

Výskum materiálového zhodnocovania komunálneho odpadu technológiou briketovania

Peter KRIŽAN, Ľubomír ŠOOŠ, Ľudovít KOLLÁTH

Ústav výrobných systémov, environmentálnej techniky a manažmentu kvality,
Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Nám. Slobody 17, 81231, Bratislava, SR.
E-mail: peter.krizan@stuba.sk

Abstrakt

Cieľom predkladaného príspevku je prezentovať možnosti mechanickej úpravy pre potreby materiálového zhodnocovania komunálnych odpadov a výsledky experimentálneho výskumu briketovania komunálneho odpadu. Cieľom daného výskumu je stanoviť vplyv materiálového zloženia a vplyv spôsobu lisovania na kvalitu tuhých biopalív. Merania sa realizovali s využitím mechanického a hydraulického briketovacieho lisu pri briketovaní komunálneho odpadu. Získané výsledky poukazujú na vhodnosť použitia mechanického princípu briketovania v porovnaní s hydraulickým princípom. Z pohľadu hodnôt hustôt brikiet sa najviac osvedčilo primiešať do komunálneho odpadu podrvený kartónový papier. Taktiež vplyvom prídania odpadových drevných pilín, hustota brikiet narástla. Tieto biologické aditíva prispeli aj k lepšiemu previazaniu materiálových zložiek a k vytvoreniu kompaktného tvaru brikiet. Autori tiež v príspevku prezentujú nutnosť znalostí vplyvu konštrukcie stroja na výslednú kvalitu brikiet.

Kľúčové slová: briketovanie, komunálny odpad, hustota brikiet, pevnosť brikiet, mechanická úprava

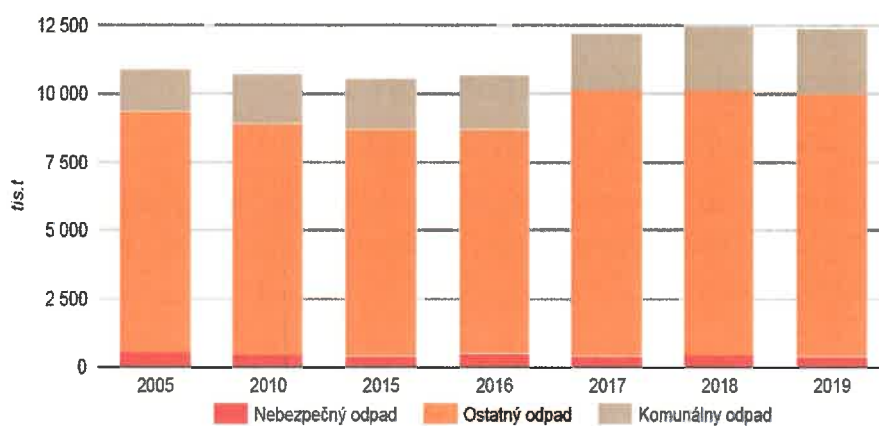
Úvod

Hlavným cieľom odpadového hospodárstva SR do roku 2020 bola, (a naďalej je) minimalizácia negatívnych účinkov vzniku a nakladania s odpadmi na zdravie ľudí a životné prostredie¹. Pre dosiahnutie stanovených cieľov bude nevyhnuté zásadnejšie presadzovanie a dodržiavanie záväznej hierarchie odpadového hospodárstva za účelom zvýšenia recyklácie odpadov predovšetkým pre oblasť komunálnych odpadov a stavebných odpadov a odpadov z demolácií v súlade s požiadavkami rámcovej smernice 2008/98/ES o odpade². Veľkou výzvou odpadového hospodárstva v SR je zastaviť nárast vzniku odpadov a hlavne znížiť vysoký podiel skládkovania odpadov.

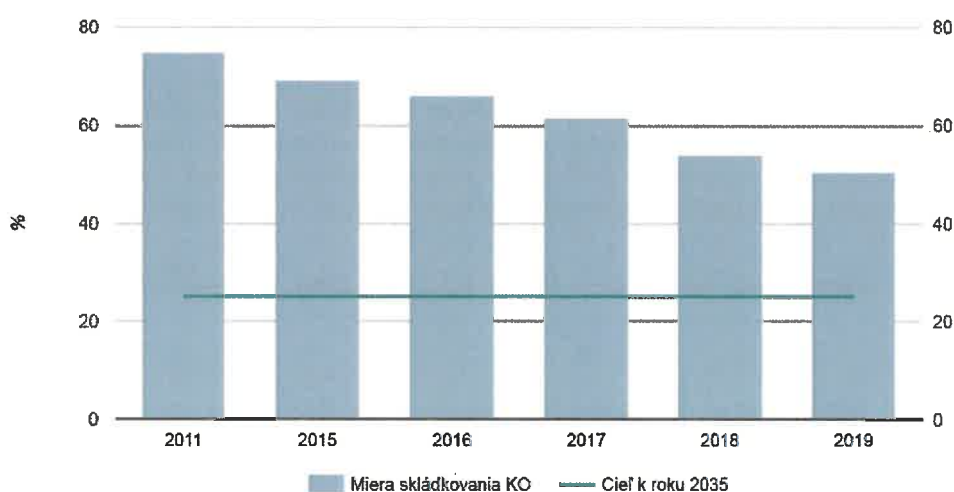
V SR vzniklo v roku 2019 spolu 12 407 669 ton odpadov¹. V porovnaní s rokom 2018 predstavuje medziročný pokles celkového vzniku odpadov v roku 2018 o 0,5 %. K poklesu došlo v kategóriách ostatný a nebezpečný odpad. V roku 2019 vzniklo v SR 2 369 725 ton komunálnych odpadov, čo predstavuje 434 kg komunálneho odpadu na obyvateľa. V porovnaní s rokom 2018 to predstavuje nárast o 7 kg komunálneho odpadu na obyvateľa. V porovnaní s krajinami EÚ patrí SR medzi krajinami s nižšou produkciou komunálneho odpadu na obyvateľa a je pod priemernou úrovňou EÚ-27, ktorého hodnota je 486 kg¹.

Produkcia komunálneho odpadu (KO) od roku 2005 vzrástla o 52,1 %, vid' obrázok 1. Hlavné ciele v komunálnej sfére sa zatiaľ nedarí plniť. Na nízkej úrovni je recyklácia komunálnych odpadov a cieľ zvýšiť recykláciu komunálnych odpadov na 50 % do roku 2020 sa žiaľ nepodarilo naplniť. Ako neuspokojivú možno hodnotiť aj oblasť triedeného zberu a zhodnocovania biologicky rozložiteľných komunálnych odpadov.

Dominantnou činnosťou nakladania s KO bolo skládkovanie odpadov. Podiel skládkovaných komunálnych odpadov na celkovom nakladaní bol 50,6 %, čo predstavuje medziročný pokles o 3,2 %, vid' obrázok 2. Recyklácia komunálnych odpadov dosiahla v roku 2019 úroveň 40,3 %. Cieľom **Envirostratégie 2030** je do roku 2030 zvýšiť mieru recyklácie komunálneho odpadu, vrátane jeho prípravy na opätovné použitie, na 60 % a do roku 2035 znížiť mieru jeho skládkovania na menej ako 25 %³, vid' obrázok 2 a 3. Na obrázku 4 je možné vidieť vývoj množstva komunálneho odpadu podľa spôsobu nakladania. Vidíme, že SR má stále potenciál zhodnocovať a nakladať s komunálnym odpadom žiadanými spôsobmi, ktoré by boli v súlade s požiadavkami rámcovej smernice 2008/98/ES o odpade a cieľom Envirostratégie 2030^{2,3}.



Obrázok 1: Vývoj vzniku odpadov v SR ¹



Obrázok 2: Vývoj miery skládkovania komunálneho odpadu v SR ¹

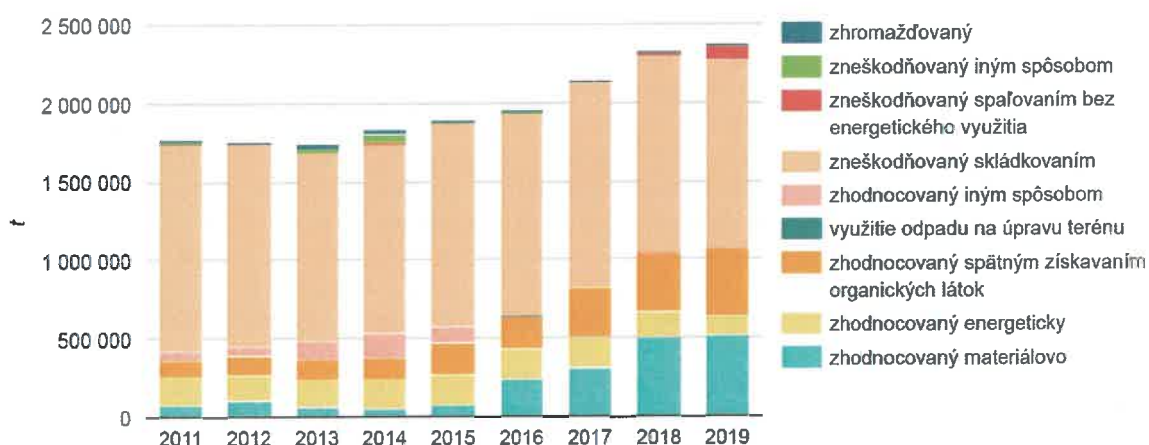
Nárast materiálového zhodnocovania komunálneho odpadu je badať, avšak stále nedosahujeme žiadané objemy zhodnocovania. Súvisí to hlavne so zložením komunálneho odpadu a so stupňom a úrovňou triedenia jednotlivých zložiek komunálneho odpadu.

