

DARJANA IVETIĆ
MIRJANA ANTOV

Originalni naučni rad
UDC:662.754.008

Bioetanol iz lignocelulozних sirovina: obnovljivi izvori i enzimска tehnologija za održivu proizvodnju energije

Lignocelulozni otpaci poljoprivredne proizvodnje su široko dostupni kao obnovljivi potencijalni izvori sirovina za proizvodnju tečnih biogoriva. Bioetanol proizveden iz obnovljive lignocelulozne sirovine mogao bi da dovede do smanjenja emisije gasova koji izazivaju efekt staklene bašte, ali i energetske krize izazvane ograničenim rezervama fosilnih goriva. Međutim, složena struktura lignocelulozne sirovine predstavlja izvor mnogobrojnih problema u konverziji do bioetanola. Veliki deo njih se odnosi na enzimsku hidrolizu tokom koje se polimeri sirovine, najčešće celuloza, razlažu do jednostavnih šećera. Obezbeđivanje odgovarajuće interakcije između celuloze i celulaza, kao enzimskog kompleksa koji je razgrađuje, je od ključnog značaja za efikasnost enzimске hidrolize, a samim tim i za održivost i ekonomsku isplativost celokupne proizvodnje bioetanola. Zbog toga se slobodno može reći da razumevanje mehanizama enzimске depolimerizacije lignocelulozних materijala, zajedno sa proizvodnjom novih i poboljšanih enzima može obezbediti globalnu upotrebu ove vredne obnovljive sirovine za proizvodnju etanola i osigurati održivu i ekološki prihvatljivu proizvodnju energije.

Ključne reči: bioetanol; lignocelulozna sirovina; enzimска hidroliza

UVOD

Stalni rast svetske populacije kao i sve veća industrijalizacija, motorizacija i urbanizacija čine da potrebe čovečanstva za energijom konstantno rastu. Globalna potrošnja energije iz svih izvora 2008. godine je bila 514 EJ uz tendenciju porasta do 1000 EJ do 2050. godine, ukoliko se nastavi dosadašnji trend ekonomskog rasta. Danas se više od 80% svetske potrebe za energijom obezbeđuje sagorevanjem fosilnih goriva, od čega se 60% sagori u motorima transportnih vozila [1]. Međutim, vrhunac eksploatacije nafte će se, prema predviđanjima, najverovatnije desiti do 2030. godine nakon čega će uslediti opadanje [2]. Prema tome, potrebno je obezbediti alternativne izvore koji će nadomestiti buduću razliku između potrebne energije i energije koju će se dobijati iz fosilnih goriva. Osim toga, težnja razvijenih zemalja da smanje zavisnost od fosilnih goriva, koja uvoze, i zemalja u razvoju za dobijanjem jeftine energije razlog su velikih ulaganja u razvoj alternativnih goriva. Ako se ovome doda i rastuća svest o uticaju sagorevanja fosilnih goriva na životnu sredinu i život na planeti uopšte, uvođenje alternativnih, osim finansijske dobrobiti, trebalo bi da ima i višestruku korist.

Zbog svega ovoga se može reći da bi novi i alternativni izvori energije trebalo da budu obnovljivi, održivi, ekonomski isplativi i ekološki prihvatljivi [1]. Veliki potencijal za ispunjenje ovih uslova ima proizvodnja goriva iz biomase (biogoriva).

Adresa autora: Univerzitet u Novom Sadu, Tehnološki fakultet, Bul. Cara Lazara 1, Novi Sad

Primljeno za publikovanje: 12. 06. 2013.

Prihvaćeno za publikovanje: 11. 09. 2013.

Posebnu pažnju među biogorivima privlači proizvodnja bioetanola, kao jednog od najznačajnijih biogoriva za transportni sektor.

Ovaj rad sagledava mogućnost proizvodnje bioetanola iz lignocelulozних sirovina, s posebnim naglaskom na potencijal upotrebe lignocelulozних sirovina, kao i na značaj enzimске tehnologije u celokupnom procesu konverzije lignoceluloze do etanola.

