Potencijal i značajke biomase paulonije

Migalić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Forestry / Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:108:549713

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University of Zagreb Faculty of Forestry and Wood Technology

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

ŠUMARSKI ODSJEK

SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ ŠUMARSTVO

TEHNIKE, TEHNOLOGIJE I MENADŽMENT U ŠUMARSTVU

MATIJA MIGALIĆ

POTENCIJAL I ZNAČAJKE BIOMASE PAULOVNIJE

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2018.

ŠUMARSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

ŠUMARSKI ODSJEK

POTENCIJAL I ZNAČAJKE BIOMASE PAULOVNIJE

DIPLOMSKI RAD

Diplomski studij Šumarstvo: smjer Tehnike, tehnologije i menadžment u šumarstvu

Predmet: Šumski proizvodi

Ispitno povjerenstvo: 1. Doc. dr. sc. Dinko Vusić

2. Prof. dr. sc. Željko Zečić

3. Doc. dr. sc. Damir Drvodelić

Student: Matija Migalić

JMBAG: 0068212414

Broj indeksa: 726/16

Datum odobrenja teme:

Datum predaje rada: 02.07.2018.

Datum obrane rada: 06.07.2018.

Zagreb, srpanj, 2018.

Dokumentacijska kartica

Naslov	Potencijal i značajke biomase paulovnije
Title	*Potential and properties of paulownia biomass*
Autor	Matija Migalić
Adresa autora	Donje Pokupje 49D, 47 000, Karlovac
Rad izrađen	Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Vrsta objave	Diplomski rad
Mentor	Doc. dr. sc. Dinko Vusić
Izradu rada pomogao	
Godina objave	2018.
Obujam	30 stranica, 22 slike, 2 tablice, 35 navoda literature
Ključne riječi	prinos, udio vode, udio pepela, nominalna gustoća
Keywords	yield, moisture content, ash content, basic density
Sažetak	Provedeno je istraživanje tri klona paulovnije (9501, OXI, Shan Tong) s ciljem utvrđivanja ukupne nadzemne biomase (u periodu mirovanja vegetacije) i osnovnih značajki koje proizvedenu biomasu definiraju kao biogorivo. Na pokusnim je plohama obavljeno prikupljanje podataka o prsnim promjerima, visinama i masama u svježem stanju ukupno 22 hibrida paulovnije, uz uzorkovanje primjernih kolutova na svakih 1,30 m od korijenova vrata naviše. Uzorkovani su kolutovi podvrgnuti laboratorijskim analizama s ciljem utvrđivanja tehničkog masenog udjela vode, udjela kore, nominalne gustoće i ogrjevne vrijednosti. Rezultati su laboratorijskih istraživanja uspoređeni s referentnim vrijednostima za biomasu topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji. Istraživanjem su utvrđene značajne razlike u produkciji biomase pojedinih hibrida paulovnije. Hibrid OXI rezultirao je najmanjim prosječnim prinosom od svega 1,3±0,4 kg, hibrid Shan Tong prosječnim prinosom od 5,4±2,1 kg, a hibrid 9501 najvećim prinosom u iznosu 8,6±5,2 kg (na kraju treće vegetacije). No, s obzirom na kompleksnost postavki pokusa i relativno malen broj stabala uzorka za definitivne zaključke o razlikama u prinosu pojedinih hibrida nužno je provesti dodatna istraživanja. Rezultati ovoga istraživanja, u odnosu na rezultate prethodnih istraživanja kao i u odnosu na referentne vrijednosti za biomasu topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji, ukazuju da sva tri testirana hibrida paulovnije (9501, Shan Tong, OXI) u našim uvjetima mogu postići povoljne značajke udjela pepela i ogrjevne vrijednosti. Niža nominalna gustoća drva paulovnije (odnosno količina goriva u jedinici obujma) ukazuju na nužnost usporedbe i vrednovanja prinosa biomase hibrida paulovnije (s prinosima ostalih vrsta drveća koje se koriste za proizvodnju energije) prvenstveno na razini količine standardno suhe drvne tvari (t/ha). Ostale značajke bitne za pozicioniranje biomase paulovnije kao biogoriva ukazuju na činjenicu da se lanac dobave biomase za energiju iz plantaža paulovnije mora modificirati na način da uspješno odgovori izazovima koji proizlaze iz povećanih vrijednosti tehničkog masenog udjela vode u trenutku sječe.

	IZJAVA O IZVORNOSTI RADA	**OB ŠF 05 07**
		Revizija: 1
		Datum: 6.7.2018

„Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojega rada te da se u izradi istoga nisam služio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni“.

_____

vlastoručni potpis

Matija Migalić

U Zagrebu, 2. srpnja 2018. godine

SADRŽAJ

		Stranica
1.	Uvod	1
2.	Problematika	2
2.1	Šumska biomasa za energiju	2
2.2	Kulture kratkih ophodnji	5
2.3	Značajke biomase paulovnije	9
2.4	Cilj rada	11
3.	Materijal i metode	12
3.1	Mjesto istraživanja“	12
3.2	Materijal istraživanja	14
3.3	Metode istraživanja	17
3.3.1	Terenska mjerenja i uzorkovanje	17
3.3.2	Laboratorijske analize	17
3.3.3	Obrada podataka	22
4.	Rezultati istraživanja	24
5.	Zaključak	29
6.	Literatura	31

POPIS TABLICA I SLIKA

		Stranica
Tablica 1.	Udio pepela u uzorcima drva i kore pojedinih hibrida	27
Tablica 2.	Usporedba parametra biogoriva iz kultura kratkih ophodnji	28
Slika 1.	Mjesto istraživanja	13
Slika 2.	Raspored hibrida na kontrolnoj plohi	14
Slika 3.	Raspored hibrida na pokusnoj plohi	15
Slika 4.	Stabla pokusne plohe	16
Slika 5.	Uzorkovanje primjernih kolutova	17
Slika 6.	Utvrđivanje ukupne mase u svježem stanju	17
Slika 7.	Priprema uzoraka	18
Slika 8.	Uzorci u sušioniku	18
Slika 9.	Primarno usitnjeni uzorci drva i kore	19
Slika 10.	Rezni mlin Retsch SM 300	19
Slika 11.	Peć za žarenje	20
Slika 12.	Analitička vaga Mettler Toledo XA 204	20
Slika 13.	Analitički uzorak nakon usitnjavanja na nominalnu veličinu čestica < 1 mm	21
Slika 14.	Eksikator	21
Slika 15.	Analitički uzorci za određivanje udjela pepela i tehničkog masenog udjela vode	22
Slika 16.	Detalj kalorimetarske bombe	22
Slika 17.	Visinska krivulja stabala uzorka	24
Slika 18.	Ovisnost biomase o prsnom promjeru	24
Slika 19.	Kutijasti dijagram tehničkog udjela vode	25
Slika 20.	Kutijasti dijagram nominalne gustoće	25
Slika 21.	Ovisnost udjela kore o prsnom promjeru stabala uzorka	26
Slika 22.	Ovisnost ogrjevne vrijednosti o udjelu vode	26

1. Uvod

Uslijed promjena na globalnom tržištu vezanih za cijene i potrošnju fosilnih goriva te nastojanja da se smanje emisije ugljičnog dioksida drvna biomasa postaje sve popularniji izvor obnovljive energije. Biomasa predstavlja ekološki prihvatljiv izvor energije koji zbog jednostavnosti korištenja i malog utjecaja na prirodu i okoliš dobiva sve već razmjer u današnjem gospodarstvu kako globalno tako i za Republiku Hrvatsku.

Republika Hrvatska obiluje prirodnim šumskim bogatstvom koji predstavlja veliki potencijal i za energetski sektor. No, već je danas evidentno da će budućnost bioenergetskog sektora snažno ovisiti o dostupnosti biomase. Količine su raspoložive drvne biomase iz šuma kojima se gospodari po principima potrajnosti, pa tako i one za proizvodnju energije zadane razinom prirasta i mogućnostima realizacije godišnjeg etata, a ukupna raspoloživost drvne biomase za energiju ovisi i o potražnji prostornoga drva u industriji drvnih ploča te industriji celuloze i papira. Slijedom navedenog, jedan od obećavajućih načina za povećanje količine biomase na tržištu je ciljano osnivanje plantaža brzorastućih vrsta drveća. Porast interesa za brzorastućim vrstama drveća, o ovoj novonastaloj situaciji leži upravo u činjenici brze proizvodnje velike količine biomase koja se može koristi kao biogorivo za proizvodnju topline i električne energije (Zuazo i dr. 2013).

Visok prinos biomase stabala paulovnije koji navode neki autori (Wang i Shogren 1992, Kalaycioglu i dr. 2005) izdvajaju vrste roda *Paulownia* kao jedne od najbrže rastućih stabala na svijetu s potencijalom proizvodnje drva za različitu namjenu (Drvodelić i dr. 2016).

2. Problematika

2.1 Šumska biomasa za energiju

Uslijed očitih negativnih utjecaja fosilnih goriva na okoliš u zadnje se vrijeme sve više energije nastoji proizvesti iz obnovljivih izvora. Korištenjem fosilnih goriva se oslobađaju stakleнički plinovi koji imaju negativni utjecaj na klimatske promjene, ali i zagađenja vode, tla i zraka. Uz sve to zalihe fosilnih goriva su ograničene, a samim smanjenjem zaliha dolazi do porasta cijena.

Biomasa se uz sunce, vjetar, vodne snage i geotermalne izvore svrstava u obnovljive izvore energije. Sama riječ potječe od grčke riječi *bios*, što znači život i latinskog, *massa* što znači tijelo. Iz navedenog može se reći da se pojam biomase odnosi na živu tvar jednog ili više organizama ili njihovih dijelova koja je izražena težinom suhe tvari po jedinici površine.

Za razliku od ostalih obnovljivih izvora energije (poput sunca, vode, vjetra i dr.), biomasa je jedini održivi izvor koji se temelji na korištenju ugljika i stoga se stoga se može učinkovito pretvoriti u različite nositelje energije (Khan i dr. 2009) slično kao i fosilna goriva.

