

Opskrba lignoceluloznim sirovinama i njihovo skladištenje

Đurđević, Patricia

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Food Technology and Biotechnology / Sveučilište u Zagrebu, Prehrambeno-biotehnološki fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:159:542998>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Food Technology and Biotechnology](#)



Sveučilište u Zagrebu
Prehrambeno – biotehnološki fakultet
Preddiplomski studij Biotehnologija

Patricia Đurđević

7232/BT

OPSKRBA LIGNOCELULOZNIH SIROVINAMA
I NJIHOVO SKLADIŠTENJE

ZAVRŠNI RAD

Predmet: Završni rad rađen je u sklopu projekta HRZZ projekt „Održiva proizvodnja biokemikalija iz sekundarnih lignoceluloznih sirovina“ (OPB-SLS; šifra projekta 9717)

Mentor: *red. prof. dr. sc. Vlatka Petravić Tominac*

Zagreb, 2019.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Završni rad

Sveučilište u Zagrebu

Prehrambeno – biotehnološki fakultet

Preddiplomski sveučilišni studij Biotehnologija

Zavod za biokemijsko inženjerstvo

Laboratorij za biokemijsko inženjerstvo, industrijsku mikrobiologiju i tehnologiju slada i piva

Znanstveno područje: Biotehničke znanosti

Znanstveno polje: Biotehnologija

Opskrba lignoceluloznim sirovinama i njihovo skladištenje

Patricia Đurđević, 0058208728

Sažetak: Sustav za opskrbu sirovinama obuhvaća brojne jedinične operacije potrebne za premještanje lignocelulozne sirovine od mjesta gdje se proizvodi do mjesta gdje započinje proces njezine prerade. Ove jedinične operacije, koje uključuju prikupljanje, pohranu, rukovanje i transport, predstavljaju jedan od najvećih tehničkih i logističkih izazova za industriju koja prerađuje lignocelulozu. U ovom završnom radu prikazane su metode procjene količine biomase, postupci berbe i sakupljanja, metode rukovanja i transporta te metode skladištenja lignocelulozne biomase obzirom na njezina svojstva. Za prijevoz lignoceluloznih sirovina koriste se razna prijevozna sredstva (kamion, vlak, brod). Skladištenje i čekanje materijala prije prerade potrebno je zbog sezonskog karaktera žetve, varijabilnih prinosa i rasporeda isporuke.

Ključne riječi: biomasa, lignoceluloza, logistika, lanac opskrbe sirovine, skladištenje, transport

Rad sadrži: 38 stranica, 17 slika, 11 tablica, 29 literaturnih navoda, 0 priloga

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je u tiskanom i elektroničkom obliku pohranjen u knjižnici Prehrambeno – biotehnološkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 23, 10 000 Zagreb

Mentor: *red. prof. dr. sc. Vlatka Petravić Tominac*

Pomoć pri izradi: *mag. ing. bioproc. Martina Andlar*

Datum obrane: 18. rujna 2019.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Bachelor thesis

University of Zagreb
Faculty of Food Technology and Biotechnology
University undergraduate study Biotechnology

Department of Biochemical engineering
Laboratory for Biochemical engineering, industrial microbiology and malting and brewing technology

Scientific area: Biotechnical Sciences
Scientific field: Biotechnology

Supply and storage methods of lignocellulosic raw materials

Patricia Đurđević, 0058208728

Abstract: Feedstock supply system includes many unit operations necessary to move lignocellulosic feedstock from the place where it is produced to the start of its conversion. These unit operations, which include collection, storage, handling, and transportation, represent one of the largest technical and logistics challenges to the lignocellulosic processing industry. This final work gives an overview of the methods of biomass quantities estimation, harvesting and transportation methods and various ways of storing lignocellulosic feedstock, depending on its properties. A variety of transport equipment (truck, train, ship) is used for transportation of lignocellulosic feedstock. Storage and queuing of material before its processing are used to deal with seasonal harvest times, variable yields, and delivery schedules.

Keywords: biomass, lignocellulose, logistics, feedstock supply chain, storage, transport

Thesis contains: 38 pages, 17 figures, 11 tables, 29 references, 0 supplements

Original in: Croatian

Thesis is in printed and electronic form deposited in the library of the Faculty of Food Technology and Biotechnology, University of Zagreb, Kačićeva 23, 10000 Zagreb

Mentor: *full professor dr. sc. Vlatka Petravić Tominac*

Technical support and assistance: *mag. ing. bioproc. Martina Andlar*

Defence date: 18th September 2019.