LIGNOCELULOZNI BIOETANOL

Od ukupne količine energije koja se dobija iz fosilnih goriva, 60% se upotrebi u transportnom sektoru, koji je ujedno odgovoran za više od 70% svetske emisije ugljenik(II)-oksida i 19% svetske emisije ugljenik(IV)-oksida [3], gasova koji najviše doprinose efektu staklene bašte na planeti. Usled toga, obezbeđivanje alternativnog goriva za motorna vozila je jedan od prioriteta istraživanja u oblasti biogoriva.

Danas se većina bioetanola proizvodi iz šećernih sirovina i tako proizveden bioetanol se naziva onim prve generacije. Ovo, međutim, predstavlja problem s aspekta kompeticije sa izvorima hrane i sada, ali pogotovu u budućnosti. Kao posledica toga, razvoj proizvodnje bioetanola u poslednje vreme biva usmeren ka proizvodnji iz nejestivih, lignocelulozних sirovina kroz tehnologije druge generacije (biološke i termohemijske).

Proizvodnja bioetanola iz lignocelulozних sirovina se odvija kroz četiri osnovna koraka – pretходna obrada (eng. *pretreatment*) koja ima zadatak da pripremi lignoceluloznu sirovinu za sledeći proces; proces enzimске hidrolize, tokom koje se polimeri lignocelulozne sirovine prevode u ferment-

tabilne šećere; potom se šećeri nastali enzimskom hidrolizom lignocelulozних polisaharida primenom odgovarajućih mikroorganizama metabolišu do etanola, koji se u poslednjem koraku prečišćava i koncentruje destilacijom [4].

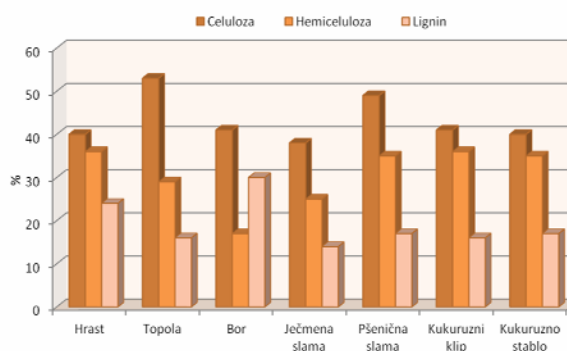
Bioetanol se može mešati sa naftom uz male modifikacije motora sa unutrašnjim sagorevanjem, ili koristiti kao čisto gorivo. Iako 1 litar etanola sadrži 66% energije u odnosu na 1 litar benzina, on ima potpunije sagorevanje čime se smanjuje emisija ugljenik(II)-oksida, nesagorenih ugljovodonika i karcinogenih supstanci. Pored toga, bioetanol sadrži sumpor samo u tragovima, pa se njegovim sagorevanjem značajno smanjuje emisija sumpor(IV)-oksida, glavne komponente kiselih kiša [3]. Na primer, pri prelasku sa benzina na mešavinu benzina sa etanolom sa udelom od 10% (v/v) (E10), emisija gasova staklene bašte se može smanjiti za 15% [5], a mešavina sa 5% etanola se može koristiti bez modifikacije motora [4].

Smatra se da glavne karakteristike lignocelulozних sirovina predstavljaju ključ za smanjenje troškova, potrošnje energije i zagađenja pri korišćenju bioetanola druge generacije [3]. Osim toga, za razliku od fosilnih goriva, lignocelulozne sirovine su ravnomerno raspoređene širom sveta, a njihova upotreba zavisi samo od lokalne dostupnosti i ekonomije [6,7]. Iz ukupno dostupnih lignocelulozних sirovina, koje predstavljaju više od polovine ukupno proizvedene biomase u svetu, godišnje se može dobiti 442 milijarde litara bioetanola [5]. Pri korišćenju bioetanola dobijenog iz šećerne repe i šećerne trske može se smanjiti emisija gasova staklene bašte za 40%, odnosno za 90% [4]. U odnosu na fosilna goriva, smanjenje emisije gasova se ostvaruje i kroz životni ciklus bioetanola. Naime, određena količina ugljenik(IV)-oksida, koja se emituje u atmosferu pri sagorevanju, je bila fiksirana u procesu fotosinteze koji se odvijao u biljkama iz koje se gorivo dobilo [8].