Biomasu možemo koristiti uz manji stupanj prerade kao gorivo za proizvodnju topline ili/i električne energije, ali i preraditi primjerice postupcima zgušćivanja u neki od oblika ostalih čvrstih goriva ili pak preraditi u tekuće biogorivo. Svaki oblik biogoriva zahtjeva određeni stupanj kakvoće ulazne sirovine koji u bitnome određuje i kakvoću finalnog proizvoda.

U hrvatskom se šumarstvu pod šumskom drvnom biomasom prikladnom i dostupnom za upotrebu najčešće podrazumijeva biomasa nadzemnih dijelova stabala, uključujući deblo i krošnju s lišćem (iglicama), dok panj sa žiljem nije dostupan u prirodnim šumama i na nagnutim terenima (Krpan 1996). U ekološkom pogledu, za naše je šumarstvo izrazito značajna činjenica da se šumska drvna biomasa proizvedi na principu potrajnosti i kao takva je nedvojbeno obnovljiv izvor energije, a osim toga proizvodnja i uporaba šumske drvne biomase u energijske svrhe igra i važnu ulogu u smanjenju emisije stakleničkih plinova, poticanju razvoja domaće industrije te osiguranju i diversifikaciji opskrbe energijom (Ćosić i dr. 2011). Uz navedeno, korištenje šumske biomase za energiju pridonosi i svim važnim elementima državnoga

i lokalnoga razvoja, posebice ekonomskom rastu kroz povećanje zaposlenosti i zarade te povoljno djelovanje na vanjskotrgovinsku bilancu (Domac i dr. 2005).

Šumska drvna biomasa može se preraditi u niz korisnih i vrijednih finalnih proizvoda, ovisno u dimenzijama i kakvoći raspoložive sirovine, odnosno drvnih sortimenata. No, unatoč intenciji ka proizvodnji kvalitetnijih (i vrijednijih) drvnih sortimenata kao posljedica prirodnoga porijekla sirovine te prisutnih grešaka drva te nužnosti provođenja šumskouzgojnih radova i u mlađim sastojinama gotovo polovica količine drvnih sortimenata otpada na kategoriju prostornoga drva čija je idealna namjena prerada u industriji drvnih ploča i industriji celulozi i papira. No, tradicionalno se najveće količine prostornoga drva koriste u obliku ogrjevnoga drva (jednometarskog i višemetarskog). Posebice je ovaj energent značajan u ruralnim područjima gdje svakako predstavlja najpovoljniji izvor energije (posebice ako je proizveden samoizradom), a ponekad i jedini izvor energije za grijanje.

Sve do ponovnog početka proizvodnje drvne sječke, ogrjevno je drvo bilo jedini sortiment koji se proizvodio direktno u šumi. Komercijalna proizvodnja drvne sječke započela je sredinom prošlog desetljeća djelomično i zbog nedostatka interesa za samoizradu i njenog dvojbenog zakonskog statusa (Bosner i dr. 2008). Situacija je kulminirala posebice u hrastovim sječinama glavnog prihoda kada hrvatski šumari pritisnuti nužnošću uspostave šumskog reda nakon razdoblja zimske sječe, odnosno do početka vegetacije, rješenje pronalaze u izradi drvne sječke metodom iveranja (Vusić 2013). Kao drugi važan poticaj proizvodnji drvne sječke isti autor navodi i nedostatak energijskoga drva u susjednim zemljama.

Iveranje drva definirano je kao postupak prerade šumske biomase u oblik pogodan za korištenje u energetske svrhe, a potreba usitnjavanja šumske biomase se zasniva na omogućavanju automatizacije rukovanja drvnom sječkom, ekonomičnijem prijevozu te lakšem sušenju i izgaranju drvne sječke (Šušnjar 1998). U hrvatskom šumarstvu metoda iveranja eksperimentalno je primjenjena početkom osamdesetih godina prošloga stoljeća (Slabak 1983, Slabak 1987, Šušnjar 1998), ali nije zaživjela (Vusić 2013).

Danas se proizvodnja (šumske) drvne sječke najčešće organizira na način da se nakon izrade i primarnog transporta oblovine, ostala nadzemna biomasa stabla, pretežno iz

krošnje (sada uključujući i obujam granjevine ispod 7 cm s korom) izvozi se na pomoćno stovarište i nakon određenog vremena prosušivanja ivera direktno u poluprikolicu tegljačkoga skupa.

Prilikom proizvodnje drvne sječke nužno je posvetiti posebnu pažnju kakvoći, koja kao i kod svih drugih proizvoda direktno utječe na cijenu, a posljedično i na isplativost proizvodnje. Kakvoća je drvne sječke definirana prvenstveno udjelom vode, udjelom pepela i granulometrijskim sastavom.

Udio vode direktno utječe na energijsko iskorištenje, ali i na transportne troškove, a parametar je kakvoće koji se relativno jednostavno može poboljšati primjenjujući metodu prirodnoga prosušivanja drva. Stoga je od ključnog značaja poznavati udio vode u trenutku sječe, ali i trendove prirodnoga prosušivanja kako be se odredilo optimalno vrijeme iveranja.

Udio pepela kao posljedica udjela anorganskih tvari u sirovini prirodno je zadana veličina. Dakle, gotovo je nemoguće smanjiti prirodni udio pepela u drvnoj biomasi. Jedina metoda koja je na raspolaganju odnosi se na selekciju sirovine (Vusić i dr. 2014) prilikom iveranja kako bi se proizvela drvna sječka bolje i lošije kakvoće s obzirom na udio pepela namjesto drvne sječke jednolične – prosječne kakvoće. Osim toga bitno je smanjiti mogućnost kontakta drvne sirovine s ostalim anorganskim tvarima koje mogu ostaviti traga u finalnom proizvodu (primjerice zemljom, pijeskom, kamenom). Udio pepela ima značaja pri korištenju u kogeneracijskim postrojenjima i toplanama na drvnu sječku jer umanjuje energijsko iskorištenje i povećava problem zbrinjavanja pepela, no posebno dolazi do izražaja kada se energijsko drvo planira koristiti za proizvodnju peleta kod kojih je povećani udio pepela glavni diskvalificirajući faktor pri klasifikaciji u razrede veće kakvoće.

Granulometrisjki sastav drvne sječke posljedica je heterogenog sastava sirovine, ali i načina usitnjavanja. Poseban problem u pogledu kakvoće predstavlja povećan udio sitne te grube frakcije, odnosno generalno neujednačenost granulometrijske strukture koja može uzrokovati probleme u sustavu dobave. Poboljšanje granulometrijskoga sastava može se postići selekcijom sirovine te izborom odgovarajućeg iverača i podešavanjem njegovoga rada (Spinelli i dr. 2005).

2.2 Kulture kratkih ophodnji

Kulture kratkih ophodnji (KKO), (engl. *Short Rotation Coppice* ili *Short Rotation Intensive Culture*) zajednički je naziv za nasade vrsta drveća za proizvodnju biomase, stoga još nos naziv energetske kulture. Navedene kulture su umjetno osnovani nasadi šumskog drveća gustog rasporeda sadnje, a takav način uzgoja potaknut je u vrijeme energetske krize ranih sedamdesetih godina prošloga stoljeća (Drvodelić 2015). Kulture se kratkih ophodnji najčešće podižu na tlima koja su degradirana i nepovoljna za poljoprivredu ili proizvodnju drugih vrsta drveća (Kajba 2009).

Kulture se kratkih ophodnji mogu osnovati vrstama drveća koje se nakon sječe moraju ponovno zasaditi (što je primjerice ponekad slučaj kod eukaliptusa ili bagrema), ali u pravilu se uzgajaju kao panjače (uobičajeno kod vrbe i topole). Povoljna izbojna snaga panja garantira da će nakon sječe potjerati novi izbojci koji će mogu ponovo posjeći za dvije do pet godina, a na taj način je omogućena sukcesivna sječa u šest do osam ophodnji, nakon kojih se zbog smanjenog vitaliteta biljaka i opadanja produkcije biomase kultura mora iskrčiti i zamijeniti novih sadnim materijalom (Kajba 2009.)

S obzirom da se biomasa iz kultura kratkih ophodnji u većini slučajeva planira koristit za proizvodnju energije, navedenoj je sirovini prilikom njena vrednovanja nužno pristupiti s aspekta biogoriva, odnosno mogućeg krajnjega korisnika. Drvna biomasa uzgojena u kulturama kratkih ophodnji najčešće se koristi za proizvodnju drvne sječke, ponekad u specifičnom pojavnom obliku (eng. *billets*). S obzirom da je drvna sječka vrlo raznolik izvor energije, a opet većina joj je značajki zadana (s obzirom na prirodno porijeklo) i ograničava mogućnost poboljšanja kvalitete tijekom proizvodnog procesa pojedinim se parametrima kakvoće kojima se u proizvodnom postupku može upravljati treba posvetiti posebna pozornost (Vusić i dr. 2014). Navedeno se prvenstveno odnosi na korištenje adekvatne sirovine za proizvodnju biogoriva željene kakvoće (primjerice određene granulometrijske strukture), maksimalnom korištenju prednosti prirodnoga prosušivanja u cilju smanjenje udjela vode i povećanja ogrjevne vrijednosti te odabiru sustava pridobivanja koji garantiraju smanjeni udio pepela onemogućujući prekomjerni kontakt sirovine s tlom.

Za isplativost proizvodnje biogoriva u kulturama kratkih ophodnji podjednako je značajno iskoristiti potencijale biomase u smislu moguće kakvoće biogoriva i time

ostvariti veću vrijednost proizvoda, ali i smanjiti troškove vezane za osnivanje i njegu kulture kratkih ophodnji te troškove vezane za pridobivanje biomase.

