

## Revitalizacija kulture Virdžinijskog sljeza (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) za izolaciju celuloznih vlakana i proizvodnju biogoriva uz ispunjavanje zahtjeva kružnog biogospodarstva

Gabriela Vanja<sup>1</sup>, Zorana Kovačević<sup>1</sup>, Ana Matin<sup>2</sup>, Sandra Bischof<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište u Zagrebu Tekstilno-tehnološki fakultet, Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Zagreb, Hrvatska

\*Dopisni autor: [sbischof@ttf.hr](mailto:sbischof@ttf.hr)

Prispjelo 10. siječnja 2023.

UDK 677.11/.15:631

### Pregled

Ovaj pregledni rad analizira mogućnost primjene višegodišnje kulture Virdžinijskog sljeza (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) za proizvodnju celuloznih vlakana. Ova kultura je odabrana, zbog prethodno utvrđene mnogostruke primjene koja osim uzgoja za prehrambene i medicinske svrhe uključuje čišćenje tla, povećanje biološke raznolikosti, smanjenje erozije tla, pa sve do proizvodnje biogoriva. Prvenstveni cilj ovog istraživanja bio je utvrditi mogućnost iskorištenja biomase (stabljike) ove biljke za proizvodnju vlakana, odnosno utvrditi optimalne uvjete za izolaciju vlakana. U suradnji sa stručnjacima poljoprivredne struke je ispitana mogućnost primjene krutog ostatka za energetske svrhe. U postupku predobrade je utvrđena uspješnost kombinacije fizikalno/kemijske obrade vlakana uz primjenu mikrovalne energije, što ne samo da skraćuje vrijeme proizvodnje i potrošnju energije, već također doprinosi ekološkim i ekonomskim aspektima obrade vlakana. Rezultati provedenih istraživanja su potvrdili mogućnost višestruke primjene biomase Virdžinijskog sljeza, najprije za izolaciju vlakana, a zatim i za proizvodnju krutih ili tekućih biogoriva. Rezultati ukazuju na mogućnost revitalizacije biljke sljeza uz ispunjavanje ciljeva kružnog biogospodarstva i Europskog Zelenog plana, ključnog za suočavanje s izazovima klimatskih promjena.

**Ključne riječi:** *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby; kruta biogoriva; celulozna vlakna; poljoprivredna biomasa; održivost, bioenergija; Europski zeleni plan; kružno gospodarstvo

### Review

#### Revitalization of Virginia mallow culture (*Sida hemaphrodita* (L.) Rusby) for the isolation of cellulose fibers and the production of biofuels while meeting the requirements of a circular bioeconomy

This review paper analyzes the possibility of using the perennial crop of Virginia mallow (*Sida hemaphrodita* (L.) Rusby) to produce cellulose fibers. This culture was chosen, due to the previously established multiple applications, which, in addition to cultivation for food and medicinal purposes, include cleaning of the soil, increasing biological diversity, reducing soil erosion, and even the production of biofuels. The primary goal of this research was to determine the possibility of using the biomass (stems) of this plant for fiber production, that is, to determine the optimal conditions for fiber isolation. In cooperation with experts in the agricultural profession, the possibility of using the solid residue for energy purposes was examined. In the pretreatment process, the success of the combination of physical/chemical fiber treatment with the use of microwave energy was established, which not only shortens production time and energy consumption but also contributes to the ecological and economic aspects of fiber processing. The results of the conducted research confirmed the possibility of multiple applications of Virginia mallow biomass, first for fiber isolation, and then for the production of solid or liquid biofuels. The results indicate the possibility of revitalizing the mallow plant while meeting the goals of the circular bioeconomy and the European Green Deal, which is crucial for facing the challenges of climate change.

**Ključne riječi:** *Sida Hemaphrodita* (L.) Rusby; solid biofuels; cellulose fibers; agricultural biomass; sustainability; bioenergy; European Green Deal; circular economy

## 1. Uvod

Svake godine svjedočimo sve većim klimatskim promjenama koje su ponajviše uzrokovane zagrijavanjem atmosfere. Šume i oceani se onečišćuju i uništavaju, dok je sve više životinjskih i biljnih vrsta na rubu izumiranja. Jedna od strategija koja pruža rješenje za ublažavanje negativnih posljedica je Europski zeleni plan, kojim se EU nastoji preobraziti u pravedno i prosperitetno društvo s modernim, re-sursno i učinkovitim i konkurentnim gospodarstvom do 2050. godine [1]. Glavni cilj ove strategije je prelazak na čistu energiju [2], kružno biogospodarstvo i potpunu mobilizacija industrije. Međutim, prije svega potrebno je smanjiti količinu otpada dobivenog iz industrija ili ga nastojati u potpunosti iskoristiti.

Posljednjih godina, fokus čovječanstva sve više je usmjeren prema održivom razvoju. UN-ova Komisija za okoliš i razvoj je već 1987. godine definirala 17 prioritetnih ciljeva za zadovoljenje današnjih potreba bez ugrožavanja potreba budućih generacija. Ciljevi održivog razvoja temelje se na gospodarskoj učinkovitosti, socijalnom napretku i odgovornosti prema okolišu. Rastuća svijest o utjecaju gospodarskog rasta na neobnovljive izvore energije i okoliš potaknula je preispitivanje linearnog modela "uzmi – iskoristi – odbaci".

Kružno gospodarstvo, nasuprot linearnom modelu, postaje ključna strategija Europske unije i uključuje prakse poput ponovne upotrebe (oprabe), popravka, recikliranja, ekodizajna i odgovorne potrošnje. Prvi službeni dokument o zaokretu neodrživog gospodarstva prema konceptu kružnog gospodarstva objavljen je 2012. godine pod nazivom „Towards Circular Economy“ gdje je istaknut njegov potencijal ka stvaranju financijskih uštedovina [3]. Korištenje sirovina u kružnom gospodarstvu bazira se na smanjenju njihove uporabe i optimizaciji korištenja nusproizvoda i otpada kako bi se smanjila iskorištenost resursa i utjecaj proizvodnje i potrošnje na onečišćenje okoliša. U načelu, glavna razlika između linearne i kružne ekonomije leži u pridržavanju načela održivog razvoja. Kružno gospodarstvo može se smatrati održivim gospodarskim sustavom u kojem je gospodarski rast odvojen od korištenja resursa, smanjenjem i recirkulacijom prirodnih resursa [4]. Na sl.1 prikazano je kružno gospodarstvo koje se temelji na korištenju proizvedenih materijala što je duže moguće, a otpad nastaje samo ako ne postoji mogućnost recikliranja.

Europska komisija je 2020. godine predstavila novi Akcijski plan za kružno gospodarstvo – Za čišću i konkurentniju Europu, koji snažno podržava ciljeve europskog zelenog plana [6]. Ostvarivanje kružnog gospodarstva zahtijeva promjene u cijelom lancu vrijednosti, od učinkovitog upravljanja resursima, dizaj-



Sl.1 Temeljni principi kružnog biogospodarstva [5]

na proizvoda, novih poslovnih i tržišnih modela, do novih načina pretvaranja otpada u resurse te promjene modela ponašanja potrošača. To uključuje potpunu transformaciju postojećeg gospodarskog modela kroz inovacije. Veliki napor treba uložiti u odvajanje otpada duž cijelog lanca vrijednosti, uključujući i svako kućanstvo [7].

