlehčení, zvětšují svůj objem a rozpadají se. Jejich soudržnost je minimální. Tento stav je způsobován pružností zrn mleté slámy a minimální schopností povrchu zrn přijímat vodu. Při lisování sice dojde k tlakovému zhuštění materiálu, ale po tlakovém odlehčení, tj. po výstupu z lisovacího kanálu, následuje odpružení surového výlisku. Pružnost slámy způsobuje, že po odlehčení dojde ke zvětšení objemu a k výrazné ztrátě jejich soudržnosti. V tomto stavu nejde lisováním vytvořit pevné a kvalitní brikety.

Povrchová vrstva stébel slámy je pevná a pružná. Tuto vlastnost si materiál zachovává i po jeho rozemletí. Pro snížení či odstranění pružné deformace materiálu před jeho zpracováním do lisovací směsi byla provedena jeho úprava působením 5% hydroxidu sodného NaOH. Působením NaOH po dobu 24 hod. na povrch zrn slámy došlo k jejich chemickému narušení (směs se stala částečně lepicí), ztrátě pružnosti a oslabení projevu nesmáčivosti. Lisovací směs s použitím upravené slámy poskytla homogenní, houževnaté brikety nejvyšších pevnostních parametrů.

Ztráta soudržnosti výlisků neprobíhá křehkým lomem, ale vzniká v důsledku tlakem vyvolaných smykových napětí podle sdružených smykových ploch. Pevnost v tlaku se pohybuje v rozmezí 6 až 16 MPa podle toho, jaký druh materiálu tvoří minoritní složku lisovací směsi. Nejvyšší hodnota deformačního tlaku, téměř 16 MPa, byla naměřena u briket podle receptury: upravená sláma (25 % hm.) a tvrdé dřevo (75 % hm.) [5]. Dosažené hodnoty deformačních tlaků jsou uvedeny v tabulce č. 2 a charakter porušení jejich soudržnosti na obr. č. 3.

Byly provedeny briketovací zkoušky palivových čtyřsložkových směsí na bázi biomasy a odpadních látek s odlišnými kvalitativními vlastnostmi, zejména obsahem vody. Materiálové složky lisovací směsi byly zastoupeny 20 % hm. upravenými kaly z čistírny odpadních vod, 30 % hm. černouhelného kalu z úpraven černého uhlí, 20 % hm. odpadního sběrového papíru a 30 % hm. pilin měkkého dřeva. Na požadovanou zrnitost pod 4 mm byl upraven a částečně rozvlákněn pouze odpadní papír mletím na nožovém mlýně Odes. Kaly z čistírny odpadních vod ( $\text{ČOV}_{\text{Nupr}}$ ) obsahovaly v důsledku předúpravy mokřými biologickými degradačními procesy značný podíl hrubé vody, byly silně plastické až lepicí. Vzhledem k této skutečnosti byla složka upraveného kalu použita v původním stavu. Dávka přídavné technologické vody byla snížena s ohledem na podíl vody v kalu. Materiálové složky odlišných kvalitativních vlastností a vlhkosti v lisovací směsi vyžadují dokonalou homogenizaci směsi. Celkový obsah vody v lisovací směsi byl po provedení optimalizačních lisovacích zkoušek upraven na 25 % hm. Lisování probíhalo plynule a klidně. Výlisky o průměru 8 mm měly po sušení při 40 °C pevnost 0,32 MPa, která byla dostatečná pro provedení spalovací zkoušky. Brikety vykazovaly dobrou materiálovou homogenitu a nelámaly se, viz obr. č. 4.



Obr. 3: Porušené brikety s patrnou kruhovou, plastickou deformací otisku pístu testeru.

Tab. 4: Zrnitostní skladba.

| Zrnitostní třída [mm] | Výnos (hm. %) |
|-----------------------|---------------|
| 0,001 – 0,125         | 41,2          |
| 0,125 – 2,0           | 47,0          |
| 2,0 – 8,0             | 11,8          |
| 0,001 – 8,0           | 100,0         |

Vedle základních charakteristik briket, které uvádí tabulka č. 3, je potřebné následně ověřit jejich chování v průběhu spalovacího procesu, tzn. způsob odhořívání a porušování, posoudit tepelnou odolnost, spékavost, včetně tavitelnosti popela.