KARAKTERISTIKE LIGNOCELULOZNE SIROVINE – PREDNOSTI I OGRANIČENJA

Lignocelulozne sirovine obuhvataju šumski i poljoprivredni otpad, kao i različite vrste trava, odnosno nejestive biljke ili njihove delove. Lignocelulozne sirovine su najrasprostranjeniji tip biomase na svetu, sa godišnjom proizvodnjom od 10^{10} Mt [9]. Iako lignocelulozne sirovine najčešće predstavljaju otpadni materijal, njihov hemijski sastav i karakteristike pružaju mogućnost za dobijanje vrednih proizvoda, između ostalih i bioetanola. Potencijal lignocelulozних sirovina za proizvodnju bioetanola leži u visokom sadržaju polisaharida (preko 60%) [10] koje, kao što je ranije pomenuto, nakon depolimerizacije do prostih šećera neki mikroorganizmi mogu izmetabolisati do etanola.

U sastavu lignocelulozних sirovina su dominantne tri gradivne komponente – celuloza, hemiceluloza i lignin, čiji sadržaj veoma zavisi od vrste sirovine (slika 1). U ćelijskim zidovima viših biljaka, lignin formira čvrst matriks sa hemicelulozom, u koji su ugrađena vlakna celuloze. Na ovaj način se ojačava celokupna struktura ćelijskih zidova i dobija kompleks koji je veoma teško razoriti. Zbog toga, sastav lignocelulozne sirovine, od kog potiče potencijal za upotrebu za proizvodnju bioetanola, istovremeno predstavlja i jednu od glavnih prepreka koje treba prevazići u ovom procesu.



Slika 1 - Prosečan sastav pojedinih vrsta lignocelulozних sirovina [24]

Celuloza je linearni homopolimer biljnog porekla koji se sastoji od velikog broja ostataka β -D-glukoze i predstavlja glavnu sirovinu za konverziju u etanol. Međutim, usled prisustva velikog broja intermolekulskih vodoničnih veza, u određenim delovima se obrazuju strukture kristalne celuloze, koja je nerastvorna u vodi i veoma otporna na dejstvo različitih hemikalija i enzima. Visok stepen polimerizacije, rezistentna kristalna struktura i tesna povezanost celuloze sa matriksom hemiceluloze i lignina su najvažniji faktori koji otežavaju efikasnost i visoku produktivnost enzimske hidrolize celuloze iz lignocelulozних sirovina [11].

Hemiceluloza je heteropolisaharid, koji se sastoji od pentozna, heksoza i šećernih kiselina. Hemiceluloza ima manju molekulsku masu od celuloze, ali i kratke lance u bočnim granama, sastavljenim od različitih šećera, koji se lako hidrolizuju. Hemiceluloza predstavlja vezu između lignina i celulozних vlakana i tako doprinosi krutosti i otpornosti celokupne celuloza-hemiceluloza-lignin strukture ćelijskog zida [12].

Posle celuloze i hemiceluloze, lignin je najrasprostranjeniji polimer u prirodi. To je amorfni heteropolimer koji se sastoji od tri različite fenilpropanske jedinice. Glavna uloga lignina je da biljci daje strukturu potporu i čvrstinu, nepropustljivost i zaštitu od mikroorganizama i oksidativnog stresa. Budući da su celulozna vlakna ugrađena u matriks hemiceluloze i lignina, on predstavlja fizičku barijeru

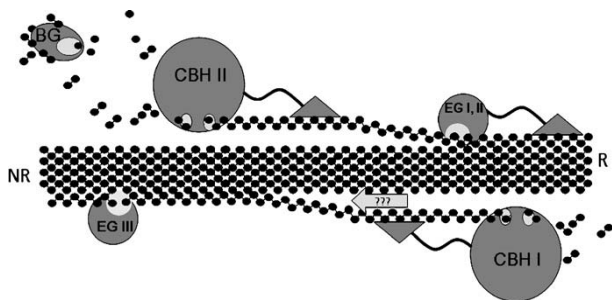
ru za kontakt između celulozitičkih enzima i supstrata [11]. Pored toga, pokazano je da se celulozitički enzimi neproduktivno vezuju za lignin, tj. enzim se vezuje za supstrat koji ne može hidrolizovati [11, 13]. Ove dve pojave za posledicu imaju povećano i neefikasno korišćenje enzima, što je, s obzirom na njihovu visoku cenu [14], ekonomski neopravdano.