V súčasnosti platí v SR povinnosť pre obec zaviesť a zabezpečiť vykonávanie triedeného zberu pre **triedený zber „klasických zložiek“** KO, t. j. papier a lepenka, sklo, plasty a kovy a biologicky rozložiteľné komunálne odpady (BRKO) okrem tých, ktorých pôvodcom je prevádzkovateľ kuchyne. Triedený zber KO je hodnotený **ako nedostatočný** a v zmysle požiadaviek rámcovej smernice o odpade v súvislosti s cieľom dosiahnuť **úroveň recyklácie KO 50 %** je potrebné účinnosť zberu zvýšiť, pričom je potrebné zabezpečiť aj zber biologicky rozložiteľného kuchynského odpadu, jedlého oleja a tukov, dreva, elektroodpadu použitých batérií a akumulátorov, textilu a šatstva.

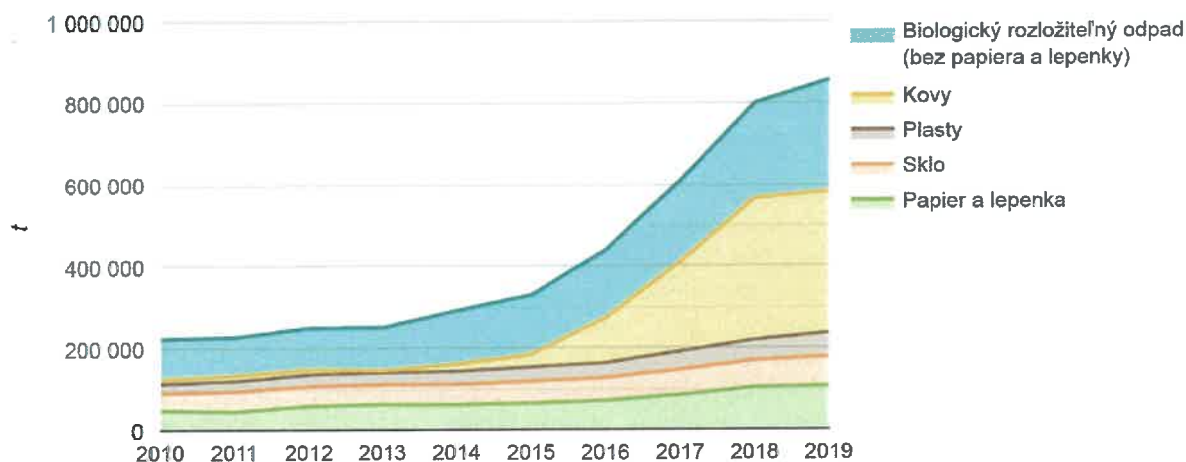
Z dlhodobého sledovania triedeného zberu KO možno pozorovať **mierne stúpajúci trend množstva vytriedených zložiek KO (obrázok 5)**, z hľadiska záväzkov SR v oblasti prípravy na opätovné použitie a recykláciu odpadu však bude potrebné triedený zber výraznejšie zintenzívniť. Podobne ako pri ostatných triedených zložkách KO, bude potrebné efektívnosť triedeného zberu komunálnych bioodpadov výrazne intenzifikovať za účelom dosiahnutia cieľov v oblasti znižovania množstva bioodpadov (BRKO) zneškodňovaných skládkovaním. Celkové množstvo odpadov z obalov má samozrejme tiež narastajúci charakter. Množstvo materiálového zhodnoteného odpadu z obalov narástlo zo 45,21 % v roku 2005 na 66,60 % v roku 2018, čím sa plní cieľ recyklovať aspoň 65% hmotnosti všetkých odpadov z obalov do roku 2025. V prípade konkrétnych materiálov sú minimálne stanovené ciele recyklácie do roku 2025 u väčšiny z nich plnené už v súčasnosti.



Obrázok 3: Vývoj miery recyklácie komunálneho odpadu v SR ¹



Obrázok 4: Vývoj množstva komunálneho odpadu podľa spôsobu nakladania v SR ¹



Obrázok 5: Vývoj triedeného zberu zložiek komunálnych odpadov v SR ¹

Jedným z možných riešení pre zvýšenie nakladania s komunálnym odpadom, zároveň zníženie miery skládkovania komunálnych odpadov a zároveň zvýšenie recyklácie niektorých zložiek odpadov z obalov je úprava komunálneho odpadu s jeho následným energetickým zhodnocovaním. Štatistické informácie uvedené vyššie poukazujú na potenciál a možnosti v oblasti zhodnocovania komunálnych odpadov. Aj keď postupne narastá miera materiálového zhodnocovania komunálnych odpadov (obrázok 4) stále sú tieto

hodnoty nedostatočné v porovnaní s mierou skládkovaním odpadov. Faktom je, že Zákon o odpadoch preferuje materiálové zhodnotenie odpadov, ktoré si vyžaduje dôkladný separovaný zber a ďalšie triedenie odpadov. Množstvá triedených zložiek komunálnych odpadov sú však podľa ¹ (obrázok 5) tiež naklonené pre zvýšenie miery materiálového zhodnocovania komunálnych odpadov. Ľahšie separovateľnejšie zložky KO (kovy, plasty, sklo) sú samostatné využiteľné. Zvyšné zložky triedených komunálnych odpadov sú vhodné pre materiálu úpravu s následným energetickým zhodnocovaním. Na základe vyššie uvedeného máme za to, že materiálové zhodnocovanie komunálnych odpadov má vysoký potenciál a možnosti. Je možné konštatovať, že v rámci komunálnych odpadov je možné využiť dostatočné objemy použiteľných zložiek pre tieto účely. Jedná sa hlavne o papier, lepenku, BRKO, drevo, kartónový papier, plasty (v určitej miere), textil, v rôznych kombináciách a percentuálnych objemoch jednotlivých zložiek.

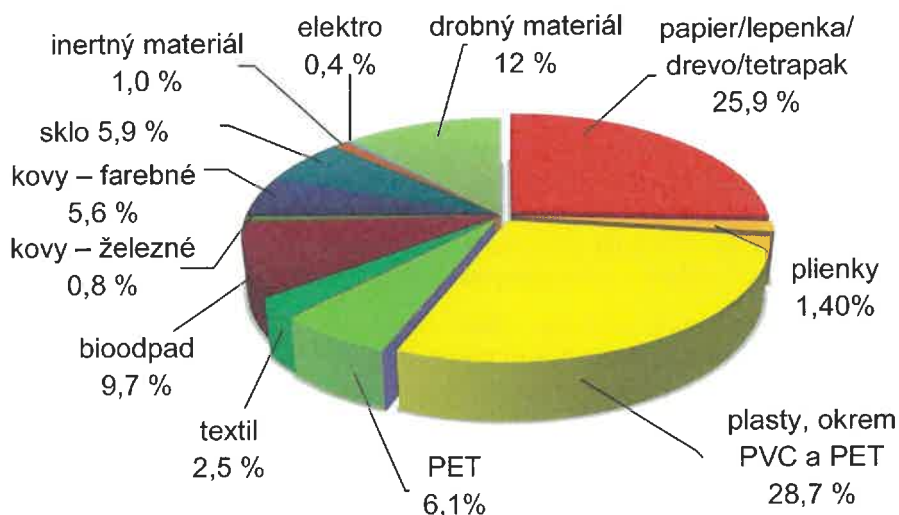
Stratégie odpadového hospodárstva v Európskej únii uvažujú s vyššou mierou mechanicko-biologickej úpravy KO do formy tuhého zhodnoteného paliva ⁴. V oblasti zhodnocovania tuhých komunálnych odpadov sa zaviedlo vo vedecko-výskumných prácach používanie viacerých pojmov. RDF (Refuse Derived Fuel), SRF (Solid Recovered Fuel) ^{4,5}, REF (Recovered Energy Fuel), PDF (Packaging Derived Fuel), PPF (Paper and Plastic Fraction) alebo PEF (Processed Engineered Fuel) ^{6,7}. Tieto termíny vyjadrujú rôzne typy alternatívnych palív, ktoré je možné získať spracovaním tuhých komunálnych odpadov. Najčastejšie používanými pojmami sú RDF a SRF. V prípade RDF sa jedná o bližšie nešpecifikovaný odpad po základnej úprave pre zvýšenie výhrevnosti, a preto sa v podstate jedná o vytriedené spáliteľné zložky KO ⁶. Pojem SRF definuje palivo z odpadu s definovanými kvalitatívnymi vlastnosťami a s určitým stupňom energetických vlastností ⁷. Existuje viacero dostupných a využiteľných technológií WTE (waste-to-energy) pre premenu spáliteľných zložiek komunálnych odpadov na užitočné teplo alebo elektrickú energiu – spaľovanie, splyňovanie a pyrolýza ⁸. Elektrárne pre spaľovanie TKO možno z pohľadu modulárnosti a mobilnosti klasifikovať do troch kategórií: systémy hromadného spaľovania, modulárne systémy a palivové systémy odpadu RDF (refuse derived fuel) ⁴. V zariadeniach na hromadné spaľovanie sa TKO netriedi pred tým, ako sa privedie do spaľovacej pece. V modulárnom systéme sa používa aj nespracovaný TKO a zariadenie je možné ľahko premiestniť z jedného miesta na druhé, pretože je malé a prenosné. V palivovom systéme RDF je spaľovaný TKO, ktorý je zložený z triedených a drvených zložiek KO s prímiesou malého objemu niektorých nehorľavých materiálov. Energetické zhodnocovanie upravených KO (triedených a drevených) má viacero výhod. Spálenie 1 tony KO v moderných systémoch WTE dokážu vyprodukovať v čistom 650 kWh elektrickej energie ⁴. Palivo pre takéto zariadenia je dostupné, keďže sú tieto zariadenia koncentrované na územiach s vyššou populáciou. Náklady pre dopravu paliva sú nižšie v porovnaní so systémami na fosílnu palivá. Pre energetické zhodnocovanie sa však využívajú aj technológie splyňovania a pyrolýzy ^{9,10}. Všetky technológie však majú spoločné, že množstvo získanej energie zo zhodnocovania KO je závislé od kvality tuhého paliva ^{11,12}. Z uvedeného dôvodu je nutnou súčasťou mechanická úprava komunálnych odpadov pred ich energetickým zhodnocovaním. Ako vhodným riešením sa javí použitie technológií triedenia, drvenia a briketovania. Mechanická úprava komunálnych odpadov a recyklovaných plastových odpadov bola použitá vo vedeckej štúdii ^{4,8} pre potreby experimentálneho stanovenia energetických a mechanických vlastností palív z materiálových zmesí. Pri výskume vlastností palív z materiálových zmesí na báze komunálnych a poľnohospodárskych odpadov ^{5,12} tiež využili technológiu drvenia pre zmenšenie frakcie a briketovania pre zhutnenie zmesí do kompaktných celkov. Na základe poznatkov sa pri dezintegrácii komunálneho odpadu osvedčilo použitie nožového mlynu alebo valcového drviča ^{5,11}. Technológia briketovania bola autormi ⁶ uvedená ako základná a nutná podmienka pre výrobu RDF paliva z komunálnych odpadov, čím významne prispieva k zníženiu miery skládkovania komunálnych odpadov. Ako vhodná technológia sa osvedčilo briketovanie s využitím mechanického briketovacieho lisu. Výskum možností energetického zhodnocovania zmesí na báze biomasy a plastových zložiek komunálneho odpadu predpokladá a uvažuje s mechanickou úpravou materiálových zmesí (triedenie, drvenie, miešanie) a výrobou tuhých kompaktných celkov vhodných pre efektívne spaľovanie ^{7,13}.

