

TLAKOVÉ POMERY V KUŽELOVEJ LISOVACEJ KOMORE

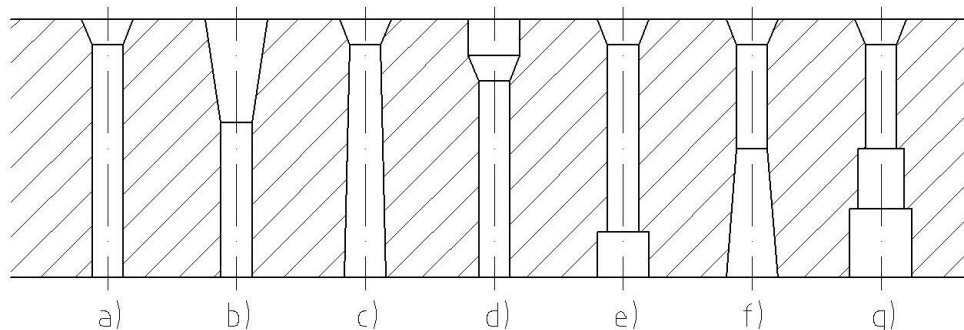
Miloš Matuš, Peter Križan

Legislatívne prostredie v EÚ vytvára požiadavky na postupné nahrádzanie fosílnych zdrojov energie obnoviteľnými zdrojmi. V podmienkach SR predstavuje najperspektívnejší obnoviteľný zdroj energie biomasa. Jej potenciál v rámci OZE na Slovensku predstavuje 42 %, z čoho pre využívanie má najväčší význam tuhá forma biomasy. Uvedené predpoklady vedú k nevyhnutnosti realizácie výskumu v oblasti spracovania tuhej formy biomasy a jej transformácie do tuhého ušľachtitého biopaliva. Príspevok sa zaoberá technológiou zhutňovania biomasy a predovšetkým teoretickou analýzou tlakových pomerov v lisovacej komore.

Kľúčové slová: biomasa, biopalivo, výlisk, lisovanie, lisovacia komora

VPLYV GEOMETRIE LISOVACEJ KOMORY NA PROCES LISOVANIA

V súčasnosti neexistuje mnoho prameňov a analýz, ktoré sa zaoberajú matematickým popisom procesu briketovania, vplyvom jednotlivých parametrov tohto procesu na výslednú kvalitu výliskov a popisom tlakových účinkov v lisovacej komore. Možno konštatovať, že ucelenejšie matematické modely zahŕňajúce vplyv predovšetkým konštrukčných parametrov na proces lisovania absentujú. Je zrejmé, že podrobný výskum vplyvu všetkých konštrukčných parametrov na proces lisovania a na výslednú dosahovanú kvalitu výliskov je veľmi rozsiahly a vyžaduje si podrobný rozbor danej problematiky. Najvýraznejší vplyv na proces lisovania majú geometrické parametre lisovacej komory, t.j. tvar a rozmery (priemer, dĺžka, kužeľovitost' komory, odstupňovanie jednotlivých tvarových častí atď.). Špecifikácie používaných geometrií lisovacích komôr v maticiacich peletovacích lisov sú znázornené na obr. 1. Každý tvar lisovacej komory je špecifický pre iný druh lisovanej biomasy, alebo pre jeden druh s rôznou štruktúrou, s rôznym použitým spojivom atď. Preto je potrebné venovať sa pri výskume zhutňovania biomasy vplyvu konštrukčných parametrov na zhutňovací proces a na dosahovanú kvalitu produkcie. Výskum a optimalizácia v oblasti geometrie lisovacej komory pre zhutňovanie biomasy je žiaduca predovšetkým pre úspešný proces lisovania, pre zvýšenie energetickej efektívnosti procesu zhutňovania a súčasne pre dosiahnutie požadovanej kvality produkcie.