Sadržaj

1. UVOD	1
2. TEORIJSKI DIO	2
2.1. Kemijska struktura lignoceluloze.....	2
2.1.1. Strukturni polimeri lignoceluloze	2
2.1.2. Vrste lignoceluloznih materijala.....	4
2.2. Biotehnološka primjena lignoceluloze i opskrba sirovinom	5
2.2.1. Proizvodi koji se mogu dobiti iz lignocelulozne sirovine.....	5
2.2.2. Važnost opskrbe sirovinom, skladištenja i održavanja odgovarajuće kvalitete sirovine	6
2.3. Prikupljanje lignoceluloznog otpada koji potječe iz raznih grana gospodarstva.....	7
2.3.1. Procjena količine biomase	7
2.3.1.1. Prinosi usjeva i ostataka usjeva	7
2.3.1.2. Lignocelulozna biomasa koja se može iskoristiti.....	9
2.3.2. Operacije žetve	11
2.3.2.1. Košnja i kondicioniranje.....	12
2.3.2.2. Sakupljanje usitnjene biomase.....	13
2.3.2.3. Sakupljanje biomase u obliku bala	13
2.3.2.4. Troškovi prikupljanja biomase.....	14
2.3.3. Specifičnosti opskrbe različitim lignoceluloznim sirovinama.....	14
2.3.3.1. Drvena biomasa i oprema za njezino prikupljanje	14
2.3.3.2. Ostaci od žetve	16
2.3.3.3. Šećerna trska	17
2.3.3.4. Drugi energetske usjevi.....	18
2.3.3.4.1. Kineski šaš.....	19
2.3.3.4.2. Divlje proso	20
2.4. Skladištenje lignoceluloznih sirovina.....	21
2.4.1. Metode skladištenja biomase.....	21
2.4.1.1. Skladištenje na otvorenom prostoru	22
2.4.1.2. Skladištenje u zatvorenom prostoru bez kontrole klimatskih uvjeta	23
2.4.1.3. Siliranje.....	23
2.4.1.4. Skladištenje u zatvorenom uz kontrolu klimatskih uvjeta.....	24
2.4.1.5. Skladištenje u čeličnim ili betonskim silosima	25
2.4.2. Svojstva biomase koja utječu na skladištenje i mijenjaju se tokom skladištenja	26

2.4.2.1. Vlažnost	26
2.4.2.2. Gustoća	27
2.4.2.3. Gubitak suhe tvari	27
2.4.2.4. Zdravlje i sigurnost ljudi tijekom skladištenja biomase	29
2.4.3. Dizajn, veličina i nadzor skladišnih prostora	29
2.5. Transport lignoceluloznih sirovina	31
2.5.1. Cestovni transport	32
2.5.2. Željeznički transport	32
2.5.3. Lučki transport	32
2.5.4. Transport cjevovodima	33
2.5.5. Cijena transporta biomase	33
3. Zaključak	35
4. Literatura	36

1. UVOD

Velika količina lignoceluloznog materijala, čiji su glavni sastojci celuloza, hemiceluloza i lignin, nastaje u šumarstvu, poljoprivredi i prehrambenoj industriji. Lignocelulozni materijali često se smatraju otpadom, no oni se mogu koristiti kao jeftina, ali istovremeno i kompleksna obnovljiva sirovina za dobivanje visokovrijednih proizvoda u brojnim biotehnološkim procesima (Škoro, 2014). Na području Republike Hrvatske su dostupni lignocelulozni materijali koji uglavnom nastaju kao nusproizvod u poljoprivredi, šumarstvu i drvnoj industriji (Buljubašić, 2012).

Biotehnološka primjena lignoceluloznih materijala moguća je samo uz postojanje odgovarajućeg sustava za opskrbu sirovinom, koji obuhvaća prikupljanje i pohranu sirovina te odgovarajuće rukovanje i transport. S procesom opskrbe također je povezana i predobrada sirovine, koja se može provesti u jednoj ili više točaka sustava opskrbe. Skladištenje i čekanje materijala prije prerade potrebno je zbog sezonskog karaktera žetve, varijabilnih prinosa i rasporeda isporuke (Sokhansanj i Hess, 2009).

