

Mogućnosti korišćenja biomase poreklom od brzorastuće trske *Miscanthus×giganteus*

Nada V. Babović, Gordana D. Dražić, Ana M. Đorđević

Fakultet za primenjenu ekologiju „Futura“, Univerzitet Singidunum, Beograd, Srbija

Izvod

Među lignoceluloznim energetskim usevima koji bi se mogli potencijalno koristiti kao sirovine za proizvodnju toplote, električne energije ili tečnih energenata, posebnu pažnju treba posvetiti miskantusu (*Miscanthus×giganteus*), višegodišnjoj rizomatskoj travi, koja poseduje brojne povoljne karakteristike. Trenutno se miskantus komercijalno uzgaja u Velikoj Britaniji i još nekim državama s ciljem produkcije biomase. Predviđanja su da će u narednim godinama miskantus postati značajna sirovina za drugu generaciju biogoriva kao što je bioetanol. U radu je ukazano na trenutne i potencijalne oblasti istraživanja o miskantusu, i dat je kritički osvrt na moguća polja primene miskantusa, uključujući proizvodnju energije, papira, građevinskog materijala, primenu u procesu kompostiranja, bioremedijacije, proizvodnje đubriva i hemikalija.

Ključne reči: energetski usevi, *Miscanthus×giganteus*, lignocelulozna biomasa, sagorevanje, bioetanol.

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Značajno povećanje sadržaja CO₂ u atmosferi, koje se uglavnom javlja kao posledica sagorevanja fosilnih goriva kao što su ugalj i nafta, u znatnoj meri doprinosi efektu globalnog zagrevanja. Iz tog razloga je neophodno detaljno opisati i proučiti moguće alternativne izvore energije koji bi u znatno smanjili emisiju CO₂ i drugih gasova staklene bašte. Biljna biomasa daje čistije produkte sagorevanja u odnosu na fosilna goriva, a ciklusom uzgajanja se troši CO₂ u procesu fotosinteze tako da je ciklus produkcije energije iz ovakvog biogoriva gotovo CO₂ neutralan. Otuda se i očekuje da biomasa postane jedan od ključnih energetskih resursa u borbi sa globalnim zagrevanjem i iscrpljivanjem rezervi fosilnih goriva. Danas je podizanje energetske efikasnosti jeftiniji put redukcije emisije gasova staklene bašte od investiranja u razvoj obnovljivih izvora energije, pa i biomase. Međutim, takve investicije su od neprocenjivog značaja za dugoročne ekonomske i ekološke perspektive u oblasti zaštite živote sredine [1].

Biomasa u proizvodnji energije predstavlja veoma širok pojam koji, između ostalog, obuhvata sve oblike organske materije kao što su drvo, organska materija zeljastih biljaka, poljoprivredne useve, poljoprivredne ostatke, vodenu vegetaciju, đubriva životinjskog porekla i komunalni čvrsti otpad. Postoji veliki broj biljaka koje imaju sposobnost konverzije solarne energije u biomasu sa velikom efikasnošću, uključujući zeljaste useve, brzorastuće drvenaste useve, krmno bilje (lu-

cerka, detelina, svičgras i miskantus), šećerne usevi (šećerna trska, šećerna repa, vlaknasti i slatki sirak), žitarice (kukuruz, ječam i pšenica), i uljarice (soja, repica, palma, suncokret, šafranika, uljana repica i pamuk). Godišnja produkcija po hektaru obradive površine je ekvivalentna vrednosti od 400 GJ za C4 useve, 250 GJ za žitarice, i 70 GJ za uljarice (biodizel). C4 višegodišnji usevi predstavljaju pogodne bioenergetske useve jer efikasno koriste dostupne resurse, zadržavaju ugljenik u zemljištu, imaju visok stepen efikasnosti korišćenja vode za bioprodukciju, nisu invazivne vrste i imaju male zahteve za prihranjivanjem [2]. Trava koja poseduje sve navedene karakteristike, i koja proizvodi veliku količinu biomase jeste *Miscanthus×giganteus* [3]. Počev od 1983. godine, sprovode se obimna istraživanja na *Miscanthus×giganteus* u Danskoj, Nemačkoj, Irskoj, Velikoj Britaniji. Plantaža miskantusa se zasniva sadnjom rizoma ili biljčica produkovanih mikropropagacijom na prethodno pripremljeno zemljište na kome ostaje produktivna u toku 15–20 godina. Potencijal prinosa ovog bioenergetskog useva kog odlikuje godišnja žetva pokazao se kao veoma značajan, ali zbog visokih troškova zasnivanja plantaža, ostaju neka ograničenja za njegov širi uzgoj. Na drugoj strani, redukovana su značajna agronomski ulaganja (godišnje oranje, sadnja i prihranjivanje) otkako se pokazalo da *Miscanthus×giganteus* ne zahteva primenu đubriva u meri u kojoj je to potrebno za godišnju produkciju žitarica kao što je kukuruz [4–6]. U Republici Srbiji je eksperiment sa *Miscanthus×giganteus* prvi put započet 2007. Iako je neophodno vršiti dugoročno praćenje parametara rasta (primarno prinosa) u funkciji parametara životne sredine, kao i genetičke i fiziološke karakteristike biljke s ciljem dobijanja relevantnih podataka, preliminarni rezultati

PREGLEDNI RAD

UDK 662.63:620.952

Hem. Ind. 66 (2) 223–233 (2012)

doi: 10.2298/HEMIND110711082B

Preписка: N. Babović, Fakultet za primenjenu ekologiju „Futura“, Univerzitet Singidunum, Maršala Tolbuhina 13–15, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: nbabovic@singidunum.ac.rs

Rad primljen: 11. jul, 2011.

Rad prihvaćen: 12. oktobar, 2011.

pokazuju da je u Srbiji moguća produkcija biomase miskantusa [7].

Miscanthus×giganteus je sterilni triploidni hibrid nastao ukrštanjem vrsta *Miscanthus sinensis* i *Miscanthus sacchariflorus*, koji u toku jedne vegetativne sezone može da naraste do visine od 3,5m. Za potpuno uspostavljanje plantaža pod miskantusom i postizanje maksimalne stope prinosa potrebno je 3–6 godina. Ukupni žetveni prinosi u drugoj godini od zasnivanja mogu dostići vrednosti od 6–10 t/ha, a u trećoj godini i do 12–17 t/ha ili više. Žetveni prinosi dostižu maksimum nakon 3–5 godina, pri čemu vrednosti godišnjih prinosa mogu biti i do 20 t/ha god. Dalje, ovaj lignocelulozni usev se odlikuje jednostavnim uzgojem i žetvom, niskim sadržajem vlage u vreme rano prolećne žetve, velikom efikasnošću iskorišćavanja vode i azota za bioprodukciju, visokim sadržajem celuloze, neinvazivnim karakterom i niskom osetljivošću na bolesti i štetočine [8–11]. Ove i druge karakteristike mogu učiniti *Miscanthus×giganteus* značajnim u grupi bioenergetskih useva. Nedavno su objavljeni rezultati poređenja ekološke održivosti produkcije biogoriva iz nekoliko vodećih useva koji se takođe koriste i kao hrana za ljude i životinje a na osnovu postojećih poljoprivrednih praksi u velikim produkcionim oblastima. Posmatrano je devet indikatora održivosti međusobno jednakog značaja. Produkcija biogoriva od palminog ulja u Jugoistočnoj Aziji, šećerne trske u Brazilu i slatkog sirka u Kini izgleda najodrživija jer se ovi usevi odlikuju najvišom efikasnošću korišćenja zemljišta, vode, azota i energenata dok je upotreba pesticida mala u odnosu na energetske prinose [12]. Najnovija istraživanja ekonomskih i ekoloških karakteristika produkcije energetskih useva u Evropi ukazuju da je korišćenje ovih useva za generaciju električne energije još uvek značajno skuplje u odnosu na ugalj ali da su prednosti u zaštiti životne sredine neuporedivo na strani energetskih useva. Među njima miskantus ima poziciju bolju od jednogodišnjih useva ali malo lošiju u odnosu na šumske kulture u brzoj ophodnji [13,14].