Obr. 1 Špecifikácia používaných geometrií lisovacích komôr pri peletovaní biomasy
a) normálna, b) hlboká, c) plochá, d) studňová, e) valcová, f) kužeľová, g) stupňovitá

Tlakové pomery vo valcovej lisovacej komore pri jednoosom lisovaní

Na základe teórie jednoosového lisovania v uzavretej lisovacej komore môžeme analyzovať vplyv zmeny dĺžky lisovacej komory. Priemer lisovacej komory má v súčinnosti s jej dĺžkou významný vplyv tak na samotné vlastnosti výlisku ako paliva, ako aj na opotrebenie nástrojov. Pri výliskoch platí, že pre pomalé vyhorenie, čo je u paliva žiaducou vlastnosťou, musí byť pomer povrchu k objemu čo možno najmenší. Rovnako pri lisovacích nástrojoch je predpoklad, že čím je menší pomer povrchu výlisku k objemu, tým je opotrebenie nástrojov menšie. Preto je žiaduce, ak je to možné, hľadať i optimálne rozmery výlisku z rôznych hľadísk. Avšak priemer lisovacej komory (totožný s priemerom výlisku) väčšinou býva na základe vonkajších podnetov (trh, účel použitia, atď.) pevne stanovený.

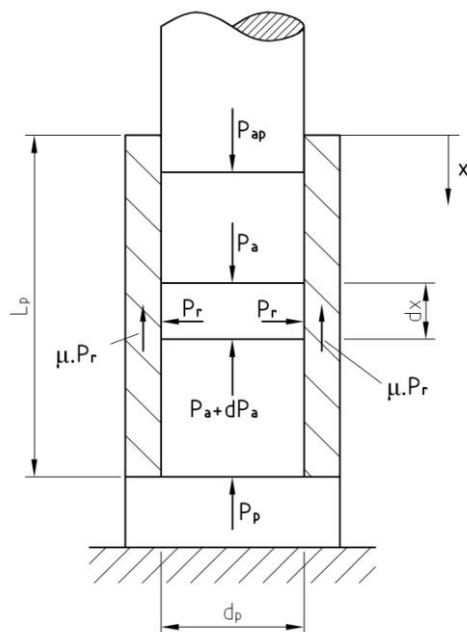
Tlakové pomery v uzavretej lisovacej komore pri jednoosom lisovaní, kde protitlak je vyvolaný zátkou, sú znázornené na obr. 2. Tlakové pomery v lisovacej komore medzi piestom a zátkou, možno vysvetliť na elemente lisovaného materiálu dx , pričom sa jeho hmotnosť počas lisovacieho procesu zanedbá.

Z tlakových pomerov vo valcovej lisovacej komore možno napísať rovnicu pre rovnováhu síl:

$$p_a - p_a + dp_a - \frac{\pi d_p^2}{4} \mu p_r - \mu p_r \pi d_p dx = 0 \quad (1)$$

Pri lisovaní sypkých materiálov sa väčšinou vychádza z anizotropie tlaku (vyššie tlaky sú v smere kolmom). Pomer hlavných napätí (radiálnych σ_r / axiálnych σ_a) sa označuje ako zvyškový tlakový koeficient alebo horizontálny lisovací pomer λ . Pre disperzné materiály nadobúda λ hodnoty od 0 po 1.

$$\lambda = \frac{\sigma_r}{\sigma_a} = \frac{p_r}{p_a} \Rightarrow p_r = \lambda p_a \quad (2)$$



p_{ap} – axiálny tlak piesta (MPa)

p_p – protitlak v lisovacom puzdre (MPa)

p_r – radiálny tlak (MPa)

p_a – axiálny tlak na zátke (MPa)

Obr. 2 Tlakové pomery v lisovacej komore pri jednoosom lisovaní

Po dosadení vzťahu (2) do rovnice (1) a pre jej okrajové podmienky: $x = 0, p_a = p_{ap}, x = L_p, p_a = p_p$ dostaneme výsledný vzťah:

$$p_{ap} = p_p \cdot e^{\frac{4 \cdot \lambda \cdot \mu \cdot L_p}{d_p}} \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