Jedan od koraka prema ostvarivanju kružnog gospodarstva je korištenje lignocelulozne biomase kao alternative fosilnim gorivima ili u proizvodnji papira, biokompozita, izolacijskih materijala, i sl. Lignocelulozna biomasa obuhvaća biomasu nakon primarne proizvodnje poljoprivrednog, šumskog i agroindustrijskog otpada, te predstavlja najrasprostranjeniji oblik jeftine, obnovljive i visokoenergetske biomase. Najčešće se koristi za proizvodnju krutih biogoriva odnosno sječke, peleta i briketa, tekućih biogoriva odnosno etanola i dizela, te plinovitih biogoriva odnosno bioplina. Svake godine se zbog rastuće industrijalizacije i potražnje za hranom proizvede milijarde tona lignocelulozne biomase. Većina lignoceluloznog otpada danas se spaljuje ili odbacuje, što zagađuje važne vodene resurse i predstavlja važan ekološki problem [8]. Poljoprivredna biomasa obuhvaća biomasu koja proizlazi iz stočarske, ratarske, hortikulture i doradbeno preradbene proizvodnje. Trenutačno najveći potencijal pokazuje poljoprivredna biomasa iz ratarske proizvodnje žitarica, industrijskih i energetskih biljaka. Najveći dio poljoprivrednog lignoceluloznog otpada odnosi se na žetvene ostatke (različiti dijelovi biljke poput lišća, stabljika, ljuski, korijenja, kao i biomasa nastala preradom primarnog proizvoda npr. zrna kod žitarica, u industrijskim postrojenjima ili na gospodarstvima) [9]. U Strategiji gospodarenjem otpadom Republike Hrvatske (2005), se ističe da se dio poljoprivrednog ostatka nastalog u ratarstvu i prehrambenoj industriji koristi za stelje i slične svrhe, dok se zanemarivi dio koristi za proizvodnju energije, a dio ostavlja na poljima. Također, prema procjeni spomenute Strategije, godišnje se u ratarstvu

generira 2 milijuna tona ostataka pšenice, 2 milijuna tona kukuruzovine te 1 milijun tona ostatka raznog voća, povrća, uljarica itd., pri čemu nastaje 1,5 milijuna tona poljoprivrednog otpada godišnje [10]. Iz tog razloga, potrebno je smanjiti količinu poljoprivrednog otpada koji se akumulira na poljima, izbjegavati spaljivanje lignocelulozne biomase na poljima koje je ionako prema zakonodavstvu EU zabranjeno, te je potrebno takav otpad prenamijeniti u sirovinu koja će ponovno ići u proizvodni proces. U tab.1 prikazani su najvažniji izvori celuloze i lignina, među kojima je i biljka Virdžinijski sljez. Pravovremenim korištenjem lignocelulozne biomase moguće je osigurati konstantnu opskrbu sirovinama i time postići neovisnost u iskorištavanju fosilnih goriva.

Tab.1 Neki od vrijednih izvora lignocelulozne biomase [8]

Vrsta biomase	Izvor lignocelulozne biomase
Poljoprivredni otpad	Slama žitarica i uljarica (kukuruza, zobi, riže i pšenice, uljana repica, suncokret itd.), biomasa energetskih kultura (Virdžinijski sljez, Miskantus, i Divovska trska).
Šumski otpad	Biomasa hrasta, smreke, jasena, bukve, vrba, topola itd.
Agro-industrijski otpad	Ostatci nakon industrijske prerade voća i povrća (koštice i ljuske), otpad od prerade drveta i proizvodnje drvenih panela i namještaja

Tranzicija prema kružnom gospodarstvu predstavlja izazovan, ali nužan proces za rješavanje problema klimatskih promjena s kojima se suočavamo danas. Ključna komponenta uspjeha ovog prijelaza leži u efikasnoj komunikaciji između različitih grana industrije. Unatoč tome što se trenutne prijelazne faze mogu sukobiti s uspostavljenim karakteristikama dugovječnih modela linearnog gospodarstva, pravilnom edukacijom građana, promocijom inicijativa, tehnološkim napretkom i istraživanjem možemo postići društvo koje je pravedno, prosperitetno te obiluje modernim, resursno učinkovitim i konkurentnim gospodarstvom [4].

Poljoprivreda predstavlja jednu od ključnih gospodarskih grana Europske unije. Njeno održivo upravljanje, uključujući korištenje poljoprivredne biomase, odnosno energetskih kultura, je ključno za ispunjavanje strateških ciljeva. Jedna takva kultura ogromnog potencijala i širokog spektra primjene je višegodišnja energetska biljka *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby iz porodice *Malvaceae* (sljezovi) [2]. *Sida hermaphrodita* (eng. Virginia mallow), smanjuje eroziju tla, pomaže pri njegovom čišćenju, povećava biološku raznolikost, koristi se u medicinske svrhe, kao sirovina za proizvodnju biogoriva, a cilj ovog istraživanja bio je utvrđivanje njenog potencijala za primjenu u svrhu ojačala za biorazgradivu polimernu matricu, odnosno za biokompozite.

## 2. Virdžinijski sljez

Virdžinijski sljez (lat. *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) je višegodišnja energetska kultura autohtona u području Kanade i sjeveroistočnom dijelu Sjeverne Amerike. Visina biljke, kao jedno od morfoloških svojstava, može varirati u rasponu od 1 do 3 m. Ima dugačke i šiljaste listove koji naizmjenice rastu na stabljici i obično se sastoje od 3–7 nepravilno nazubljenih režnjeva sa srednjim najdužim. U početnom stadiju razvoja, stabljike su prekrivene dlačicama, koje s vremenom nestaju, čime stabljika postaje glatka. Cvatovi su bijeli sa 5 latica duljine oko 8 mm, a cvatu od kolovoza do listopada (sl.2). Ova kultura pruža značajan izvor lignocelulozne biomase, podržavajući razne industrijske sektore, uključujući proizvodnju papira i energije. Njena intenzivna kultivacija naglašava značajan potencijal u održivom razvoju i ekonomiji [11].



Sl.2 Prikaz gornjeg dijela cvjetajuće stabljike Virdžinijskog sljeza [11]

Cvatnja počinje u kolovozu i traje do pojave prvog jakog mraza u listopadu. Sjeme se raspršuje tijekom zime i klija u rano proljeće. Jedna odrasla biljka može proizvesti nekoliko tisuća sjemenki, od kojih je većina održiva [11]. Mladice izbijaju iz tla krajem travnja i početkom svibnja iz rizoma biljke. Životni vijek kultivirane biljke je 15 do 20 godina, s očekivanih 20-30 izdanaka u četvrtoj i daljnjim godinama uzgoja. Prva godina žetve ima niske prinose biomase, dok su najveći prinosi dobiveni u 3. i 4. godini uzgoja [12]. Prinosi ovisi o tlu i vremenskim uvjetima, primjenjivom gnojivu i kontroli korova [13]. Virdžinijski sljez uspijeva na otvorenim, vlažnim, sunčanim do djelomično zasjenjenim obalnim staništima. Raste na pjeskovitim tlima s malim udjelom organske tvari i neutralnim do blago kiselim pH-om [11]. Ova vrsta može uspjeti čak i na tlima slabije proizvodne kvalitete, tzv. marginalnim tlima, što je korisno za rekultivaciju degradiranih i onečišćenih tala, te kako bi se izbjeglo iskorištavanje zemljišta pogodnih za proizvodnju hrane [12].

Unatoč tvrdnjama da nema prirodnih neprijatelja, oko 30 % biljaka na plantaži može biti zaraženo crvenim paukom i lisnim ušima. Međutim, njihova štetnost je mala, pa se ne preporučuje primjena ekološki nepovoljnih mjera zaštite. Potencijalne prijete predstavljaju i polukrlice poput smeđe stjenice (lat. *Coreus marginatus* L.) i različite stjenice roda *Lygus*, te gusjenice leptira [12].

## 2.1. Kemijski sastav biljke Virdžinijskog sljeza

Potencijal lignocelulozne biomase za biogoriva određuje se njezinim kemijskim sastavom. Poljoprivredni otpad, naveden u tab.1, obično ima visok udio celuloze i hemiceluloze, te nizak udio lignina (< 20 %).

Udjeli navedenih komponenti mogu varirati ovisno o uvjetima uzgoja biljke, geografskom položaju i dobi biljke te samoj metodi određivanja kemijskog sastava. U tab.2 su prikazani različiti udjeli celuloze, hemiceluloze i lignina iako je metoda određivanja lignoceluloznog sastava ista kod svih prikazanih autora (modificirana standardizirana metoda ISO 5351-1:2002) [14]. S obzirom na kemijski sastav, poljoprivredni otpad je pogodan za proizvodnju biogoriva, budući da biomasa s nižim sadržajem lignina zahtijeva manje energetske intenzivne procese za pretvorbu u biogorivo. Za razliku od poljoprivredne biomase, šumska biomasa, s visokim sadržajem lignina, predstavlja tehnički i ekonomski izazov [8].

Kemijski sastav biljke Virdžinijskog sljeza, prema istraživanjima prikazanim u tab.2, obuhvaća određeni sadržaj celuloze, hemiceluloze i lignina. Udio lignoceluloznih komponenti u Virdžinijskom sljezu ovisi o klimatskim uvjetima i roku žetve (listopad, veljača ili ožujak) [15]. Drugi i treći rok žetve doprinose većim udjelima celuloze i lignina u biljci, dok se udio hemiceluloze može povećati ili smanjiti. U trećem roku žetve sadržaj vlage biomase je najčešće manji od 20 %, što olakšava daljnju doradu i skladištenje.