U radu je dat pregled mogućnosti korišćenja miskantusa kao obnovljive sirovine, pre svega za proizvodnju energije, a zatim i za brojne druge namene: građevinski materijal, industrija papira, bioremedijacija, i drugo.

ZNAČAJ LIGNOCELULOZNE BIOMASE

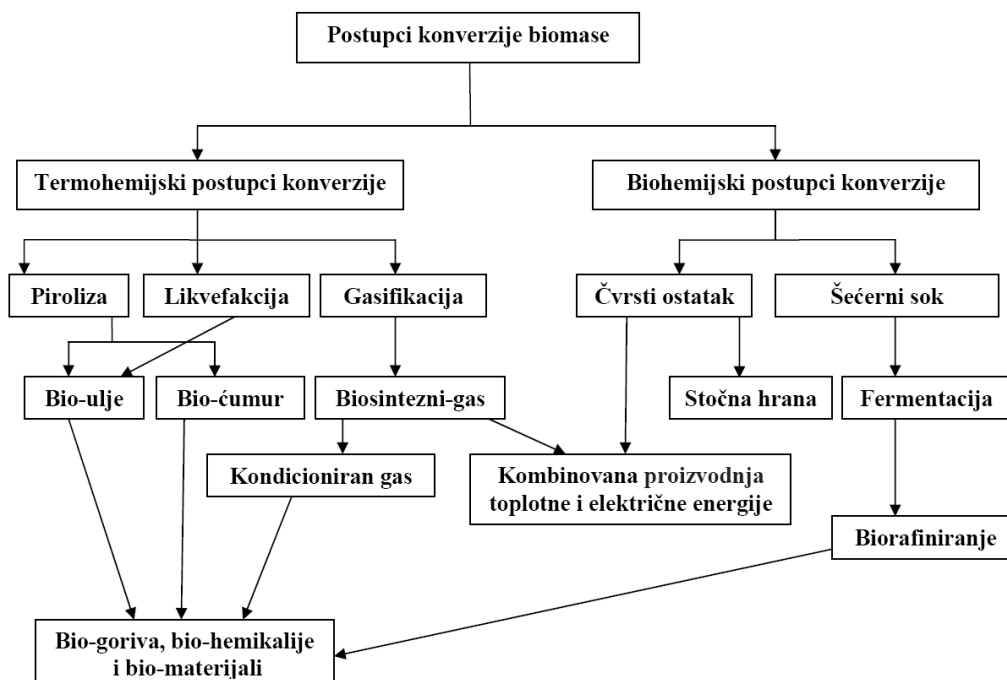
U poslednjih nekoliko godina, korišćenje lignocelulozne biomase kao sirovine u procesu dobijanja bioenergenata dobilo je na značaju prvenstveno zbog mogućnosti njihove široke primene i relativno malog uticaja na područje snabdevanja hranom [15,16]. Skorašnji porast cene kukuruza u SAD posledica je povećane potražnje kukuruza za proizvodnju bioetanol. Lignocelulozni biotenol ima mnogo više prednosti u od-

nosu na biotenol koji se trenutno u najvećoj meri proizvodi od kukuruza, prvenstveno zbog toga što lignocelulozna biomasa može da raste uz mala ulaganja i na marginalnim zemljištima čija primarna namena nije proizvodnja tradicionalnih useva za potrebe ishrane stanovništva. Višegodišnje trave, svičgras (*Panicum virgatum* – specijalna vrsta prosa, engl. *switchgrass*) i miskantus (*Miscanthus×giganteus* – kineska šaš, slonovska trava) predstavljaju osnovni lignocelulozni materijal koji se proučava kao potencijalna sirovina za proizvodnju biogoriva.

Koncept biorafinerija je prvi put definisan 1999, kada je potvrđeno da se čist lignocelulozni materijal može konvertovati u brojne bio-proizvode putem integrisanih procesnih jedinica [17]. Na slici 1 je prikazan koncept biorafinerije. U biorafineriji, poljoprivredne sirovine i nusprodukti su podvrgnute nizu bioloških, hemijskih i fizičkih procesa radi dobijanja bio-goriva, bio-materijala, dijetetskih proizvoda, polimera i specijalnih hemijskih komponenti [18]. Ovaj koncept se može uporediti sa rafinerijom nafte gde se nafta podvrgava nizu procesa u postupku dobijanja goriva, plastike i petrohemijskih proizvoda. Proizvodi u biorafineriji kreću se od osnovnih prehrambenih sirovina do kompleksnih farmaceutskih proizvoda i od jednostavnih građevinskih materijala do složenih industrijskih kompozita i polimera. Biogoriva, kao što su bioetanol, vodonik ili biodizel, i bio-hemikalije, kao što su ksilitol, glicerol, limunska kiselina, mlečna kiselina ili vitamini, mogu biti proizvedene s ciljem dobijanja energije, za proizvodnju hrane, i za potrebe prehrambene, odnosno farmaceutске industrije. Vlakna, lepkovi, biorazgradiva plastika kao što je poliaktična kiselina, razgradive površinske aktivne materije, deterdženti i enzimi i ostali proizvodi iz biorafinerija mogu biti kasnije iskorišćeni za industrijsku proizvodnju. Međutim, treba pomenuti da je proizvodnja mnogih biogoriva ekonomski opravdana samo ukoliko se i značajni koprodukti dobijaju u procesu proizvodnje biogoriva, i ukoliko je proces obrade koji se u ovom slučaju koristi energetski efikasan.

Sastav miskantusa (*Miscanthus×giganteus*)

Među lignoceluloznim energetskim usevima koji potencijalno mogu biti korišćeni za proizvodnju energije, električne struje ili tečnih goriva za motorna vozila, posebnu pažnju treba posvetiti miskantusu (*Miscanthus×giganteus*), višegodišnjoj rizomatskoj travi, koja poseduje veliki broj povoljnih karakteristika. Miskantus se istakao kao jedan od najboljih kandidata u grupi lignoceluloznih energetskih useva koji uspeva na područjima sa umereno kontinentalnom klimom [4,19]. Kao vrstu sa C4 fotosintetičkim putem, karakterišu ga visoka efikasnost fotosinteze, i visoka stopa fiksacije CO₂. Zbog sposobnosti da u jesenjem periodu vrši translokaciju azotnih i drugih jedinjenja u rizome, *Miscanthus×giganteus* veoma efikasno koristi nutrijente za biopro-



Slika 1. Šematski dijagram koncepta biorafinerije prema literaturi [18].

Figure 1. Schematic diagram of biorefinery concept according to reference [18].

dukciju i može da produkuje konstantno visok prinos u periodu od 15 godina bez dodavanja đubriva ili uz minimalno prihranjivanje [20].

U tabeli 1 dat je sastav biomase miskantusa prema Villaverde i sar. [21]. Sastav miskantusa zavisi od sezone, termina žetve i bioklimatske lokacije. Literaturni podaci [22] ukazuju da ukupni sadržaj lignina u suvoj masi *Miscanthus×giganteus* iznosi 23%, celuloze 37% i hemiceluloze 22%, dok suva biomasa *Miscanthus×giganteus* sadrži 38% celuloze, 24% hemiceluloze i 24% Klason lignina [23]. Sørensen i sar. [24] utvrdili su da se suva masa *Miscanthus×giganteus* sastoji od 40% celuloze, 18% hemiceluloze i 25% Klason lignina.