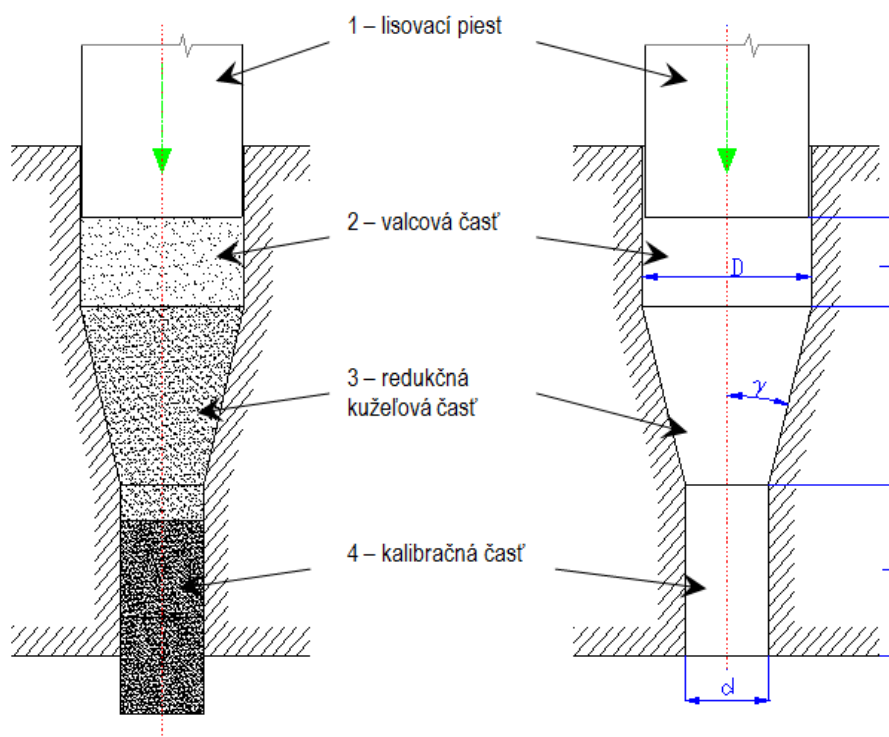
Táto rovnica (3) udáva vzťah medzi tlakom piesta a protitlakom pôsobiacim na lisovaný materiál. Tento vzťah možno uplatniť aj pri lisovaní v otvorenej lisovacej komore, kde protitlak je tvorený statickým trecím odporom medzi už zlisovaným materiálom pretláčaným cez lisovaciu komoru a stenami tejto komory. Zo vzťahu možno ďalej vychádzať aj pri určovaní veľkosti potrebného protitlaku na lisovaciu operáciu a určenie statického trecieho odporu pretláčaného stĺpca, ktorý už bol zlisovaný. Kombináciou súčiniteľa trenia a dĺžky lisovacej komory teda vieme zabezpečiť potrebný protitlak pri otvorených lisovacích komorách.

Vychádzajúc zo vzťahu (3) je zrejmé, že zväčšovaním dĺžky lisovacej komory exponenciálne rastie protitlak na lisovaný materiál. Naopak, zmešovaním priemeru lisovacej komory protitlak exponenciálne klesá. Možno konštatovať, že dĺžka lisovacej komory a taktiež jej priemer majú podľa matematického modelu výrazný vplyv na výslednú kvalitu výliskov ako aj na energetickú efektívnosť. Preto je nutné uvažovať o experimentálnom overení týchto výsledkov a hľadať ich optimalizáciu.

Tlakové pomery pri lisovaní v kuželovej lisovacej komore

Kuželovitosť steny lisovacej komory je veľmi významným parametrom, ktorý výraznou mierou ovplyvňuje veľkosť lisovacieho tlaku, a tým aj výslednú kvalitu výliskov. Pri pretláčaní lisovaného materiálu cez kuželovú komoru dochádza k viacsovému lisovaniu, a teda aj k zvýšeniu kvality výliskov v podobe vyššej hustoty ako aj jeho mechanických vlastností, ale zároveň dochádza k vyššiemu opotrebeniu nástrojov. Taktiež zvyšovaním lisovacieho tlaku sa zvyšuje energetická náročnosť procesu lisovania. Z tohto dôvodu je potrebná podrobná matematická analýza ako ja experimentálna verifikácia a následná optimalizácia geometrie lisovacej komory. Pri zhutňovaní s použitím kuželovej lisovacej komory sa dosahujú podstatne kvalitnejšie výlisky ako pri zhutňovaní s použitím valcovej lisovacej komory. Neplatí však pravidlo, že čím je väčší vrcholový kužel komory, tým je lepšia kvalita výlisku. To dáva predpoklad existencii závislosti medzi veľkosťou vrcholového uhla lisovacej komory a lisovacím tlakom s ohľadom na dosahovanú kvalitu výliskov. Je teda na mieste zaoberať sa hľadaním optimálnych hodnôt týchto veličín. Pre určenie tejto závislosti je potrebné vhodným spôsobom popísať samotný lisovací proces a rozloženie tlakov v priestore lisovacej komory. Tiež je potrebné v procese lisovania zabezpečiť tzv. fázu výdrže, kedy výlisk ostáva po zlisovaní ešte určitú dobu pod tlakom. Počas tejto fázy výlisk chladne a tuhne. Táto fáza výdrže sa dosahuje vo valcovej kalibračnej časti komory.