**Tab.2** Kemijski sastav biljke Virdžinijskog sljeza prema odabranim istraživačima [2, 14, 15]

Kemijski sastav (%)	Izvor		
	[14]	[15]	[2]
Celuloza	42,65	39,03	39,93
Hemiceluloza	29,17	30,08	26,84
Lignin	23,00	19,88	28,08

Celuloza, kao glavna strukturna komponenta, utječe na čvrstoću stabljičnih vlakana. Postotak celuloze u prirodnom vlaknu utječe na primjenu, svojstva i troškove proizvodnje. Hemiceluloza, kao potporni matriks celuloznim mikrofibrilima, ima značajan utjecaj na svojstva vlakna, dok veći sadržaj hemiceluloze može povećati apsorpciju vlage. Lignin, kompleksni aromatski polimer, predstavlja izazov u ek-

strakciji iz biomase s visokim troškovima zbog hidrofobnosti i netopivosti u većini otapala [16].

## 2.2. Mogućnost primjene biljke Virdžinijskog sljeza

Održiva opskrba biljnom biomasom predstavlja ključni izazov za zadovoljenje potreba rastuće ekonomije, posebno s obzirom na povećani udio energije iz biomase. Kultivacija Virdžinijskog sljeza postaje sve važnija radi jačanja obnovljivih izvora resursa, ujedno Virdžinijski sljez akumulira teške metale iz tla u svojoj biomasi [17].

Ova višegodišnja energetska kultura pokazuje potencijal za uzgoj na manje plodnim tlima, čime se izbjegava konkurencija s biljkama namijenjenima prehrambenoj industriji. Uzgoj Virdžinijskog sljeza u poljoprivredi datira od sredine prošlog stoljeća, kad je bila prepoznata kao krmna biljka, izvor nektara za pčelarstvo te izvor stabljičnog vlakna za tekstilnu industriju. Ova bogata povijest ukazuje na raznovrsne načine iskorištavanja Virdžinijskog sljeza, od poljoprivrede do energetike, čime se potvrđuje njezin sveobuhvatan doprinos različitim sektorima [18-21]. Biomasa Virdžinijskog sljeza koristi se za proizvodnju peleta i briketa [22], a njihova donja ogrjevna vrijednost (eng. *low heating value*, LHV) iznosi 19,9 MJ/kg [23]. Jednako tako se koristi i za proizvodnju iverice niske gustoće (eng. *low density*, LD). Prema [24] može koristiti kao materijal za ivericu, ali primjena smole polimernog metil difenil diizocijana (PMDI) kao vezivnog sredstva nije bila uspješna, dok su se povećanjem masenog udjela Virdžinijskog sljeza u kompozitu ispitivana svojstva pogoršala. Utvrđeno je da ekstrakt sjemena Virdžinijskog sljeza pokazuje snažnu antifungalnu aktivnost, posebno protiv mikrogljivice *Candida albicans*, uz usmjerenu aktivnost prema ostalim ispitnim sojevima [25]. Bitno je istaknuti da ovaj ekstrakt ne izaziva citotoksične učinke na fibroblaste, čime se otvara put za daljnja istraživanja i razvoj u biomedicini te se percipira kao obećavajući kandidat za razvoj antifungalnog lijeka protiv kožnih ili sustavnih kandidijaza. Višegodišnje kulture mogu postati dodatni izvor sirovine za papirnu industriju zbog male potrebe za hranjivim tvarima i visokih prinosa. Prema istraživanju [26], stabljika Virdžinijskog sljeza mogla bi predstavljati alternativu u budućnosti kao izvor vlakana za papirnu industriju.

Glavni koraci u proizvodnji pulpe su: drobljenje, separiranje te natronski postupak drobljenja. Stabljika se usitnjava pomoću mlina sa čekićem, oštricom i rezačem. Cilj usitnjavanja stabljike je dobivanje dijelova veličine 1 – 6 mm, kako vlakna izolirana iz tih dijelova ne bi bila preduga za proizvodnju papira te

kako bi se povećala specifična površina sirovog materijala i time poboljšala svojstva pulpe [26]. Prikaz sirovog materijala stabljike Virdžinijskog sljeza prije i nakon usitnjavanja je vidljiv na sl.3.



Sl.3 Prikaz stabljike Virdžinijskog sljeza prije i nakon usitnjavanja [26]

Za proizvodnju pulpe koristila se 10 % otopina NaOH dok je omjer krute/tekuće tvari iznosio 1:20. Reakcijska temperatura od  $98 \pm 2$  °C se održavala tijekom 3 sata, nakon čega je dobivena pulpa prosijana te isprana deioniziranom vodom do pH 7 (sl.4.).

Prema dobivenim rezultatima [26], prosječna duljina celuloznih vlakana iz stabljike Virdžinijskog sljeza dobivenih za proizvodnju papira je 1,3 mm. Provedeno istraživanje je otkrilo da celulozna vlakna koja se nalaze u pulpi dobivenoj iz navedene biljke pokazuju zadovoljavajući omjer duljine i debljine te imaju dobra svojstva za papirnu industriju. Nebijeljena vlakna su žućkaste boje, pokazuju potencijal visoke čvrstoće, a moguća primjena je u kartonskoj ambalaži, gdje je potrebna zadovoljavajuća čvrstoća snopića celuloznih vlakana, dok bijeljenje nije potrebno.

Realizacijom projekta Dizajn naprednih kompozita iz energetskih održivih izvora (BIOKOMPOZITI), pod voditeljstvom Sveučilišta u Zagrebu Tekstilno-tehnološkog fakulteta, u partnerstvu sa Sveučilištem u Zagrebu Agronomski fakultet, istražene su dvije samonikle kulture, među kojima je i Virdžinijski sljez, te su dizajnirani prototipovi naprednih biokompozita s dugim i kratkim vlaknima. Izrađeni biokompoziti se odlikuju manjom masom, poboljšanom čvrstoćom, povećanom otpornošću na gorenje te dodat-

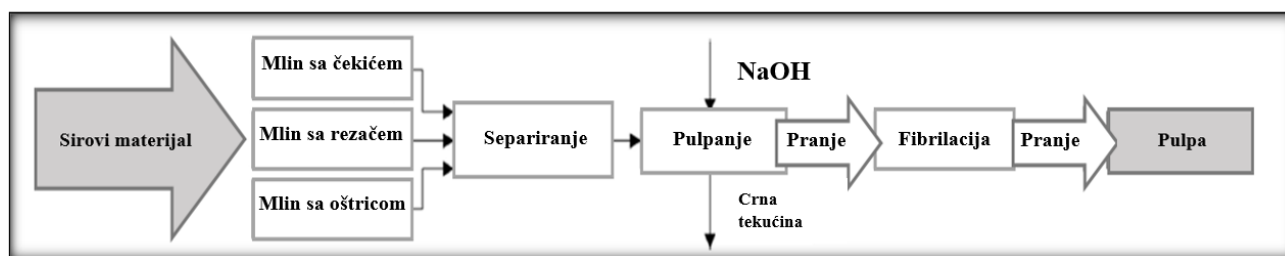
nom antimikrobnom zaštitom. Razvijeni materijali mogu pronaći primjenu u automobilskoj ili građevinskoj industriji. Projekt BIOKOMPOZITI ima pozitivan utjecaj na tekstilni i poljoprivredni sektor što zasigurno doprinosi hrvatskoj bioekonomiji, potvrđujući pretpostavku da agro-otpad može imati dualnu primjenu: u proizvodnji biokompozita i biogoriva [27].

### 2.2.1. Izolacija vlakana iz Virdžinijskog sljeza

Iako se lignocelulozna biomasa dobivena od energetskih kultura primarno koristi za dobivanje energije, moguće je jedan dio iskoristiti i u tekstilnoj industriji za dobivanje celulozne sirovine. Stabljična vlakna, koja se nalaze u uzdužnim snopovima stabljike, pružaju biljkama čvrstoću i savitljivost. Ova vlakna često su jednako dugotrajna kao i sama stabljika iz koje se izvlače, čineći ih iznimno vrijednim materijalom [27, 28].

Onečišćenje okoliša, dugotrajni procesi izolacije vlakana te visoki udio ručnog rada doprinijeli su smanjenju proizvodnje stabljičnih vlakana. Međutim, suvremeni razvoj novih i ekološki prihvatljivijih tehnologija ponovno pokreće interes i potražnju za ovim vlaknima. Ona se smatraju jednim od najodrživijih i najperspektivnijih oblika prirodnih vlakana.