Odabir prikladnih tehnika i tehnologija pridobivanja drvne sječke iz kultura kratkih ophodnji ovisi o gustoći sadnje i dimenzijama biljaka koje treba posjeći (i usitniti), odnosno uvjetovan je velikim brojem biljaka malih jediničnih masa i dimenzija koje su jednolično raspoređene u sječnoj jedinici. Stoga je logična intencija maksimalnog mehaniziranja radova pridobivanja drvne biomase u navedenim uvjetima kako bi se jedinični troška što više smanjio. Posljedično, za potrebe pridobivanja drvne sječke iz kultura kratkih ophodnji razvijeni su namjenski strojevi te razna priključna vozila (ili adaptirana postojeća poljoprivredna mehanizacija), a sve u cilju optimizacije sječe, izrade i transporta drvne biomase.

Posebno je značajno naglasiti važnost pravilnoga odabira razmaka i rasporeda sadnje biljaka prilikom osnivanja kultura kratkih ophodnji, jer će isti ponekad, osim utjecaja na prinos, imati odlučujući utjecaj na troškove pridobivanja drvne biomase ili čak na samu mogućnost korištenja pojedinih mehanizirani sredstava rada. Osim toga pri odabiru površina treba preferirati ravan ili blago nagnut teren biti kako bi se mehanizacija slobodno mogla kretati po površini, a da pritom ne oštećuje tlo. Podrazumijeva se da je odabrane površine neophodno otvoriti mrežom prometnica u optimalnom razmaku s ciljem smanjenja udaljenosti primarnoga transporta i omogućavanja daljinskoga transporta. U cilju optimiziranja rada strojeva u mehaniziranom sustavu pridobivanja drvne biomase iz kultura kratkih ophodnji prilikom podizanja treba odabrati i površinu prikladne veličine ili težiti koncentriranju manjih površina u relativno maloj međusobnoj udaljenosti koja će garantirati prihvatljive troškove seljenja mehanizacije između radilišta.

Radovi pridobivanja drvne sječke iz kultura kratkih ophodnji provode su pravilu u razdoblju mirovanja vegetacije u cilju postizanja optimalne kakvoće proizvoda. Radove je optimalno izvoditi zimi kada je tlo smrznuto, a po mogućnosti bez snježnoga pokrivača što je posebice povoljno prilikom primjene potpuno mehaniziranih sustava jer smrznuto tlo osigurava nesmetano prometovanje mehaniziranih sredstava rada velikih masa bez pretjeranog oštećenja tla i uzrokovanja kolotraga.

Najčešći sustav pridobivanja drvne biomase za energiju iz kultura kratkih ophodnji zasniva se na skupnom radu modificiranog silažnog kombajna sa žetvenom glavom za drvnu biomasu i poljoprivrednog traktora s (polu)prikolicom. Kombajn radi poslove kao i u poljoprivredi, putem žetvene glave posječe i usitni posječenu biomasu, a primarni se transport do pomoćnog stovarišta ili do krajnjega potrošača obavlja poljoprivrednim traktorom. Ograničenja sustava leže u činjenici da je nemoguće koristiti prednosti prirodnoga prosušivanja, odnosno da se u postrojenju isporučena biomasa mora li odmah iskoristiti ili prisilno prosušiti s obzirom da je usitnjena drvna biomasa ograničene mogućnosti skladištenja uslijed očekivane pojačane mikrobiološke aktivnosti pri povećanom udjelu vode i posljedično značajnom gubitku drvne tvari (Kofman 2012). Prednosti pak ovoga sustava leže u postizanju potpune mehaniziranosti radova pridobivanja drvne biomase za energiju koja posljedično omogućuje značajno smanjenje jediničnoga troška.

Pridobivanje se drvne biomase iz kultura kratkih ophodnji mogu izvršit i na način da se sječa obavlja motornom pilom ili pak mehaniziranim strojem za sječu (priključnim oruđem na poljoprivrednom traktoru) nakon čega se posječena stabla uhrpavaju u složajeve na sječnoj površini. Primarni se transport obavlja traktorskom ekipažom ili forvarderom neposredno nakon sječe ili nakon razdoblja prosušivanja. Ako se izvoženje obavlja neposredno nakon sječe, stablovina se najčešće uhrpava na pomoćnome stovarištu i usitnjavaju nakon razdoblja prosušivanja. Usitnjavanje se obavlja mobilnim iveračem obično direktno u sredstvo daljinskoga transporta, kamion tegljač s poluprikolicom. Očita prednost ovoga sustava pridobivanja je omogućavanje prirodnoga prosušivanja, a izraženi nedostatak rukovanje stablovinom malih dimenzija (posebice pri ručno-strojnoj sječi).

U cilju unaprjeđenja prethodno opisanog sustava pridobivanja drvne biomase iz kultura kratkih ophodnji razvijena su i različita tehničko-tehnološka rješenja u obliku priključnih oruđe za sječu i vezanje snopova vučenih je i pogonjenih poljoprivrednim traktorom. Posječene se biljke vežu u snopove i paralelno slažu u redove. Transport snopova se obavlja traktorskom ekipažom ili forvarderom. Iveranje se može odvijati na pomoćnom stovarištu nakon odgovarajućeg perioda prirodnog prosušivanja, ali i na glavnom

stovarištu primjenom stacionarnog iverača s obzirom da je izradom snopova omogućen daljinski transport neusitnjene drvne biomase. Sustav djelomično ujedinjuje prednosti dva prethodno opisana uz dodatnu pogodnost korištenja elekrtopogonjenog stacionarnog iverača. Eventualni nedostatci mogu se uočiti u dodatnom vremenu potrebnom za izradu snopova te u većem broju radnih zahvata u dobavnome lancu u usporedbi s prvim opisanim sustavom.

Slična modifikacija drugo opisanog sustava rezultirala je konstrukcijom posebnog stroja vučenog i pogonjenog poljoprivrednim traktorom koji obavlja funkciju sječe biljaka uz istovremeno slaganje u vlastiti tovarni prostor. Nakon toga posječeni se materijal transportira na pomoćno stovarište i nakon odgovarajućeg vremena prosušivanja ivera direktno u sredstvo daljinskog transporta i dalje transportira krajnjem korisniku. Nedostaci sustava mogu se identificirati u činjenici da se dio vremena koji se mogao utrošiti za sječu, slično kao i kod harvardera troši za izvoženje pa će navedeni sustav najčešće imati manje učinke negoli pri korištenju dva odvojena stroja specijalno konstruirana za sječu odnosno izvoženje. Prednost, je uz sve već ranije spomenute prednosti sličnih sustava je svakako i smanjenje broja operatera strojeva.

Kratki pregled dostupnih tehničko-tehnoloških rješenja za pridobivanje drvne biomase za energiju iz kultura kratkih ophodnji ukazuje na dva pravca razvoja. Jedan u smjeru potpune mehanizacije i proizvodnje svježe sječke, a drugi u smjeru visoke do potpune mehaniziranosti u cilju omogućavanja prirodnog prosušivanja.

Za očekivati je da će se odabir prikladne tehnologije vjerojatno zasnivat se na veličini konkretne sječne jedinice i dimenzijama stabala, zahtjevima korisnika za odgovarajućom kakvoćom drvne sječke, a u konačnici i raspoloživim strojevima s obzirom na ukupne količine drvne biomase koje će se u određenom području proizvoditi iz kultura kratkih ophodnji.

2.3 Značajke biomase paulovnije

U rod *Paulownia* pripadaju listopadne brzo rastuće vrste drveća iz porodice *Paulowniaceae*, a sastoji se od devet vrsta i nekoliko prirodnih hibrida koji od prirode rastu u Kini (Drvodelić 2018a).

Vrste ovog roda pogodne su za osvajanje napuštenih poljoprivrednih površina ili za pospješivanje kakvoće tla (García-Morote i dr. 2014), posebice u uvjetima kada se naglasak stavlja na brzu proizvodnju biomase (Joshee 2012).

Nekoliko je recentnih istraživanja usmjereno na potencijal paulovnije u proizvodnji oblog drva (Joshee 2012), prinos biomase za energiju (Zuazo i dr. 2013, Berdón Berdón i dr. 2017), njenu primjenu u agrošumarstvu (Muthuri i dr. 2005), utjecaj navodnjavanja na produktivnost (García-Morote i dr. 2014), kemijski sastav njezina drva i ostala svojstva drva (López i dr. 2012, Zuazo i dr. 2013, Qi 2016, Berdón Berdón i dr. 2017).

Važne vrsta u ovom rodu su: *P. albiflora, P. australis, P. catalpifolia, P. elongata, P. fargesii, P. fortunei, P. kawakamii i P. tomentosa*. Vrste roda *Paulownia* rastu od prirode i kao kultivirane vrste u nekim dijelovima svijeta, uključujući Kinu, Japan i jugoistočnu Aziju, Europu, sjevernu i srednju Ameriku i Australiju, a vrste iz navedenog roda vrlo su prilagodljive na različite edafske i klimatske čimbenike i dobro rastu na marginalnim zemljištima (Drvodelić i dr. 2016).

Paulovnije pripadaju u pionirske vrste drveća (Drvodelić 2018a) sa svim osobinama koje posjeduju te vrste (rano rađanje sjemenom, sitno i mobilno sjeme, obilni urodi svake ili svake druge godine, brza ontogeneza, stabla kratkoga životnog vijeka,…). No, U Republici Hrvatskoj, na osnovu detaljnih terenskih opservacija, nije zabilježena invazivnost vrste *Paulownia tomentosa* iako je doduše primijećeno njezino širenje, ali na svega nekoliko lokaliteta i to u manjim grupama po nekoliko jedinki koje ne predstavljaju za sada opasnost za prirodnu vegetaciju i ekosustav (Drvodelić 2018b).

Korištenje stabla paulovnije datira u davnu prošlost. Naime, u Japanu stabla se paulovnije koriste se od 200-te godine poslije Krista i predstavlja nacionalnu tradiciju. Uz Japan, može se spomenuti i Kina u kojoj je paulovnija zasađena na više od 2,5 milijuna hektara.

Paulovnija kao energetski usjev za proizvodnju biomase značajna je zbog svoje glavne prednosti, brzog rasta, ali i zbog mogućnosti regeneracije iz korijena.