Pre analýzu vplyvu kuželovitosti stien lisovacej komory využijeme základný tvar lisovacej komory (obr. 3), ktorá pozostáva z troch častí. Takýto typ lisovacej komory je často využívaný v konštrukciách zhutňovacích strojov.

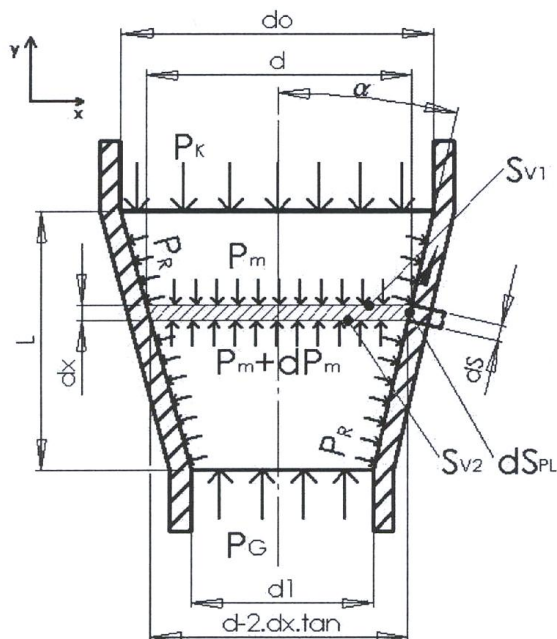


Obr. 3 Základné časti a rozmery kuželovej lisovacej komory

Valcová časť (2) slúži ako zásobník lisovaného materiálu pre proces lisovania. Do tejto časti je privádzaný materiál, ktorý sa vplyvom vonkajšej sily vyvodenej lisovacím piestom (1) začína zhutňovať. V kuželovej časti (3) dochádza vplyvom vonkajšej sily a vplyvom kuželového tvaru k viacsovému zhutneniu materiálu. Valcová kalibračná časť (4) dáva výlisku konečný tvar. Výlisk je tu držaný určitú dobu pod tlakom. Táto doba výdrže je

nutná súčasť lisovacieho procesu, kvôli zmenšeniu vplyvu vznikajúcich dilatácií. Rozmery výlisku, ktorý vychádza cez valcovú kalibračnú časť komory sa už menia len veľmi málo. Vďaka kalibračnej časti (4) lisovacej komory získava výlisk z biomasy vyššiu mechanickú odolnosť a kvalitný povrch bez porúch.

Na obrázku 4 sú uvedené tlakové pomery počas lisovania v kužeľovej časti komory. Pri popise tlakových pomerov zanedbávame hmotnosť lisovaného materiálu. Maximálny dosiahnutý tlak P_k , ktorý vzniká pri pretláčaní, závisí od dĺžky, tvaru lisovacieho kanála, veľkosti vrcholového uhla kužeľovej časti lisovacej komory a pomerov trenia medzi lisovaným materiálom a materiálom komory. Trecí odpor je daný radiálnym tlakom P_R a priečnou zložkou tlaku P_M pôsobiaceho na stenu kanála, koeficientom väzbového trenia μ a dĺžkou kanála L . Priemer kanála sa lineárne znižuje v závislosti od dĺžky L .



