



UDK: 662.8.052, 628.4.04

Originalni naučni rad
Original scientific paper

ТЕХНОЛОШКИ ПАРАМЕТРИ БРИКЕТИРАЊА БИОМАСЕ МИСКАНТУСА

Жељко Целетовић^{*1}, Владан Димитријевић², Ставан Стојановић²,
Милош Павловић²

¹Универзитет у Београду, ИНЕП – Институт за примену нуклеарне енергије,
Београд-Земун, Србија

²Агросас, Нови Београд, Србија

Сажетак: У раду смо приказали специфичности процеса брикетирања биомасе мискантуса и проблеме и потешкоће који се могу очекивати код прераде ове нове и потенцијално врло приходовне биоенергетске сировине. Гајењем мискантуса и брикетирањем његове сламе, коришћењем постројења малог капацитета, економичну производњу могу остварити и мања пољопривредна газдинства. Поштовањем основних технолошких параметара постројења за брикетирање могу се произвести квалитетни брикети од мискантуса.

Кључне речи: мискантус, биомаса, брикети, биогорива

УВОД

Светска кретања у области коришћења обновљивих извора енергије показују да се све развијене земље убрзано оријентишу на интензивно коришћење свих расположивих обновљивих извора енергије [7]. Биомаса као гориво представља лако доступан, обновљив, технички и еколошки прихватљив извор енергије. Широку примену има коришћење традиционалних биоенергетских усева, пре свега сламе житарица и дрвне масе. Последњих година широко се промовише и коришћење различитих врста једногодишњих и вишегодишњих трава, од којих се, по квалитету биомасе, посебно издваја мискантус (*Miscanthus × giganteus* Greef et Deu.) [10]. Површине под биоенергетским усевима су у непрекидном порасту и са маргиналних и земљишта ниске плодности све чешће се прелази на њихово гајење на високо-продуктивним земљиштима, пре свега због остваривања већег профита. Присутан је интерес за коришћење ових усева за поједина пољопривредна

* Контакт autor. E-mail: zdzeletovic@inep.co.rs

газдинства и индивидуална домаћинства у руралном подручју. Поред економске користи, Целетовић и Михаиловић [10] процењују да ће могућност остваривања високог нивоа енергетске аутономије пољопривредних газдинстава бити један од главних мотива за будуће коришћење ових усева у Србији. Наиме, у Србији постоји велика потражња за потребним количинама енергетских брикета, како за потребе домаћинства, тако и за индустријске потребе.

Брикетирање биомасе показује низ предности у односу на остале поступке спремања биомасе [1]: смањује се волумен, трошкови манипулације и транспорта, потребан је знатно мањи простор за складиштење, већа је отпорност материјала на биолошке процесе кварења, повећава се ефикасност у процесу сагоревања, и др. Брикети су, у односу на угал, погоднији за складиштење, са мање је прљавштине и пепела. Брикете обично користе потрошачи који су ближе произвођачу [4]. У процесу брикетирања слама се компримује, док се не достигне густина $>500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Густина дрвне масе креће се од $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ до скоро $700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Ово узрокује да су одлике брикета ближе огревном дрвету, тако да се поређење брикета обично и врши са дрвном масом, као алтернативним извором енергије [2]. При том, према Додић и сар. [2], једна тона брикета замењује приближно 2 m^3 огревног дрвета. Међутим, неекономичност транспорта сламе житарица на већим раздаљинама и високи трошкови производње брикета од сламе житарица не остављају простор да се покрију основни трошкови производње, а камоли оствари добит [2].