Složenost i otpornost ćelijskog zida lignocelulozних sirovina je uzrok potrebe za prethodnom obradom ovih sirovina, a agresivnost uslova pri kojima se ona radi značajno je određen tipom sirovine. Kompromis između uslova prethodne obrade koji će razoriti ćelijski zid (i tako olakšati enzimsku hidrolizu), a neće dovesti do stvaranja zagađenih otpadnih tokova je veoma značajan za efikasnu enzimsku hidrolizu i održivost celokupnog procesa proizvodnje bioetanol [15-17].

ENZIMSKA HIDROLIZA LIGNOCELULOZNIH SIROVINA

Enzimska hidroliza lignocelulozne sirovine predstavlja ključni korak u celokupnoj proizvodnji bioetanol, s obzirom da se u ovom procesu konvertuju komponente biomase u supstrat za alkoholnu fermentaciju. Naime, enzimskom hidrolizom od složenih polisaharida lignocelulozne sirovine nastaju prosti šećeri koje će proizvodni mikroorganizam metabolisati do etanol.

Iako je celuloza homopolimer, potreban je kompleks enzima, koji sačinjavaju tri vrste hidrolaza, da bi se razgradila. Endoglukanaze (EG) nasumično hidrolizuju unutrašnje β -1,4-glikozidne veze, egzoglukanaze ili celobihidrolaze (CBH I, CBH II) otepljuju celobiozne jedinice sa krajeva celuloznog lanca (CHB I sa redukujućeg kraja, CHB II sa neredukujućeg kraja), dok β -glukozidaze hidrolizuju celobiozu do glukoze (slika 2).

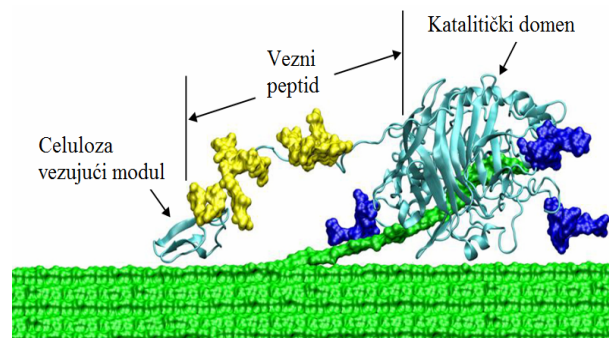


Slika 2 - Šematski prikaz hidrolize celuloze sinergističkim delovanjem celulaza [7]

Delujući sinergistički, ove tri vrste enzima hidrolizuju celulozu do glukoze. Delovanjem endoglukanaza stvaraju se nova mesta za vezivanje egzoglukanaza i otepljuvanje celobiozних jedinica. Zatim β -glukozidaze (BG) hidrolizuje celobiozu do glukoze (slika 2), što je od presudnog značaja, jer je egzoglukanaza enzim podložan inhibiciji proizvodom, celobiozom, zbog čega bi hidroliza celuloze

bila značajno usporena [7,18]. Budući da većina mikroorganizama koji se koristi za komercijalnu proizvodnju celulaza ne sadrži β -glukozidazu u dovoljnoj količini, ovaj enzim se često posebno dodaje prilikom razgradnje celuloze [19].

Ono što razlikuje celulaze od drugih klasa enzima jeste sposobnost hidrolize nerastvornog supstrata. U cilju obezbeđivanja odgovarajućeg kontakta i orijentacije između katalitičkog mesta i supstrata, celobihidrolaze i endoglukanaze imaju celuloza-vezujući domen (domen koji nije katalitički već služi za vezivanje za supstrat), što je od presudnog značaja i za samu hidrolizu celuloze (slika 3). Pretpostavlja se da celuloza-vezujući domen, postojanjem hipotetičkog proteina remeti strukturu celulozних vlakana (strelica na slici 2) i da različiti domeni u enzimima iniciraju hidrolizu celuloze sa različitih mesta [18]. Ove dve karakteristike celulozitičkih enzima su predmet mnogih istraživanja i veoma su značajne za spoznavanje mehanizma njihovog delovanja i unapređenje celokupnog procesa enzimске hidrolize celuloze.