P_k – axiálny tlak piesta (MPa)

P_R – radiálny tlak (MPa)

P_G – protitlak v lisovacej komore (MPa)

P_M – axiálny tlak na zátku (MPa)

d_0 – priemer lisovacej komory na vstupe (mm)

d_1 – priemer lisovacej komory na výstupe (mm)

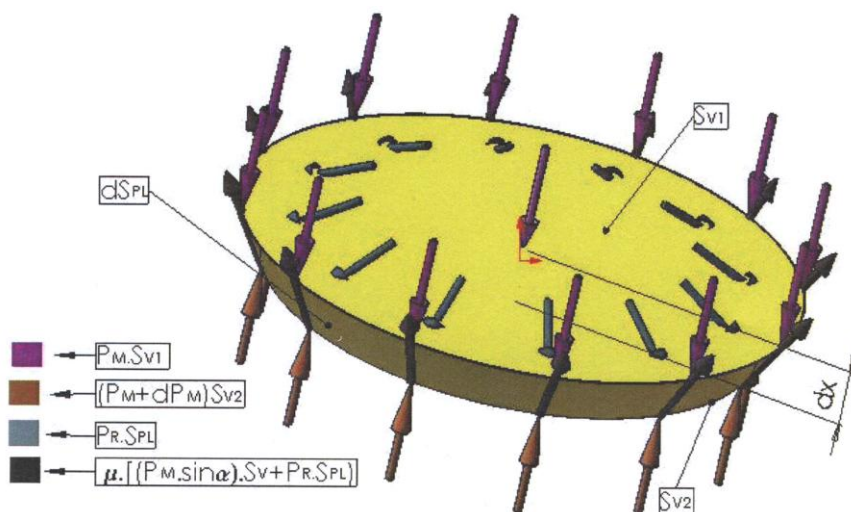
d – priemer lisovacej komory v priereze (mm)

μ – koeficient trenia (-)

L – dĺžka kužeľovej časti lisovacej komory (mm)

Obr. 4 Tlakové pomery v kužeľovej lisovacej komore

Pre popis procesu lisovania vychádzame z popisu pôsobenia tlakov na elementárny zrezaný kužeľ hrúbky d_x . Vo zvislom smere pôsobí lisovací tlak P_M , v smere opačnom označíme vyvolaný protitlak $P_M + dP_M$. Z dôvodu pôsobenia trenia vzniká tlak kolmý na steny kanála P_R . Ten spolu s časťou priečnej zložky lisovacieho tlaku vyvolá trenie pôsobiace pozdĺž stien lisovacieho kanála. Za predpokladu priaznivých podmienok trenia je tlak na steny zásobníka značne menší ako osový.



Obr. 5 Priestorové rozloženie tlakov na elementárny zrezaný kužeľ

Pre vytvorenie rovnovážnych rovníc potrebujeme poznať veľkosti plôch, na ktoré pôsobia jednotlivé tlaky.

Pre obsah povrchu plášťa zrezaného kužeľa platí:

$$S_{PL} = \frac{1}{2} \pi (d_0 + d_1) s \quad (\text{mm}^2) \quad (4)$$

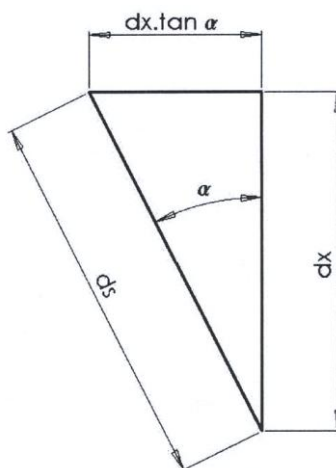
Kde: s – dĺžka spojnice podstáv (mm),
 d_0 – priemer vrchnej podstavy (mm),
 d_1 – priemer spodnej podstavy (mm).

$$\cos \alpha = \frac{L}{s} \Rightarrow s = \frac{L}{\cos \alpha} \quad (5)$$

Pre povrch plášťa elementárneho zrezaného kužeľa bude na základe obr. 5 platiť:

$$dS_{PL} = \frac{1}{2} \pi (d + (d - 2 \cdot dx \cdot \tan \alpha)) \cdot ds \quad (6)$$

Analogicky pre ds podľa (4) a obr. 6: $\cos \alpha = \frac{dx}{ds} \Rightarrow ds = \frac{dx}{\cos \alpha}$ (7)



Obr. 6 Vyjadrenie základných rozmerov elementárneho zrezaného kužeľa

Dosadením vzťahu (7) do (6) dostaneme:

$$dS_{PL} = \pi (d - dx \cdot \tan \alpha) \frac{dx}{\cos \alpha} \quad (8)$$

Plošný obsah podstáv elementárneho zrezaného kužeľa sa bude exponenciálne meniť v smere lisovania. Pre vrchnú podstavu možno napísať vzťah (9), pre spodnú podstavu (10):