Tabela 1. Hemijski sastav *Miscanthus×giganteus* [21]Table 1. Composition of *Miscanthus×giganteus* [21]

Komponenta	Procenat (suva osnova)	
Pepeo	0,8	
Lignin	Klason lignin	20,8
	Lignin rastvoran u kiselinama	0,9
Polisaharidi	Holoceluloza	36,5
	α -Celuloza	50,9
	β -Celuloza	11,9
	γ -Celuloza	10,6
Monosaharidi	Arabinoza	1,1
	Ksiloz	14,9
	Manoza	0,0
	Galaktoza	0,3
	Glukoza	38,0
	Ramnoza	0,0
	Uronske kiseline	1,2

KORIŠĆENJE BIOMASE MISCANTUSA ZA PRODUKCIJU ENERGIJE

Znaćajne karakteristike za sagorevanje biomase su mali sadržaj vlage, pepela, K, Cl, N i S. Tabela 2 prikazuje prinos suve materije, donju toplotnu moć, kolićinu energije po jedinici površine zasada, sadržaj vlage prilikom žetve i sadržaj pepela u *Miscanthus×giganteus* u poređenju sa drugim energetske usevima [25].

Generalno, prinos suve materije (SM) i toplotna moć useva predstavljaju najznaćajnije faktore pri odrećivanju potencijala energetske sirovine kao ćvrstog goriva. Zbog toga, treba imati u vidu da prinos suve mase

Tabela 2. Karakteristike energetske useve [25]
Table 2. Energy crops characteristics [25]

Usev	Prinos suve materije t SM/(ha godišnje)	Donja toplotna moć MJ/kg SM	Količina energije po ha GJ/ha	Sadržaj vlage pri žetvi %	Sadržaj pepela mas.%
Slama	2–4	17	35–70	14,5	5
Miskantus	8–32	17,5	140–560	15	3,7
Konoplja	10–18	16,8	170–300	n/a	n/a
Vrba	8–15	18,5	280–315	53	2,0
Topola	9–16	18,7	170–300	49	1,5
Trstika (Giant reed)	15–35	16,3	245–570	50	5
Kanarska trava (Reed canary grass)	6–12	16,3	100–130	13	4
Svičgras (Switchgrass)	9–18	17	–	15	6
Bagrem (Black locust)	5–10	19,5	100–200	35	n/a
Drvo	3–5	18,7	74,8	50	1–1,5

u velikoj meri zavisi od karakteristika tla i klimatskih uslova, dok sadržaj vode i pepela zavisi od vremena žetve. Biomasa miskantusa je pogodna za sagorevanje prvenstveno zbog niskog sadržaja vode, Cl, K, N, S i količine pepela u poređenju sa drugim lignoceluloznim biljkama [26].

Kako hemijski sastav miskantusa određuje povoljne karakteristike biomase za sagorevanje, miskantus se komercijalno uzgaja u Evropskoj uniji kao energetska useva (Velika Britanija, Irska i Danska). Pored korišćenja biomase miskantusa kao obnovljive sirovine za proizvodnju energije, u poslednje vreme se proučava mogućnost korišćenja ove sirovine za proizvodnju biogoriva, pre svega bioetanola (logen corporation, Kanada). Prednost miskantusa u poređenju sa drugim sirovinama za proizvodnju biogoriva, kao što su ostaci iz poljoprivrede počev od kukuruznih stabala i pšenične slame, ta je što miskantus može biti kultivisan i u zagađenim oblastima, ili na obradivom zemljištu niskog kvaliteta, neadekvatnom za druge useve.

Sagorevanje

Upotrebom raznih tehnologija sabijanja, biomasa miskantusa se prevodi u čvrsta biogoriva u formi briketa, peleta, bala i nakon toga može biti iskorišćena za proizvodnju električne energije i u svrhu dobijanja toplote. Za proizvodnju peleta i briketa, usev se seče a zatim se biomasa obrađuje direktno na terenu ili se transportuje u pogone za obradu gde se visokim kompresovanjem prevodi u pelete ili brikete. Baliranje uključuje sečenje i sušenje, a zatim i korišćenje velike mašine za baliranje kako bi se dobile bale velike gustine. Biomasa miskantusa može biti upotrebljena za ko-sagorevanje uglja u termoelektranama, u velikim pogonima za proizvodnju električne energije uz relativno malu proizvodnju toplote. *Miscanthus×giganteus* ima neto kalorijsku

vrednost po suvoj osnovi od 17 MJ/kg sa 2,7% sadržaja pepela. Energetska vrednost 20 t suve materije miskantusa po hektaru bila bi ekvivalentna energetske vrednosti od 8 t uglja [8].

Nekoliko proizvođača je konstruisalo kotlove koji su adekvatni za spaljivanje miskantusa u obliku ivera, bala, briketa ili peleta. Do sada je miskantus bio uspešno spaljivan u Danskoj u komercijalne svrhe korišćenjem kotlova sa sagorevanjem u cirkulacionom fluidizovanom sloju snage 78 MW (50% ko-sagorevanja) i u kotlovima sa sagorevanjem spršenog „letećeg uglja“ u snage 160 MW (20% kosagorevanja) [27]. Trenutno se u Evropi najveći procenat biomase miskantusa koristi za sagorevanje. Miskantus se uglavnom oblikuje u velike bale i transportuje u industrijska postrojenja gde se bale mogu čuvati i kao zalihe za kasniju upotrebu. U bioelektranama koje koriste slamu vrši se spaljivanje miskantusa (npr. Elean Spalionica, Ely, Velika Britanija). Postrojenja za spaljivanje čiste biomase u Velikoj Britaniji dobijaju velike finansijske podsticaje kroz šemu podsticaja za obnovljive izvore energije. Dok je infrastruktura za sagorevanje čiste biomase u fazi razvoja, za ko-sagorevanje uglja je već razvijeno nekoliko generatora električne struje u Velikoj Britaniji: Drax (Jorkšir) i Abertaw (Južni Vels). Miskantus se trenutno ko-sagoreva u Drax kotlovima za spršeni ugalj u Velikoj Britaniji a takođe može biti spaljivan u kotlovima sa sagorevanjem u fluidizovanom sloju.

Splithoff i Hein [28] ispitivali su efekte ko-sagorevanja miskantusa, slame i otpadnog komunalnog mulja zajedno sa kamenim ugljem kao primarnim gorivom u kotlovima za spršeni ugalj. Oni su utvrdili da se sa dodatkom miskantusa, slame i drveta smanjuje emisija SO₂. Collura i sar. [29] ispitivali su sagorevanje slame i peleta *Miscanthus×giganteus*- koristeći kotlove od 25 i 60 kW. Oni su pokazali da emisijski faktori za SO₂, NO_x i

ukupan organski ugljenik u otpadnim gasovima zadovoljavaju evropske standard za kotlove na biomasu.

Prinos i karakteristike sagorevanja *Miscanthus×giganteus*

Uočeno je da prinosi miskantusa u značajnoj meri variraju u zavisnosti od lokacije i klimatskih uslova, i da su najveći prinosi zabeleženi u oblastima Južne Evrope kada voda nije bila limitirajući faktor. Zapravo, veliki broj ogledana polju koji je bio sproveden u poslednjoj deceniji pokazao je značajna variranja prinosa suve mase miskantusa, u rasponu od 4–25 t/ha u zemljama centralne Evrope do 30–40 t/ha za Južnoevropske zemlje [4,26,30–36].

Odnos kvantiteta i kvaliteta požnjene biomase miskantusa zavisi od vremena žetve [25]. Zimski gubici (opalo lišće, lišće u procesu raspadanja, vršni delovi stabljike) mogu dovesti do smanjenja suve biomase za 30 do 50% [37], ali sušenje u polju smanjuje i sadržaj vode i mineralnih materija u usevu, što daje čistiju sirovinu za proizvodnju goriva i omogućuje zadržavanje više nutrijenata u zemljištu [38,39]. U Velikoj Britaniji je trenutna praksa da se žetva miskantusa odlaže za kasni zimski period ili rano proleće, što vodi smanjenju sadržaja vlage, pepela i alkalnih metala u suvoj masi [40]. Sadržaj mineralnih materija u biomasi miskantusa je mali u poređenju sa pšeničnom slamom, ali veći nego što je zabeleženo u biomasi poreklom od brzorastućih vrba ili topola. Prema Lewandowskom i Kičereru [26] sadržaj minerala je najmanji u vreme ranoprolećne žetve: 0,09–0,34% N; 0,37–1,12% K; 0,03–0,21% Cl i 1,6–4,0% pepela. Sastav pepela miskantusa uključuje približno 30–40% SiO₂, 20–25% K₂O, 5% P₂O₅, 5% CaO, i 5% MgO – opseg vrednosti iz različitih studija [41,42].