Močenje ili maceracija označava proces izdvajanja/izoliranja prirodnih stabljičnih vlakana, što podrazumijeva odvajanje snopova vlakana od kutikularizirane epiderme i stanica drvenaste jezgre [28]. Metoda koja se primjenjuje za izolaciju vlakana direktno utječe na svojstva dobivenih vlakana. Tijekom godina razvijene su mnoge metode izoliranja vlakana iz stabljike biljke, a dijelimo ih na: ručne, mehaničke, kemijske, biološke, fizikalne metode ili njihove kombinacije. Usporedba između pojedinih metoda izoliranja stabljičnih vlakana prikazana je u tab.3. Prema [28] ispitane su 3 kombinacije različitih metoda izolacije vlakana: biološko/mehanička, fizikalno/mehanička te fizikalno/kemijska. Utvrđeno je da se fizikalno/kemijska metoda pokazala najboljom zbog ekonomičnosti i ekološke prihvatljivosti, pri čemu su se zadržala pozitivna svojstva materijala. Ova vrsta obrade značajno ubrzava proces te štedi energiju i samim time je prihvatljivija za okoliš, dok konvencionalne metode troše vodu, kemikalije i energiju u većim količinama i ekološki su neprihvatljivije [29].



Sl.4 Proces proizvodnje pulpe iz sirovog materijala višegodišnje biljke [26]

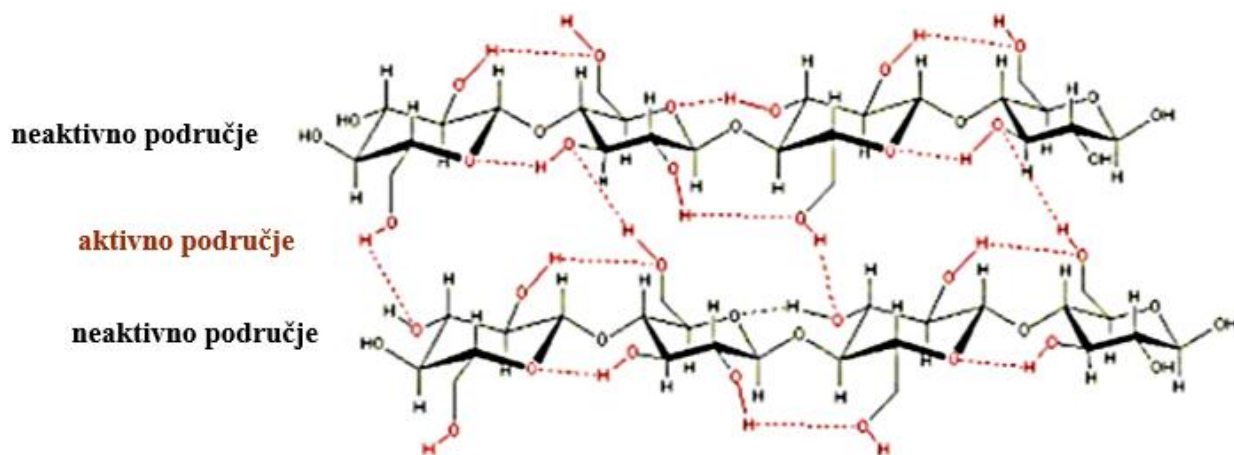
**Tab.3** Usporedba između pojedinih metoda izolacije stabljičnih vlakana [30]

Metoda izolacije	Prednosti	Nedostaci	Vrijeme obrade
Maceracija vodom	Vlakna ujednačenih svojstava i visoke kvalitete	Zagađenje okoliša zbog anaerobne bakterijske fermentacije, truli miris te visoke cijene, zahtjev za intenzivnim tretmanom otpadnih voda	7 – 14 dana
Maceracija rosom	Lako uklanjanje pektina	Vlakna su kontaminirana zemljom, ograničenje na određene klimatske uvjete, nedosljedna kvaliteta	2 – 3 tjedna
Enzimatska maceracija	Specifična svojstva vlakna se postižu variranjem vremena i vrste enzima (čišći i brži proces)	Mala čvrstoća vlakana	12 – 24 sata
Kemijska maceracija	Glatka i čista površina vlakna u kratkom periodu	Kada je koncentracija NaOH veća od 1 % dolazi do smanjenja čvrstoće, visoki troškovi obrade i nepovoljna boja	60 – 75 minuta
Mehanički postupak	Velike količine kratkih vlakana su uklonjene u kratkom periodu	Niska kvaliteta vlakana te visoki troškovi proizvodnje	-

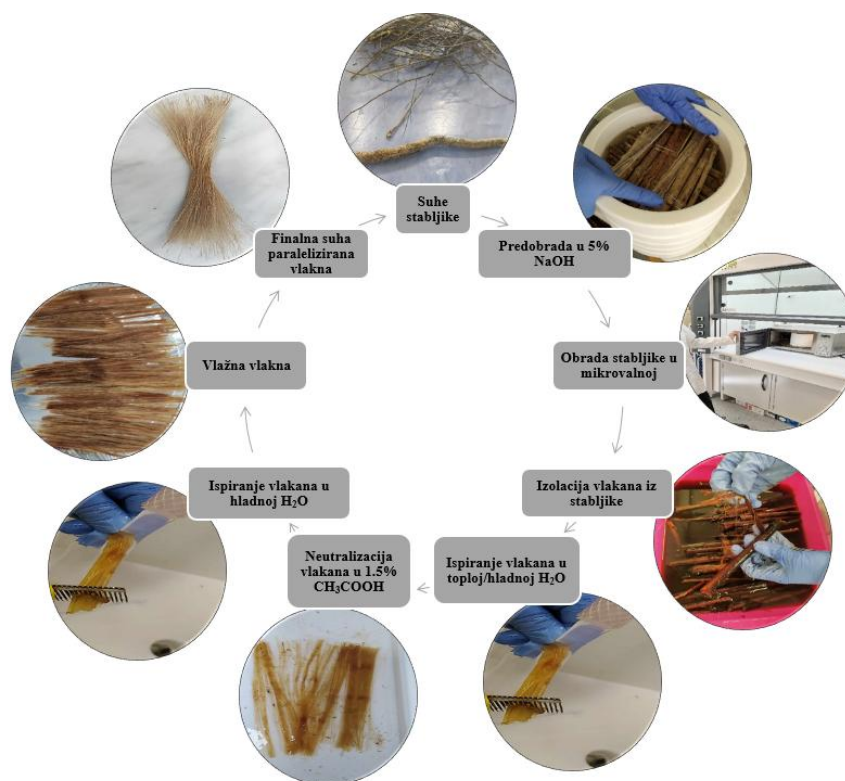
Kemijska maceracija potpomognuta mikrovalnim zračenjem (kemijsko/fizikalni proces izolacije vlakana) pokazala je veću učinkovitost u uklanjanju neceluloznih tvari kao što su pektin [28], lignin, hemiceluloza te druge popratne tvari iz biljke u usporedbi s kemijskom maceracijom u alkalnom mediju (NaOH) [29, 31] te je ujedno rezultirala većim udjelom celuloze u finalnom proizvodu. Obradom MW elektromagnetska energija prodire u unutrašnjost stabljike te stupa u interakciju s vodikovim vezama smještenim u celulozi, čime se povećava temperatura te dolazi do kidanja kristalnih veza unutar celuloze (sl.5). Zbog niske polarnosti veza ovakva obrada ima utjecaj na topivost lignina u organskim otapalima kao što je NaOH. Kemijskom maceracijom u alkalnom mediju pod utjecajem energije mikrovalnog zračenja utječe se na uklanjanje hidrofilnih skupina iz hemiceluloze i voskova te se dobiva otvorena površina vlakana s više pora, čime se direktno može utjecati na čvrstoću i vezu između vlakna i polimerne matrice u primjeni za biokompozitne materijale [32].

Postupak dobivanja vlakana iz stabljike Virdžinijskog sljeza primjenom kemijske maceracije u alkalnom mediju pod utjecajem energije mikrovalnog zračenja prikazan je shematski (sl.6).

Svojstva prirodnih vlakana, pa tako i udio vlakana u stabljici, mogu varirati ovisno o biološkoj raznolikosti, uvjetima rasta, klimatskim uvjetima, navodnjavanju, metodi berbe, starosti biljke te ostalim uvjetima. To se potkrijepljuje rezultatima dobivenih vrijednosti prinosa vlakana Virdžinijskog sljeza nakon kemijske maceracije u alkalnom mediju za biljke ubrane u siječnju 2020., koji iznosi 10,71 %, dok one ubrane u ožujku 2021. imaju prinos vlakana od 11,97 %. Prema podacima [33], prinos vlakana u biljci brnistri iznosio je 5 %, što predstavlja manji udio u usporedbi s vrijednostima drugih stabljičnih vlakana. Na primjeru istraživanja [34,35] prinos vlakana u lanu iznosi 20–25 %. Proizvodnja lana po hektaru je približno 8 tona, a Virdžinijskog sljeza 20-25 tona, iz čega proizlazi da se po hektaru dobiva više vlakana iz Virdžinijskog sljeza nego od lana [2, 36, 37].