Stoga su ciljevi ovog završnog rada:

- objasniti važnost opskrbe lignoceluloznim sirovinama;
- prikazati metode procjene količine lignoceluloznog otpada koji se može dobiti uzgojem pojedinih poljoprivrednih kultura;
- navesti postupke berbe i sakupljanja, metode rukovanja i transporta te metode skladištenja lignoceluloznih sirovina obzirom na njihova svojstva;
- navesti svojstva biomase koja utječu na skladištenje (vlaga, gustoća, samozagrijavanje, opasnost od požara i eksplozije, utjecaj na ljudsko zdravlje i sigurnost, prašina);
- prikazati dizajn i veličinu skladišnih prostora;
- navesti promjene sastava biomase tijekom skladištenja; te
- procijeniti troškove žetve i obrade biomase.

Pritom je posebna pažnja posvećena onim sirovinama koje su dostupne u našem podneblju.

2. TEORIJSKI DIO

2.1. Kemijska struktura lignoceluloze

Lignocelulozna biomasa se najvećim dijelom sastoji od tri polimera (celuloze, hemiceluloze i lignina), te u manjim količinama od drugih komponenata, kao što su acetilne grupe, minerali te fenolni supstituenti. Lignoceluloza je radi svojih svojstava, kao što su kristaliničnost celuloze, hidrofobnost lignina te sami način na koji je celuloza inkapsulirana unutar lignin–hemiceluloznog matriksa, u velikoj mjeri otporna na razgradnju i radi toga još uvijek predstavlja izazov za uporabu kao sirovina za biotehnologiju (Isikgor i Becer, 2015).

Lignocelulozna biomasa sastoji se od 30 - 35 % celuloze, 25 – 30 % hemiceluloze te oko 10 % lignina, a ostatak lignocelulozne biomase sačinjavaju proteini, lipidi, pepeo, voda, pektin, ugljikohidrati male molekulske mase te drugi sastojci u tragovima (Chen, 2014).

2.1.1. Strukturni polimeri lignoceluloze

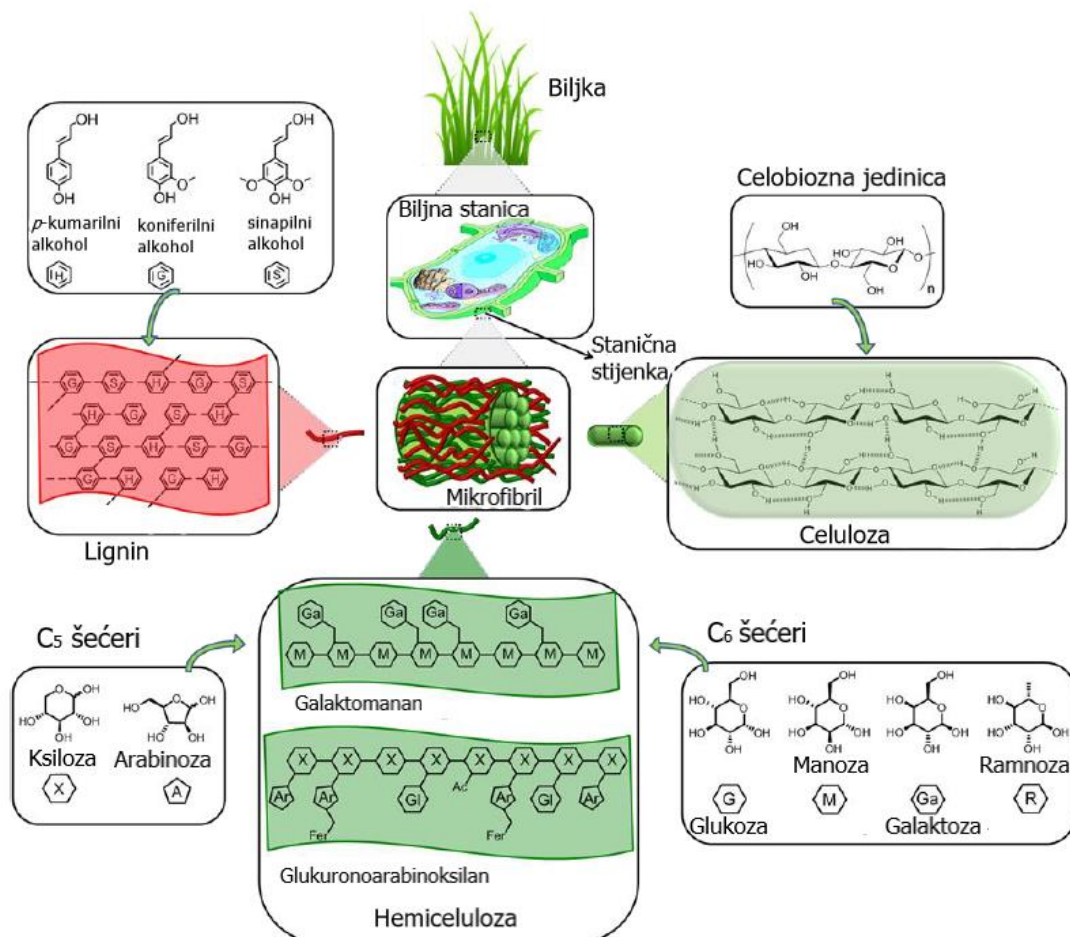
Celuloza je makromolekularna komponenta molekulske formule $(C_6H_{10}O_5)_n$. Po strukturi je u vodi netopljiv homogeni polisaharid, koji se sastoji od ravnog lanca velikog broja D–glukozičnih jedinica povezanih $\beta(1\rightarrow4)$ vezom (Slika 1). Molekule celuloze uglavnom se međusobno povezuju tako da zajedno tvore agregate. Agregati celuloze sadrže kristalinični i amorfni dio. U kristaliničnom dijelu molekule celuloze su pravilno raspoređene, što ometa biorazgradnju same molekule. Amorfnu regiju celuloze očituje opuštena, neorganizirana struktura molekula celuloze (Chen, 2014).