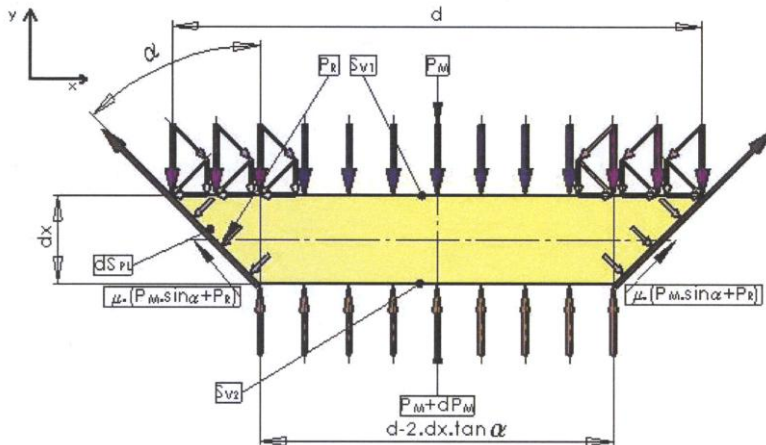
$$S_{V1} = \frac{1}{4} \pi d^2 \quad (\text{mm}^2) \quad (9)$$

$$S_{V2} = \frac{1}{4} \pi (d - 2 \cdot dx \cdot \tan \alpha)^2 \quad (\text{mm}^2) \quad (10)$$

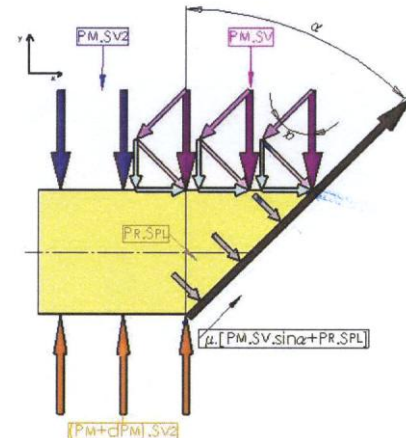
Vzťah pre výpočet plochy medzikružia, na ktoré bude pôsobiť tlak ovplyvnený kuželovitostou komory:

$$S_V = S_{V1} - S_{V2} = \frac{1}{4} \pi (d^2 - (d - 2 \cdot dx \cdot \tan \alpha)^2) = \pi (d - dx \cdot \tan \alpha) \cdot dx \cdot \tan \alpha \quad (\text{mm}^2) \quad (11)$$

Rozložením tlakových polí P_M a P_R a popisáním reakcií v pôsobiskách môžeme znázorniť pôsobenie tlakov a ich reakcie. Nakoľko je možné predpokladať, že rozloženie tlakov po obvodě bude rovnomerné, je možné pre zjednodušenie preniesť popis do roviny (obr. 7).



Obr. 7 Rozloženie tlakov na elementárny zrezaný kužel v rovine



Obr. 8 Rozbor tlakov na jednotlivé plochy

Pre napísanie rovníc rovnováhy je potrebné priradiť k pôsobiacim tlakom plochy ich pôsobenia. Na základe tlakového rozboru na obr. 8 je možné napísať nasledovnú rovnicu pre rovnováhu síl (v smere osi lisovacej komory):

$$P_M S_{V2} + P_M S_V - (P_M + dP_M) S_{V2} - \mu [P_R + P_M \sin \alpha] dS_{PL} \cos \alpha = 0 \quad (12)$$

Rovnica (12) dostáva po úprave tvar:

$$P_M S_V - dP_M S_{V2} - \mu [P_R + P_M \sin \alpha] dS_{PL} \cos \alpha = 0 \quad (13)$$

Po dosadení vzťahov (8), (10), a (11) do rovnice (13) a vyjadrením tlaku P_R na základe teórie lisovania sypkých látok vychádzajúc z anizotropie tlaku a jeho dosadením do rovnice (13) a následnej úprave dostávame tvar rovnovážnej rovnice popisujúcej zmenu tlakových pomerov v kuželovej lisovacej komore v závislosti od dĺžky komory a vrcholového uhla:

$$P_M \left(d - dx \cdot \tan \alpha \right) \tan \alpha \cdot dx - \frac{1}{4} \left(d - 2 dx \cdot \tan \alpha \right)^2 dP_M - \pi \mu P_M \left(d - dx \cdot \tan \alpha \right) dx = 0 \quad (14)$$