Sl.5 Aktivno i neaktivno područje unutar celuloznog vlakna djelovanjem energije mikrovalnog zračenja [32]



Sl.6 Shematski prikaz postupka kemijske maceracije stabljike Virdžinijskog sljeza pod utjecajem mikrovalne energije

### 3. Fizikalna i mehanička svojstva vlakana iz Virdžinijskog sljeza

Količina vlage na tekstilnom materijalu, određena vlažnošću zraka i vrstom vlakna te sorpcijskim svojstvima, ključna je za uporabna svojstva vlakna i provođenje fizikalno-kemijskih procesa [37]. Prirodna vlakna, uključujući stabljična, su higroskopna i udobnija za nošenje od sintetskih. Repriza pojedinih vlakana uključujući i vlakna iz Virdžinijskog sljeza prikazani su u tab.4.

Tab.4 Repriza vlakana iz Virdžinijskog sljeza u usporedbi s nekim od najčešće korištenih prirodnih i umjetnih vlakana [28]

Vlakno	Repriza (%)
Pamuk	7-8
Lan	7
Virdžinijski sljez	10-10,5
Vuna	14-18
Viskoza (CV)	12-14
Poliamid (PA)	4,1
Polipropilen (PP)	0
Staklo (GF)	0

Provedena istraživanja su pokazala da je repriza vlakana Virdžinijskog sljeza u rasponu 10,0–10,5 %. Može se zaključiti da vlakno Virdžinijskog sljeza ima dobra sorpcijska svojstva slična ostalim celuloznim vlaknima.

Apsorpcija vlage u vlaknu proporcionalna je udjelu amorfnih područja unutar vlakna. Visoku hidrofilnost stabljičnih vlakana uzrokuju hidroksilne (-OH) skupine unutar celuloze, hemiceluloze i lignina [38]. Vlakna izolirana iz stabljike kombiniranim fizikalno-kemijskim postupkom imaju veću količinu vlage zbog uspješnog uklanjanja pektina, lignina i voskova [28]. Uklanjanjem lignina, koji ometa prodiranje vlage u celuloznu staničnu stijenku, povećava se apsorpcija vlage u vlaknu. Obradom vlakana Virdžinijskog sljeza uslijed kemijske maceracije u alkalnom mediju utječe se na udio pojedinih komponenti koje sačinjavaju kemijsku strukturu vlakana, njihovu kristalnost i strukturu, ali i na apsorptivnost vlage kod vlakana. Karakteristične gustoće odabranih stabljičnih vlakana prikazane u tab.5 nalaze se u rasponu između 1,19 g/cm<sup>3</sup> (vrbino vlakno) i 1,57 g/cm<sup>3</sup> (Virdžinijski sljez i kenaf).

Tab.5 Gustoća vlakana Virdžinijskog sljeza te odabranih stabljičnih vlakana karakteriziranim prema literaturi [39-42]

Vlakno	Gustoća (g/cm <sup>3</sup> )	Literatura
Vrba	1,19	[39]
Lan	1,38; 1,54; 1,45	[40]; [41]; [42]
Konoplja	1,35; 1,43	[40]; [42]
Juta	1,23; 1,51; 1,34	[40]; [41]; [42]
Kenaf	1,57; 1,30	[41]; [42]
Virdžinijski sljez	1,58	[27]

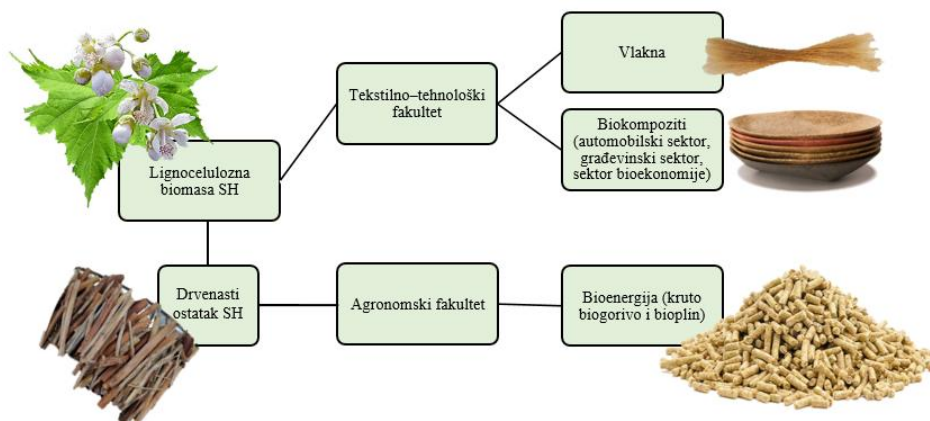
Srednja vrijednost gustoće vlakana iz Virdžinijskog sljeza, dobivena korištenjem plinskog piknometra tijekom istraživanja [27], iznosi  $1,58 \text{ g/cm}^3$ , s neznatnom razlikom u odnosu na gustoće ostalih navedenih stabljičnih vlakana [39-42]. Dobivene vrijednosti gustoće obuhvaćaju ne samo udio celuloze, čija gustoća iznosi otprilike  $1,5 \text{ g/cm}^3$ , već i druge komponente poput lignina i hemiceluloze. Gustoća pektina vjerojatno je slična onoj celuloze, što znači da prisutnost pektina ne uzrokuje značajne varijacije u gustoći. Morfologija stabljičnog vlakna, poput prisutnosti središnjeg lumena, također utječe na gustoću. Na primjer, kapok vlakno ima manju gustoću ( $1,16 \text{ g/cm}^3$ ) od jutina vlakna ( $1,45 - 1,50 \text{ g/cm}^3$ ) zbog većeg lumena. Drugi čimbenici koji utječu na varijacije u gustoći uključuju zaostalu vlagu, metodu izolacije vlakana, geometriju, poroznost vlakna te postupke daljnje obrade i modifikacije [43]. Prirodna vlakna, zbog svoje anizotropne strukture, iskazuju anizotropna svojstva. Naprezanja u smjeru uzdužne osi vlakna su značajno veća od naprezanja okomitih na os vlakna. Prekidna sila (F) predstavlja silu pri kojoj dolazi do prekida vlakna, a čvrstoća se izražava omjerom F i finoće (duljinske mase) vlakna. Finoća, kao mjera površine poprečnog presjeka, se opisuje omjerom mase i duljine vlakna. Što je vlakno finije, duljinska masa mu je manja, i obrnuto [37]. Biokemijska raznolikost ključna je za mehanička svojstva stabljičnih vlakana. Vlačna čvrstoća i modul elastičnosti (Youngov modul) vlakna rastu s povećanim udjelom celuloze, dok prisutnost hemiceluloze, zbog svoje amorfnosti, dovodi do smanjenja čvrstoće vlakana. Čvrstoća vlakana je obrnuto proporcionalna prekidnom istezanju, pri čemu će vlakna veće čvrstoće imati manje prekidno istezanje. Finoća stabljičnog vlakna, povezana s strukturnim karakteristikama sekundarne stanične stijenke (pretežno celuloza s manjim udjelom lignina), ovisi o genetici, okolišu, obliku i duljini elementarnih vlakana, njihovom broju u tehničkom vlaknu te metodi izolacije vlakana [28,33].

Tab.6 prikazuje usporedbu vlačne čvrstoće i prekidnog istezanja vlakana iz Virdžinijskog sljeza te drugih odabranih vlakana. Usporedbom rezultata vlačne čvrstoće i prekidnog istezanja između vlakana Virdžinijskog sljeza i lanenog vlakna kao predstavnika stabljičnih vlakana, zaključeno je da vlakno Virdžinijskog sljeza pokazuje zadovoljavajuću žilavost i čvrstoću te kompatibilnost s ostalim stabljičnim vlaknima, što ga čini pogodnim za korištenje u širokoj paleti proizvoda gdje je potrebna kombinacija lakoće, snage i žilavosti.