Nedostatak sagorevanja miskantusa je niska tačka topljenja pepela iz biomase koja je verovatno posledica istovremenog prisustva visoke koncentracije Si, K i Ca. Sinterovanje pepela nije ništa lošije u poređenju sa pepelom drugih biomasa (recimo pšenične slame), a u poređenju sa trskom kanarinkom (*Phalaris arundinacea*, engl. *reed canary grass*) i vrbom (pepeo vrba je inertan do 900 °C) sinterovanje je lošije, jer pepeo mis-

kantusa pokazuje tendencije sinterovanja na temperaturama manjim od 600 °C. Sadržaj K je značajno viši u listovima nego u stabljici a takođe u zelenim biljkama u toku rasta nego u osušenim, kada je rast završen. Dakle, poljoprivredne strategije čiji je cilj smanjenje udela lisne komponente (npr. odlaganjem vremena žetve) mogu u značajnoj meri da poboljšaju podobnost biomase za postojeća postrojenja za sagorevanje [43].

Mogućnosti korišćenja biomase za proizvodnju bioetanola

Proizvodnja bioetanola iz biomase je jedan od načina za smanjenje potrošnje nafte i zagađenja životne sredine. Kao zamena za benzin, bioetanol ima izuzetan potencijal s obzirom na to da već postoji distributivni sistem za tečna goriva i da motori savremenih automobila mogu raditi sa do 10% bioetanola. Trenutno se na komercijalnoj skali sva biogoriva proizvode tehnologijom „prve generacije“. To zahteva visoku cenu nabavke useva na bazi skroba/saharaze i ulja kao njihovih sirovina. Drugi problem leži u tome što je biljna biomasa koja služi za proizvodnju bioetanola prve generacije takođe i izvor hrane za ljudsku ishranu i ishranu životinja: žitarice (npr. pšenica, kukuruz, ječam, raž) i šećerni usevi (šećerna trska, šećerna repa i slatki sirak). Takvi usevi mogu biti štetni po zemljište i imati nepovoljan energetski odnos (output/input). Bioetanol druge generacije koji može biti proizveden iz različitih lignoceluloznih materijala, kao što su poljoprivredni ostaci (npr. pšenična slama, otpaci iz prerade šećerne trske, kukurozovina), šumski produkti (tvrdo i meko drvo), i namenski usevi (miskantus, proso trava, vrba, konoplja), ima potencijal da bude zamena za benzin ili, pak, može koristiti samo kao dodatak benzinu. Dugoročno gledano, predviđa se da će se ubuduće proizvodnja bioetanola zasnivati uglavnom na lignoceluloznim sirovinama, prvenstveno imajući u vidu njihovu izobilje za razliku od dostupnih sirovina koje su bogate skrobom i prostim šećerima [44,45]. U tabeli 3 su date vrednosti očekivanih (druga generacija) i realnih (prva generacija) prinosa biogoriva kao i procenjena redukcija emisije CO₂ [46]. Još jedna od prednosti proizvodnje

Tabela 3. Opseg projektovanih prinosa bioetanola i smanjenja emisije gasova staklene bašte za izvore biogoriva prve i druge generacije biogoriva [46]

Table 3. Range of projected bioethanol yields and reductions in GHG emissions for first- (1st) and second- (2nd) generation biofuel sources [46]

Usev (komponenta, generacija)	Projektovani prinos bioetanola, L ha ⁻¹ god ⁻¹	Projektovano smanjenje emisije GHG ^a , %
Kukuruz (zrno, I)	5200–5400	30–45
Miskantus (celulozna biomasa, II)	7000–7393	35–75
Šećerna trska (šećerni sok, I)	6797–8134	60–85
Slatki sirak (šećerni sok, I)	2524–7012	25–35
Svičgras (celulozna biomasa, II)	3085–7573	35–75

^aPredstavlja moguće redukcije koncentracije CO₂ u atmosferi uzimajući u obzir ugljenik u biomasi (iznad i ispod zemlje), smanjenje agronomskih ulaganja (oranje, gorivo, sadnja i prihranjivanje) u poređenju sa tradicionalnim gajenjem useva

biogoriva bazirane na upotrebi lignoceluloznih useva zasniava se na izbegavanju konkurencije sa proizvodnjom prehrambenih useva, s obzirom na to da se lingocelulozni usevi (npr. proso trava, miskantus, vrba i topola, itd.) mogu uzgajati i na marginalnim zemljištima neadekvatnim za produkciju useva namenjenih ishrani ljudi ili životinja [47]. Zahvaljujući visokom sadržaju celuloze i visokom prinosu biomase, miskantus bi se mogao koristiti za proizvodnju bioetanol. Celuloza i hemiceluloza se mogu enzimskim procesima hidrolizovati do fermentabilnih šećera koji se zatim fermentacijom prevode u bioetanol.

Uočeno je da visok sadržaj lignina ima inhibitorski efekat na procese biološke konverzije kao što su fermentacija i anaerobna digestija shodno povećanoj otpornosti na mikrobiološku razgradnju. Lygin i sar. [48] utvrdili su da sadržaj lignina i odnosi između sadržaja lignin/celuloza i celuloza/ksilan mogu biti odlučujući faktori koji ukazuju na mogućnost razgradnje biomase miskantusa. Oni su zaključili da uzgoj i selekcija genotipova miskantusa sa smanjenim sadržajem lignina mogu u perspektivi pospešiti veću proizvodnju biomase i veću efikasnost konverzije biomase radi dobijanja što većih količina biogoriva po jedinici površine.

Kako lignocelulozna biomasa prirodno ne podleže enzimskoj hidrolizi, neophodan je predtretman kako bi se pospešila njena podložnost enzimskim procesima i bilo moguće dobijanje fermentabilnih šećera. Tokom poslednjih godina razvijen je veliki broj fizičkih, hemijskih i enzimskih predtretmana, a njihove prednosti i nedostaci prikazani su u tabeli 4 [44,49]. Postupak predtretmana je i dalje jedan od najskupljih koraka, zbog čega je i proizvodnja bioetanol iz lignocelulozne biomase tehnološki zahtevnija i znatno skuplja. Izbor tehnologije za predtretman određene biomase zavisi od njenog sastava i nusprodukata nastalih kao rezultat predtretmana. Ključna pitanja koja se odnose na proces predtretmana lignocelulozne biomase su sledeća: 1) optimizacija procesa hidrolize hemiceluloze tako što će se ograničiti njeno razlaganje do furana, koji deluju kao inhibitori fermentacije; 2) smanjivanje kristalčnosti celuloze, tj. povećavanje reaktivnosti celuloze; 3) izbegavanje razlaganja i rekondenzacija lignin; 4) razvijanje procesa koji može biti primenjen na pilot, demonstrativnom i komercijalnom nivou [50,51].