Hemiceluloza je heterogeni polisaharid, koji sadrži kratki bočni lanac sastavljen od dva ili više monosaharida (Slika 1). Šećerne grupe hemiceluloze su uglavnom ksiloza, glukoza, manoza, arabinoza i galaktoza, te razni njihovi derivati. Hemiceluloza je amorfni materijal koji, za razliku od celuloze, ima nizak stupanj polimerizacije (manji od 200, uglavnom 80–120). U staničnoj stijenci lignoceluloznih materijala hemiceluloza je najkompleksnija od svih komponenata, te joj pruža strukturnu čvrstoću jer tvori kovalentne veze (uglavnom benzil-eter veze) s ligninom te esterske veze s acetilnim jedinicama i hidroksicinaminskom kiselinom (Chen, 2014).

Lignin je trodimenzionalni polimer fenilpropanskih jedinica. Ima ulogu u održavanju biljnih stanica odnosno cjelokupnih biljnih tkiva i biljnih vlakana na okupu tj. djeluje kao „stanično ljepilo“ (eng. cellular „glue“), daje čvrstoću staničnoj stijenci te osigurava biljci otpornost na insekte i patogene. Odgovarajuće fenilpropanske monomerne jedinice unutar

ligninskog polimera prikazane na Slici 1 su: *p*-hidroksifenil (H), gvajacil (G) te siringil (S) jedinice (Isikgor i Becer, 2015).

U tvrdoj drvnoj građi (eng. hardwood) lignin se sastoji uglavnom od siringilnih jedinica, dok lignin mekog drveća (eng. softwood) uglavnom sadrži gvajacilne jedinice te manji udio *p*-hidroksifenilnih jedinica. Lignin u pšeničnoj slami primarno je sastavljen od gvajacil-propanskih te siringil-propanskih jedinica, uz mali udio *p*-hidroksifenil-propana (Chen, 2014).



Slika 1. Struktura lignoceluloze (Isikgor i Becer, 2015).

Napomena: „Gl“ označava glukuronsku kiselinu, a „Fer“ označava esterifikaciju ferulinskom kiselinom.

Prostorna struktura lignoceluloze prikazana je na Slici 1. Molekule celuloze su unutar stanične stijenke lignoceluloznih materijala pravilno raspoređene u snopovima, a vlakna su ispunjena hemicelulozom i ligninom. Celuloza, hemiceluloza i lignin unutar stanične stijenke međusobno su povezani na različite načine. Molekule celuloze i hemiceluloze, odnosno više molekula lignina, međusobno su povezane vodikovim vezama. Osim toga, između molekula

hemiceluloze i lignina postoje i kemijske veze, zbog čega lignin izoliran iz prirodnih lignoceluloznih materijala sadrži i mali udio ugljikohidrata u svojoj strukturi (Chen, 2014).