**Tab.6** Vlačna čvrstoća i prekidno istezanje odabranih vlakana [37]

Vlakno	Vlačna čvrstoća (cN/tex)	Prekidno istezanje (%)
Pamuk	19 – 42	5,6 – 7,1
Lan	26 – 77	3 – 4
Virdžinijski sljez	73,48	5,81
Viskoza (CV)	16 – 30	15 – 30
Vuna	11 – 14	30 – 42
p-aramid (Kevlar)	140 – 250	1 – 4
Polipropilen (PP)	22 – 60	15 – 50
Staklo (GF)	200 – 280	1,5 – 2

Na temelju navedenih rezultata, može se zaključiti da se fizikalno-kemijski postupak izolacije vlakana Virdžinijskog sljeza, može uspješno primijeniti za izoliranje vlakana sa svojstvima prikladnim za tekstilnu industriju i kompozite. Primjenom ovog postupka izolacije vlakana dolazi do značajnog skraćivanja vremena proizvodnje i smanjenja potrošnje energije. Bitno je naglasiti činjenicu da se drvenasti ostatak, preostao nakon izoliranja vlakana iz biljke Virdžinijskog sljeza koji je neiskoristiv i predstavlja otpad u tekstilnoj industriji, može primijeniti kao ulazna sirovina za proizvodnju biogoriva, čime se pridonosi dobroj praksi kružnog gospodarstva. Potpuno iskorištavanje sirovine Virdžinijskog sljeza gdje će ostatak od proizvodnje biokompozita postati sirovina za proizvodnju biogoriva prikazan je na sl.7.



**Sl.7** Primjena kružnog modela razvijenog u projektu Dizajn naprednih kompozita iz energetske održive izvora - BOKOMPOZITI [27]

#### 4. Primjena Virdžinijskog sljeza za energetske svrhe

Poljoprivredna lignocelulozna biomasa, kao ostatak primarne poljoprivredne proizvodnje, predstavlja značajan izvor energije. Energetske kulture, poput višegodišnje vrste naziva Virdžinijski sljez, ključne su za proizvodnju biomase. Cilj uzgoja ovih kultura je postizanje maksimalne količine biomase po jedinici površine, koja se zatim može pretvoriti u energiju. Energetske kulture omogućuju različite oblike biogoriva, uključujući kruta goriva poput sječke, peleta i briketa, tekuća poput biodizela i bioetanola te plinovita biogoriva poput bioplina [2].

Virdžinijski sljez, kao višegodišnja energetska kultura, ima posebne prednosti, uključujući mogućnost uzgoja u sustavima bez obrade tla i prilagodbu na marginalna tla. Njena sposobnost pohranjivanja hranjivih tvari, dugovječnost nasada, jednostavnog uzgoja i sposobnosti prilagodbe na različite klimatske uvjete i uvjete tla čine je izuzetno perspektivnom za proizvodnju biomase.

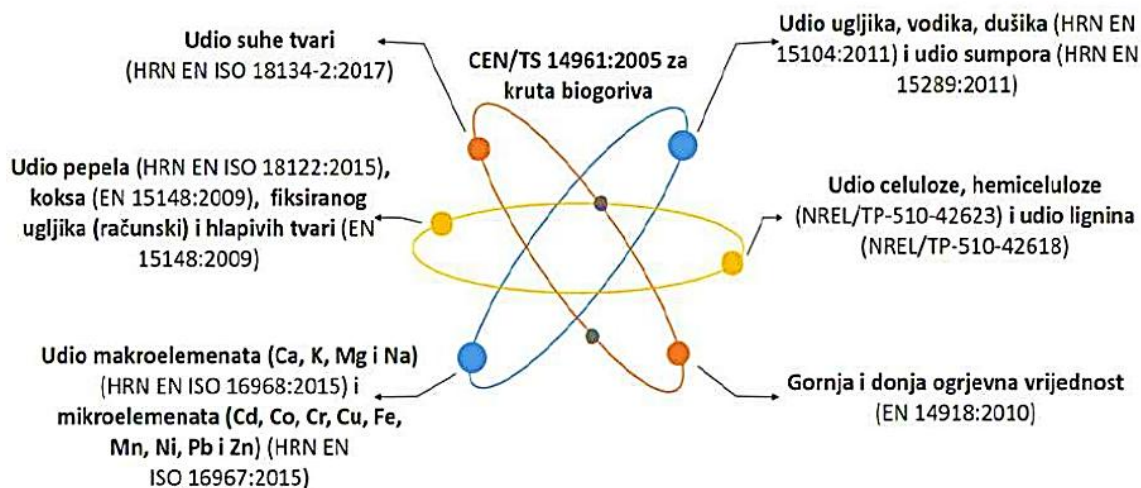
Za pretvaranje određene vrste sirovine, kao što su *Miscanthus x giganteus*, *Sida hermaphrodita L.*, *Arundo donax L.*, *Spartium junceum L.*, u potencijalni izvor energije u obliku biomase, nužno je temeljito proučiti njihove fizikalno-kemijske, strukturalne i ogrjevne karakteristike. Ovo istraživanje pruža dublji uvid u energetske isplativost, pridonoseći boljem razumijevanju potencijala za proizvodnju zelene energije, kako je prikazano na sl.8 [44]. Stoga je provedeno istraživanje proizvodnje energije iz sječke Virdžinijskog sljeza kao čvrstog biogoriva, analizirajući goriva, negoriva svojstva, ogrjevnu vrijednost i lignocelulozni sastav [2]. Goriva svojstva odnose se na karakteristike biomase koje su relevantne za njezino sagorijevanje ili pretvorbu u energiju dok se nego-

riva svojstva odnose na aspekte biomase koji nisu direktno povezani s procesom sagorijevanja ili energetske konverzije. Vlaga, pepeo, fiksirani ugljik, dušik i koks čine negoriva svojstva, dok suha tvar, ugljik, vodik, kisik, sumpor te hlapive tvari predstavljaju goriva svojstva. Rezultati istraživanja navedenih svojstava sječke Virdžinijskog sljeza prikazani su u tab.7.

Tab.7 Rezultati negorivih i gorivih svojstva biomase Virdžinijskog sljeza [2]

Negoriva svojstva		Goriva svojstva	
Istraživani parametri	Virdžinijski sljez	Istraživani parametri	Virdžinijski sljez
Vlaga (%)	8,03	Ugljik (%)	48,97
Pepeo (%)	2,68	Vodik (%)	6,03
Fiksirani ugljik (%)	5,45	Hlapiva tvar (%)	83,84
Koks (%)	8,13	Kisik (%)	44,21
Dušik (%)	0,58	Sumpor (%)	0,21

Ugljik je ključni element u svim vrstama goriva te određuje njihovu kvalitetu; veći udio ugljika čini gorivo kvalitetnijim. Uz ugljik, vodik čini osnovni sastav svakog goriva, a povećani udio vodika dodatno poboljšava kvalitetu goriva. Oksidacijom, ugljik i vodik oslobađaju energiju te utječu na toplinsku vrijednost. Kisik, iako ne proizvodi energiju, podržava proces oksidacije. U poljoprivrednoj biomasi, udio ugljika obično varira između 43 % do 48 %, vodika između 5 % do 7 %, dok je sadržaj kisika na suhu tvar obično između 40 % do 45 %. Sadržaj pepela u gorivu određuje njenu kvalitetu, pri čemu je manji sadržaj pepela povezan s većom kvalitetom goriva. Sadržaj koksa i fiksiranog ugljika u biomasi pozitivno utječe na energetske karakteristike, predstavljajući značajnu količinu energije oslobođene izgaranjem biomase [2].



Sl.8 Analize biomase provode se radi utvrđivanja njezinih energetske svojstva [44]

Da bi se odredila optimalna vrsta goriva za određenu energetska kulturu, potrebno je analizirati čvrstoću, biorazgradljivost i zapaljivost biomase, što se procjenjuje pomoću lignoceluloznog sastava. Ako lignocelulozna biomasa sadrži više lignina, tada je pogodna za izravno izgaranje, dok veći udio celuloze i hemiceluloze čini biomasu prikladnom za proizvodnju tekućih goriva. Rezultati lignoceluloznog sastava sječke Virdžinijskog sljeza, koji obuhvaća udio celuloze, hemiceluloze i lignina, dobiveni su u laboratoriju korištenjem modificirane standardne metode ISO 5351-1:2002 [14] i prikazani su u tab.8. Ovi rezultati ukazuju na mogućnost korištenja istraživane biomase za različite tipove biogoriva, posebno za proizvodnju čvrstog biogoriva [2].