Isplativost proizvodnje biomase paulovnije ovisi o nekoliko faktora, a to su odabir prikladne vrste/hibrida, odabir zemljišta, mjesta sadnje, kao i intenzitet navodnjavanja i ostalih radova njege. Prilikom sadnje potrebno je odabrati sadnice ili sjeme koje prvenstveno otpornošću na temperature imaju preduvjet za preživljavanje i uspješnu proizvodnju biomase.

Drvodelić (2018) definira glavne odrednice o kojima ovisi uspjeh osnivanja novih plantaža paulovnije:

a) odabir prikladnih površina s mogućnošću navodnjavanja,

b) izbor vrste ili hibrida paulovnije,

c) određivanja optimalnog vremena sadnje,

d) priprema tla za sadnju i

e) određivanje međusobnog razmaka između biljaka i redova.

Plantaže paulovnije potrebno je u cilju povećanja produkcije biomase opskrbiti vodom i hranjivim tvarima. Naravno da utjecaj gnojiva i vode najviše ovisi o plodnosti tla i prirodnoj dostupnosti vode. Paulovniju je najbolje saditi na dubokim, plodnim, pjeskovito-ilovastim ili ilovastim tlima s dobrom drenažom (Drvodelić i dr. 2016).

Prema Drvodeliću (2018) drvo paulovnije je 50 % lakše od naših domaćih vrsta tvrdih listača (hrast, grab..); izrazito je čvrsto (žilavo), ali i lako obradivo. Otporno je na habanje, djelovanje kiselina i lužina. Drvo je svijetle boje s finom strukturom i svilenkasto glatke površine, bez kvrga te vodootporno, a u daskama se lako i brzo suši, a pri tome se ne iskrivljuje.

2.4 Cilj rada

Za cilj je rada postavljeno utvrditi prinos biomase pojedinih istraživanih hibrida paulovnije (9501, Shan Tong, OXI) te osnovne značajke koje proizvedenu biomasu definiraju kao biogorivo (tehničkog masenog udjela vode, udjela kore, nominalne gustoće i ogrjevne vrijednosti). Rezultati laboratorijskih analiza usporedit će se s referentnim vrijednostima za biomasu topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji, a u cilju definiranja pogodnih krajnjih korisnika proizvedenoga energijskoga drva, odnosno formuliranja preporuka za odabir optimalnih sustava pridobivanja biomase iz energetskih nasada paulovnije.

3. Materijal i metode

3.1 Mjesto istraživanja

Terensko je istraživanje provedeno na plohama (pokusna i kontrolna) osnovanim u rasadniku „Šumski vrt i arboretum“ koje je u sastavu NPŠO Zagreb šumarskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu. Rasadnik se nalazi na području grada Zagreba, u gradskoj četvrti Maksimir (slika 1).

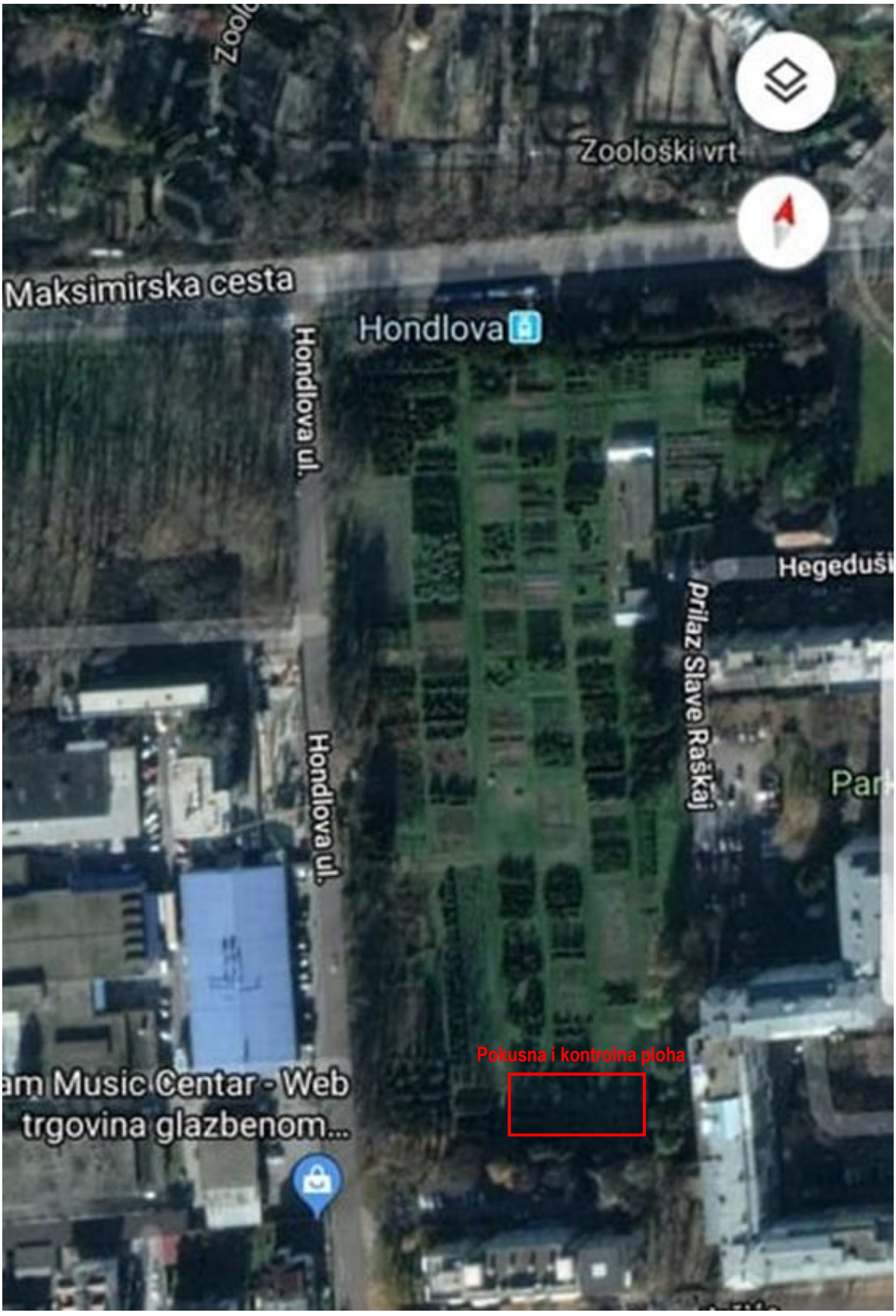
Područje Zagreba smješteno je u kontinentalnoj središnjoj Hrvatskoj, na južnim obroncima Medvednice i obalama rijeke Save na nadmorskoj visini 122 m. Gledajući zemljopisni smještaj, Zagreb je smješten na jugozapadnom dijelu Panonske nizine, između dinarske, alpske, panonske i jadranske regije.

Klima u Zagrebu je umjereno kontinentalna, što znači da su ljeta vruća i suha (s prosječnom temperaturom od 20°C, dok su zime hladne (te im prosječna temperatura iznosi 1°C). Najmanje padalina ima u rano proljeće i zimi, dok najviše u kasno proljeće te rano ljeto i jesen. Izrazito sušnih i vlažnih razdoblja nema.

Na jugu i istoku Zagreba prevladavaju nizine, dok su na zapadu brežuljkasti i gorski krajevi. Najviši dijelovi su na jugozapadu, točnije Žumberačka gora i Samoborsko gorje, kao i rubni dijelovi Medvednice na sjeveru.

Što se tiče tla, ono je srednje kakvoće. Uz rijeke, kao i u vlažnijim nizinama, prevladavaju močvarna i aluvijalna glejna tla, dok su na ravničarskim dijelovima pseudoglejna tla. U brdskim predjelima nalaze se lesivirana i smeđa kisela tla.

Grad Zagreb pripada vodnom području rijeke Save. Naime, Sava je desni pritok Dunava, ukupne duljine od 562 km u Hrvatskoj. Prosječnim protokom na ušću vodom je najbogatiji dunavski pritok. Za vodnu opskrbu Save važne su obilne padaline u brdsko-planinskom gornjem dijelu porječja (u Sloveniji). U gornjem dijelu toka, Sava ima snježno-kišni režim, dok u donjem i srednjem dijelu toka režim prelazi u kišno-snježni. Posljedica navedenog je ranoljetni i proljetni maksimum koji postaje izrazitiji od kasnojesenskog (kiša), dok je ljetni minimum izraženiji od zimskog minimuma.



Slika 1. Mjesto istraživanja

3.2 Materijal istraživanja

Pokus hibrida paulovnije osnovan je 25. 05. 2015. godine. Na kontrolnoj plohi prije sadnje prije sadnje ufrezano je gnojivo Osmocote. Razmak sadnje iznosio je 3 x 3 m. Posađene su 4 sadnice hibrida 9501 uzgojene iz korijena, 2 sadnice hibrida OXI uzgojene kulturom tkiva i 1 sadnica hibrida 9501 uzgojena iz jednogodišnjeg korjenjaka (slika 2). Na pokusnoj plohi je također prije sadnje ufrezano gnojivo Osmocote, dodane su huminske kiseline (Ema5 + 20 l vode) i probiotics EmFarmaPlus (ProBiotics + 20 l vode), a sadnice su nakon sadnje mikorizirane ektomikoriznim micelijima. Posađene su 4 sadnice hibrida 9501 uzgojene korijenskim reznicama, 2 sadnice hibrida OXI uzgojene kulturom tkiva, 4 sadnice hibrida 9501 uzgojene zapercima, 4 sadnice hibrida Shan Tong uzgojene reznicama od stabljike i 1 sadnica hibrida 9501 uzgojena od jednogodišnjeg korjenjaka. Razmak sadnje iznosio je također 3 x 3 m.