Cieľom tohto príspevku je experimentálne overiť použitie technológie briketovania pre zhutňovanie komunálneho odpadu definovaného zloženia, výskum vplyvu biologických prímies na mechanické vlastnosti a tvar vyrobených brikiet. Zadanie vzniklo v praxi od prevádzkovateľa technológie plazmového splyňovania komunálnych odpadov, so zámerom zlepšiť vlastnosti vstupného paliva. Najväčším problémom sa javila nekompaktnosť a nesúdržnosť komunálneho odpadu, čo spôsobuje zákazníkovi

problémy v dopravných systémoch technológie. Zámerom riešiteľského kolektívu bolo realizovať experimentálne overenie a zaoberať sa efektívnou mechanickou úpravou komunálnych odpadov prostredníctvom technológií dezintegrácie a zhutňovania. Očakávaným výstupom pre zákazníka je tiež návrh koncepcie mechanickej úpravy komunálneho odpadu do formy tuhých kompaktných celkov – brikiet. Cieľom tohto príspevku je teda prezentovať postup mechanickej úpravy komunálneho odpadu a výsledky výskumu mechanických vlastností vyrobených brikiet z KO v závislosti od použitej technológie briketovania a materiálového zloženia KO.

Použitý materiál a technológie

Experimentálny rozbor komunálneho odpadu sme realizovali v spolupráci so zadávateľom úlohy, v priestoroch spracovateľskej spoločnosti. Počas experimentu bola separácia jednotlivých zložiek komunálneho odpadu uskutočňovaná ručne, a teda bolo možné zodpovedne vyseparovať nasledovné zložky: papier (do tejto skupiny sa započítala aj lepenka, drevo a tetrapack), plienky, plasty okrem PVC, PET, guma a pryže, textil, bioodpad, kovy (železné), kovy (farebné), sklo, inertný odpad, elektro odpad, nebezpečný odpad, drobný materiál. Spolu bolo v priebehu roka vyseparovaných 638,24 kg komunálneho odpadu. Zloženie komunálneho odpadu je z veľkej časti závislé od faktoru ročného obdobia a tiež od lokality jeho vzniku. Skladba komunálneho odpadu môže byť diametrálne rozdielna v letnom období, kedy je viac biologického odpadu zo záhrad, parkov, ulíc ako v zimnom období. Práve z tohto dôvodu bolo potrebné urobiť podrobnú analýzu skladby, t.j. rozbor komunálneho odpadu. Experiment bol uskutočnený opakovane v priebehu celého roka a priemerné hodnoty jednotlivých zložiek komunálneho odpadu sú uvedené na obrázku 6.



Obrázok 6: Objemový pomer zložiek komunálneho odpadu

Na základe vykonanej analýzy zložiek komunálneho odpadu je možné konštatovať, že tuhý komunálny odpad má široké spektrum zloženia a to aj z pohľadu druhov, ale tiež z pohľadu veľkosti frakcie. Skladá sa z dvoch základných skupín: organických látok (horľavých materiálov) a anorganických látok (nehorľavých materiálov). Veľkosť častíc sa pohybuje od prachu až po vyššie objemy (vyradený nábytok alebo spotrebiče). Nasledovala nutná mechanická úprava.

Z dôvodu zabezpečenia realizácie experimentálneho výskumu bola ďalšia etapa (výskum zhutňovania komunálneho odpadu briketovaním) realizovaná v laboratórnych priestoroch našej fakulty. Keďže požiadavka mechanickej úpravy vznikla z dôvodu efektívnejšej manipulácie s KO (vo forme zhutnených brikiet), zabezpečenia zakonzervovania a zastavenia degradačných (hnilobných) procesov materiálu, výhľadovo efektívnejšieho spôsobu prípadného plazmového splyňovania^{8,12}, bolo nutné experimentálne overenie dôkladne naplánovať a vypracovať metodiku realizácie meraní. Ako bolo vyššie uvedené, pred samotným briketovaním boli odseparované nespáliteľné zložky KO ručne. Taktiež aj

zložky KO, ktoré by počas lisovania mohli spôsobiť rýchle opotrebovanie alebo dokonca deštrukciu lisovacej komory (kovy a sklo). Na nasledujúcom obrázku 7 je možné vidieť schematicky proces spracovania komunálneho odpadu. Komunálny odpad je nutné podvŕiť na menšie frakcie vhodné pre briketovanie. Po mechanickej úprave je možné komunálny odpad podrobiť skúške briketovania, jednak ako samostatnú materiálovú frakciu, ale aj s pridaním vybraných druhov biologických odpadov.



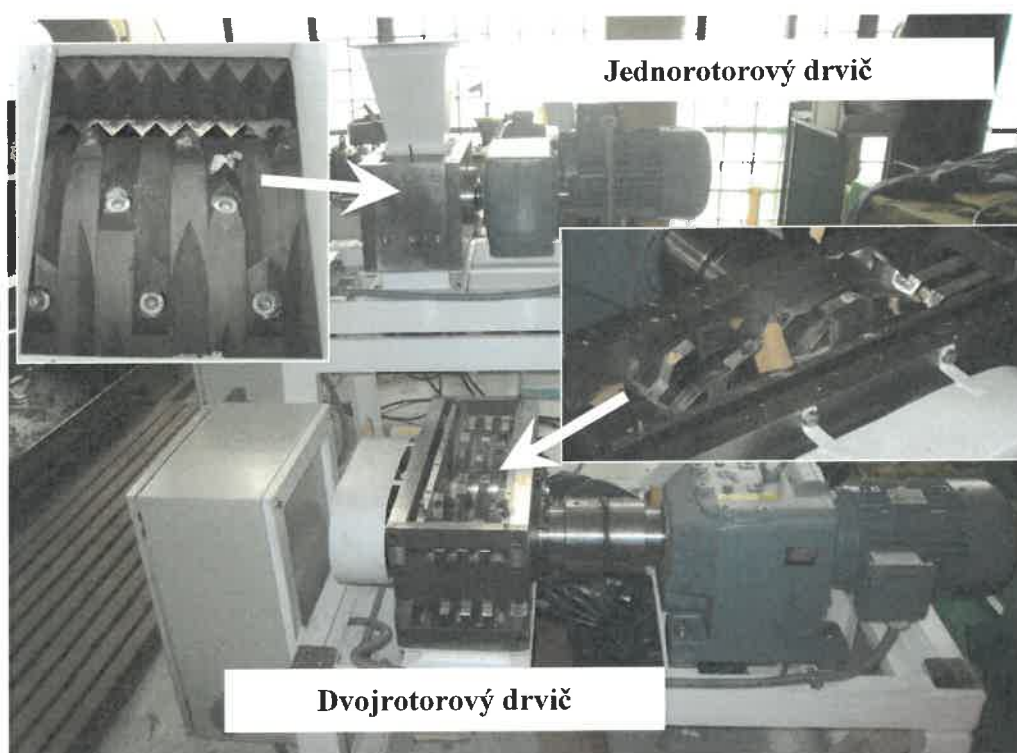
Obrázok 7: Schematická ilustrácia spracovania komunálneho odpadu

Pred briketovaním bol komunálny odpad mechanicke upravovaný (obrázok 7), pretože jeho rozmery a vlhkosť sa javili ako nevhodné pre briketovanie. Spracovateľská spoločnosť dodala komunálny odpad priamo zo skládky - to znamená mokrý, špinavý a heterogénny odpad. Vlhkosť vzoriek komunálneho odpadu bola zmeraná digitálnym odporovým vlhkomerom GMH 3830 s meracou sondou. Počiatočná (priemerná) hodnota vlhkosti dodaného komunálneho odpadu bola 65,3 %. Základnou požiadavkou bolo KO upraviť, t.z. upraviť vlhkosť (napr. sušením) a upraviť veľkosť frakcie pomocou dezintegrácie. Oba tieto parametre patria do skupiny parametrov, ktoré majú veľký vplyv na proces briketovania^{4,5}. Nezáleží na tom, aký typ materiálu chceme zhutniť, musíme monitorovať obsah vlhkosti, veľkosť frakcií, teplotu lisovania a lisovací tlak. Ale teplota lisovania a lisovací tlak súvisia s typom briketovacieho stroja. Čím rôznorodejší materiál, tým sa kladú vyššie požiadavky na mechanicke úpravu materiálu pre zhutnením.