С друге стране, мискантус (*Miscanthus × giganteus* Greef et Deu.) је вишегодишњи травни усев за производњу биомасе, чија се целокупна надземна биомаса може искористити као енергетска сировина за сагоревање [11,12]. Мискантус је идентификован као један од најбољих избора за производњу биоенергије ниског инпута у Европи и у САД [3]. То је врло висока C_4 трава, која је дуговечна (15-20 година), жање се сваке године и веома је високог потенцијалног приноса [12], што и представља основни предуслов за економичну биоенергетску производњу. Слама мискантуса одликује се високом топлотном вредношћу и због специфичног квалитета подесна је и за брикетирање [5]. Циљ нашег приказа да се представе основни технолошки параметри процеса брикетирања биомасе мискантуса, као и евентуални практични проблеми и потешкоће који се могу очекивати код прераде ове нове и потенцијално врло приходовне биоенергетске сировине.

МАТЕРИЈАЛ И МЕТОДЕ РАДА

За брикетирање је коришћена биомаса мискантуса добијена са парцела огледног поља ИНЕП-а, у Земуну. Целокупан надземни део усева је, након сазревања и сушења током јесени и зиме, пожњевен током фебруара, када се у српским агроколошким условима добија најквалитетнија биомаса мискантуса за сагоревање [9,12].

Брикетирање је изведено на постројењу *Biomasser Duo-Set*, намењеном за брикетирање сламе стрних жита, мискантуса, барске трске и ливадског сена (Слика 1). Постројење се састоји од млина за четвртасте бале и за сламу у растреситом стању *Shredder RK* и пужне (екструдер) брикетирке *Biomasser Duo tip BS 207*. Према техничким параметрима произвођача, ради се о постројењу малог

капацитета, које би требало да послужи задовољавању енергетских потреба пољопривредног газдинства и за локално тржиште.



Слика 1. Постројење за брикетирање Biomasser Duo-Set

Figure 1. Briquetting plant: Biomasser Duo-Set

Инсталисана снага погонског електромотора млина *Shredder RK* је 7,5 kW. Млин је прилагођен за дозирање растреситог материјала и стандардних четвртстих бала, а састоји се од: носеће конструкције на точковима; погонског електромотора; ротора са комплетом ножева за дезинтегрисање бала; комплета ножева за уједначавање дужине уситњеног материјала; сита за добијање захтеване фракције сировине; и вентилатора. Правилно ситњење сламе је омогућено специјалним ситима у глави ротора монтираним у млину.

Коришћена машина за брикетирање припада групи механичких брикетирки са спиралом (пужем). Пужне пресе се користе за пресовање релативно влажних материјала. Укупна инсталисана снага машине за брикетирање је 12,4 kW, а састоји се од: носеће конструкције, на којој се налазе 2 погонска мотора, трансмисија и 2 комплета пужева са обликујућим рукавцима; контејнера за уситњену сламу; филтер цака; и 2 комплета вођица, носача вођица са стезним прстеновима и теговима. Погонски мотор преко трансмисије покреће спиралу (пуж) који је постављен целом својом дужином у рукавцу (матрици). Рукавац има уграђене грејаче и он је конусно-цилиндричног облика, тако да је излаз кружног попречног пресека, пречника 70 мм. На рукавац се настављају металне вођице које служе за хлађење брикета, а на којима се налазе стеге са теговима које служе за подешавање оптерећења на излазу из рукавца (Слика 1). Продуктивност коришћене брикетирке креће се од 80-140 kg·h⁻¹ брикета, зависно од уситњености, влажности и типа материјала, уз просечну потрошњу енергије од 8,6 kW·h⁻¹.

РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Брикети се формирају пресовањем уситњених честица лигно-целулозног материјала са или без везивног средства, под високим притиском, повишеној температури и оптималним садржајем влаге у материјалу. Компактност и збијеност уситњених честица у брикету без везивног средства обезбеђује се термопластичним слепљивањем честица биљног материјала. Осим одговарајуће гранулације (уситњености) полазног материјала (3 до 5 mm), при пресовању биомасе значајну улогу има и садржај влаге у материјалу.