Slika 3 - Građa i mehanizam delovanja celobihidrolaza [25]

Razumevanje mehanizma delovanja celulaza dodatno otežavaju faktori koji su vezani za heterogenu hidrolizu, a koji se ne mogu izolovati kako bi se pojedinačno proučili, pa ne čudi što se degradacija lignoceluloze ne pokorava *Michaelis-Menten*-ovoj kinetici. [18]. I pored brojnih napora, kinetika celulaza ostaje velikim delom nepoznanica, što veoma otežava određivanje optimalnih uslova za njihovo delovanje, ili bar predviđanje ponašanja pod određenim uslovima [20].

Poznavanje mehanizma depolimerizacije lignocelulozne sirovine je tesno povezano sa uslovima pri kojima se ovaj proces odvija. Izbor vrste enzima i koncentracije, kao i uslova u kojima će se vršiti hidroliza, ključni su za dobijanje dobrog prinosa šećera, a samim tim i bioetanol. Imajući u vidu uzak opseg vrednosti pH i temperature pri kojima enzimi ispoljavaju maksimalnu aktivnost, ovi parametri se pažljivo moraju odabrati i kontrolisati prilikom procesa. Ovo naročito može biti problematično kada se za razgradnju obnovljivih sirovina

koriste smeše više enzima, kao što su celulaze, hemicelulaze i pektinaze.

Kada je reč o dva osnovna parametra svakog enzimskog procesa, koncentraciji enzima i koncentraciji supstrata, njihova optimizacija je pri enzimskoj hidrolizi lignocelulozne sirovine, naročito sa stanovišta buduće industrijalizacije, od presudnog značaja. Niske koncentracije enzima i supstrata daju niske koncentracije dobijenih šećera i znatno produžavaju vreme potrebno za postizanje zadovoljavajućeg stepena hidrolize. S druge strane, visoke koncentracije supstrata omogućavaju obradu veće količine biomase tokom jednog ciklusa, ali mogu dovesti do smanjenja prinosa hidrolize usled problema vezanih za difuzione limitacije izazvane smanjenim sadržajem vode i problemima u postizanju homogenosti smeše enzim-supstrat [21,22]. Visoke koncentracije enzima mogu dovesti do neproduktivne upotrebe enzima, jer povećanje količine enzima nije proporcionalno prinosu šećera koji nastaju kao rezultat delovanja enzima [21]. Dakle, jedan od osnovnih izazova enzimske hidrolize celuloze iz lignocelulozne sirovine jeste dostizanje balansa između dovoljno visoke koncentracije supstrata, ali ne previsoke da se ne bi javile difuzione limitacije, i dovoljno visoke koncentracije enzima da bi hidroliza bila brza i efikasna, a da ne dođe do neproduktivne upotrebe enzima.

Karakteristike lignocelulozne sirovine – vrsta, poreklo i sastav značajno diktiraju pravac istraživanja i razvoja tehnologije njene enzimske hidrolize. Kao što je ranije pomenuto stepen polimerizacije i kristalčnosti celuloze, sadržaj hemiceluloze, kao i sadržaj i distribucija lignina predstavljaju dodatne informacije koje treba uzeti u obzir pri izboru svih uslova procesa enzimske hidrolize [12, 23]. Zbog raznovrsnosti lignocelulozних sirovina kao supstrata, nemoguće je utvrditi univerzalan metod za proces enzimske hidrolize. Potrebni enzimi i odnosi u kojima se oni mešaju, pronalaženje uslova u kojima će svaki od njih moći da ispolji svoju aktivnost, kao i utvrđivanje optimalnih količina enzima i supstrata se moraju odrediti za svaki lignocelulozni supstrat pojedinačno [8].