Tab.8 Rezultati lignoceluloznog sastava biomase Virdžinijskog sljeza [2]

Istraživani parametri	Virdžinijski sljez
Celuloza (%)	39,91
Hemiceluloza (%)	26,84
Lignin (%)	28,08

Ogrjevna vrijednost označava količinu toplinske energije koja se može dobiti iz biomase pretvorbom. Kemijski sastav i vlažnost biomase najviše utječu na ogrjevnju vrijednost. Gornja i donja ogrjevna vrijednost razlikuju se po načinu određivanja [44]. Gornja ogrjevna vrijednost (H<sub>g</sub>, HHV) odnosi se na količinu topline koja nastaje potpunim izgaranjem jedinične količine goriva. U ovom procesu dimni plinovi ohlade se na 25 °C, a vlaga iz dimnih plinova izlučuje se kao kondenzat. To predstavlja najveću moguću energiju koja se može dobiti izgaranjem određenog goriva. Donja ogrjevna vrijednost (H<sub>d</sub>, LHV) predstavlja količinu topline koja nastaje potpunim izgaranjem jedinične količine goriva. U ovom procesu dimni plinovi ohlade se na 25 °C, a vlaga u dimnim plinovima ostaje u obliku pare, ne dopuštajući iskorištavanje topline kondenzacije. Donja ogrjevna vrijednost podložna je utjecaju sadržaja vlage i masenog udjela vodika u gorivu. Manja je od gornje ogrjevnje vrijednosti zbog topline utrošene na isparavanje vode i sumporne kiseline iz goriva ili nastale vode tijekom procesa izgaranja [44]. Prema [2] gornja (HHV) i donja (LHV) ogrjevna vrijednost Virdžinijskog sljeza iznose 18,07 MJ/kg za gornju ogrjevnju vrijednost a 16,75 MJ/kg za donju te ukazuju na visoki energetski potencijal istraživane kulture.

## 5. Zaključak

Ovaj pregledni rad ističe potencijal biljke Virdžinijskog sljeza (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby)

i mogućnost njene revitalizacije za potrebe izoliranja celuloznih vlakana, uz istovremeno ostvarivanje principa kružnog biogospodarstva daljnjim iskorištenjem nusproizvoda tekstilne industrije za energetske svrhe. Postignuti rezultati ukazuju na višestruku primjenu biljke, od izdvajanja vlakana i ojačala u biokompozitima do iskorištavanja ostataka za proizvodnju krutih biogoriva.

Revitalizacija Virdžinijskog sljeza kao sirovine za celulozna vlakna ne samo da pridonosi tekstilnoj industriji u dobivanju vlakana i njihovoj primjeni za odjeću ili biokompozite, već i ostvaruje ciljeve održivog kružnog gospodarstva. Kombinacija fizikalno-kemijskog postupka izoliranja vlakana iz stabljike Virdžinijskog sljeza uz korištenje energije mikrovalnog zračenja pokazala se učinkovitom, skraćujući vrijeme proizvodnje i smanjujući potrošnju energije. Ova tehnologija također ima potencijal za unapređenje ekoloških i ekonomskih aspekata ekstrakcije vlakana iz stabljike biljke.

Provedena istraživanja potvrđuju praktičnost upotrebe biljke Virdžinijskog sljeza za različite industrijske svrhe te dodatno promiču održivi pristup kroz punu valorizaciju biljke, uključujući i ostatak materijala nakon izolacije vlakana. Ova revitalizacija predstavlja korak prema ostvarivanju kružnog biogospodarstva, ključnog za rješavanje izazova klimatskih promjena i ostvarivanje ciljeva Europskog Zelenog plana.

*Rad je sufinanciran sredstvima Europskog fonda za regionalni razvoj putem projekta K.K.01.1.1.04.0091 BLOKOMPZOITI: Dizajn naprednih biokompozita iz energetske održivih izvora.*

## Literatura:

- [1] COM (2019) 640 final, Europski zeleni plan, Komunikacija komisije Europskom parlamentu, Vijeću i Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija, Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640> (pristupljeno 15/3/2023).
- [2] Matin, A.; Bilandžija, N.; Voća, N.; Leto, J.; Bischof, S. Energy Production from *Sida hermaphrodita* Chips as Solid Biofuel. In *Proceedings of the 55<sup>th</sup> Croatian and 15<sup>th</sup> International Symposium on Agriculture*, Vodice, Croatia, 16–21 February 2020; Mioč, B., Širić, I., Eds.; University of Zagreb Faculty of Agriculture: Zagreb, Croatia, 2020; pp. 573–577.

- [3] Ellen MacArthur Foundation, Towards the circular economy Vol. 1: An economic and business rationale for an accelerated transition, 2013.
- [4] Gudelj Velaga, A.; Bilandžija, N.; Grubor, M.; Kovačević, Z.; Krička, T. Energy utilisation of biofibre production residues – circular economy approach. In Proceedings of the 48<sup>th</sup> Symposium Actual Tasks on Agricultural Engineering, Zagreb, Croatia, 2021; pp. 463-472.
- [5] Kružno gospodarstvo, Hrvatski fokus. Dostupno <https://www.hrvatski-fokus.hr/2017/09/13212/> (pristupljeno 27/2/2023).
- [6] COM (2020) 98 final, Novi akcijski plan za kružno gospodarstvo, Komunikacija komisije Europskom parlamentu, Vijeću i Europskom gospodarskom i socijalnom odboru i odboru regija. Dostupno <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0098> (pristupljeno 11/5/2023).
- [7] Odluka o donošenju Izmjena Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017.–2022. godine, NN 1/2022 (3.1.2022.). Dostupno na: [https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022\\_01\\_1\\_1.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2022_01_1_1.html) (pristupljeno 11/5/2023).
- [8] Vu, H.P.; Nguyen, L.N.; Vu, M.; Johir, M.A.H.; McLaughlan, R.; Nghiem, L.D. A comprehensive review on the framework to valorize lignocellulosic biomass as biorefinery feedstocks. *Science of The Total Environment* **2020**, 140630. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140630>
- [9] Projekt KK.05.1.1.02.0016 (KLIMA) *Proizvodnja hrane, biokompozita i biogoriva iz žitarica u kružnom biogospodarstvu*. Dostupno na: <https://projekt-klima.eu/> (pristupljeno 11/5/2023).
- [10] Petrović Tominac, V.; Trontel, A.; Novak, M.; Marđeko, N.; Grubišić, M.; Didak Ljubas, B.; Buljubašić, M.; Šantek, B. Lignocelulozni nusprodukti iz poljoprivrede i prehrambene industrije kao pokretač napretka biotehnološke proizvodnje. *Glasnik zaštite biljka* **2022**, 45 (6), 26-37, <https://doi.org/10.31727/gzb.45.6.3>.
- [11] COSEWIC. Assessment and status report on the Virginia Mallow *Sida hermaphrodita* in Canada. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada: Ottawa, Canada, 2010. ix + 18 pp. Dostupno na: [https://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=https://publications.gc.ca/collections/collection\\_2011/ec/CW69-14-611-2010-eng.pdf](https://publications.gc.ca/site/archivee-archived.html?url=https://publications.gc.ca/collections/collection_2011/ec/CW69-14-611-2010-eng.pdf) (pristupljeno 22/3/2023).
- [12] Krička, T.; Grubor, M.; Jurišić, V.; Leto, J.; Voća, N.; Bilandžija, N.; Matin, A. Nova energetska kultura *Sida hermaphrodita* u Republici Hrvatskoj. *Glasnik zaštite biljka* **2017**, 40 (5), 44-49. <https://doi.org/10.31727/gzb.40.5.5>.
- [13] Borkowska, H.; Molas, R.: Two extremely different crops, Salix and Sida, as sources of renewable bioenergy. *Biomass and Bioenergy* **2012**, 36, 234-240. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.10.025>.
- [14] Bilandžija, N.; Krička, T.; Matin, A.; Leto, J.; Grubor, M. Effect of Harvest Season on the Fuel Properties of *Sida hermaphrodita* (L.) Biomass as Solid Biofuel. *Energies* **2018**, 11 (12), 3398. <https://doi.org/10.3390/en1123398>.
- [15] Jurišić, V.; Bilandžija, N.; Matin, A.; Voća, N.; Leto, J.; Grubor, M.; Kričko, T. Energetska valorizacija biomase kulture *Sida hermaphrodita*. Presentation, Univeristy of Zagreb, Faculty of Agriculture, Zagreb, Croatia, 2017. Dostupno na: <https://www.sumari.hr/biomasa/dvanaestidanibiomase/09.pdf> (pristupljeno 12/5/2023).
- [16] Yang, J.; Ching, Y.C.; Chuah, C.H. Applications of Lignocellulosic Fibers and Lignin in Bioplastics: A Review. *Polymers* **2019**, 11(5), 751, <https://doi.org/10.3390/polym11050751>.
- [17] von Gehren, P.; Gansberger, M.; Pichler, W.; Weigl, M.; Feldmeier, S.; Wopienka, E.; Bochmann, G. A practical field trial to assess the potential of *Sida hermaphrodita* as a versatile, perennial bioenergy crop for Central Europe. *Biomass and Bioenergy* **2019**, 122, 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.004>.
- [18] Jablonowski, N.D.; Kollmann, T.; Meiller, M.; Dohrn, M.; Muller, M.; Nabel, M.; Zapp, P.; Schonhoff, A.; Schrey, S.D. Full assessment of *Sida (Sida hermaphrodita)* biomass as a solid fuel. *GCB Bioenergy* **2020**, 12(8), 618-635. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12694>.
- [19] Šiaudinis, G.; Jasinskas, A.; Šarauskis, E.; Steponavičius, D.; Karčauskienė, D.; Liaudanskienė, I. The assessment of Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* Rusby) and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) productivity, physicochemical properties and energy expenses. *Energy* **2015**, 93, 606-612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.065>.
- [20] Jablonowski, N.D.; Kollmann, T.; Nabel, M.; Damm, T.; Klose, H.; Müller, M.; Bläsing, M.; Seebold, S.; Krafft, S.; Kuperjans, I.; et al. Valorization of *Sida (Sida hermaphrodita)* biomass for multiple purposes. *GCB Bioenergy* **2016**, 9(1), 202-214. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12346>.