Оптимални технолошки поступак за формирање квалитетних енергетских брикета условљен је врстом материјала, квалитетом уситњености и садржајем влаге у материјалу. Овај поступак може бити веома сложен и скуп ако се употребљава лепило као везивно средство за спајање уситњених честица. Производња брикета без учешћа везивних средстава (лепила) битно доприноси поједностављењу процеса производње и побољшању његове еколошке вредности [1]. Поступак брикетирања уситњеног лигно-целулозног материјала без везивног средства заснива се на високом притиску у алату пресе, који биомасу претвара у брикете компактне форме велике запреминске масе. Према Бркић и Јанић [1], да би се биомаса могла претворити у трајну чврсту форму потребно је да садржај влаге буде 10 до 18% (максимално до 20%), а гранулација (уситњеност) материјала максимално до 5 mm. На трошкове производње брикета значајно утичу и скупи резервни делови пресе и неправилно одржавање постројења за брикетирање [1]. Врло брзо се троши алат и остали делови пресе, па је неопходно редовно обављати правилно центрирање и подмазивање покретних елемената пресе. Да би трошкови брикетирања лигно-целулозног материјала били што нижи, треба водити рачуна о томе да трошкови сакупљања, манипулације и складиштења сировина морају бити релативно ниски.

При ситњењу малих четвртастих бала сламе стрних жита са ситом пречника отвора 15 mm, добијена је уситњена фракција максималне дужине 5 cm, а у узорку се могло приметити да је највише било фракције дужине од 2 до 2,5 cm (око 40% у узорку). Уградњом сита на млину са пречником отвора од 18 mm опсег уситњене сламе стрних жита се помера до 7 cm, а у узорку има највише фракције дужине око 3 cm. Балирана слама стрних жита својом масом притиска ротор млина и тиме много брже улази у простор између ножева и сита, па се брже добија уситњен материјал. Максимална продуктивност ($600 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$) се једино у том случају достиже. За сламу у растреситом стању продуктивност је значајно мања.

Основне одлике сламе мискантуса, попут топлотне вредности, процентуалног садржаја угљеника (C), кисеоника (O) и водоника (H) су релативно постојане (Табела 1). Садржај других елемената и пепела у слами, пак, зависи од одлика земљишта на којем се гаји и технологије гајења мискантуса [12]. Код ситњења сламе мискантуса добијени су следећи резултати. Са ситом пречника отвора 15 mm добијено је највише уситњеног материјала дужине до 8 cm, док су у узорку најзаступљеније биле фракције дужине од 2,5 до 3,5 cm (47,4%). После млевења са ситом пречника отвора 18 mm, у узорку су се појављивале знатне количине фракције дужине и преко 10 cm. Та величина уситњеног материјала може изазвати касније потешкоће у процесу самог брикетирања. Комплетно стабло мискантуса због изузетне чврстоће се теже ситни без претходне припреме. Наиме,

Moriceanu *et al.* [6] су добили да сила кидања стабала мискантуса износи од 104-233 N за интернодије које се налазе у доњем делу (подножју) стабала, односно од 55-149 N за интернодије које се налазе у горњем делу (врху) биљних стабала. Одговарајуће биљне деформације до тачке рептуре (прекида) биле су између 0,9-1,0 mm за доње интернодије биљке и између 1,0-1,2 mm за горње интернодије биљке. При том, модул еластичности стабала мискантуса износи између 69,3-218,8 МПа за доње интернодије, односно између 25,1-122,3 МПа за горње интернодије [6].

Табела 1. Основне одлике сламе мискантуса као горива [12]

Table 1. The main characteristics of *Miscanthus* straw as fuel [12]

	Опсег концентрација <i>The range of concentrations</i>	Просечно <i>Average</i>
Садржај пепела <i>Ash content</i>	1.6 – 4.0 %	2.7 %
Елементни састав <i>Elemental composition</i>		
С	47.1 – 49.7 %	48.3 %
О	41.4 – 42.9 %	42.2 %
Н	5.4 – 5.9 %	5.6 %
Н	0.1 – 0.6 %	0.3 %
Р	≤ 0.1 %	< 0.1 %
К	0.2 – 1.3 %	0.8 %
Са	< 0.1 – 0.2 %	0.1 %
С	< 0.1 – 0.2 %	< 0.1 %
Cl	< 0.1 – 0.5 %	< 0.2 %
Топлотна вредност <i>The heating value</i> (MJ·kg ⁻¹)	17.0 – 19.2	18.3