2.1.2. Vrste lignoceluloznih materijala

U lignocelulozne sirovine ubraja se poljoprivredni otpad (npr. stabljike kukuruza, kukuruzni oklasci, pšenična slama, ječmena slama, rižina slama), otpad drvne industrije te trave (energetski usjevi) (Chen, 2014). Primjeri ovih sirovina dostupnih na području Republike Hrvatske su kukuruzovina, kukuruzni oklasci, kukuruzna komušina, pšenična i ječmena slama, lisne rozete šećerne repe, ostaci rezidbe maslinika i voćnjaka te bukova piljevina (Buljubašić, 2012). U Tablici 1 prikazane su pojedine vrste lignocelulozne biomase te njihov kemijski sastav.

Tablica 1. Tipovi lignocelulozne biomase i njihov kemijski sastav (Isikgor i Becer, 2015).

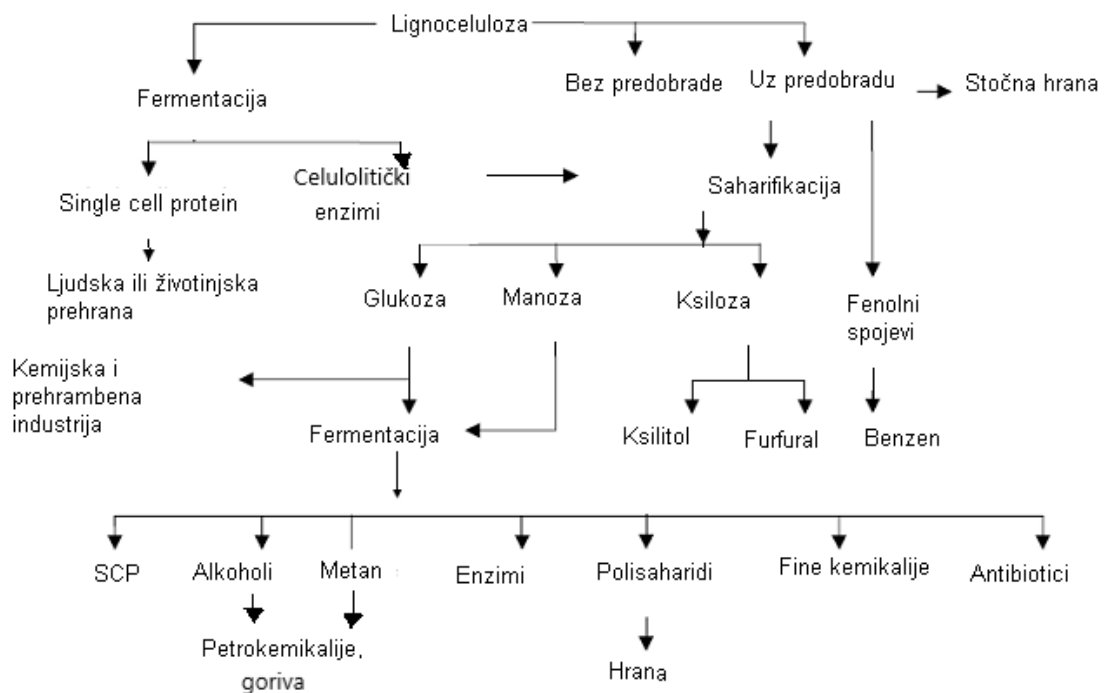
Lignocelulozna biomasa		Celuloza [%]	Hemiceluloza [%]	Lignin [%]
Tvrdo drvo	Topola	50.8 – 53.3	26.2 – 28.7	15.5 – 16.3
	Hrast	40.4	35.9	24.1
	Eukaliptus	54.1	18.4	21.5
Meko drvo	Bor	42.0 – 50.0	24.0 – 27.0	20.0
	Američka duglazija	44.0	11.0	27.0
	Smreka	45.5	22.9	27.9
Poljoprivredni otpad	Pšenična slama	35.0- 39.0	23.0 – 30.0	12.0 – 16.0
	Ječmena pljevica	34.0	36.0	13.8 – 19.0
	Ječmena slama	36.0 – 43.0	24.0 – 33.0	6.3 – 9.8
	Rižina slama	29.2 – 34.7	23.0 – 25.9	17.0 – 19.0
	Rižina pljevica	28.7 – 35.6	12.0 – 29.3	15.4 – 20.0
	Zobena slama	31.0 – 35.0	20.0 – 26.0	10.0 – 15.0
	Kukuruzni oklasci	33.7 – 41.2	31.9 – 36.0	6.1 – 15.9
	Stabljika kukuruza	35.0 – 39.6	16.8 – 35.0	7.0 – 18.4
	Otpaci u preradi šećerne trske	25.0 – 45.0	28.0 – 32.0	15.0 – 25.0
	Slama kineske šećerne trske	32.0 – 35.0	24.0 – 27.0	15.0 – 21.0
Trave	Trava	25.0 – 40.0	25.0 – 50.0	10.0 – 30.0
	Divlje proso	35.0 – 40.0	25.0 – 30.0	15.0 – 20.0