Veľkosť frakcie má pri briketovacom procese veľmi veľký vplyv. Čím hrubšia frakcia, tým väčšia lisovacia sila je potrebná na briketovanie. Briketa má nižšiu homogenitu a stabilitu. S rastúcou veľkosťou frakcií sa väzobné sily vo vnútri materiálu znižujú, čo ovplyvňuje rýchlejší rozpad brikety. Zväčšenie veľkosti frakcie zvyšuje lisovací tlak a znižuje kvalitu brikiet. Zvyčajne sa na zmenšovanie rozmerov používa kombinácia jednorotorového valcového drviča s dvojrotorovým valcovým drvičom^{4,11}. Princíp procesu mechanickeho zmenšovania veľkosti je veľmi jednoduchý. Rezné klíny nástrojov uložené na jednom rotore sa otáčajú proti rezným klinom nástrojov druhého rotora. Nástroje prostredníctvom rezných klinov zachytávajú materiál. Produktivita dezintegračných strojov závisí od rozmerov stroja, rýchlosti otáčania, veľkosti a tvaru vstupnej frakcie.

V prípade materiálu homogénneho biologického zloženia (biomasa), je menšia veľkosť frakcie tiež výhodná pre proces sušenia. Proces sušenia končí rýchlejšie a dosahuje sa lepšia kvalita sušenia, pretože menšia frakcia materiálu sa rýchlejšie zbaví vody. Keď je obsah vlhkosti materiálu veľmi vysoký, odparenie prebytočnej vody roztrhne briketu na kúsky. Ak je obsah vlhkosti materiálu veľmi nízky, mali by sa použiť na zvýšenie kvality brikiet vyššie tlaky a to je veľmi drahé a nevhodné. V prípade zhutňovania komunálneho odpadu je lisovanie materiálu s vyššou vlhkosťou dokonca nerealizovateľné. V rámci nášho experimentálneho výskumu sme nepoužili pre sušenie žiadnu konkrétnu technológiu na to určenú, pretože ňou nedisponujeme. Realizovali sme teda kontinuálne sušenie voľne uloženého KO, vo vykurovanej budove pod strechou a bez prístupu zvýšenej atmosférickej vlhkosti. Po 20-tich dňoch sušenia a každodenného prevzdušňovania, sme dosiahli 40 %-ný pokles obsahu vlhkosti komunálneho odpadu v porovnaní s počiatočným stavom. Takto pripravený komunálny odpad sme podrobili dezintegrácii.

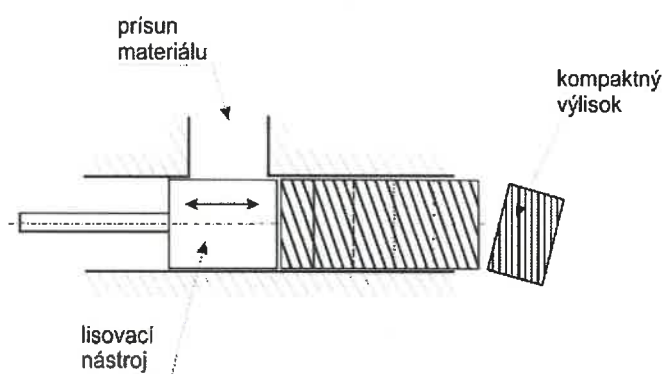
Proces dezintegrácie pozostával z viacerých etáp. V prvej etape, sme na drvenie dodaného komunálneho odpadu použili rýchlobežný nožový drvič DP 18,5-350/430 spoločnosti Profing, a.s. Tento nožový drvič je určený na objemové drvenie rozmernejších kusov z plastu, gumy a iných materiálov ako napríklad odrezky z dreva, textil, papier, elektro šrot, elektro káble, polystyrén, EPS, PET fľaše, PE- fólie, mikroténové fólie a pod. Parametre nožového drviča sú: príkon motora 18,5 kW, priemer rotora 350 mm, dĺžka rotora (nožov) 430 mm, počet nožov – rotačné 3/pevné 2. Sito použité pre drvenie malo štvorcové otvory rozmeru 20x20 mm. Z dôvodu potreby zmenšenia frakcie, keďže požiadavka na briketovanie bola frakcie s najväčším rozmerom 10 mm, sme realizovali jemnú dezintegráciu v dvoj-rotorovom valcovom drviči. Pre zmenšenie frakcie komunálneho odpadu sme použili laboratórny rotorový drvič vyvinutého na našom pracovisku (obrázok 8). Tu je vidieť 2-stupňová modifikácia používaná pre zjemnenie frakcie rôznych druhov biomasy. Pre potreby drvenia komunálneho odpadu sme použili iba dvojrotorový valcový drvič, ktorého príkon je 4,3 kW a bol osadený sitom s kruhovými otvormi \varnothing 10 mm. Podrvená vzorka komunálneho odpadu bola opätovne podrobená stanoveniu vlhkosti, keďže aj drvením sa každej vzorke znižuje obsah vlhkosti. Hodnota vlhkosti dezintegrovanej vzorky komunálneho odpadu klesla na hodnotu 13,4 %.



Obrázok 8: Zmenšenie frakcie komunálneho odpadu pomocou drvičov ¹⁴

Keďže komunálny odpad je zmesou rôznych druhov odpadov, hlavne nebiologických, pre úspešné zabezpečenie briketovania je vhodné pridať do vzorky percento materiálov s určitým obsahom lignínu (prírodného lepidla). Na základe našich poznatkov a skúseností z praxe, lepšie zhutnenie materiálov briketovaním je možné dosiahnuť zvýšením lisovacej teploty (ak má vplyv na materiálové zložky), zvýšením lisovacieho tlaku (zväčšujeme pôsobiacu silu a tým vzniknú pevnejšie väzby medzi materiálovými časticami) a úpravou silových pomerov v lisovacej komore. Toto je možné realizovať primiešaním iných druhov materiálov, ktoré napomáhajú k tvorbe väzieb, alebo zmenou geometrie lisovacej komory. Pre potreby briketovania máme v našich laboratórnych priestoroch k dispozícii mechanický briketovací lis BL 50-250 s príkonom 17,5 kW (obrázok 9), ktorý umožňuje vyrábať brikety s priemerom \varnothing 50 mm. Súčasťou stroja je kalibračný chladiaci kanál, na ktorého konci je osadený deliaci stôl. Jeho úlohou je deliť brikety na rovnaké dĺžky pomocou lámania. Základom tohto lisu je kľukový mechanizmus, ktorý vyvodzuje lisovaciu silu prostredníctvom lisovacieho piestu na materiál v otvorenej lisovacej komore. Keďže je to definovaná kinematická konštrukcia, zmena (napr. zvýšenie) lisovacej sily

nie je možná. V takýchto prípadoch prichádza do úvahy jedine úprava geometrie lisovacej komory alebo lisovanie rôznych materiálových zmesí podporujúcich tvorbu väzieb medzi materiálovými časticami. Briketovací lis tejto konfigurácie je priamo určený pre zhutňovanie biologických materiálov do brikiet. Pre overenie použiteľnosti daného briketovacieho lisu sme realizovali skúšky lisovateľnosti komunálneho odpadu pri dostupnej konfigurácii mechanického briketovacieho lisu. Skúšky briketovania čistého (bez prímiesí) podrveného komunálneho odpadu boli najprv realizované na troch rôznych lisovacích hubiciach vyvinutých na briketovanie dreveného odpadu. Brikety neboli kompaktné a rozpadávali sa, nebolo možné stanoviť ich mechanické parametre. Na hubiciach s danými konštrukčnými rozmermi nebolo možné dosiahnuť potrebný lisovací tlak pre tvorbu väzieb medzi materiálovými časticami komunálneho odpadu. Aby sme predišli negatívnemu výsledku aj pri lisovaní miešaných materiálov, navrhli a zhotovili sme novú lisovaciu hubicu (obrázok 10). V podstate sa jednalo o predĺženie lisovacej komory o 700 mm, čím sme docielili zvýšenie trecích síl. Efektom je zväčšenie protitlaku na lisovaný materiál. Výstupný priemer komory zostal nezmenený. Briketovanie s použitím upravenej hubice bolo úspešné a vyrobené brikety z komunálneho odpadu boli kompaktné (obrázok 10).