Publikovan je veoma mali broj studija koje se odnose na predtretman i enzimsku hidrolizu miskantusa u postupku proizvodnje bioetanol. Primenjeni predtretmani do sada za biomasu miskantusa su ekspanzija

Tabela 4. Pregled različitih procesa koji se koriste za pripreme lignocelulozne biomase [44,49]

Table 4. Summary of various processes used for the pretreatment of lignocellulosic biomass [44,49]

Predtretman	Prednosti	Ograničenja i nedostaci
Mehaničko sitnjenje	Smanjuje se stepen kristalčnosti celuloze, ne koriste se hemikalije u procesu	Veliki utrošak energije, postupak nije ekonomski isplativ
Eksplozija pod dejstvom vodene pare	Dovodi do razlaganja hemiceluloze i transformacije lignina; ekonomski isplativ	Delimična destrukcija frakcije ksilana; nepotpuno razaranje matriksa lignin-ugljeni hidrati; izdvajaju se jedinjenja koja inhibiraju mikroorganizme
Eksplozija u prisustvu amonijaka	Povećava se specifična površina i poroznost celuloze, ne izdvajaju se inhibitori za dalje procese prerade	Lignin i hemiceluloza se delimično uklanjaju; nije podesna za biomasu sa visokim sadržajem lignina; amonijak se mora reciklirati zbog uštede i zaštite životne sredine
Eksplozija u prisustvu CO ₂	Povećava se specifična površina; natkritični CO ₂ jeftin, netoksičan, ne formiraju se inhibitori za dalje procese prerade	Ne modifikuje lignin i hemicelulozu; skup proces za industrijsku primenu
Ozonoliza	Efikasno razlaže lignin i deo hemiceluloze; obično se vrši na sobnoj temperature; ne formiraju se toksična jedinjenja	Potrebna velika količina ozona; skup postupak
Kisela hidroliza	Hidrolizuje se hemiceluloza do ksiloze i drugih šećera; menja se struktura lignina	Skup postupak; korozija opreme; formiranje toksičnih supstanci
Bazna hidroliza	Uklanjanje hemiceluloza i lignina; povećava se specifična površina	Dugo vreme trajanja procesa; formiraju se soli i inkorporiraju se u biomasu
Predtretman organskim rastvaračima	Lignin se dobija kao nus-proizvod	Rastvarači treba da se uklone iz reaktora, i recikliraju; visoka cena postupka
Piroliza	Dobijaju se gasoviti i tečni produkti	Visoka temperatura; produkcija pepela
Pulsirajuće električno polje	Normalni uslovi; razara biljne ćelije; jednostavna oprema	Proces zahteva dalja ispitivanja i istraživanja
Biološki predtretman	Razlaganje lignina i hemiceluloze; mali utrošak energije; ne koriste se hemikalije	Brzina hidrolize je mala, spor proces

vlakana amonijakom [52], predtretman sa razblaženom sumpornom kiselinom kombinovan sa predtretmanom sa organskim rastvaračem (etanol) [50,51] predtretman sa razblaženom sumpornom kiselinom kombinovan sa eksplozijom pod uticajem vodene pare [24].

OSTALE MOGUĆNOSTI PRIMENE MISKANTUSA

Sve veći broj publikacija i naučnih radova o miskantusu u proteklim godinama govori o sve većem interesovanju, istraživanju i komercijalnoj primeni ovog useva. Osim njegove direktne primene za proizvodnju energije i biogoriva, *Miscanthus×giganteus* se može koristiti za dobijanje širokog spektra proizvoda kao što su: papirna pulpa, građevinski materijal, geotekstil, vlaknaste ploče, derivati celuloze, itd. [4]. Međutim, potrebna su dalja istraživanja kako bi se tehnologije obrade miskantusa usavršavale, vršiti selekciju novih varijeteta i osigurati tržište za različite proizvode. U tabeli 5 dat je pregled mogućih primena miskantusa [27].

Građevinski materijal

Miskantus predstavlja predmet interesovanja kao izvor vlakana koji se koriste za proizvodnju građevinskog materijala. Harvi i Hačins [53] istraživali su mogućnost upotrebe miskantusa u proizvodnju vlaknaste ploče srednje gustine (medijapan, engl. *medium density fibreboard* – MDF). Oni su potvrdili da je vlaknasta struktura miskantusa posebno pogodna za proizvodnju medijapana. Uočili su da se uzorak medijapana dobijenog od miskantusa mogao uporediti sa onim dobijenim od komadića drveta. Međutim, postojeći šumski otpad je jeftiniji izvor sirovina i komercijalno održiviji u odnosu na miskantus ili konoplju koji se mogu koristiti za

proizvodnju vlaknaste ploče.

Materijali poznati kao LNS (light natural sandwich) laki su građevinski materijali koji se koriste za ravne i profilisane strukturne elemente. Ove materijale odlikuje visoka stabilnost oblika i zbog toga imaju različitu primenu. Pretpostavlja se da ovi materijali u bliskoj budućnosti mogu zameniti sadašnje proizvode na tržištu koji su bazirani većinom na PVC, poliuretanu ili aluminijumu. Korišćenje miskantusa kao materijala od koga se pravi jezgro LNS materijala je pokazano u Nemačkoj [27], a istraživanje razvoja LNS od miskantusa je podržano od strane Evropske komisije na projektu FAIR5-CT97-3784. Evropska unija je 1992. godine podržala demonstracioni projekat koji proučava korišćenje miskantusa u proizvodnji panel ploča i građevinskih blokova [54].

Miskantus se koristi kao materijal za izgradnju krovova tradicionalnih kuća i zgrada u Japanu. Miskantus kao prirodni građevinski materijal se primenjuje i u Danskoj, gde se koristi kao zamena ili dopuna tradicionalnom korišćenju trske (*Phragmites*). Zbog velike potražnje za trskom u Danskoj tokom 1995–1996 realizovan je projekat sa ciljem komercijalizacije korišćenja slame miskantusa kao građevinskog materijala. Zaključak projekta je bio da samo varijetet miskantusa *Miscanthus sinensis* može biti korišćen i do sada je oko 30 ha u Danskoj izdvojeno za gajenje *Miscanthus sinensis*.

Kompostiranje

Vlakna miskantusa mogu biti korišćena kao sirovina za proizvodnju komposta. Jensen i sar. [55] utvrdili su da je na kompostiranom substratu miskantusa (*Miscanthus ogiformis*) dobro rastao bršljen (*Hedera helix*). Wethje [56] ispitivao je fizičke karakteristike komposta na

Tabela 5. Potencijalna primena miskantusa [27]

Table 5. Potential uses of *Miscanthus* [27]

Upotreba	Kratak opis
Građevinski materijali, Vlaknaste ploče srednje gustine, medijapan (MDF), Panel ploče i građevinski blokovi, Lake sendvič ploče (LNS), Šperploče, Slamnate kuće i zgrade	Miskantus je poznat po svojoj jačini i maloj težini i koristi se za razne potrebe u građevinarstvu. Više istraživanja koja se odnose na razvoj varijeteta sa boljim kvalitetom stabljika je potrebno. <i>Miscanthus sinensis</i> je zahvaljujući tanjim i manjim stabljikama pogodniji za ozgradnju slamnatih kuća nego <i>M. giganteus</i> .
Kompostiranje	Kompost na bazi miskantusa može da se koristi kao efikasno đubrivo, ali problemi se mogu javiti sa visokim koncentracijama kadmijuma i hroma koje miskantus akumulira.
Bioremedijacija	Miskantus se može gajiti na kontaminiranom zemljištu teškim metalima i toksičnim organskim supstancama. Studije u Velikoj Britaniji i Portugalu pokazale su da visoke koncentracije teških metala redukuju prinos miskantusa, ali je moguće koristiti ga kao energetski izvor.
Proizvodnja papirne pulpe	Visok sadržaj celuloze u miskantusu čini ga pogodnim za proizvodnju papira.
Produkti fermentacije	Miskantus može da se koristi kao sirovina za proizvodnju fermentabilnih rastvora pentozna šećera.
Đubriva	Pepeo od sagorevanja miskantusa može imati upotrebu kao đubrivo.

bazi miskantusa. Tom prilikom je utvrđeno da medijum komposta dobijenog od miskantusa ima malu ukupnu gustinu, visoku vazдушnu poroznost i visok koeficijent difuzije kiseonika u poređenju sa tresetom, što zahteva dalja istraživanja pre nego što započne njegova primena kao alternative za treset.

Proizvodnja papirne pulpe

Dobijanje papirne pulpe je u stvari proces delignifikacije, pri čemu se lignin hemijski rastvara što omogućava separaciju vlakana iz sirovine. Komercijalna proizvodnja pulpe iz nedrvenih resursa procenjena je na 6,5% od ukupne proizvodnje pulpe sa tendencijom daljeg rasta. Narodna Republika Kina proizvodi 77% svetске nedrvne pulpe.