- [21] Purwin, C.; Starczewski, M.; Borsuk, M.; Nogalski, Z.; Opyd, P.M.; Mazur-Kuśnirek, M.; Białobrzewski, I. The Quality, Intake, and Digestibility of Virginia Fanpetals (*Sida hermaphrodita* L. Rusby) Silage Produced under Different Technologies and Its Effect on the Performance of Young Animals. *Animals* **2021**, *11*(8), 20270. <https://doi.org/10.3390/ani11082270>.
- [22] Lisowski, A.; Świętochowski, A.; Szulc, K.; Lenart, A. Density and porosity of the cut and ground material of energy plants. *Annals of Warsaw University of Life Sciences. Agricultural and Forest Engineering* **2011**, *58*, 21-28.
- [23] Nahm, M., Morhart, C. Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) as perennial multipurpose crop: biomass yields, energetic valorization, utilization potentials, and management perspectives. *GCB Bioenergy* **2017**, *10*(6), 393–404. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12501>.
- [24] Czarnecki, R., Dukarska, D. Estimating the possibilities of applying *Sida hermaphrodita* Rusby to the production of low-density particleboard. *Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forest and Wood Technology* **2010**, 83–85.
- [25] Lewtak, K.; Fiołka, M.J.; Czaplewska, P.; Macur, K.; Kaczyński, Z.; Buchwald, T.; Szczuka, E.; Rzymowska, J. *Sida hermaphrodita* seeds as the source of anti-*Candida albicans* activity. *Scientific Reports* **2019**, *9*, 12233. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48712-1>.
- [26] Höller, M.; Lunze, A.; Wever, C.; Deutschle, A.L.; Stücker, A.; Frase, N.; Pestsova, E.; Spiess, A.C.; Westhoff, P.; Pude, R. Meadow hay, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby and *Silphium perfoliatum* L. as potential non-wood raw materials for the pulp and paper industry. *Industrial Crops & Products* **2021**, *167*, 113548. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113548>.
- [27] Projekt KK.01.1.1.04.0091 (BIOKOMPOZITI) Dizajn naprednih kompozita iz energetski održivih izvora. Dostupno na: <https://biokompoziti.eu/> (pristupljeno 13/5/2023).
- [28] Kovačević, Z. Development of advanced polylactide nanobiocomposite reinforced with *Spartium junceum* L. *Fibres* (Ph.D. Thesis), University of Zagreb Faculty of Textile Technology, Zagreb, Croatia, 2019. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:201:290756> (pristupljeno 24/5/2023).
- [29] Camani, P.H.; Anholon, B.F.; Toder, R.R.; Rosa, D.S. Microwave-assisted pretreatment of eucalyptus waste to obtain cellulose fibers. *Cellulose* **2020**, *27*, 3592–3609. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03019-7>.
- [30] Lee, C. H.; Khalina, A.; Lee, S.H.; Liu, M. A Comprehensive Review on Bast Fibre Retting Process for Optimal Performance in Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Advances in Materials Science and Engineering* **2020**, 1–27. <https://doi.org/10.1155/2020/6074063>.
- [31] Gazliya, N.; Aparna, K. Microwave-assisted alkaline delignification of banana peduncle. *Journal of Natural Fibers* **2021**, *18*(5), 664-673. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1645786>.
- [32] Akinyemi, A. B., Omoniyi, E. T., Onuzulike, G. Effect of microwave assisted alkali pretreatment and other pretreatment methods on some properties of bamboo fibre reinforced cement composites. *Construction and Building Materials* **2020**, *245*, 118405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118405>.
- [33] Kovacevic, Z., Vukusic, S. B., Zimniewska, M. Comparison of Spanish broom (*Spartium junceum* L.) and flax (*Linum usitatissimum*) fibre. *Textile Research Journal* **2012**, *82*(17), 1786–1798. <https://doi.org/10.1177/0040517512447526>.
- [34] Kozasowski, R. M., Mackiewicz-Talarczyk, M. *Handbook of Natural Fibers: Flax*; Woodhead Publishing Series in Textiles 2012, Volume 1, pp. 56–113. <https://doi.org/10.1533/9780857095503.1.56>.
- [35] Grégoire, M.; Bar, M.; De Luycker, E.; Musio, S.; Amaducci, S.; Gabrion, X.; Placet, V.; Ouagne, P. Comparing flax and hemp fibers yield and mechanical properties after scutching/hackling processing. *Industrial Crops and Products* **2021**, *172*, 114045. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114045>.
- [36] Leto, J. Virdžinijski sljez – Zanimljiv energetski usjev (2). *Gospodarski list* 2019. Dostupno na: <https://gospodarski.hr/rubrike/virdzinijski-sljez-zanimljiv-energetski-usjev-2/> (pristupljeno 12/5/2023).
- [37] Andrassy, M., Čunko, R. *Vlakna*, Zrinski d.d., Čakovec, 2005.
- [38] Moudood, A.; Hall, W.; Öchsner, A.; Li, H.; Rahman, A.; Francucci, G. Effect of Moisture in Flax Fibres on the Quality of their Composites. *Journal of Natural Fibers* **2019**, *16*(2), 209–224. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1414651>.

- [39] Oktae, J.; Lautenschläger, T.; Günther, M.; Neinhuis, C.; Wagenführ, A.; Lindner, M.; Winkler, A. Characterization of willow bast fibers (*Salix* spp.) from short-rotation plantation as potential reinforcement for polymer composites. *BioRes* **2017**, *12(2)*, 4270–4282. <https://doi.org/10.15376/biores.12.2.4270-4282>.
- [40] Thyavihalli Girijappa, Y. G.; Mavinkere Rangappa, S.; Paarameswaranpillai, J.; Siengchin, S. Natural Fibers as Sustainable and Renewable Resource of Development of Eco-Friendly Composites: A Comprehensive Review. *Frontiers in Materials* **2019**, *6*, 226. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00226>.
- [41] Kandemir, A.; Pozegic, T.R.; Hamerton, I.; Eichhorn, S.J.; Longana, M.L. Characterisation of Natural Fibres for Sustainable Discontinuous Fibre Composite Materials. *Materials* **2020**, *13(9)*, 2129. <https://doi.org/10.3390/ma13092129>.
- [42] Ali, A.; Shaker, K.; Nawab, Y.; Ashraf, M.; Basit, A.; Shahid, S.; Umair, M. Impact of hydrophobic treatment of jute on moisture regain and mechanical properties of composite material. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* **2015**, *34(24)*, 1–12. <https://doi.org/10.1177/0731684415610007>.
- [43] Le Gall, M.; Davies, P.; Martin, N.; Baley, C. Recommended flax fibre density values for composite property predictions. *Industrial Crops and Products* **2018**, *114*, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.065>
- [44] Bischof, S.; Kovačević, Z.; Kričko, T.; Bilandžija, N.; Leto, J.; Grubor, M.; Peter, A.; Kontek, M. Dizajn naprednih biokompozita iz energetskih održivih izvora. Izvještaj, 2021. Dostupno na: [https://biokompoziti.eu/wp-content/uploads/2021/05/Izvjestaj-BIOKOMPOZITI\\_25.5.21.pdf](https://biokompoziti.eu/wp-content/uploads/2021/05/Izvjestaj-BIOKOMPOZITI_25.5.21.pdf) (pristupljeno 12/5/2023).