Из наведеног следи да највећи проблем у току ситњења представљају сами нодуси који стаблу и дају одређену чврстоћу, и то посебно нодуси у првих 1-1,5 m висине стабла. Ломљењем тих нодуса стабло лако добија уздужне пукотине и тиме прелази у много лакши материјал за ситњење. Сигурно је да би резултате у квалитетнијем ситњењу дало претходно гњечење масе мискантуса. Уситњена маса која прође кроз сито млина се пнеуматским путем, помоћу вентилатора уграђеног у млину пребацује у контејнер брикетирке. На контејнеру коришћене брикетирке се налази филтер цак, који има функцију да задржава најситније честице и прашину, а сав остали уситњен материјал пада на дно где се константно меша.

Оптимална дужина уситњеног материјала за добијање квалитетног брикета је од 2 до 5 cm, мада се процес брикетирања не мења значајно ако је део уситњене масе нешто дужи, и до 8 cm. Превише крупан материјал (фракција преко 8 cm) би, пре свега, правио загушења при преласку из контејнера брикетирке у простор између пуџа и рукавца, а након тога би правио велики отпор и при кретању кроз сам рукавац. Продуктивност брикетирања, у том случају, значајно опада. Ситнији материјал од 2 cm доводи до тога да се материјал нормално слеplује, али се брикети на излазу из вођица врло лако распадају, јер су везе између брикетираног материјала сувише кратке и не

успевају да спрече ломљење брикета. Продуктивност би се у случају ситнијег материјала повећала, али рад са таквим материјалом би се одразио на квалитет брикета.

Влажност материјала је један од најбитнијих фактора при брикетирању сламе. Приказана технологија се састоји у слепљивању уситњене сламе природним лепком који се налази у слами - лигнином. При описаном процесу брикетирања не додају се адитиви ни лепкови. Рукавци имају уграђене грејаче који имају функцију да подстакну лигнин у материјалу да се загрејан понаша као лепак. Како грејачи на рукавцу постижу минималну температуру од 150°C, а максималну 300°C, код превише влажног материјала то доводи до веома великог испаравања воде на излазу из рукавца и на централном отвору брикета, а током процеса сабијања брикет који се формира се врло брзо лепи и стврдњава у површинском слоју и тако повећава отпор у рукавцу и на пужу - мотору. Постројење има уграђен сигурносни систем који зауставља моторе услед преоптерећења и све док се не отклони загушени материјал из рукавца неће се наставити даљи рад. Уколико је материјал који се брикетира мање влажности од 15% продуктивност ће се повећати, али се брикет неће довољно добро формирати, тј. слепљивати. Оптимална влажност правилно уситњеног материјала обезбеђује добар квалитет брикета, а то се постиже подешавањем само два радна параметра брикетирке: температуре на рукавцу и оптерећења на вођицама, односно, на излазу из рукавца.

Рад на брикетирки у циљу добијања највеће продуктивности и квалитетних брикета за радника без искуства може да представља значајан проблем. У почетку, проблеме могу узроковати честа преоптерећења услед превише влажног материјала, повећане температуре на рукавцу или услед преоптерећења вођица на излазу из рукавца. Преоптерећење се манифестује променом звука електромотора, а може се визуелно пратити преко амперметра уграђеног на контролној табли. Нормалан режим рада погонског електромотора је око 5А. У случају преоптерећења мотора казаљка показује више вредности, а већ на 10А укључује се заштита и сигурносни аларм и брикетирка се гаси. Уколико се се приметне високе вредности на амперметру најбоље је прво растеретити излаз из рукавца, то јест, смањити оптерећење на вођицама (спустити тегове на стегама).