Varijetet *Miscanthus sacchariflorus* je glavna sirovina u proizvodnji papira u Narodnoj Republici Kini. Pored toga, u Evropskim zemljama vršena su brojna istraživanja o mogućoj proizvodnji papirne pulpe korišćenjem vrste *Miscanthus×giganteus* [21,57,58]. Danas je upotreba vlakana iz nedrvenih useva u proizvodnji papirne pulpe u Evropi manja od 1% ukupne proizvodnje. Papirna pulpa poreklom iz nedrvenih useva se uglavnom proizvodi u zemljama u razvoju, a sirovine koje se najčešće koriste su slama, otpaci iz prerade šećerne trske i bambusa.

Produkti fermentacije

Kao rezultat komparativne studije na zelenim biljkama požnjevenim u septembru i suvih biljaka obranih u martu, analiziran je hemijski sastav listova i stabljike vrste *Miscanthus sinensis* [59]. Analizom lipofilnih i hidrofilnih komponenti pokazano je da su zelene biljke sadržale veće količine glicerida i drugih masnih estara nego suve biljke. Dominantne masne kiseline su linolna, linolenska i palmitinska kiselina. Sadržaj D-saharoze, D-glukoze i D-fruktoze u zelenim biljkama je takođe veći nego u suvim uzorcima. Listovi suvih biljaka imaju manji sadržaj ovih komponenti što je posledica procesa starenja i opadanja lišća tokom zimskog perioda. Zelene stabljike bile su posebno bogate rastvorljivim šećerima. Zbog visokog sadržaja celuloze, šećera i lignina, procenjeno je da *Miscanthus sinensis* može biti adekvatna sirovina za proizvodnju pentoznih šećera.

Đubriva

Još neke od primena koje do sada nisu pomenute jesu upotreba vlakana miskantusa za proizvodnju geotekstila, štapova za ukrasne biljke kao i upotreba pepela miskantusa nakon sagorevanja kao đubriva [27]. Kvalitet i kvantitet pepela biomase zavise od velikog broja faktora uključujući vrstu biljke koja se koristi, deo biljke koji se koristi, uslove rasta, đubrenje, izbor termina žetve, žetvene tehnike i sisteme za konverziju.

Bioremedijacija

Ogledna područja zasnovana sa miskantusom mogu biti od velikog značaja za životnu sredinu delujući kao dobar absorbent za otpadne vode i neke industrijske efluente. Takođe, zasnivanje ovakvih oglednih polja na zagađenom zemljištu može doprineti redukciji disperzije zagađenja u vazduh i ispranja zagađujućih materija u dublje zemljišne slojeve, erozije zemljišta, poboljšanju vizuelnog efekta i može obezbediti prirodno stanište za divlje životinje.

BioReNew projektom (www.bioregen.eu) finansiranim od strane Evropskih fondova ispitivan je potencijal bioenergetskih useva za bioremedijaciju i ekonomsku obnovu područja degradiranih industrijskim aktivnostima [60]. Glavni cilj ovog projekta bio je razvoj sistema za obnovu zemljišta zagađenog teškim metalima upotrebom bioenergetskih useva, što bi u značajnoj meri bilo korisno za očuvanje životne sredine i doprinelo ekonomskoj obnovi područja izmenjenih pod uticajem industrije. Bilo je brojnih pokušaja da se to potvrdi, korišćenjem vrsta roda *Salix*, *Phalaris* i *Eucalyptus* u Velikoj Britaniji, Švedskoj i Španiji, pri čemu je za usvajanje teških metala izabrano 150 klonova *Salix* vrsta, 20 klonova *Phalaris* vrsta i 10 vrsta *Miscanthus*. Takođe, u Engleskoj je BioReGen projektom pokazano da bioenergetski usevi mogu da rastu na degradiranim zemljištima sa različitim stepenom kontaminacije. Zasnovane su dve eksperimentalne parcele na kojima su zasađene reznice vrbe (varijetet Tora), miskantus (*Miscanthus×giganteus*), crvena trska i svičgras (engl. *switchgrass*, varijetet *Cave-in-rock*). Braunfild lokacija je originalno bila kop gline za proizvodnju cigle koji je kasnije tokom 50 godina popunjavao sa pepelom poreklom od uglja koji je sagorevan u domaćinstvima, otpadom iz domaćinstva i ostacima od spaljivanja otpada. Nivo kontaminacije teškim metalima i arsenom kretao se u opsegu: Zn (400–1000 ppm), Cu (100–500 ppm), Ni (100–200 ppm), Pb (300–2000 ppm) i As (50–200 ppm) koji mogu značajno da utiču na ljudsko zdravlje. Pokazano je da miskantus može uspešno da raste na kontaminiranom zemljištu, bez obzira što visoke koncentracije teških metala mogu redukovati produktivnost useva. Karakteristično je da se većina teških metala akumulira u korenu i rizomima, a ređe u nadzemnim organima biljke [60].

Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije i Elektroprivreda Srbije podržali su projekat TR 31078 (od 2011. do 2014.), koji ima za cilj da ispita potencijal rasta vrste *Miscanthus×giganteus* na degradiranom prostoru i mogućnosti bioremedijacije takvih područja.

ZAKLJUČAK

Zbog porasta potražnje za obnovljivim izvorima energije, namenski gajeni usevi kao što su vrbe (*Salix*

sp.), topole (*Poplar* sp.), miskantus (*Miscanthus* sp.) i svičgras (*Panicum virgatum*) masovno se uzgajaju širom Evrope. Najvažniji genotip miskantusa koji se koristi za proizvodnju biomase u Evropi je *Miscanthus×giganteus*, stvoren ukrštanjem *Miscanthus sacchariflorus* i *Miscanthus sinensis*. Biološki ciklus *Miscanthus×giganteus* počinje sadnjom rizoma u aprilu (kada prestane opasnost od kasnih mrazeva). Da bi se obezbedio dobar kvalitet biomase za sagorevanje praksa je da se žetva miskantusa odloži na kraj zime/početak proleća, čime se smanjuje sadržaj vlage, pepela, nutrienata i minerala. Smanjenje prinosa biomase zbog odložene žetve iznosi oko 30%. *Miscanthus×giganteus* ima toplotnu moć od 17 MJ/kg sa 2,7% pepela. Ovaj višegodišnji energetski usev ima visok prinos po hektaru, a punu zrelost dostiže u periodu od treće do pete godine nakon sadnje sa maksimalnim prinosom u jesen od 10 do 30 t suve materije/ha god. Pored toga, ovaj lignocelulozni usev karakteriše jednostavna kultivacija i žetva, visok sadržaj celuloze i visoka otpornost na bolesti i štetočine. Zbog sposobnosti translokacije minerala i nutrienata iz nadzemnih delova u rizom, od septembra do marta, *Miscanthus×giganteus* se odlikuje izuzetnom efikasnošću korišćenja nutrienata i može da proizvodi velike količine biomase preko 15 godina bez dodavanja đubriva, čime se značajno smanjuju finansijski inputi, u poređenju sa kultivacijom jednogodišnjih energetskih useva kao što je kukuruz. Biomasa *Miscanthus×giganteus* ima dobar kvalitet sagorevanja zbog niskog sadržaja vlage, kao i zbog niskog sadržaja Cl, K, N, S i pepela u poređenju sa ostalim lignoceluloznim usevima. Osim korišćenja biomase miskantusa za proizvodnju električne i toplotne energije, miskantus se proučava kao sirovina za proizvodnju bioetanola. Pojedine kompanije u SAD, Kanadi i Španiji tek počinju da grade prva komercionalna postrojenja koja bi proizvodila bioetanol iz lignocelulozne biomase. Prednost miskantusa u poređenju sa drugim sirovinama za proizvodnju bioetanola, kao što su žetveni ostaci poljoprivrednih kultura (kukuruzovina, slama), u tome je što se miskantus može gajiti na zagađenom ili degradiranom zemljištu, nepodesnom za druge useve. Potencijalna industrijska primena biomase miskantusa uključuje proizvodnju papirne pulpe, građevinskih materijala, dobijanje komposta, hemikalija kao i bioremedijaciju kontaminiranog zemljišta i vode.

Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije (projekat TR 31078) i Elektroprivrede Srbije.

LITERATURA

[1] M. Khanna, B. Dhungana, J. Clifton-Brown, Costs of producing miscanthus and switchgrass for bioenergy in Illinois, *Biomass Bioenerg.* **32** (2008) 482–493.

- [2] R.B. Gupta, A. Demirbas, Gasoline, Diesel and Ethanol Biofuels from Grasses and Plants, Cambridge University Press, New York, 2010.
- [3] E.A. Heaton, F.G. Dohleman, S.P. Long, Meeting US biofuel goals with less land: the potential of *Miscanthus*, *Glob. Chang. Biol.* **14** (2008) 2000–2014.
- [4] I. Lewandowski, J.C. Clifton-Brown, J.M.O. Scurlock, W. Huisman, *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop, *Biomass Bioenerg.* **19** (2000) 209–227.
- [5] G. Dražić, J. Milovanović, J. Ikanović, Đ. Glamočlija, Impacts of agroecological factors on the biomass production of giant miscanthus (*Miscanthus giganteus*), *J. Sci. Agric. Research* **71** (2010) 81–85.
- [6] G. Dražić, N. Mihailović Ž. Dželetović, J. Šinžar, B. Stevanović, Annual water and nitrogen dynamics in the whole plant of *Miscanthus giganteus*, III International Symposium of Ecologists of the Republic of Montenegro, Herceg Novi, 2008, str. 171.
- [7] G. Dražić, Ž. Dželetović, A. Đorđević, Environmental impact on *Miscanthus giganteus* biomass quality measured as ecosystem processor activity, The Second International Environmental Best Practice Conference, Krakow, 2009, p. 44.
- [8] Defra, Planting and growing *Miscanthus*. Best Practice Guidelines (for Applicants to Defra's Energy Crops Scheme), 2007.
- [9] Ž. Dželetović, G. Dražić, S. Blagojević, N. Mihailović, Specifični agrotehnički uslovi gajenja miskantusa, *Polj. Teh.* **31** (2006) 107–115.
- [10] G. Dražić, N. Mihailović, Ž. Dželetović, *Miscanthus* may prove to be valuable fuel source, Simpozium Power Plants, Vrnjačka banja, 2006, str. 19.
- [11] N. Babović, Ž. Dželetović, A. Đorđević, G. Dražić, Uticaj veličine rizoma na dinamiku rasta *Miscanthus×giganteus*, VI Naučno-stručni simpozijum iz selekcije i semnarstva, Vršac, 2010, str. 98.
- [12] S. C. de Vries, G. W. J. van de Ven, M. K. van Ittersum, K. E. Giller, Resource use efficiency and environmental performance of nine major biofuel crops, processed by first-generation, conversion techniques, *Biomass Bioenerg.* **34** (2010) 588–601.
- [13] E. Krasuska, H. Rosenqvist, Economics of energy crops in Poland today and in the future, *Biomass Bioenerg.*, in press, doi:10.1016/j.biombioe. 2011.09.011
- [14] M. Brandao, L. Mila, Canals, R. Clift, Soil organic carbon changes in the cultivation of energy crops: Implications for GHG balances and soil quality for use in LCA, *Biomass Bioenerg.* **35** (2011) 2323–2336.
- [15] D. Tilman, J. Hill, C. Lehman, Carbon-negative biofuels from lowinput high-diversity grassland biomass, *Science* **314** (2006) 1598–1600.
- [16] M.R. Schmer, K.P. Vogel, R.B. Mitchell, R.K. Perrin, Net energy of cellulosic ethanol from switchgrass, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105** (2008) 464–469.
- [17] L.R. Lynd, C.E. Wyman, T.U. Gerngross, Biocommodity engineering, *Biotechnol. Prog* **15** (1999) 777–793.
- [18] A. Demirbas, *Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities*, Springer, 2009, p. 79.

- [19] C. Somerville, H. Youngs, C. Taylor, S.C. Davis, S.P. Long, Feedstocks for lignocellulosic biofuels, *Science* **329** (2010) 790–792.
- [20] D.G. Christian, A.B. Riche, N.E. Yates, Growth, yield and mineral content of *Miscanthus x giganteus* grown as a biofuel for 14 successive harvests, *Ind. Crop. Prod.* **28** (2008) 320–327.
- [21] J.J. Villaverde, P. Ligerio, A. de Vega, *Miscanthusxgiganteus* as a source of biobased products through organosolv fractionation: A mini review, *Open Agric. J.* **4** (2010) 102–110.
- [22] M. Han, G.W. Choi, Y. Kim, B.C. Koo, Bioethanol production by *Miscanthus* as a lignocellulosic biomass: Focus on high efficiency conversion to glucose and ethanol, *Bio Res.* **6** (2011) 1939–1953.
- [23] T. de Vrije, G.G. de Hass, G.B. Tan, E.R.P. Keijsers, P.A.M. Claassen, Pretreatment of *Miscanthus* for hydrogen production by *Thermotoga elfii*, *Int. J. Hydrogen Energ.* **27** (2002) 1381–1390.
- [24] A. Sørensen, P.H. Teller, T. Hilstrøm, B.K. Ahring, Hydrolysis of *Miscanthus* for bioethanol production using dilute acid presoaking combined with wet explosion pre-treatment and enzymatic treatment, *Bioresource Technol.* **99** (2008) 6602–6607.
- [25] AEBIOM, European Biomass Statistics, 2007.
- [26] I. Lewandowski, A. Kicherer, Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthusxgiganteus*, *Eur. J. Agron.* **6** (1997) 163–177.
- [27] M.B. Jones, M. Walsh, *Miscanthus for Energy and Fibre*, Earthscan, London, 2007.
- [28] H. Spliethoff, K.R.G. Hein, Effect of co-combustion of biomass on emissions in pulverized fuel furnaces, *Fuel Process. Technol.* **54** (1998) 189–205.
- [29] S. Collura, B. Azambre, G. Finqueneisel, T. Zimny, J.V. Weber, *Miscanthusxgiganteus* straw and pellets as sustainable fuels, Combustion and emission tests, *Environ. Chem. Lett.* **4** (2006) 75–78.
- [30] H. Schwarz, P. Liebhard, K. Ehrendorfer, P. Ruckebauer, The effect of fertilization on yield and quality of *Miscanthus sinensis* “*giganteus*”, *Ind. Crop. Prod.* **2** (1994) 153–159.
- [31] U. Jorgensen, Genotypic variation in dry matter accumulation and content of N, K and Cl in *Miscanthus* in Denmark, *Biomass Bioenerg.* **12** (1997) 155–169.
- [32] M. Christou, D. Papavassiliou, E. Alexopoulou, A. Chatzathanassiou, Comparative studies of two potential energy crops in Greece, 10th European Bioenergy Conference, Wurzburg, 1998, pp. 935–938.
- [33] M. Acaroglu, A.S. Aksoy, Third year growing results of C4 energy plant *Miscanthus sinensis* in producing energy from biomass, 10th European Bioenergy Conference, Wurzburg, 1998, pp. 758–759.
- [34] M. Bao Iglesias, R.J.L. Rodriguez, R.I. Crespo, J. Lamas, *Miscanthus sinensis* plantations in Galicia, north-west Spain: results and experience over the last three years, 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, 1996, pp. 608–612.
- [35] L. Price, M. Bullard, H. Lyons, S. Anthony, P. Nixon, Identifying the yield potential of *Miscanthusxgiganteus*: an assessment of the spatial and temporal variability of *M.xgiganteus* biomass productivity across England and Wales, *Biomass Bioenerg.* **26** (2004) 3–13.
- [36] G. Dražić, S. Sekulić, J. Milovanović, J. Aleksić, Master plan plantaže energetskog useva *Miscanthus x giganteus*, *Energ. Ekon. Ekol.* **2** (2010) 96–99.
- [37] U. Jorgensen, B. Sander, Biomass requirements for power production: How to optimise the quality by agricultural management, *Biomass Bioenerg.* **12** (1997) 145–147.
- [38] Ž. Dželetović, N. Mihailović, Đ. Glamočlija, G. Dražić, G., Odložena žetva *Miscanthusxgiganteus* – uticaj na kvalitet i količinu obrazovane biomase, *PTEP* **13** (2009a) 170–173.
- [39] Ž. Dželetović, N. Mihailović, Đ. Glamočlija, G. Dražić, Žetva i skladištenje *Miscanthusxgiganteus* Greef et Deu., *Polj. Teh.* **34** (2009b) 9–16.
- [40] I. Lewandowski, J.C. Clifton-Brown, B. Andersson, G. Basch, D.G. Christian, U. Jorgensen, M.B. Jones, A.B. Riche, K.U. Schwarz, K. Tayebi, F. Teixeira, Environment and harvest time affects the combustion qualities of *Miscanthus* genotypes, *Agron. J.* **95** (2003) 1274–1280.
- [41] A. Moilanen, M. Nieminen, K. Sipilä, E. Kurkela, Ash behavior in thermal fluidizedbed conversion processes of woody and herbaceous biomass, 9th European Bioenergy Conference, Copenhagen, 1996, 1227–1232.
- [42] A. L. Hallgren, J. Oskarsson, Minimization of sintering tendencies in fluidized-bed gasification of energy crop fuels, 10th European Bioenergy Conference, Wurzburg, 1998, 1700–1703.
- [43] A. Monti, N. Di Virgilio, G. Venturi, Mineral composition and ash content of six major energy crops, *Biomass Bioenerg.* **32** (2008) 216–223.
- [44] V.V. Semenčenko, Lj.V. Mojović, S.D. Petrović, O.J. Očić, Novi trendovi u proizvodnji bioetanola, *Hem. ind.* **65** (2011) 103–114.
- [45] Z.J. Predojević, Postupci pripreme lignocelulozne sirovine za dobijanje bioetanola, *Hem. ind.* **64** (2010) 283–293.
- [46] R. Lemus, D.J. Parrish, Herbaceous crops with potential for biofuel production in the USA, *CAB Reviews: Persp. Agr. Veter. Sci. Nutr. Nat. Res.* **4** (2009) 1–23.
- [47] Ž. Dželetović, G. Dražić, Đ. Glamočlija, N. Mihailović, Perspektive upotrebe biljaka kao bioenergetskih useva, *Polj. Teh.* **32** (2007) 59–67.
- [48] A.V. Lygin, J. Upton, F.G. Dohleman, J. Juvik, O.A. Zabolina, J.M. Widholm, V.V. Lozovaya, Composition of cell wall phenolics and polysaccharides of the potential bioenergy crop – *Miscanthus*, *GCB Bioenergy* **3** (2011) 333–345.
- [49] P. Kumar, D.M. Barrett, M.J. Delwiche, P. Stroeve, Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production, *Ind. Eng. Chem. Res.* **48** (2009) 3713–3729.
- [50] N. Brosse, P. Sannigrahi, A. Ragauskas, Pretreatment of *Miscanthusxgiganteus* using the ethanol organosolv