#### 4.2 Briketování anorganických materiálů

Briketovací testy anorganických materiálů byly prováděny na zemité fosfátové rudě s obsahem užitečné složky  $P_2O_5$  přes 30 % hm. Materiál zemité fosfátové rudy byl klasifikován jako směs písčito-prachovitých zrn s podřízeným podílem drobného šterku s obsahem vody veškeré  $W_t = 9,64$  % hm. Zastoupení zrnitostních tříd v rudě ukazuje tabulka č. 4.

V původním stavu je materiál nelisovatelný. Provedené briketovací testy prokázaly, že optimální vlhkost lisovací směsi pro zemitou fosfátovou rudu leží v intervalu 12 – 13 % hm., v závislosti na délce lisovacího kanálu matrice a průměru briket 8 nebo 10 mm. Před lisováním je nutné vsázkovou směs fosfátové rudy upravit přidávkou technologické vody, není nutné používat pojidla ani plastifikátory. U vyrobených briket po 48 hod. sušení při teplotě 40 °C klesá obsah vody na hodnoty 0,3 – 0,19 % hm. Optimalizací technologických podmínek je možno lisovat brikety vhodných mechanických parametrů tak, aby brikety bylo možno transportovat a použít jako vsázku do tepelného zpraco-

vání, aniž by došlo k jejímu rozpadnutí. Pevnost vysušených briket v prostém tlaku byla stanovena podle ČSN ISO/TS17892–7 a Testerem AK-14-E. U vyrobených briket byla zjišťována změna jejich pevnosti vyvolaná přijímáním vzdušné vlhkosti a jejich reakce na tepelný šok při teplotě 800 °C po dobu 15 min. [6]. Výsledky jsou uvedeny v tabulkách č. 5, 6 a 7.

#### 5 Shrnutí výsledků a jejich diskuse

Testované lisovací směsi palivových briket tvořených jednou či více palivovými složkami rozdílných kvalitativních vlastností umožňují připravit výlisky požadovaných kvalitativních parametrů (výhřevnost, měrná sirnatost), viz tabulka č. 3. Pevnostní charakteristiky výlisků je možno do jisté míry ovlivnit hmotnostními poměry materiálové skladby lisovací směsi. S rostoucím hmotnostním podílem upravené biomasy (sláma nebo odpadní papír) v lisovací směsi lze připravit pevné a houževnaté brikety. Rozhodujícím parametrem je celkový obsah vody ve směsi před lisováním. Optimální obsah vody upřesněný předběžnými lisovacími testy musí poskytovat lisovací směs plastickou a výlisky s hladkým povrchem bez příčných trhlin. Zajímavé výsledky pevnosti briket poskytuje lisovací směs s podílem slámy upravené hydroxidem sodným, ale vede ke zvýšení obsahu  $Na^+$  iontu ve výlisku, což by se mohlo v kombinaci s obsahem draslíku  $K^+$  projevovat ve snížení tavitelnosti popela.

Pevnost vysušených briket z anorganických materiálů je rozdílná ve směru podélné osy briket a ve směru na ni kolmém. Pevnost vysušených briket (v prostém tlaku) byla stanovena podle ČSN CEN ISO/TS17892–7. Pevnost ve směru kolmém na podélnou osu, tj. kolmo na průměr briket byla měřena pomocí testeru AK-14-E, který je určen pro rychlé a operativní zjišťování kvality výlisků. Naměřené výsledky vykazují rozdíly. Hodnoty stanovené podle normy jsou nižší než hodnoty stanovené kolmo

Obr. 4: Brikety ze čtyřsložkové směsi dle receptury  $VR_p$ .