Tokom poslednje decenije se ulažu značajni naponi u smeru poboljšanja postojećih i identifikaciji novih i efikasnijih, kako enzima, tako i mikroorganizama koji ih proizvode [18]. Osim toga, širom sveta se radi na optimizaciji smeša enzima i procesnih parametara za pojedinačne, lokalno dostupne, lignocelulozne sirovine. I pored svih nepoznanica na polju enzimske hidrolize lignocelulozних sirovina, može se reći da je ona trenutno najperspektivnije rešenje od kojeg se očekuje da, u godinama koje slede, proizvodnju bioetanol učini održivom i ekonomski isplativom.

ZAKLJUČAK

Sve veća potreba čovečanstva za energijom, ograničene rezerve fosilnih goriva, kao i uticaj njihovog sagorevanja na životnu sredinu su glavna pokretačka sila za razvoj alternativnih goriva. Među gorivima koja se mogu dobiti iz obnovljive biomase, od posebnog značaja je bioetanol kao potencijalno biogorivo za motore sa unutrašnjim sagorevanjem. Razvoj proizvodnje bioetanol se usmerava ka dobijanju iz otpadnih, lignocelulozних sirovina. Karakteristike lignocelulozних sirovina koje se odnose na njihov sastav i široku dostupnost su glavni razlozi koji ih čine obećavajućim u pogledu proizvodnje bioetanol. S druge strane, karakteristike lignocelulozних sirovina istovremeno postavljaju velike izazove pred ključni proces u konverziji do etanol - proces enzimske hidrolize. Dublje poznavanje mehanizma delovanja celulolitičkih enzima je od presudnog značaja za unapređenje enzimske hidrolize i, stoga, efikasnost celokupnog procesa proizvodnje bioetanol iz lignocelulozних sirovina. Dakle, proizvodnjom bioetanol iz obnovljivih lignocelulozних sirovina uz razvoj tehnologije njihove enzimske hidrolize može se obezbediti održivo, sigurno, ekonomski isplativo i ekološki prihvatljivo gorivo za motorna vozila širom sveta.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (projekat TR 31002).

LITERATURA

- [1] Moriarty P., Honnery D. (2012) What is the global potential for renewable energy? *Renew Sustain Energ Rev* 16, 244–252.
- [2] Höök M., Tang X. (2013) Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy Policy* 52, 797–809.
- [3] Nigam, P.S., Singh, A. (2011). Production of liquid biofuels from renewable resources. *Prog Energ Combust* 37, 52–68.
- [4] Balat M. (2011) Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review. *Energ Convers Manage* 52. 858–875.
- [5] Bohlmann G.M. (2006) Process economic considerations for production of ethanol from biomass feedstocks. *Ind Biotechnol* 2, 14–20
- [6] Ivetić D., Antov M. (2013) Environmental management through fossil fuels replacement: global and local potential of agricultural waste for bioethanol production. *Reporting for sustainability 2013*, 191–196. May 7–10. 2013., Becici, Montenegro.
- [7] Merino S.T., Cherry J. (2007) Progress and Challenges in Enzyme Development for Biomass Utilization, *Adv Biochem Engin/Biotechnol* 108, 95–120.
- [8] Bessou, C., Ferchaud, F., Gabrielle, B., Bruno M. (2009) Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review. *Agron Sustain Dev*, 31, 1–79.