Pre ďalšiu úpravu uvedenej rovnovážnej rovnice bude potrebné v budúcom priebehu výskumu stanoviť okrajové podmienky a stanoviť si jej výsledný tvar vhodný pre následné optimalizačné metódy. Výsledkom teda bude vzťah popisujúci vplyv geometrie lisovacej komory (priemer komory, dĺžka komory a veľkosť vrcholového uhla kuželovej časti) na potrebný lisovací tlak pre dosiahnutie želanej kvality (hustoty) výlisku.

Uvedený vzťah (14) vychádza z rovnice rovnováhy síl v kuželovej časti lisovacej komory. V praxi sa v súčasnosti využívajú pre rôzne druhy lisovanej biomasy rôzne tvary lisovacích komôr skladajúce sa prevažne z kuželových a valcových častí. Ďalším smerom výskumu bude teoretický popis tlakových pomerov v lisovacích komorách rôznych tvarov vyskladaných z kombinácie valcových plôch, kuželových plôch, guľových, parabolických atď.

Cieľom komplexného výskumu je matematický model tlakových pomerov v lisovacej komore s ľubovoľným tvarom a zároveň optimalizácia tohto tvaru vzhľadom k energetickým nákladom na lisovanie a k dosahovanej kvalite výliskov. Experimentálne overenie získaného matematického modelu umožní pre rôzne druhy biomasy a rôzne technologické podmienky navrhnúť optimálnu geometriu lisovacej komory z energetického hľadiska a z hľadiska požadovanej kvality výliskov.

ZÁVER

Kvalita výliskov je rozhodujúci faktor na trhu s biopalivami. Na to, aby bolo možné dosiahnuť výlisky s požadovanými mechanickými ukazovateľmi kvality, ale pri vynaložení minimálnych energetických nákladov, je potrebné podrobne analyzovať celý proces zhutňovania biomasy. Najviac premenných do procesu zhutňovania prináša samotný materiál, jeho druh, štruktúra, chemické zloženie, mechanické vlastnosti, vlhkosť. Pre každý druh zhutňovaného materiálu je potrebné hľadať a nastavovať vhodné technologické parametre pre dosiahnutie požadovanej kvality výliskov. Rovnako s každým druhom lisovaného materiálu je potrebné hľadať a upravovať aj konštrukčné parametre produkčných strojov. Konštrukčné parametre rozhodujúcou mierou ovplyvňujú výslednú kvalitu biopaliva, ale zároveň ovplyvňujú aj náklady na výrobu týchto biopalív. Správna voľba konštrukčných parametrov je podmienkou vzniku výliskov vysokej kvality. Preto je potrebné sa zaoberať hĺbkovou analýzou týchto parametrov, experimentálnymi skúškami a následne verifikáciou návrhov opatrení. Pre každý druh zhutňovaného materiálu bude potrebné opakovať celý výskum, avšak postupným napĺňaním databázy výsledkov a ich aplikovaním v praxi bude možné výrazne prispieť k progresii vo výrobe výliskov nielen z biomasy pri znižovaní výrobných a investičných nákladov.

Pod'akovanie:

Tento príspevok bol vytvorený realizáciou projektu „Vývoj progresívnej technológie zhutňovania biomasy a výroba prototypov a vysokoproduktívnych nástrojov“ (ITMS kód Projektu: 26240220017), na základe podpory operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

POUŽITÁ LITERATÚRA:

- [1] HORRIGHS, W. Determining the dimensions of extrusion presses with parallel-wall die channel for the compaction and conveying of bulk solids. In *Aufbereitungs-Technik : Magazine*. Duisburg, 1985, no. 12.
- [2] MATÚŠ M., KRIŽAN P.: Influence of structural parameters in compacting process on quality of biomass pressings. In. International conference APLIMAT 2010, Bratislava, ISBN 978-80-89313-47-1, str. 343 – 351.
- [3] PEREZ, E.: *Module – Pellets press components (rolls, dies, knives, feeder)*, The Agricultural University of Norway, online, citované zo dňa 05.05.2009, 8:31, www.mataminc.com/pdfs/How%20Pellets%20are%20Made.pdf