- process for ethanol production, *Ind. Eng. Chem. Res.* **48** (2009) 8328–8334.
- [51] N. Brosse, R. El Hage, P. Sannigrahi, A. Ragauskas, Dilute sulphuric acid and ethanol organosolv pretreatment of *Miscanthus×Giganteus*. *Cell. Chem. Technol.* **44** (2010) 71–78.
- [52] H.K. Murnen, V. Balan, S.P.S. Chundawat, B. Bals, L. da Costa Sousa, B. E. Dale, Optimization of ammonia fiber expansion (AFEX) pretreatment and enzymatic hydrolysis of *Miscanthus x giganteus* to fermentable sugars, *Biotechnol. Progr.* **23** (2007) 846–850.
- [53] J. Harvey, M. Hutchens, M. Progress in commercial development of *Miscanthus* in England, 8th EC Conference, Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry, Oxford, 1995, pp. 587–593.
- [54] C.L. Mangan, Non-food crops and non-food uses in EC research programmes, 7th EC Conference, Biomass for Energy, Environment, Agriculture and Industry, Bochum, 1994, pp. 341–347.
- [55] H.E. Kresten Jensen, M. Leth, J.J. Lonsmann Iversen, Growth of *Hedera helix* L. container plants in compost substrates made with *Miscanthus ogiformis* Honda straw and various N-sources, *Comp. Sci. Util.* **9** (2001) 206–214.
- [56] C.A. Wethje, Physical characteristics of *Miscanthus ogiformis* composts compared to peat and wood fiber growth substrates, *Compost Sci. Util.* **12** (2004) 219–224.
- [57] J.J. Villaverde, P. Ligerio, A. de Vega, Bleaching *Miscanthus x giganteus* Acetosolv pulps with hydrogen peroxide/acetic acid. Part 1: Behaviour in aqueous alkaline media, *Bioresource Technol.* **100** (2009) 4731–4735.
- [58] P. Cappelletto, F. Mongardini, B. Barberi, M. Sannibale, M. Brizzi, V. Pignatelli, Papermaking pulps from the fibrous fraction of *Miscanthus×Giganteus*, *Ind. Crop. Product.* **11** (2000) 205–210.
- [59] W. Lange, Extracts of miscanthus grass (*Miscanthus sinensis* Anders.). A comparison of the “summer-green” and the “winter-dry” plant, *Holzforschung* **46** (1992) 277–282.
- [60] C. Britt, J. Garstang, Bioenergy Crops and Bioremediation – a Review, a Contract Report by ADAS for the Department for Food, Environment and Rural Affairs, Final report, 2002.

SUMMARY

POTENTIAL USES OF BIOMASS FROM FAST-GROWING CROP *Miscanthus×giganteus*

Nada V. Babović, Gordana D. Dražić, Ana M. Đorđević

Faculty of Applied Ecology „Futura“, Singidunum University, Belgrade, Serbia

(Review paper)

There is an increasing interest in perennial grasses as a renewable source of bioenergy and feedstock for second-generation cellulosic biofuels. Switchgrass (*Panicum virgatum*) and miscanthus (*Miscanthus×giganteus*), belonging to the perennial grasses group, are the major lignocellulosic materials being studied today as sources for direct energy production, biofuels, bioremediation and other. They have the ability to grow at low cost on marginal land where they will not compete with the traditional food crops. *Miscanthus×giganteus* possesses a number of advantages in comparison with the other potential energy crops such as are: high yields, low moisture content at harvest, high water and nitrogen use efficiencies, low need for annual agronomic inputs such as fertilizers and pesticides, high cellulose content, non-invasive character, low susceptibility to pests and diseases and broad adaptation to temperate growing environments. The main problems are low rate of survival during the first winter after the creation of plantation and the relatively high establishment costs. *Miscanthus×giganteus* is grown primarily for heat and electricity generation but can also be used to produce transport fuels. Miscanthus biomass has a very good combustion quality due to its low water concentration as well as its low Cl, K, N, S and ash concentrations compared to other lignocellulose plants. It is expected that miscanthus will provide cheaper and more sustainable source of cellulose for production of bioethanol than annual crops such as corn. Miscanthus has great promise as a renewable energy source, but it can only be realised when the grass production has been optimised for large-scale commercial cultivation. However, further research is still needed to optimise agronomy of miscanthus, to develop the production chain and pre-treatment as well as to optimise energy conversion route to produce heat, electricity, and/or fuels from biomass, if miscanthus is to compete with fossil fuel use and be widely produced.

Keywords: Energy crops • *Miscanthus×giganteus* • Lignocellulosic biomass • Combustion • Bioethanol