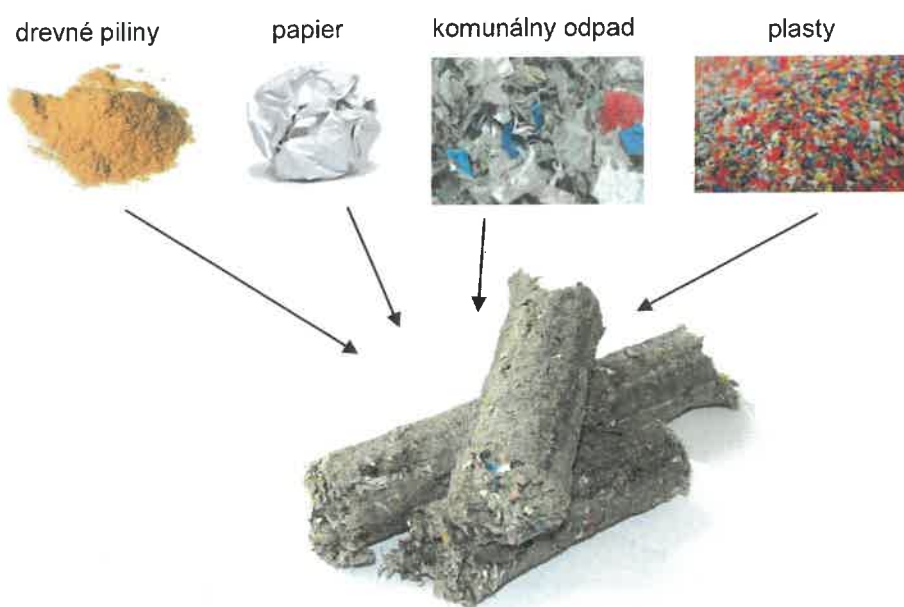
Obrázok 9: Princíp otvorenej lisovacej komory a mechanický klukový BL ⁸



Obrázok 10: Nová briketovacia hubica (vpravo) a vyrobená briketa (vpravo)

Z dôvodu overenia použitia rôznych typov prímiesí a ich vplyvu na mechanické vlastnosti brikiet sme sa rozhodli pripraviť rôzne materiálové zmesi. Rozhodli sme sa použiť odpad z dreva a kartónový papier, a teda pridávať ho do plastového a komunálneho odpadu. Tieto materiály obsahujú lignín a pomáhajú k lepšiemu previazaniu častíc materiálu v brikete. Lignín tiež pôsobí ako stabilizačný faktor. Vyššia koncentrácia lignínu zaručuje lepšiu pevnosť brikiet. Vysoká lisovacia teplota je potrebná aj na plastifikáciu plastov a komunálnych odpadov. Zvýšenú teplotu v procese lisovania je možné dosiahnuť použitím dodatočného vyhrevného zariadenia alebo zvýšeným trením. V každom prípade je to element, ktorý môže zvýšiť kvalitatívne parametre finálnych brikiet. Na základe požiadaviek zákazníka sme tiež realizovali pokus aj s prídavkom cementu. Aj na základe tohto faktu, aj na základe požiadaviek plynúcich zo zadania, sme namiešali 7 rôznych materiálových zmesí (obrázok 11), ktoré sme podrobili briketovaniu. Pri dvoch materiálových zmesiach sme použili pre briketovanie aj hydraulický lis (obrázok 12). Počas spolupráce zo zadávateľom vznikla požiadavka porovnania rôznych spôsobov

briketovania. Preto sme zvolili mechanický briketovací lis a hydraulický briketovací lis BrikStar 200 s príkonom 16 kW. Napriek rôznorodosti konštrukcií zhutňovacích strojov, v zásade existujú iba 2 základné spôsoby zhutňovania resp. lisovania. Rozoznávame zhutňovanie v tzv. uzatvorenej (obrázok 12) a v otvorenej lisovacej komore (obrázok 9). Preto sme zvolili mechanický kľukový lis, ako typický predstaviteľ lisovania v otvorenej lisovacej komore a hydraulický lis, ako typický predstaviteľ lisovania v uzatvorenej lisovacej komore. Princíp zhutňovania v uzatvorenej lisovacej komore je založený na lisovaní materiálu z viacerých strán. Podávacia závitovka plní lisovaciu komoru, ktorá sa po naplnení hydraulicky uzatvorí. Taktiež je hydraulicky uzatvorený otvor, cez ktorý je po zlisovaní vytlačený výlisok. Hlavné zlisovanie uskutočňuje lisovací nástroj. Zhutňovanie v otvorenej lisovacej komore je spôsob lisovania, kde počas kontinuálneho prísunu lisovaného materiálu do lisovacej komory, dochádza k lisovaniu materiálu do formy tuhého výlisok, postupnému posuvu zlisovaných výlisokov cez lisovaciu komoru a k vytlačeniu výlisokov von z komory. Prísun materiálu môže byť realizovaný rôznymi mechanickými spôsobmi, od dopravnej závitovky až po dopravu samospádom. Hlavné zlisovanie uskutočňuje lisovací nástroj.

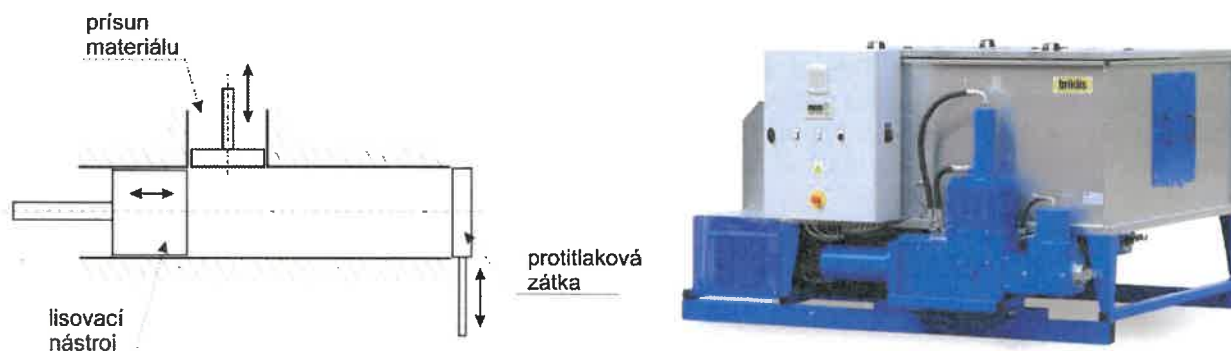


Obrázok 11: Vytvorenie zmesi pre experimentálny výskum ¹⁵

Materiálové zmesi vytvorené pre experimentálne overenie:

- vzorka 1 – materiál zložený z 38 % drevnej štiepky z mäkkého dreva, 45 % podrveného kartónového papiera, 11 % podrvených PET fliaš, 6% textilného odpadu (ZKO),
- vzorka 2 - komunálny odpad s prídavkom 20 % podrveného kartónového papiera (80/20 - MP) – lisované iba s mechanickým briketovacím lisom,
- vzorka 3 - komunálny odpad s prídavkom 4 % cementu (4C),
- vzorka 4 - komunálny odpad s prídavkom 20 % drevných pilín (20 WS),
- vzorka 5 - čistý komunálny odpad, bez prídavku (KO - MP) – lisované iba s mechanickým briketovacím lisom,
- vzorka 6 - komunálny odpad s prídavkom 50 % podrveného kartónového papiera (50/50 - HP) – lisované iba s hydraulickým briketovacím lisom,
- vzorka 7 - čistý komunálny odpad, bez prídavku (KO - HP) – lisované iba s hydraulickým lisovacím lisom.

Pre briketovanie každej z vyššie uvedených materiálových zmesí bolo miešaním pripravených 30 kg, čo postačovalo na briketovanie v trvaní 2 hodín (pre každú zmes/vzorku) a postačovalo na výrobu dostatočného množstva brikiet pre štatistické spracovanie. Z každej briketovanej dávky bolo náhodne vybraných 10 kusov brikiet, ktoré boli podrobené meraniu a testovaniu.



Obrázok 12: Princíp uzatvorenej lisovacej komory a hydraulický briketovací lis¹⁵

Meranie a testovanie bolo realizované za účelom stanovenia mechanických ukazovateľov kvality brikiet, čo sú v danom prípade hustota brikety a pevnosť brikety v tlaku. Na vylisovaných briketách sme merali priemer a dĺžku brikety, a taktiež sme zisťovali hmotnosť brikety. Pre meranie priemeru a dĺžky brikiet bolo použité digitálne posuvné meradlo Mitutoyo, pre meranie hmotnosti brikiet boli použité digitálne váhy Kern. Z týchto parametrov sme vypočítali hustotu každej jednej brikety podľa nasledovného vzťahu (1). Hustota brikiet je dôležitý parameter pri briketovaní. Čím väčšia hustota, tým výhodnejší pomer energia/objem výlisku. Brikety s vyššou hustotou sú vhodnejšie z pohľadu horenia, dopravy, skladovania a narábania s briketami.

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \quad (\text{kg/dm}^3) \quad (1)$$

kde: V_N – objem brikety (dm^3);
 m_N – hmotnosť brikety (kg).