<table>
<tr><td colspan="2">9501
KRK
NEČEPIRANA</td><td colspan="2">9501
KRK
NEČEPIRANA</td></tr>
<tr><td colspan="2">9501
KRK
ČEPIRANA</td><td colspan="2">9501
KRK
NEČEPIRANA</td></tr>
<tr><td colspan="2">OXI
IVK
ČEPIRANA</td><td colspan="2">OXI
IVK
ČEPIRANA</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">9501
KRK
NEČEPIRANA</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">*KK – sadnice uzgojene jednogodišnjim korjenjakom; KRK – sadnice uzgojene korijenskim reznicama; IVK – sadnice uzgojene metodom kulture tkiva</td></tr>
</table>

Slika 2. Raspored hibrida na kontrolnoj plohi

Radovi njege su uključivali zalijevanje (oko svake sadnice je prilikom sadnje napravljena zdjelica za zalijevanje) i povremenu prihranu te čepiranje nekih sadnica u proljeće druge godine (20. 04. 2016.). Tijekom prve vegetacije, 2015. godine, zalijevanje je obavljeno u devet navrata (28. 05., 07. 07., 04 .08., 11. 08., 14. 08., 21. 08., 28 .08., 08. 09. i 22 .09.). Prihrana je obavljena tvorničkim gnojivima NPK srednje

koncentracije hranjiva formulacije NPK 15 15 15. Tijekom prve vegetacije prihrana je obavljena u pet navrata (24. 07., 31. 07., 14. 08., 21. 08. i 28. 08.) u dozi od 1 šake razbacivanjem u zoni zdjelice za zalijevanje. Radovi njege sadnica zalijevanjem i prihranom obavljeni su na obje plohe identično.

Shan Tong RSM ČEPIRANA	**9501 ZM ČEPIRANA**	**9501 KRM ČEPIRANA**
Shan Tong RSM NEČEPIRANA	**9501 ZM NEČEPIRANA**	**9501 KRM NEČEPIRANA**
Shan Tong RSM NEČEPIRANA	**501 ZM9 ČEPIRANA**	**9501 KRM ČEPIRANA**
Shan Tong RSM ČEPIRANA	**9501 ZM NEČEPIRANA**	**9501 KRM NEČEPIRANA**
OXI IVM NEČEPIRANA	**9051 KM ČEPIRANA**	**OXI IVM ČEPIRANA**
*KM – sadnice uzgojene jednogodišnjim korjenjakom; ZM – sadnice uzgojene zapercima; KRM – sadnice uzgojene korijenskim reznicama; RSM – sadnice uzgojene reznicama od stabljike; IVM – sadnice uzgojene metodom kulture tkiva		

Slika 3. Raspored hibrida na pokusnoj plohi

Paulownia Shan Tong je hibrid između vrsta *P. tomentosa* i *P. fortunei*. Kombinira otpornost na hladnoću vrste *P. tomentose* s brzinom rasta, ravnim rastom debla, uskom krošnjom i kvalitetom drva vrste *P. fortunei*. Hibrid ShanTong odlikuju velika otpornost na suše, kao i na hladnoće, velika otpornost na bolesti i štetnike te širok raspon prilagodljivosti. Prema komercijalnim proizvođačima sadnog materijala paulovnije, prilikom eksperimentalnog promatranja navedenog hibrida tijekom četiri godine pokazao se povoljan rast paulovnije u normalnim uvjetima, ali i u ljetnim mjesecima. Naime, najviša temperatura zraka bila je i do +42°C, dok je u uzastopnom razdoblju od 63 dana temperatura bila viša od +36°C bez padalina. Sadnice su pokazale visoku razinu otpornosti na navedene uvjete, kao i na niske temperature, do

-20°C. Može se uzgajati i u hladnijim regijama Njemačke, kao i u toplijim regijama južne Europe. Zbog svoje uske krošnje omogućuje sadnju više stabala po hektaru.

Paulownia 9501 je također hibrid vrsta *P. tomentosa* i *P. fortunei.* Poznat je i pod nazivom Shan Tong "Royal Treeme" and "Nordmax 21". Značajke su mu vrlo slične hibridu Shan Tong.

Paulownia OXI je hibrid dobiven "in vitro" metodom križanjem vrste *Paulownia elongata*. Specifičan je po tome što iz njegovog korijena raste nekoliko izdanaka. Upravo zbog toga namijenjen je za sadnju u svrhu drvne biomase za energiju jer stvara velike prinose po hektaru. Otporan na temperature do – 20°C. Uspijeva gotovo na svim zemljištima.



Slika 4. Stabla pokusne plohe

3.3 Metode istraživanja

3.3.1 Terenska mjerenja i uzorkovanje

Terenski je dio istraživanja proveden 28.11. 2017. godine na pokusnoj plohi i 06. 12. 2017. godine na kontrolnoj plohi. Ukupno je uzorkovano 15 stabala na pokusnoj plohi i 7 stabala na kontrolnoj plohi.

Stabla su uzorka posječena neposredno prije izmjere kojom je utvrđen prsni promjer i visina svakog stabla. Nakon izmjere, na svakih 1,30 m od korijenova vrata naviše uzorkovan je jedan primjerni kolut. Svim su tako nastalim sekcijama određena ukupna masa kojoj je pridodana masa kolutova u cilju utvrđivanja mase stabala u svježem stanju. Masa sekcija utvrđena je prijenosnom vagom WLC 60/C2/K, a masa kolutova prijenosnom vagom Kern EMB 1200-1.

Ukupno je uzorkovano 119 primjernih kolutova.



Slika 5. Uzorkovanje primjernih kolutova



Slika 6. Utvrđivanje ukupne mase u svježem stanju

3.3.2 Laboratorijske analize

Fizikalne su analize provedene u Laboratoriju za šumsku biomasu Šumarskog Fakulteta u Zagrebu.

Primjernim su kolutovima izmjerena dva nasuprotna promjera i dvije visine u cilju izračuna gustoće drva u svježem stanju te iskaza nominalne gustoće. S obzirom na

pojavnost šupljina centralnog dijela pojedinih primjernih kolutova istima su određene dimenzije te umanjen ukupni obujam s ciljem točnijeg izračuna gustoće drva.

Uzorci su zatim pripremljeni na način da je kora odvojena od drva koluta (slika 7) u cilju utvrđivanja udjela kore (na temelju odnosa ukupne mase uzorka i mase kore u standardno suhom stanju). Tako pripremljeni uzorcima utvrđen je tehnički maseni udio vode metodom gravimetrije sukladno normi HRN EN ISO 18134-2:2015 korištenjem sušionika Binder FD 115 i Binder FD 240 (slika 8). Sušenje je obavljeno u trajanju 24 sata na temperaturi 105 ± 2ºC uz izmjenu zraka u sušioniku svaka 3 sata. Početne i završne mase uzorka utvrđene su izvagom (na 0,1 g) laboratorijskom vagom Kern 440-49A.

Tehnički maseni udio vode pojedinih uzoraka izračunat kao odnos mase vode i mase uzorka u svježem stanju prema jednadžbi 1.

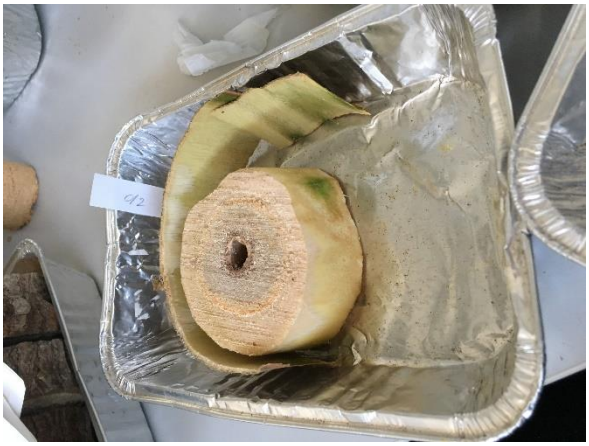
$$M = \frac{W_W - W_0}{W_w} \times 100 \qquad (1)$$

Gdje je:

M – tehnički maseni udio vode (%),

W_w – masa uzorka u svježem stanju (g),

W_0 – masa uzorka u standardno suhom stanju (g).



Slika 7. Priprema uzoraka



Slika 8. Uzorci u sušioniku

Po završetku gravimetrijske metode uzorci su primarno usitnjeni vertikalnim cjepačem Lancman 7 EL (slika 9) i pripremljeni na razini istraživanog stabla, posebno za drva, a posebno za koru. Finalno usitnjavanje na nominalnu veličinu čestica < 1,0 mm obavljeno je reznim mlinom Retsch SM 300 brzinom vrtnje 2000 min^{-1} (slika 10).



Slika 9. Primarno usitnjeni uzorci drva i kore



Slika 10. Rezni mlin Retsch SM 300

Količina usitnjenog uzorka po stablu reducirana je metodom četvrtina na potrebnu količinu za provođenje daljnjih laboratorijskih analiza.

Udio pepela pojedinog uzorka drva, odnosno kore za svako istraživano stablo utvrđen je sukladno normi HRN EN ISO 18122:2015 korištenjem peći za žarenje Nabertherm L9/11 (slika 11) i analitičke vage Mettler Toledo XA 204 (slika 12) s preciznosti očitanja od 0,1 mg. Postupak započinje žarenjem prazne lađica u peći za žarenje na 550 ± 10 °C tijekom 60 minuta nakon čega se hladi, najprije 7 min na termootpornoj podlozi u atmosferskim uvjetima, a potom u eksikatoru (slika 14) minimalno 30 min. Lađice s uzorcima (minimalno 1 g) stavljaju se u hladnu (sobna temperatura) peć za žarenje i podvrgavaju žarenju u propisanom režimu. Temperaturne rampe se programiraju na 30 min za dostizanje temperature 250 °C, zadržavanje temperature na 250°C 60 min, 30 min za dostizanje temperature 550 °C i zadržavanje temperature na 550°C 120 min. Nakon završenog žarenja lađica i njen sadržaj (pepeo) postupno se hlade do sobne temperature, ponovno najprije 7 min na termootpornoj podlozi u atmosferskim uvjetima, a potom u eksikatoru minimalno 30 min. Izračun masenog udjela pepela obavlja se sukladno jednadžbi 2.

$$A_{\mathrm{ad}} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad (2)$$

Gdje je:

A_{ad} –maseni udio pepela na zrakosuhoj bazi (%),

m_1 – masa prazne lađice (g),

m_2 – masa lađice i uzorka (g),

m_3 – masa lađice i pepela (g).