Tab. 5: Pevnosti v prostém tlaku dle ČSN ISO/TS17892-7.

| Vzorek - číslo                     | 2     | 3     | 4     | Rozměry vzorku [mm] |
|------------------------------------|-------|-------|-------|---------------------|
| pevnost v tlaku – vysušený [MPa]   | 0,315 | 0,369 | 1,314 | Ø = 10 , v = 20     |
| pevnost v tlaku po nasáknutí [MPa] | 0,251 | 0,228 | 0,628 | Ø = 8 , v = 17      |

Tab. 6: Pevnost stanovená kolmo na průměr briket pomocí AK-14-E.

| Číslo vzorku    | Vlhkost směsi (hm. %) | Obsah vody po vysušení (hm. %) | Průměr brikety [mm] | Deformační síla [N] | Pevnost brikety v tlaku [MPa] |
|-----------------|-----------------------|--------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|
| 2               | 14,65 %               | 0,30 %                         | 10                  | 26,2                | 0,93                          |
| 3               | 12,64 %               | 0,29 %                         | 10                  | 27,8                | 0,98                          |
| 4               | 12,00 %               | 0,19 %                         | 8                   | 28,5                | 1,00                          |
| 4/VŽ – vyžíhaný | 12,00 %               | po vyžíhání 1 000 °C           | 8                   | 866,0               | 30,60                         |

Tab. 7: Pevnosti briket po nasáknutí vzdušnou vlhkostí a po tepelném šoku.

| Označení vzorku                                                                     | Obsah vody po 97 hod. (hm. %) | Průměr brikety [mm] | Průměr. deformační síla [N] | Průměr. deformační tlak při porušení vzorku [MPa] |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| Pevnost briket vystaveným působení relativní vzdušné vlhkosti 95 % po dobu 100 hod. |                               |                     |                             |                                                   |
| 2/VV                                                                                | 1,04                          | 10                  | 16,68                       | 0,59                                              |
| 3/VV                                                                                | 0,97                          | 10                  | 23,54                       | 0,83                                              |
| 4/VV                                                                                | 1,13                          | 8                   | 23,25                       | 0,82                                              |
| Pevnost vzorků briket podrobeným tepelnému šoku při 800 °C                          |                               |                     |                             |                                                   |
| 2/TŠ                                                                                | 1,04                          | 10                  | 62,78                       | 2,22                                              |
| 3/TŠ                                                                                | 0,97                          | 10                  | 44,15                       | 1,56                                              |
| 4/TŠ                                                                                | 1,13                          | 8                   | 63,27                       | 2,24                                              |

na průměr briket. Údajů stanovených podle normy je nízký počet a nebylo proto možno provést seriózní srovnání obou metod, nehledě na to, že každé měření pevnosti briket je prováděno v odlišném směru výlisku. Dosažené výsledky se dají posuzovat jako pevnostní směrová anizotropie výlisku [6] ve vazbě na použitý systém lisování.

Provedené testy nasákavosti vzdušnou vlhkostí při teplotě 30 °C a vlhkosti vzduchu do 95 % po dobu 97 hod. dokazují, že brikety za těchto podmínek přijímají vodu v rozsahu 1,0 až 1,1 % hm. Zvýšený obsah vody vede ke snížení pevnosti briket ve směru podélné (delší) osy brikety na hodnoty 0,228 až 0,628 MPa a ve směru kolmém na podélnou osu pak na 0,59 až 0,83 MPa. Pevnost briket se zvýšeným obsahem vody získané ze vzdušné vlhkosti a podrobených testu tepelným šokem při 800 °C po dobu 15 min. vede ke zvýšení pevnosti briket na hodnoty 1,56 až 2,24 MPa ve směru kolmém na podélnou osu briket. Brikety byly testovány na tepelnou stálost při teplotě 1 000 °C po dobu 45 min. Jejich pevnost v příčném směru stoupla vyžíháním na 30,0 MPa. U vzorků briket vystavených tepelnému šoku v rozmezí 800 až 1 000 °C nedochází ke vzniku prasklin a trhlin na jejich povrchu. Vzorky briket byly testovány na tavitelnost. Testované vzorky vykázaly interval teplot mezi bodem deformace (DT) a tečení (FT) od 1 418 až po 1 434 °C [6].