Pevnosť v tlaku je dôležitým ukazovateľom kvality výliskov z hľadiska ich odolnosti pri manipulácii, preprave a skladovaní. Pod pojmom pevnosť brikety sa rozumie maximálny tlak na raznicu, ktorý vznikne pri tlakovej skúške za stanovených podmienok

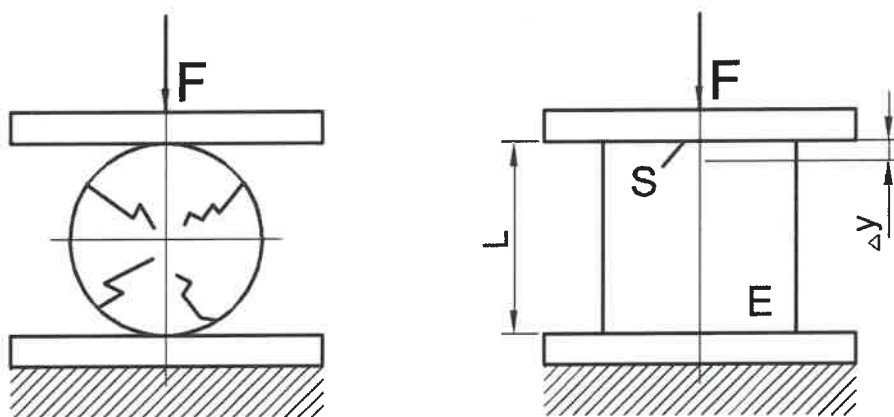
$$\sigma_{Bt} = \max p \quad (2)$$

kde: σ_{Bt} – pevnosť brikety v jednoduchom tlaku (kPa, MPa),
 p – maximálny tlak pôsobiaci na briketu (kPa, MPa).

Briketa sa vkladá medzi kruhové raznice lisu, kde je namáhaná rovnomerne so zvyšujúcim sa tlakom až do jej rozdrvenia. Pri skúške sa používajú celistvé a neporušené brikety. Briketa sa vkladá medzi dve kruhové raznice skúšobného lisu s priemerom 30 mm na stred raznicovej plochy. Prítláčné razidlo rovnomerne zvyšuje namáhanie brikiet v priebehu skúšky. Zistená maximálna hodnota udáva pevnosť brikiet v tlaku. Podľa¹⁷ sú možné dve základne skúšky pevnosti valcových brikiet v tlaku. Je to skúška pevnosti v jednoduchom tlaku (obrázok 13 vpravo) a skúška rozštepom (obrázok 13 vľavo). Pri oboch skúškach sa meria maximálna sila dosiahnutá pri porušení výliskov. Pri skúške rozštepom je ukazovateľom pevnosti podiel maximálnej sily a dĺžky brikety. Pri skúške pevnosti rozštepom sa pevnosť valcovej brikety sa vypočíta ako

$$\sigma_{Br} = \frac{F_{\max}}{L_N} \quad (3)$$

kde: σ_{Br} – pevnosť brikety v rozštepe (N/mm^1),
 F_{\max} – maximálna sila pôsobiaca na briketu (N),
 L_N – dĺžka brikety (mm).



Obrázok 13: Skúška pevnosti rozštepom (vľavo) a skúška pevnosti v jednoduchom tlaku (vpravo) ¹⁷

Výsledky a diskusia

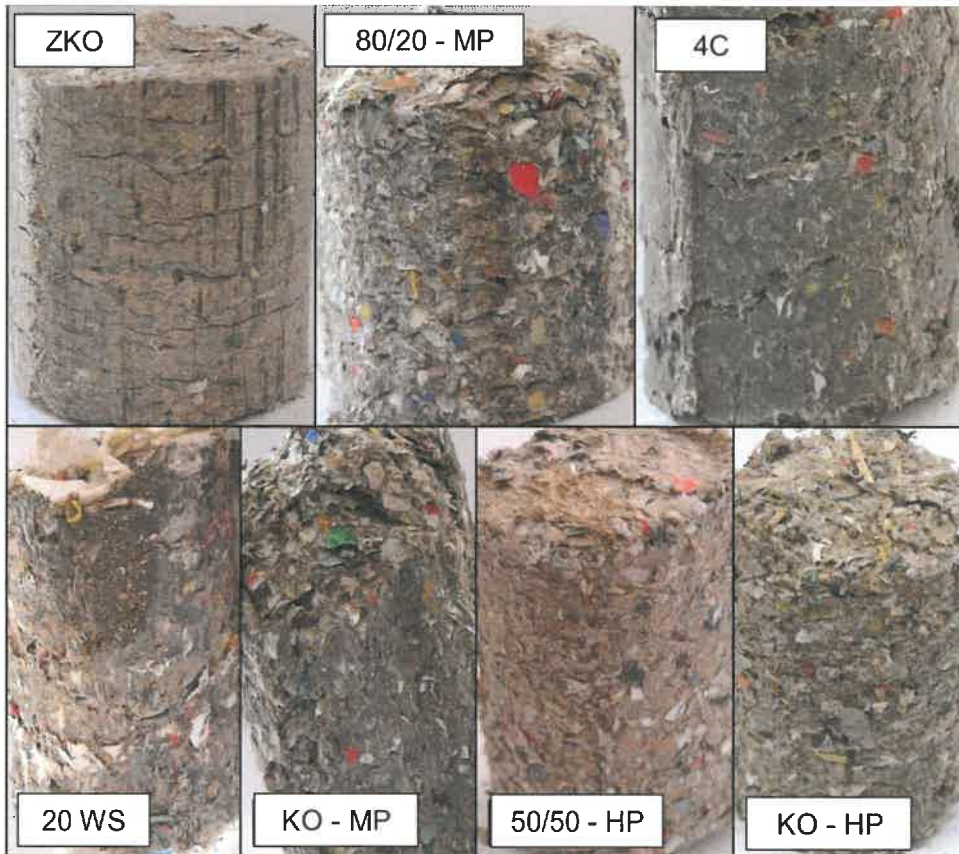
Každú z uvedených 7 skupín vzoriek sme podrobili briketovaniu na príslušajúcom type briketovacieho lisu. Obrázok 14 znázorňuje a porovnáva stav materiálu pred a po briketovaním. Z každej z uvedených skupín vzoriek sme testovali 10 vylišovaných brikiet (obrázok 15).



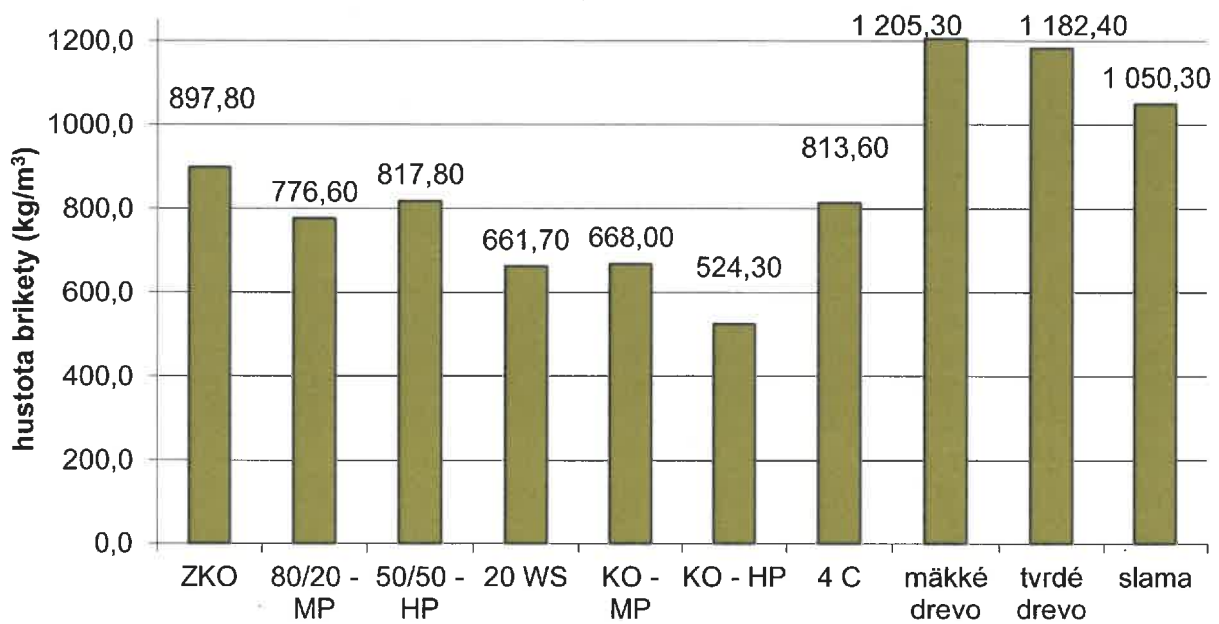
Obrázok 14: Dezinintegrováný komunálny odpad (vľavo) a žiadané produkty – brikety (vpravo) ^{14,15}

Na nasledujúcom obrázku 16 môžeme vidieť výsledky testovania hustoty brikiet, kde uvedené číselné hodnoty predstavujú priemerné hodnoty vždy z 10-tich hodnôt získaných meraním. Môžeme konštatovať, že materiálové zloženie vzoriek a taktiež použitý typ briketovacieho lisu výrazne ovplyvňuje hustotu brikiet. Brikety vyrobené na mechanickom lise majú vyššiu hustotu ako brikety vyrobené na hydraulickom lise. Pozitívom je aj použitie spojiva – papier, drevné piliny, cement. Čím viac spojiva, tým vyššia hustota brikiet.