Slika 11. Peć za žarenje



Slika 12. Analitička vaga Mettler Toledo XA 204

Paralelno s utvrđivanjem udjela pepela provodi se i utvrđivanje tehničkog masenog udjela vode analitičkog uzorka sukladno normi HRN EN ISO 18134-3:2015 s ciljem korekcije rezultata udjela pepela i svih ostalih rezultata laboratorijskih ispitivanja u kojima se rezultat utvrđuje na zrakosuhoj bazi, a treba ga iskazati na standardno suhoj bazi. Uzorci (minimalno 1 g) sušeni su 180 min u sušioniku Binder FD 115 na temperaturi 105 ± 2ºC. Po završetku sušenja uzorci su premješteni iz sušionika u eksikator (sa silika gelom kao desikantom) da se postupno (minimalno 30 min) ohlade do sobne temperature. Prilikom analize koriste se posebne staklene posude sa poklopcem koji sprječava skupljanje vlage na uzorku za vrijeme manipulacije u laboratorijskoj atmosferi koja je očekivana zbog visoke higroskopnosti biogoriva sitne granulacije (slika 13). Posude su otvorene samo u trenutku doziranja uzorka te tijekom

sušenja u sušioniku. Početne i završne mase uzorka utvrđene su izvagom (na 0,1 mg) analitičkom vagom Mettler Toledo XA 204. Tehnički maseni udio vode analitičkog uzorka određuje se prema formuli 3.

$$M_{\mathrm{ad}} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \qquad (2)$$

Gdje je:

M – tehnički maseni udio vode zrakosuhog uzorka (%),

m_1 – masa prazne posude (g),

m_2 – masa posude i uzorka prije sušenja (g),

m_3 – masa posude i uzorka nakon sušenja (g).



Slika 13. Analitički uzorak nakon usitnjavanja na nominalnu veličinu čestica < 1 mm



Slika 14. Eksikator

Miješanjem jednoličnih masa uzoraka pojedinih repeticija po hibridu i plohi pripremljeni su kompozitni uzorci drva, odnosno kore. Navedeni uzori podvrgnuti su laboratorijskim analizama s ciljem utvrđivanja ogrjevne vrijednosti pomoću kalorimetra sukladno normi HRN EN 14918:2010. Za potrebe iskaza donje ogrjevne vrijednosti (ali i usporedbe s referentnim vrijednostima) određen je i sadržaj ugljika, vodika i dušika sukladno normi HRN EN ISO 16948:2015 te sadržaj sumpora sukladno normi HRN EN ISO 16994:2016. Navedene su analize provedene u Centralnom kemijsko - tehnološkom laboratoriju HEP Proizvodnje d.o.o.



Slika 15. Analitički uzorci za određivanje udjela pepela i tehničkog masenog udjela vode



Slika 16. Detalj kalorimetarske bombe

3.3.3 Obrada podataka

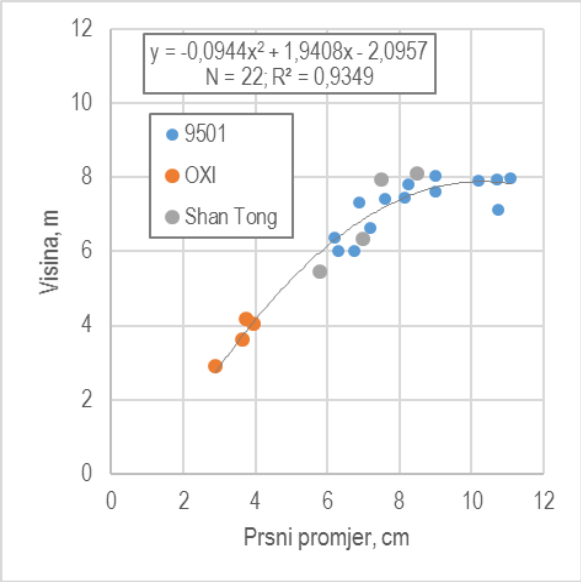
Ograničena veličina uzorka terenskog pokusa (i niz varijabli prilikom osnivanja pokusa) nije omogućila detaljnije statističke analize razlika između stabala kontrolne i pokusne ploha (za potrebe ovoga rada). Stoga su rezultati laboratorijskih analiza interpretirani na razini pojedinoga hibrida.

Konstruirana je visinska krivulja te iskazana ovisnost količine biomase o prsnom promjeru. Maseni je udio kore prikazan u ovisnosti o prsnim promjerima istraživanih stabala. Tehnički maseni udio vode i nominalna gustoća pojedinih hibrida prikazani su kutijastim dijagramima koji prikazuju srednju vrijednost, medijanu i kvartile vrijednosti po pojedinim stablima uzorka.

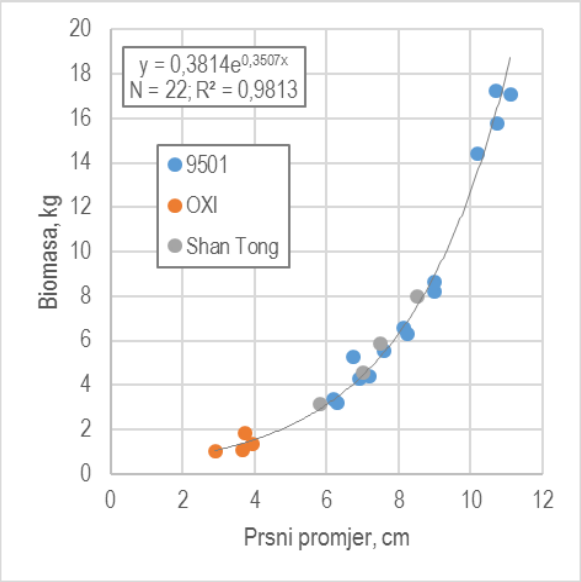
Za potrebe usporedbe s referentnim vrijednostima za biomasu topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji, prikazanima u normi HRN EN ISO 17225-1:2014, izračunate su prosječne ponderirane (s obzirom na udio kore) vrijednosti udjela pepela, gornje i donje ogrjevne vrijednosti te sadržaja ugljika, vodika, kisika, dušika i sumpora za pojedini istraživani hibrid.

4. Rezultati s raspravom

Tijekom istraživanja uzorkovano je ukupno 14 stabala hibrida 9501 te po četiri stabla hibrida OXI i Shan Tong. Prosječni prsni promjer uzorkovanih stabala iznosio je 7,3±2,4 cm. Hibridi 9501 i Shan Tong postigli su značajno veći prsni promjer u iznosu 8,4±1,7 cm i 7,2±1,1 cm u odnosu na hibrid OXI čiji je prosječni prsni promjer iznosio 3,6±0,5 cm. Očekivano, i visine stabala slijedile su trend porasta prsnog promjera (slika 17), što je u konačnici rezultiralo i većim prinosom biomase (slika 18). Evidentno je grupiranje postignutih prinosa biomase (na kraju treće vegetacije nečepiranih, odnosno druge vegetacije čepiranih stabala) u tri odvojene skupine. Hibrid OXI rezultirao je najmanjim prosječnim prinosom od svega 1,3±0,4 kg, hibrid Shan Tong prosječnim prinosom od 5,4±2,1 kg, a hibrid 9501 najvećim prinosom u iznosu 8,6±5,2 kg. Bitno je istaknuti da su četiri stabla uzorka hibrida 9501 (uzgojena korijenskim reznicama i nečepirana) pokazala prinos od preko 14 kg suhe tvari po stablu.



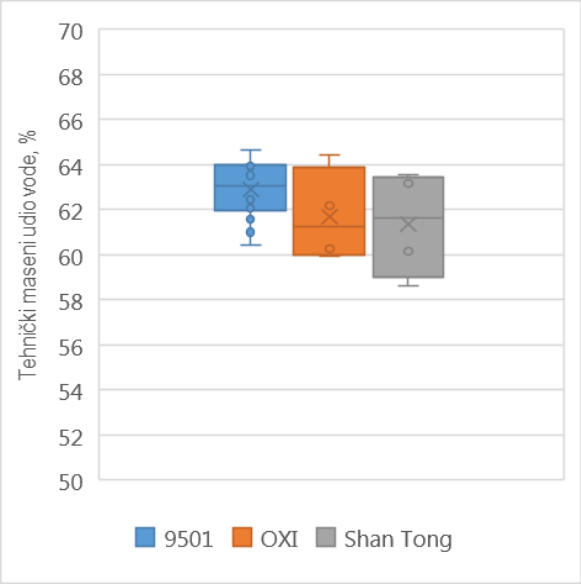
Slika 17. Visinska krivulja stabala uzorka



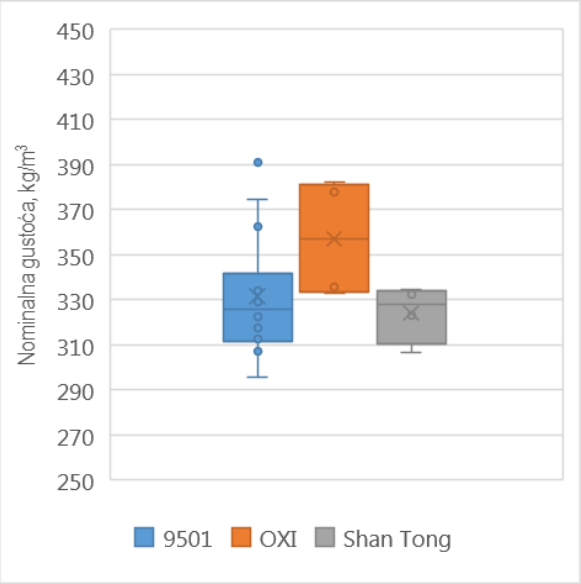
Slika 18. Ovisnost biomase o prsnom promjeru

Tehnički maseni udio vode u svježem stanju (neposredno nakon sječe) iznosio je, u usporedbi s našim komercijalnim vrstama drveća iz zimske sječe, visokih 62,4±1,7 % (slika 19). Slične rezultate, u rasponu od 62,79 % do 64,85%, utvrđuju i Berdón Berdón i dr. (2017) pri istraživanju različitih hibrida paulovnije posječenih u veljači.