- [9] Harmsen P., Huijgen W., Bermudez L., Bakker R. (2010) Literature review of physical and chemical pretreatment processes for lignocellulosic biomass. Wageningen UR Food & Biobased Research, institute within the legal entity Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek
- [10] Zheng Y., Yu C., Cheng Y.-S., Zhang R., Jenkins B., VanderGheynst J.S. (2011) Effects of ensilage on storage and enzymatic degradability of sugar beet pulp. *Bioresour Technol* 102, 1489–1495.
- [11] Alvira P., Tomás-Pejó E., Ballesteros M., Negro M.J. (2010) Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. *Bioresour Technol*, 101, 4851–4861.
- [12] Chang V.S., Holtzapple M. (2000) Fundamentals factors affecting biomass reactivity *Appl Biochem Biotechnol* 84–86, 5–37.
- [13] Börjesson J., Engqvist M., Sipos B., Tjerneld F. (2007) Effect of poly(ethylene glycol) on enzymatic hydrolysis and adsorption of cellulase enzymes to pretreated lignocellulose. *Enz Microb Technol* 41,186–195.
- [14] Macrelli S., Mogensen J., Zacchi G. (2012) Techno-economic evaluation of 2nd generation bioethanol production from sugar cane bagasse and leaves integrated with the sugar-based ethanol process. *Biotechnol Biofuels* 5, 22.
- [15] Ivetić D.Ž., Vasić V.M., Šćiban M.B., Antov M.G. (2011) Analysis of pretreatments of sugar beet shreds for bioethanol production in respect of cellulose hydrolysis and waste flows, *Acta Periodica Technologica* 42, 223–230.
- [16] Šćiban M., Vasić V., Kukić D., Ivetić D., Antov M. (2011) Waste flows from pretreatment of lignocellulosic raw materials for bioethanol production, I International Conference „ECOLOGY OF URBAN AREAS” 2011, 186 – 191, 30th September 2011, Ecka, Serbia.
- [17] Vasic V., Sciban M., Ivetic D., Prodanovic J., Kukic D., Antov M. (2013) New approaches of treatment and utilization of wastewaters from bioethanol production process. III International Congress: “Engineering, environment and materials in processing industry”, 800-807, March 4–6.2013., Jahorina, Bosna i Hercegovina.
- [18] Kristensen J.B. (2009a) Enzymatic hydrolysis of lignocellulose. Substrate interactions and high solids loadings, *Forest & Landscape Research* 42. Forest & Landscape Denmark .
- [19] Sørensen A. (2010) A new highly efficient beta-glucosidase from the novel species, *Aspergillus saccharolyticus*, Uniprint, Aalborg University, November 2010, ISBN 978–87–90033–73–6.
- [20] Drissen R.E.T., Maas R.H.W., Van Der Maarel M.J.E.C., Kabel M.A., Schols H.A., Tramper J., Beeftink H.H. (2007) A generic model for glucose production from various cellulose sources by a commercial cellulose complex. *Biocatal Biotransformation* 25, 419–429.
- [21] Ivetić D.Ž., Šćiban M.B., Antov M.G. (2012) Enzymatic hydrolysis of pretreated sugar beet shreds: statistical modeling of the experimental results, *Biomass Bioenerg* 47, 387–394.
- [22] Kristensen J.B., Felby C., Jørgensen H. (2009b) Yield-determining factors in high-solids enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Biotechnol Biofuels* 2:1.
- [23] Hendriks, A.T.W.M., Zeeman, G. (2009) Review Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol* 100, 10–18.
- [24] Garrote G., Domínguez H., Parajó J.C. (1999) Hydrothermal processing of lignocellulosic materials, *Holz als Roh- und Werkstoff* 57, 191-202 .
- [25] Gwinner D. (2012) Better biofuels through computational analysis. *NREL Continuum Magazine*. National Renewable Energy Laboratory 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3305.

ABSTRACT

BIOETHANOL FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS: RENEWABLE SOURCES AND ENZYME TECHNOLOGY FOR SUSTAINABLE ENERGY PRODUCTION

Renewable sources, available globally in the form of residual agricultural biomass, i.e. lignocellulosic feedstock, can be transformed into liquid biofuels. Bioethanol produced from renewable lignocellulosic feedstock has great potential to reduce greenhouse gasses emissions and energy crisis, related to the combustion of fossil fuels. However, the complex structure of lignocellulosic feedstock imposes many problems to its conversion to bioethanol. Many of those problems are addressed to the enzymatic hydrolysis during which biomass polymers, primarily cellulose, are degraded to simple sugars. Achieving proper interaction between cellulose and cellulases, enzyme complex degrading cellulose, is crucial for efficient biomass hydrolysis, and thus viable and cost effective overall bioethanol production. Therefore, understanding of mechanisms of enzymatic depolymerization of lignocellulosic feedstock along with production of new and improved enzymes may provide global usage of this valuable renewable source for bioethanol production and ensure sustainable energy supply which is environmentally beneficial.

Key words: bioethanol; lignocellulosic feedstock; enzymatic hydrolysis.

Scientific paper

Received for Publication: 12. 06. 2013.

Accepted for Publication: 11. 09. 2013.