Брикетирање пшеничне сламе до 20% влажности захтева радну температуру рукавца 200-250°C, прво оптерећење подигнуто до максимума, а остала три оптерећења врло мало у циљу одржавања правога облика и уједначене брзине кретања брикета. Услед малих варијација влажности између бала пшеничне сламе долази до мањих промена оптерећења на погонском мотору. Код брикетирања мискантуса рад погонског мотора је уједначенији и мирнији, без појаве наглих и великих оптерећења, услед уједначеније влажности материјала. Међутим, оптимална температура на рукавцу за брикетирање мискантуса влажности око 16% је већа него код пшеничне сламе и налази се у опсегу 250 - 300°C. Исто тако и оптерећење на вођицама мора бити постављено тако да је прво оптерећење на максимуму, друго на пола стеге, а друга два оптерећења врло мало изнад минимума.



Слика 2. Брикети од сламе: 1) мискантуса, 2) јечма и 3) ливадског сена

Figure 2. Briquettes from straw: 1) Miscanthus, 2) barley and 3) meadow hay

Облик добијених брикета је ваљкаст и они се обично пакују у термоскупљајућу фолију, картонске кутије, папирне или пластичне вреће. Брикет од мискантуса добијен према описаној технологији брикетирања је кружног попречног пресека пречника 7 cm са централним кружним отвором од 2 cm (Слика 2.) Централни отвор формира врх пужа у облику вијка, а има функцију одушка за водену пару која се издваја из материјала током брикетирања. Отвор омогућава брже и потпуније сагоревање брикета. Условно речено брикет је неодређене дужине. Најчешће се описаним постројењем добијају брикети просечне дужине око 8 cm. Дужина брикета углавном зависи од квалитета везаности (слепљености) брикета и густине, што се подешава радним параметрима брикетирке. Боље слеplени брикет (са густином $800-850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) се у просеку распадао на комаде дужине 10-20 cm, док се лошије слеplени брикет на изласку из вођица распадао и на сегменте дужине 5 cm. У случајевима краткотрајних преоптерећења када се брикетирани материјал дуже задржао у зони загрејаног рукавца, могао је да се формира брикет дужине и више од 50 cm са густином преко $1050 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Формирање таквих брикета, наравно, није препоручљиво из разлога што се брже троше радни елементи пуж и рукавац, смањује се радни век електромотора, повећава потрошња енергије, а продуктивност је знатно испод назначене.

Проучавајући енергетске биљке: *Salix viminalis*, *Miscanthus × giganteus*, *Rosa multiflora*, *Sida hermaphrodita*, *Helianthus tuberosus* и *Spartina pectinata*, Urbanovičová et al. [8] су установили да су брикети од мискантуса показали веома добре механичке карактеристике. Оптимално формиран брикет од мискантуса има нешто већу насипну масу око $550 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ од насипне масе брикета од пшеничне сламе (око $450 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), а влажност брикета је око 10%. Добијени енергетски брикети могу да се користе у свим врстама ложишта за чврсто гриво, уз пажљиво дозирање. По енергетској вредности брикети су слични нашим домаћим мрким угљевима [1]. Осим тога коришћење брикета уместо угља има значајну еколошку предност, јер је садржај сумпора у траговима (мање се загађује околина са продуктима сагоревања), а пепео од брикета може да се користи као добро минерално ђубриво [1].