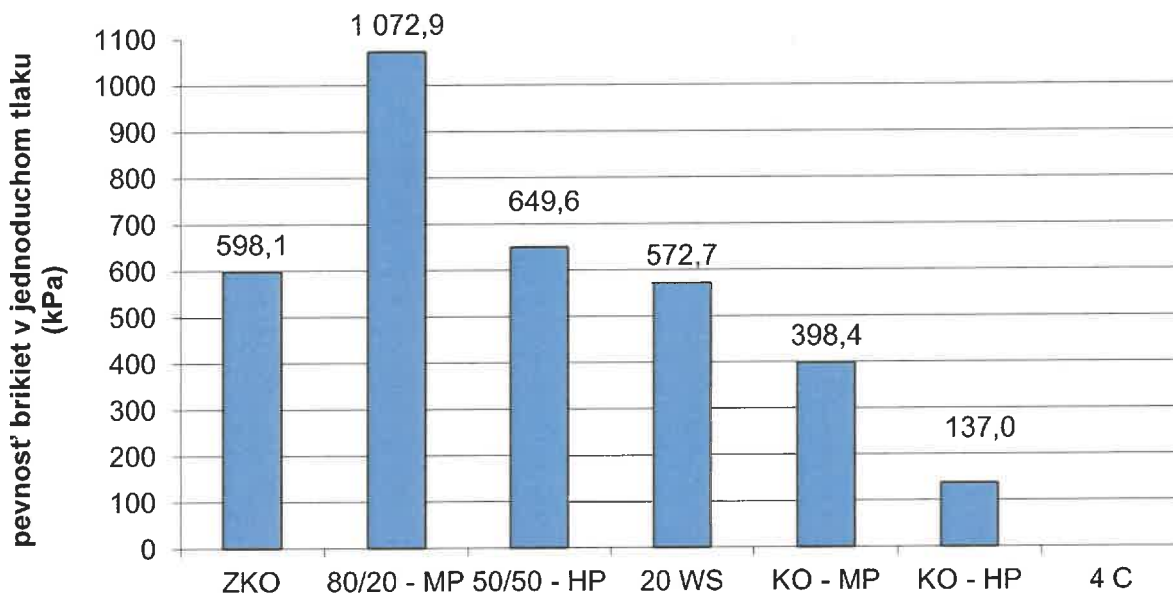
Na obrázku 16 môžeme tiež vidieť porovnanie vyrobených brikiet z komunálneho odpadu s briketami z čistého mäkkého dreva, z tvrdého dreva a zo slamy. Tieto vzorky sú tu znázornené pre názorné porovnanie, v akom pomere je kvalita vyrábaných brikiet z čistej biomasy a brikiet z komunálneho odpadu. Brikety z týchto druhov materiálov sú vyrábané ako tuhé ušľachtilé biopalivá. Platné normy pre stanovenie parametrov tuhých ušľachtilých biopalív udávajú, že hustota brikiet by mala byť minimálne $1,12 \text{ kg/dm}^3$ ¹⁶. V našom prípade sa nemusíme pridŕžať hodnôt daných v norme, t.z. nemusíme dosahovať danú hustotu. Okrem toho, že pracujeme s úplne odlišným materiálom, brikety z komunálneho odpadu budú použité na splyňovanie, preto sa nekladie veľký dôraz na hustotu brikiet.



Obrázok 15: Brikety z rôznych namiešaných vzoriek komunálneho odpadu ¹⁵

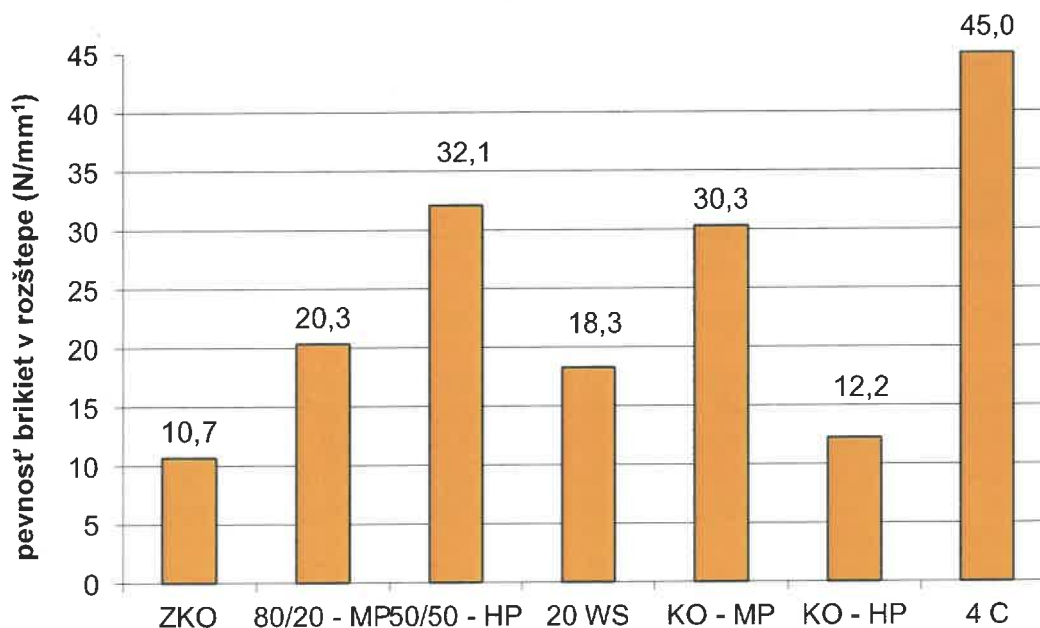


Obrázok 16: Porovnanie hustôt brikiet z komunálneho odpadu s briketami z biomasy ¹⁷



Obrázok 17: Pevnosť brikiet z namiešaných vzoriek z komunálneho odpadu v jednoduchom tlaku

Na obrázkoch 17 a 18 sú uvedené výsledky testovania pevnosti brikiet v tlaku. Obdobne ako pri hustote brikiet sa potvrdilo, že brikety vyrobené na mechanickom lise dosahujú vyššie hodnoty, v tomto prípade vyššie pevnosti v jednoduchom tlaku aj v rozštepe ako brikety vyrobené na hydraulickom lise. Pozitívom je aj použitie spojiva – papier a drevné piliny. Tieto spojivá dopomohli k vytvoreniu väzieb medzi neorganickými časticami vzoriek (PET fľaše, textil, fólie, plasty, atď...).



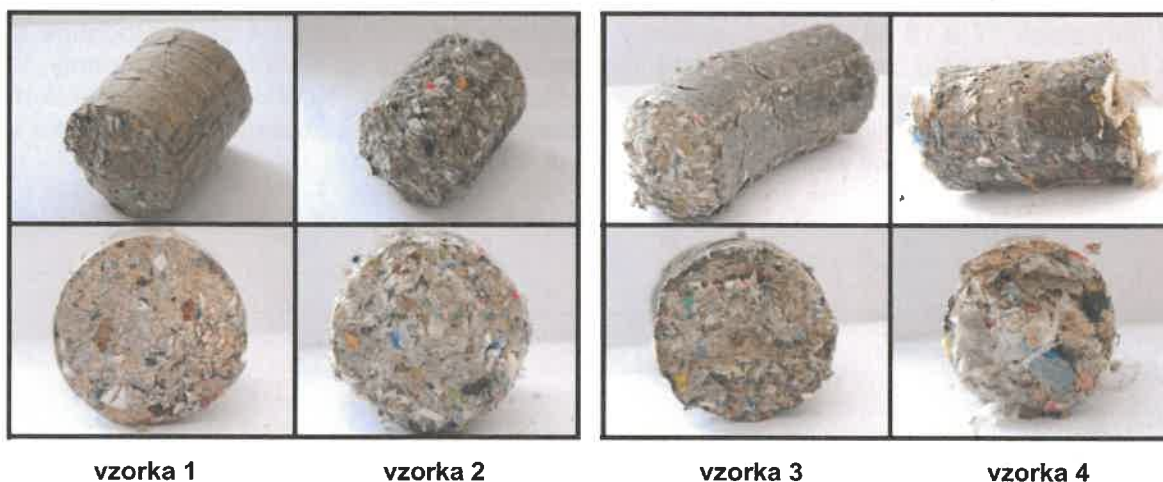
Obrázok 18: Pevnosť brikiet z namiešaných vzoriek z komunálneho odpadu v rozštepe

V tabuľke 1 sú uvedené výstupy matematicko-štatistického spracovania nameraných údajov. Ako štandard pre spracovanie nameraných údajov sa používa charakteristika polohy – aritmetický priemer a charakteristika variability nameraných údajov – výberový rozptyl. Ako je uvedené vyššie, z každej

briketovanej dávky bolo náhodne vybraných 10 kusov brikiet, ktoré boli podrobené meraniu a testovaniu. Následne boli vypočítané aritmetické priemery (použité v grafoch) a výberové odchýlky. Keďže hodnoty výberových odchýlok poukazujú na nevýznamné rozdiely, je možné konštatovať, že výsledky experimentálneho výskumu boli získané a spracované korektné.