## 6 Závěr

Článek shrnuje poznatky z experimentálních lisovacích zkoušek zaměřených na přípravu kusovitých (zrnných) materiálů, briket

z jemně zrnitých palivových složek a jejich směsí z kategorie biomasy, odpadních látek, anorganického materiálu a tepelně přepracovaného fosilního paliva. Je popsána příprava lisovací směsi a procesní podmínky lisování. Jsou uvedeny změny pevnostních charakteristik briket po vysušení, opětovném nasáknutí vzdušnou vlhkostí a vystavení tepelnému šoku při teplotě 800 °C. Výlisky vykazují pevnostní rozdíly stanovené ve směru kolmém na průměr brikety a ve směru jejich podélné (delší) osy. Technologie briketování umožňuje připravit kusové materiály a paliva požadovaných kvalitativních vlastností (výhřevnost, emise, měrná sirnatost) kombinací odpadních látek, biomasy a méně kvalitních druhů fosilních paliv, jako možnou náhradu tříděných druhů paliv pro tepelné spotřebiče malých a středních výkonů při dodržení platných legislativních norem.

## Použité symboly a zkratky

|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| $W^a$        | obsah analytické vody               |
| $W_t^r$      | obsah vody veškeré v původním stavu |
| $A^{d(r)}$   | obsah popela                        |
| $Q_s^{d(r)}$ | spalné teplo                        |
| $Q_i^{d(r)}$ | výhřevnost                          |
| $H^{d(r)}$   | obsah vodíku                        |
| $S^{d(r)}$   | obsah síry                          |
| $S_m^r$      | měrná sirnatost                     |

Pozn.:  
index  $r$  (původní stav),  $d$  (bezvodý stav)



**Poděkování**

Výzkumné práce byly prováděny díky finanční podpoře MŽP ČR v rámci řešení projektu VaV SP/2f2/98/07.

**Literatura**

- [1] VALEŠ J., KUSÝ J., ANDĚL L.: *Energetický obsah spalitelného uhlíku odpadních látek a tvorba směsných paliv*, Zpravodaj hnědé uhlí 3/2009, s. 27-32, ISSN 1213 – 1660.
- [2] VALEŠ J., KUSÝ J., ANDĚL L., ŠAFÁŘOVÁ M.: *Možnosti využití pokrutiny z výroby rostlinného oleje pro energetické účely*, Symposium ODPADOVÉ FÓRUM 2010, 5. ročník, ISBN 978-80-85990-12-6.
- [3] KRIŽAN P., MATÚŠ M.: *Výzkum vplyvu druhu lisovaného materiálu pri zhutňovaní*, Briketovanie a peletovanie 2009, Zborník prednášok, Strojnícka fakulta STU Bratislava, ISBN 978-80-227-3185-0.
- [4] KOTT J.: *Technické a ekonomické aspekty výroby pelet z biomasy*, Briketovanie a peletovanie 2009, Zborník prednášok, Strojnícka fakulta STU Bratislava, ISBN 978-80-227-3185-0.
- [5] KUSÝ J., VALEŠ J.: *Briketovací testy dvousložkových lisovacích směsí na bázi tvrdého dřeva a stanovení pevnosti výlisků*, Interní technická zpráva VÚHU a.s. Most, 11/2010.
- [6] VALEŠ J., KUSÝ J., ANDĚL L.: *Zpráva o výsledcích briketovacích testů fosfátové rudy a provedených fyzikálně chemických rozborech*, Interní technická zpráva VÚHU a.s. Most, 12/2010.
- [7] ČSN 44 1377: Tuhá paliva. Stanovení obsahu vody.
- [8] ČSN 44 1378: Tuhá paliva. Stanovení popela.
- [9] ČSN ISO 609: Tuhá paliva. Stanovení uhlíku a vodíku – Vysokoteplotní spalovací metoda.
- [10] ČSN ISO 351: Tuhá paliva. Stanovení obsahu veškeré síry – Vysokoteplotní spalovací metoda.
- [11] ČSN ISO 1928: Tuhá paliva. Stanovení spalného tepla kalorimetrickou metodou v tlakové nádobě a výpočet výhřevnosti.