ЗАКЉУЧАК

Биомаса мискантуса представља сировину подесну за брикетирање. Коришћењем постројења мањег капацитета, попут *Biomasser Duo-Set*, економичну производњу могу остварити и мања пољопривредна газдинства. Поштовањем основних технолошких параметара рада постројења за брикетирање могу се произвести квалитетни брикети од сламе мискантуса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бркић, М., Јанић, Т. 2003. Анализа поступака брикетирања биомасе. *Савремена пољопривредна техника*, 29 (4): 217-222.
- [2] Dodić, S.N., Zekić, V.N., Rodić, V.O., Tica, N.Lj., Dodić, J.M., Popov, S.D. 2012. The economic effects of energetic exploitation of straw in Vojvodina. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (1): 397-403.
- [3] Khanna, M., Dhungana, B., Clifton-Brown, J. 2008. Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois. *Biomass and Bioenergy*, 32 (6): 482-493.
- [4] Мартинов, М., Тешић, М., Веселинов, Б., Ђатков, Ђ., Бојић, С. 2010. Примена чврсте биомасе као горива у Немачкој – стање и перспективе. *Савремена пољопривредна техника*, 36 (2): 157-166.
- [5] Michel, R., Mischler, M., Azambre, B., Fiqueneisel, G., Machnikowski, J., Rutkowski, P., Zimny, T., Weber, J.V. 2006. *Miscanthus* × *Giganteus* straw and pellets as sustainable fuels and raw material for activated carbon. *Environmental Chemistry Letters*, 4 (4): 185-189.
- [6] Moiceanu, G., Voicu, G., Paraschiv, G., Poenaru, I.C., Biris, S.St. 2012. Mechanical characteristics of miscanthus stalks obtained by compression tests. In: *Actual Tasks on Agricultural Engineering* (Ed. S. Košutić), Proceedings of the 40. International Symposium on Agricultural Engineering, 21.-24. February 2012., Opatija, Croatia, Zavod za mehanizaciju poljoprivrede, Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 507-516.
- [7] Ољача, М.В., Ољача, С.И., Недић, М.М., Глигоревећ, К.Б., Чанак Недић, А.А., Доленшек, М.М. 2011. Рационализација савремених решења коришћења биомасе у домаћинствима. *Електропривреда*, 64 (3): 279-286.
- [8] Urbanovičová, O., Piszczalka, J., Lisowsk, A., Findura, P. 2010. Mechanical characteristics of briquettes made of biomass. *Savremena poljoprivredna tehnika*, 36 (4): 397-400.
- [9] Целетовић, Ж., Михаиловић, Н., Гламочлија, Ђ., Дражић, Г., Ђорђевић, С., Миловановић, М. (2009): Жетва и складиштење *Miscanthus* × *giganteus* Greef et Deu. *Пољопривредна техника*, 34 (3): 9-16.
- [10] Dželetović, Ž.S., Mihailović, N.Lj. 2011. Status, development and prospects of using bioenergy crops in the world and in Serbia. *Journal on Processing and Energy in Agriculture*, 15 (2): 90-93.
- [11] Целетовић, Ж., Гламочлија, Ђ. 2011. Привредни значај гајења мискантуса. *Пољопривредна техника*, 36 (2): 61-68.
- [12] Целетовић, Ж. 2012. *Мискантус (Miscanthus × giganteus Greef et Deu.) - производне одлике и принос биомасе*, 104 стр., Београд, Задужбина Андрејевић.

TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF BRIQUETTING OF MISCANTHUS BIOMASS

Željko Dželetović¹, Vladan Dimitrijević², Stevan Stojanović², Miloš Pavlović²

¹University of Belgrade, INEP – Institute for the Application of Nuclear Energy,
Belgrade-Zemun, Republic of Serbia

²Agrogas, Belgrade, Republic of Serbia

Abstract: In this paper, the specific characteristics of Miscanthus straw briquetting process are presented, as well as the problems and difficulties that may be expected in the processing of this new and potentially profitable bioenergy crop. By Miscanthus cultivation and the straw briquetting in small capacity plants, even small farms may achieve a cost-effective production. By obeying the main technologic requirements of briquetting plant, good quality Miscanthus briquettes may be produced.

Key words: *Miscanthus, biomass, briquettes, biofuel*

Datum prijema rukopisa: <i>Paper submitted:</i>	15.10.2012.
Datum prijema rukopisa sa ispravkama: <i>Paper revised:</i>	29.10.2012.
Datum prihvatanja rada: <i>Paper accepted:</i>	02.11.2012.