Visok tehnički maseni udio vode neposredno utječe na smanjenje iskoristive ogrjevne vrijednosti drva (slika 22), s obzirom na činjenicu da se prilikom sagorijevanja u ložištu dio energije goriva mora utrošiti za isparavanje vode sadržane u gorivu, ali i vode koja nastaje kemijskom reakcijom vodika i kisika prilikom sagorijevanja (Hakkila 1989). Drugi problem pri korištenju drvne biomase visokog tehničkog udjela vode za proizvodnju energije je nemogućnost skladištenja (u obliku drvne sječke) s obzirom na povećanu očekivanu mikrobiološku aktivnost i posljedično gubitak drvne tvari koji primjerice pri skladištenju drvne sječke proizvedene u kulturama kratkih ophodnji vrbe opisuje Kofman (2012). Iako neki autori (Kalaycioglu i dr. 2005) navode da se drvo paulovnije lako prirodno prosušuje, nužno je provesti istraživanja i u našim klimatskim uvjetima kako bi se utvrdio stvarni potencijal mogućnosti prirodnog prosušivanja drva paulovnije, pogotovo imajući na umu da je uobičajeni iznos tehničkog masenog udjela vode u drvnoj sječki pri isporuci u Republici Hrvatskoj oko 35 %. Do postizanja odgovarajućih rezultata kroz istraživanja prirodnog prosušivanja, prikladnom se opcijom nameće prisilno prosušivanje svježe drvne sječke paulovnije upuhivanjem toploga zraka kada tehničko-tehnološki uvjeti omogućuju isplativost. Odnosno, u slučaju kada je dostupan jeftin izvor otpadne topline što je čest slučaj u našim kogeneracijskim postrojenjima.



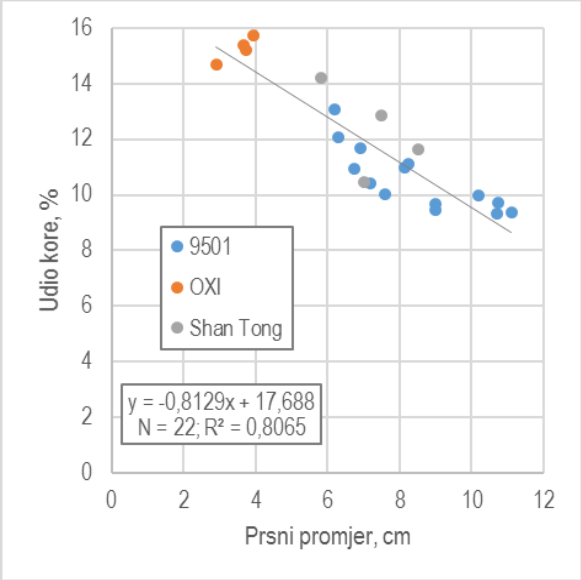
Slika 19. Kutijasti dijagram tehničkog udjela vode



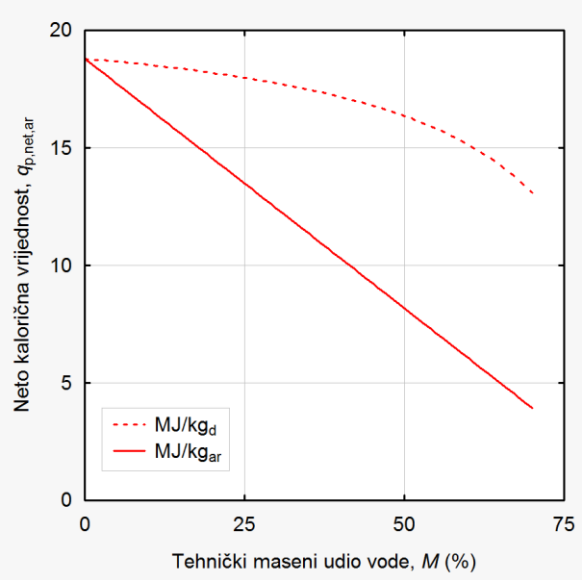
Slika 20. Kutijasti dijagram nominalne gustoće

Nominalna je gustoća istraživanih hibrida prosječno iznosila 335±27 kg/m^3 (slika 20), odnosno svega 60 % nominalne gustoće drva naših tvrdih listača, 75 % nominalne gustoće drva naših mekih listača, ili 85 % nominalne gustoće drva naših četinjača. Ovi su rezultati posebno indikativni i treba ili neizostavno uzeti u obzir prilikom komentiranja produkcije hibrida paulovnije koji se namjeravaju koristiti za proizvodnju energije, posebice u slučajevima kada se očekivani prinos iskazuje u metrima kubnim.

Udio kore istraživanih stabala kretao se u rasponu od 15,8 % do 9,3 % pokazujući veliku ovisnost o prsnom promjeru istraživanih stabala (slika 21). Poznato je da povećani udio kore nepovoljno djeluje na kakvoću energijskoga drva jer u pravilu i udio pepela slijedi trend povećanja udjela kore (Qi i dr. 2016) koja sadrži veći udio anorganskih tvari negoli drvo.



Slika 21. Ovisnost udjela kore o prsnom promjeru stabala uzorka



Slika 22. Ovisnost ogrjevne vrijednosti o udjelu vode

Udio pepela u uzorcima drva prosječno je iznosio 0,75±0,08 %, a u uzorcima kore 4,29±0,92 % (tablica 1). Kada se prosječni ponderirani udio pepela (s obzirom na maseni udio kore) za pojedine hibride paulovnije usporedi s prosječnim vrijednostima udjela pepela drvne biomase iz kultura kratkih ophodnji topole i vrbe (tablica 2) može se zaključiti da drvna biomasa paulovnije postiže povoljniji udio pepela (na donjoj granici raspona udjela pepela za topolu). Za razliku od rezultata ovoga istraživanja, Berdón Berdón i dr. (2017) nalaze veći udio pepela u biomasi paulovnije koji se kreće

u rasponu od 1,51 % do 1,96 %. Qi i dr. (2016), pak za drvo debla paulovnije utvrđuju udio pepela u iznosu 0,23±0,02 %, a za koru u iznosu 2,89±0,13 %. Razlike povoljnoga predznaka pri usporedbi udjela pepela utvrđenih ovim istraživanjem i referentnih vrijednosti za kulture kratkih ophodnji topole i vrbe mogu se objasniti većim prsnim promjerom istraživanih stabala i posljedično manjim udjelom kore u usporedbi s očekivano manjim promjerima stabala (i većim udjelom kore) topole i vrbe u kulturama kratkih ophodnji. Naime, prevladavajuća tehnologija pridobivanja biomase za energiju u kulturama kratkih ophodnji topola i vrba uvjetuje manje promjere stabala. Primjerice, primjena modificiranih silažnih kombajna (prve generacije) bila je ograničena promjerom na korijenovom vratu od svega 6 cm, pa se i selekcija klonova topole i vrbe fokusirala na stabla koja ukupne prinose biomase postižu gušćim razmakom sadnje uz preferiranje više izbojaka iz panja.

Tablica 1. Udio pepela u uzorcima drva i kore pojedinih hibrida

Ploha	Uzorak	Hibrid	Maseni udio pepela, %
Pokusna	Drva	9501	0,80
		Shan Tong	0,67
		OXI	0,69
	Kore	9501	5,80
		Shan Tong	3,93
		OXI	3,34
Kontrolna	Drva	9501	0,76
		OXI	0,86
	Kore	9501	4,29
		OXI	4,10

Neočekivano, unatoč prosječno 5,7 puta većem udjelu pepela u uzorcima kore u usporedbi s uzorcima drva, gornja je ogrjevna vrijednost uzorka drva, u prosječnom

iznosu 19,32±0,35 MJ/kg bila čak neznatno niža od gornje ogrjevne vrijednosti uzoraka kore koja je iznosila prosječno 19,70±0,26 MJ/kg. Prosječene ponderirane vrijednosti gornje i donje ogrjevne vrijednosti istraživanih hibridova paulovnije nalaze se u okviru referentnih vrijednosti biomase iz kultura kratkih ophodnji topole i vrbe (tablica 2), kao i u okviru vrijednosti koje u svojim istraživanjima hibrida paulovnije utvrđuju Zuazo i dr. (2013) te Qi i dr. (2016). Pošto ogrjevna vrijednost ovisi o količinskoj pretvorbi ugljika i vodika sadržanih u gorivu u vodu i ugljični dioksid može se reći da je ogrjevna vrijednost funkcija kemijskoga sastava goriva (Susott i dr. 1975). Stoga bi svako veće odstupanje ogrjevne vrijednosti ukazivalo na razlike u kemijskom sastavu biogoriva (Zuazo i dr. 2013). Sukladno navedenom, malena varijabilnost ogrjevne vrijednosti utvrđena i ovim kao i prethodnim istraživanjima (Zuazo i dr. 2013, Qi i dr. 2016) u usporedbi s referentnim ogrjevnim vrijednostima biomase topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji (tablica 2) potvrđuju pretpostavku o sličnosti kemijskog sastava drvne biomase. Usporedbom referentnih vrijednosti sadržaja ugljika i vodika u biomasi topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji i onih utvrđenih istraživanjem hibrida paulovnije sličnost kemijskog sastava je očita i očekivana (tablica 2).