Tabuľka 1: Výsledky matematicko-štatistického spracovania nameraných údajov

	Hustota brikiet (kg/dm ³)		Pevnosť v rozštepě (N/mm)		Pevnosť v jedn. tlaku (kPa)	
	ρ	$s^2(\rho)$	σ_{Br}	$s^2(\sigma_{Br})$	σ_{Bt}	$s^2(\sigma_{Bt})$
ZKO	897,8	0,008087	10,7	0,055173	598,1	0,090103
80/20 MP	776,6	0,003300	20,3	0,097038	1072,9	0,046594
50/50 HP	817,8	0,000588	32,1	0,112997	649,6	0,027321
20 WS	661,7	0,001415	18,3	0,060998	572,7	0,005051
KO-MP	668,0	0,007393	30,3	0,074765	398,4	0,014417
KO-HP	524,3	0,001784	12,2	0,005238	137,0	0,003188
4 C	813,6	0,004377	45,0	0,031067	-	-
mäkké drevo	1205,3	0,000125	-	-	-	-
tvrdé drevo	1182,4	0,000284	-	-	-	-
slama	1050,3	0,002974	-	-	-	-



Obrázok 19: Príklady vyrobených brikiet z namiešaných vzoriek komunálneho odpadu

Dôležitým a zaujímavým parametrom palív je aj ich energetická hodnota. Brikety z každej namiešanej vzorky boli podrobené informatívnemu stanoveniu výhrevnosti u zadávateľa. Pre stanovenie výhrevnosti bol použitý plne-automatizovaný kalorimeter IKA C 6000, kde na základe vyhorenej vzorky v kalorimetrickej bombe je stanovená hodnota spalného tepla vzorky. Tieto hodnoty sú následne vyjadrené prostredníctvom výhrevnosti, s uvažovaním vstupnej vlhkosti vzorky. Namerané a vypočítané hodnoty výhrevnosti (NCV) sú nasledovné:

- ZKO (vzorka 1) = 26,14 MJ/kg,
- 80/20-MP (vzorka 2) = 18,51 MJ/kg,
- 4C (vzorka 3) = 14,10 MJ/kg,
- 20WS (vzorka 4) = 24,08 MJ/kg,
- KO-MP (vzorka 5) = 21,16 MJ/kg,
- 50/50-HP (vzorka 6) = 19,37 MJ/kg,
- KO-HP (vzorka 7) = 21,43 MJ/kg.

Záver

Na základe vykonaných skúšok zhutňovania a testovania brikiet môžeme konštatovať nasledovné:

- komunálny odpad môže byť zhutňovaný, po dôkladnej mechanickej úprave (veľkosť frakcie do 10 mm a vlhkosť do 15 %),
- materiálové zloženie výrazne ovplyvňuje kvalitu produkovaných brikiet,
- najvhodnejším z pohľadu výhrevnosti sa javí namiešaný zmesový komunálny odpad s hodnotou 26,14 MJ/kg NCV,
- pre zvýšenie hustoty a pevnosti brikiet odporúčame použiť organické spojivo, ako papier alebo drevné piliny,
- pridaním 20 % objemu podrveného kartónového papiera stúpne hustota brikiet o 14 %,
- pridaním 50 % objemu podrveného kartónového papiera stúpne hustota brikiet o 35,8 %,
- najvyššie hodnoty hustôt brikiet boli získané pri zmesovom komunálnom odpade (namiešaná vzorka KO), avšak z pohľadu pevnosti brikiet boli tieto hodnotené ako najmenej pevné,
- z pohľadu mechanických ukazovateľov kvality brikiet (hustota a pevnosť), odporúčame použiť mechanický briketovací lis s upravenou dĺžkou lisovacej hubice, pretože briketovanie prebieha v tzv. „otvorenej“ lisovacej komore, čo pozitívne vplyva na vytvorenie väzieb medzi časticami,
- z pohľadu požiadaviek na rozmerovú a tvarovú presnosť, odporúčame použiť hydraulický briketovací lis, pretože briketovanie prebieha v tzv. „uzatvorenej“ lisovacej komore. Brikety sú produkované po jednom, postupne, všetky sú rovnakej dĺžky a majú rovné čelá, ktoré sa nedrobia (viď obrázok 20).



Obrázok 20: Vyrobené brikety, na mechanickom BL (vľavo) a na hydraulickom BL (vpravo) ¹⁶

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol za podpory projektu APVV-19-0607 – Optimalizované progresívne tvary a netradičné kompozitné suroviny ušľachtilých biopalív, financovaného Agentúrou pre vedu a výskum, a príspevok je súčasťou výskumu realizovaného v rámci projektu UNIVNET 0201/004/20 - Univerzitná a priemyselná výskumno-vzdelávacia platforma recyklačnej spoločnosti. Autori ďakujú za podporu Ministerstvu školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky.

Literatúra

1. Lieskovská, Z., Mičuda, J., a kol.: *Správa o stave životného prostredia Slovenskej republiky v roku 2019*, MŽP SR Bratislava, SAŽP Banská Bystrica, 222 s., 2020. ISBN 978-80-8213-028-0.
2. Rámcová smernica 2008/98/ES z 19.novembra 2008 o odpade a o zrušení určitých smerníc, online dňa 12.08.2020:
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SK/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0098&from=SK>
3. Zelenšie Slovensko, Stratégia environmentálnej politiky SR do roku 2030, MŽP SR, február 2019, 60 s., online dňa 12.08.2020:
https://www.minzp.sk/files/iep/03_vlastny_material_envirostrategia2030_def.pdf
4. Gug, J., Cacciola, D., Sobkowicz, M.J.: Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. In *Waste Management*, Vol.35 (2015), s.283-292. ISSN 0956-053X. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.09.031
5. Hussieny, M., Elagroudy, S., a kol.: Optimising mixture of agricultural, municipal and industrial solid wastes for the production of alternative fuel. In *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 72 (2019), s.259-264, ISSN 2283-9216. DOI: 10.3303/CET1972044
6. Chiou, I.-J., Chen, Ch.-H: Municipal solid waste landfill age and refuse-derived fuel. In *Waste Management & Research*, Vol. 39, Iss. 4, (2021), s.601-606, ISSN 0734-242X.
<https://doi.org/10.1177/0734242X20961832>
7. Nidhi, Ch., Sharma, B., Singh, P. K.: Energy value in biomass and plastic components of municipal solid waste. In *International Journal of Science and technology*, Vol. 3, Iss. 2, s. 80-92, ISSN 2454-5880. <https://dx.doi.org/10.20319/mijst.2017.32.8092>
8. Yong-Chil, S., Tanvir, A. Md. a Won-Seok, Y.: *Gasification of Municipal Solid Waste*, IntechOpen, 2018, 288 s., ISBN 978-1-78923-289-9, DOI: 10.5772/intechopen.69788
9. Baláš, M., Lisý, M., Kracík, P., Pospíšil, J.: Municipal solid waste gasification within waste-to-energy processing, *MM Science Journal*, 2017, pp. 1783-1788, DOI: 10.17973/MMSJ.2017_03_2016137
10. Jandačka, J., Trnka, J., Holubčík, M. a Kantová, N.: Biodegradable municipal waste to combustion in form of compacted solid fuel. In *AIP Conference Proceedings: 38th Meeting of Departments of Fluid Mechanics and Thermodynamics: Liptovský Mikuláš, Slovensko, 19-21 jún 2019*. American Institute of Physics Inc. Vol.2118, Iss. 1, 030019 (2019), <https://doi.org/10.1063/1.5114747>
11. Trnka, J., Holubčík, M., Čajová Kantová, N., Jandačka, J.: Energy performance of a rotary burner using pellets prepared from various alternative biomass residues. *BioResources*, 2021, 16(4), pp. 6736-6748. DOI: 10.15376/biores.16.4.6737-6749
12. Munir, M.T., Mardon, I., Al-Zuhair, S., Shawabkeh, A., Saqib, N.U.: Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 116, 109461, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109461
13. Čajová Kantová, N., Čaja, A., Patsch, M., Holubčík, M., Durčanský, P.: Dependence of the flue gas flow on the setting of the separation baffle in the flue gas tract. *Applied Sciences*, 2021, 11(7), 2961. DOI: 10.3390/app11072961
14. Kers, J., Križan, P., Letko, M., Šooš, Ľ., Kask, Ü. a Gregor, A.: Mechanical recycling of compounded polymeric waste and evaluation of briquetting parameters. In *Proceedings of the 7th International Conference of DAAAM Baltic Industrial Engineering* : Tallinn, Estonia 22-24 April 2010. Tallinn : Tallinn University of Technology, 2010, s.468-473. ISBN 978-9985-59-982-2.
15. Križan, P., Matúš, M., Šooš, Ľ., Kers, J., Peetsalu, P., Kask, Ü. a Menind, A.: Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties. In *Agronomy Research. Vol. 9. Biosystems engineering*. Spec.iss. 1 (2011), s.115-123. ISSN 1406-894X.
16. Križan, P. a Matúš, M.: Vplyv spôsobu lisovania a typu konštrukcie stroja na výslednú kvalitu tuhých biopalív, In: *Zborník z medzinárodnej konferencie Energie z biomasy: sborník příspěvků z 20. konference Energie z biomasy*. 1. vyd. Brno, VUT Brno, 2019, s. 25-39, ISBN 978-80-214-5825-3.
17. Križan, P.: *Proces lisovania dreveného odpadu*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2014, 197 s., ISBN 978-80-227-4251-1.

Research of Municipal Waste Material Recovery by Briquetting Technology

Peter KRIŽAN, Ľubomír ŠOOŠ, Ľudovít KOLLÁTH

Slovak Technical University in Bratislava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Manufacturing Systems, Environmental Technology and Quality Management,
Nám. Slobody 17, 812 31 Bratislava, Slovakia;
E-mail: peter.krizan@stuba.sk

Abstract

The aim of this paper is to present the possibilities of mechanical treatment for the material recovery of municipal waste purposes and the results of experimental research of municipal waste briquetting. The aim of the research is to determine the effect of the material composition and the effect of the densification method on the final quality of solid biofuels. The measurements were carried out using a mechanical and hydraulic briquetting press during the municipal waste briquetting. The obtained results indicate the suitability of usage the mechanical briquetting principle in comparison with the hydraulic principle. From the point of view of briquette density values, crushed cardboard paper was best solution as an additive material into municipal waste. Also due to the addition of waste wood sawdust, the density of briquettes increased. These biological additives have also contributed to better binding between material particles and to the creation of a compact briquette shape. The authors also would like to present the important knowledge about the machine design influence on the final quality of briquettes.

Keywords: briquetting, municipal waste, briquettes density, briquettes strength, mechanical treatment