Tablica 2. Usporedba parametra biogoriva iz kultura kratkih ophodnji

Parametar	**Jedinica**	**Vrba**	**Topola**	**Paulovnia**		
				9501	**Shan Tong**	**OXI**
Pepeo	w-% d	2.0 (1.1–4.0)	2.0 (1.5–3.4)	1.2	1.1	1.2
Gornja ogrjevna vrijednost	MJ/kg d	19.9 (19.2–20.4)	19.8 (19.5–20.1)	19.5	19.6	19.2
Donja ogrjevna vrijednost	MJ/kg d	18.4 (17.7–19.0)	18.4 (18.1–18.8)	18.3	18.3	17.9
Ugljik, C	w-% d	48 (46–49)	48 (46–50)	49	49	49
Vodik, H	w-% d	6.1 (5.7–6.4)	6.2 (5.7–6.5)	5.8	5.8	5.7
Kisik, O	w-% d	43 (40–44)	43 (39–45)	44	44	44
Dušik, N	w-% d	0.5 (0.2–0.8)	0.4 (0.2–0.6)	0.3	0.2	0.3
Sumpor, S	w-% d	0.05 (0.02–0.10)	0.03 (0.02–0.10)	0.06	0.05	0.05

5. Zaključak

Istraživanjem su utvrđene značajne razlike u produkciji biomase pojedinih hibrida paulovnije. Hibrid OXI rezultirao je najmanjim prosječnim prinosom od svega 1,3±0,4 kg, hibrid Shan Tong prosječnim prinosom od 5,4±2,1 kg, a hibrid 9501 najvećim prinosom u iznosu 8,6±5,2 kg (na kraju treće vegetacije). No, s obzirom na kompleksnost postavki pokusa (različite metode uzgoja sadnica i različit tretman pri osnivanju i njezi stabla) i relativno malen broj stabala uzorka za definitivne zaključke o razlikama u prinosu pojedinih hibrida nužno je provesti dodatna istraživanja.

Rezultati ovoga istraživanja, u odnosu na rezultate prethodnih istraživanja kao i u odnosu na referentne vrijednosti za biomasu topola i vrba iz kultura kratkih ophodnji, ukazuju da sva tri testirana hibrida paulovnije (9501, Shan Tong, OXI) u našim uvjetima mogu postići povoljne značajke udjela pepela i ogrjevne vrijednosti.

Niža nominalna gustoća drva paulovnije (odnosno količina goriva u jedinici obujma) ukazuju na nužnost usporedbe i vrednovanja prinosa biomase hibrida paulovnije (s prinosima ostalih vrsta drveća koje se koriste za proizvodnju energije) prvenstveno na razini količine standardno suhe drvne tvari (t/ha).

Ostale značajke bitne za pozicioniranje biomase paulovnije kao biogoriva ukazuju na činjenicu da se lanac dobave biomase za energiju iz plantaža paulovnije mora modificirati na način da uspješno odgovori izazovima koji proizlaze iz povećanih vrijednosti tehničkog masenog udjela vode u trenutku sječe. Mogućnosti prirodnog prosušivanja energijskoga drva paulovnije u našim klimatskim uvjetima moraju se detaljnije istražiti, kao i odabir optimalnog vremena sječe te optimalnog vremena i mjesta usitnjavanja i skladištenja drvne sječke.

U ovom trenutku uspješno se korištenje energijskoga drva paulovnije može očekivati u kogeneracijskim postrojenjima koja na raspolaganju imaju suvišak topline za prisilno sušenje drvne sječke. Primjerice, i danas se u Republici Hrvatskoj, u pojedinim kogeneracijskim postrojenjima koja rade na principu rasplinjavanja biomase (i zahtijevaju standardno suhu drvnu sječku) učinkovito koristi drvna sječke topole (sa također relativno velikim inicijalnim tehničkim masenim udjelom vode uz prethodno prisilno sušenje viškom topline). Za očekivati je da bi navedenim postrojenjima brzo uzgojena biomasa paulovnije predstavljala povoljan nadomjestak u uvjetima ograničene raspoloživosti količina energijskoga drva.

6. Literatura

1. Berdón Berdón, J., Montero Calvo, A. J., Royano Barroso, L. , Parralejo Alcobendas, A. I., González Cortés, J., 2017: Study of Paulownia's Biomass Production in Mérida (Badajoz), Southwestern Spain. Environment and Ecology Research 5: 521–527.
2. Bosner, A., Nikolić, S., Pandur, Z., Benić, D., 2008: Razvoj i umjeravanje prijenosnoga sustava za mjerenje osovinskih opterećenja vozila – mjerenja na forvarderu. Nova mehanizacija šumarstva 29: 1–15.
3. Ćosić, B., Stanić, Z., Duić, N., 2011: Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia. Energy 36, 2017–2028.
4. Drvodelić, D., 2015: Podizanje energetskih nasada za proizvodnju biomase. Gospodarski list 22: 39–49.
5. Drvodelić, D. Oršanić, M., Paulić, V., 2016: Utjecaj ektomikorize i huminskih kiselina na morfološke značajke jednogodišnjih sadnica hibrida *Paulownia tomentosa* x *Paulownia fortunei*. Šum. list 140: 327–337.
6. Drvodelić, D., 2018a: Plantažni uzgoj paulovnije. Gospodarski list 12: 47–59.
7. Drvodelić, D., 2018b: Razmnožavanje paulovnije korijenskim reznicama. Šum. list 142: 297–307.
8. Domac, J., Richards, K., Risović, S., 2005: Socio-economic drivers in mplementing bioenergy projects. Biomass and Bioenergy 28: 97–106.
9. García-Morote, F. A., López-Serrano, F. R., Martínez-García, E., Andrés-Abellán, M., Dadi, T., Candel, D., Rubio, E., Lucas-Borja, M. E., 2014: Stem Biomass Production of *Paulownia elongata* × *P. fortunei* under Low Irrigation in a Semi-Arid Environment. Forests 5: 2505–2520.
10. Hakkila, P., 1989: Utilization of Residual Forest Biomass. Springer-Verlag, Berlin, 1–568.
11. HRN EN 14918:2010 Solid biofuels – Determination of calorific value.
12. HRN EN ISO 16948:2015 Solid biofuels – Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen.
13. HRN EN ISO 16994:2016 Solid biofuels – Determination of total content of sulfur and chlorine.

14. HRN EN ISO 17225-1:2014 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 1: General requirements.
15. HRN EN ISO 18122:2015 Solid biofuels – Determination of ash content.
16. HRN EN ISO 18134-2:2015 Solid biofuels – Determination of moisture content – Oven dry method – Part 2: Total moisture – Simplified method.
17. HRN EN ISO 18134-3:2015 Solid biofuels – Determination of moisture content – Oven dry method – Part 3: Moisture in general analysis sample.
18. Joshee, N., 2012: Paulownia, in: C. Kole, C.P. Joshi, D.R. Shonnard (Eds.), Handbook of Bioenergy Crop Plants, CRC Press, New York, USA, pp. 671–686.
19. Kajba, D., 2009: Contribution of Poplars and Willows to Sustainable Livelihoods and Land-use in Croatia: Status and Needs, Presentation at the International Workshop “Improve the contribution of Poplars and Willows in meeting sustainable livelihoods and land-use in selected Mediterranean and Central Asian countries” FAO Project GCP/INT/059/ITA, Izmit, Turkey, 27-31 July 2009.
20. Kalaycioglu, H., Deniz, I., Hiziroglu, S., 2005: Some of the properties of particleboard made from Paulownia. J. Wood Sci. 51: 410–414.
21. Khan, A. A., de Jong, W., Jansens, P. J., Spliethoff, H., 2009: Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies. Fuel Processing Technology 90(1): 21–50.
22. Kofman, P.D., 2012: Storage of short rotation coppice willow fuel. Coford Connects, Harvesting/Transport 30: 1–4.
23. Krpan, A. P. B., 1996: Biomasa za enegiju – zbilja hrvatskoga krša? Zaštita šuma i pridobivanje drva, S. Sever (ur.), Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Šumarski institut, Jastrebarsko, Zagreb, 211–216.
24. López, F., Pérez, A., Zamudio, M., De Alva, H. E., García, J. C., 2012: Paulownia as raw material for solid biofuel and cellulose pulp. Biomass Bioenergy 45: 77–86.
25. Muthuri, C. W., Ong, C. K., Black, C. R., Ngumi, V. W., Mati, B. M., 2005: Tree and crop productivity in Grevillea, Alnus and Paulownia-based agroforestry systems in semi-arid Kenya. For. Ecol. Manag. 212: 23–39.
26. Slabak, M., 1983: Tehnologija iveranja u svijetu i kod nas. Mehanizacija šumarstva 8 (7-8): 193–204.
27. Slabak, M., 1987: Rezultati primjene iverača u nizinskoj proredi. Korišćenje šumske biomase za energetiku; Mogućnosti proizvodnje i korišćenja u SFR

Jugoslaviji, D. Bura (ur.). Jugoslovenski poljoprivredno šumarski centar – Služba šumske proizvodnje, Beograd, 229–238.

28. Spinelli, R., Hartsough, B. R., Magagnotti, N., 2005: Testing Mobile Chippers for Chip Size Distribution. International Journal of Forest Engineering 16(2): 29–35.
29. Susott, R. A., De Groot, W. E., Shafizadeh, F., 1975: Heat content of natural fuels. J. Fire Flammabl. 6: 311–325.
30. Šušnjar, M., 1998: Istraživanje ovisnosti nekih tehničkih značajki iverača morfološkom raščlambom. Mehanizacija šumarstva 23 (3-4): 139–150.
31. Qi,·Y., Yang, C., Hidayat, ·W., Jang, JH., Kim, NH., 2016: Solid Bioenergy Properties of Paulownia tomentosa Grown in Korea. J. Korean Wood Sci. Technol. 44: 890–896.
32. Vusić, D., 2013: Pogodnost sustava pridobivanja drvne biomase u smrekovoj šumskoj kulturi. Disertacija. Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 1–174.
33. Vusić, D., Zečić, Ž., Paladinić, E., 2014: Optimization of energy wood chips quality by proper raw material manipulation. Proceedings Natural resources, green technology & sustainable development, I. Radojčić Redovniković, T. Jakovljević, J. Halambek, M. Vuković, D. Erdec Hendrih, (ur.), Zagreb, Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, 159–166
34. Wang, Q., Shogren, J.F., 1992: Characteristics of the crop-paulownia system in China. Agric. Ecosyst. Environ. 39: 145–152.
35. Zuazo, V. H. D., Bocanegra, J. A. J., Torres, F. P., Pleguezuelo, C. R. R., Martínez, J. R. F., 2013: Biomass Yield Potential of Paulownia Trees in a Semi-Arid Mediterranean Environment (S Spain). Int. J. Renew. Energy Res. 3: 789–793.