U kontekstu ovog završnog rada pojam „biomasa“ označava lignoceluloznu sirovinu koja se koristi kao biomasa. Biomasa trenutno predstavlja, uz naftu, plin i ugljen, četvrti najveći izvor energije. Pod pojmom biomase obično se podrazumijevaju sve biorazgradive tvari biljnog porijekla, dobivene od ostataka poljoprivredne i šumske industrije.

2.2. Biotehnoška primjena lignoceluloze i opskrba sirovinom

2.2.1. Proizvodi koji se mogu dobiti iz lignocelulozne sirovine

Lignocelulozne sirovine mogu se koristiti u različitim proizvodnim procesima, kao na primjer za dobivanje: kemikalija (npr. octena, limunska i fumarna kiselina, aceton, etanol, butanol, glicerol), biogoriva (npr. bioplin, biodizel, bioetanol), enzima (npr. celuloza, ksilanaza, hemiceluloza) te ostalih proizvoda visoke vrijednosti (npr. ksilitol, furfural, galna kiselina, vanilin) (Howard i sur., 2003). Na Slici 2 prikazani su načini dobivanja raznih proizvoda iz lignoceluloznih sirovina.



Slika 2. Shema pretvorbe lignoceluloze u različite proizvode (Howard i sur., 2003).

2.2.2. Važnost opskrbe sirovinom, skladištenja i održavanja odgovarajuće kvalitete sirovine

Da bi se lignocelulozne sirovine mogle koristiti u biotehnološkoj proizvodnji, neophodno je uspostaviti sustav za opskrbu (Sokhansanj i Hess, 2009). Skladištenje i čekanje materijala prije prerade potrebno je zbog sezonskog karaktera žetve, varijabilnih prinosa i rasporeda isporuke. Sustav za opskrbu lignoceluloznim sirovinama obuhvaća brojne jedinične operacije potrebne za premještanje sirovine od mjesta njezine proizvodnje do mjesta gdje započinje njezina prerada. Jedinične operacije unutar sustava opskrbe su: prikupljanje, pohrana, rukovanje i transport. One predstavljaju jedan od najvećih tehničkih i logističkih izazova za industriju koja prerađuje lignocelulozu. Za transport se koriste razna prijevozna sredstva (kamion, vlak, brod).

Važno je napomenuti da u sustav za opskrbu sirovinama ne spadaju samo berba, baliranje ili transport, već se radi o skupu svih jediničnih operacija od polja do ulaska u prvu fazu kemijske ili biotehnološke obrade u postrojenju za konverziju lignocelulozne sirovine. Ovaj integrirani sustavni pristup stvara mogućnosti za preraspodjelu i izmjenu pojedinačnih operacija radi smanjenja troškova sirovina i povećanja dodanih vrijednosti kako biorefinerija tako i proizvodnog sustava. Primarni cilj integriranog sustava opskrbe sirovinama je smanjiti potrošnju goriva za logistiku, a time i trošak proizvodnje krajnjeg proizvoda. Taj se cilj može postići na tri načina (Sokhansanj i Hess, 2009):

- (1) odabirom i razvojem tehnologija koje smanjuju troškove jediničnih operacija,
- (2) odabirom strojeva i redoslijeda operacija koji minimiziraju troškove i
- (3) korištenjem biomase veće vrijednosti, što poboljšava učinkovitost pretvorbe i konačni prinos proizvoda.

Za integrirani sustav opskrbe sirovinama izuzetno je važna predobrada radi dobivanja biomase s dodanom vrijednošću (tj. smanjenje veličine čestica, prilagodba udjela vlage, čišćenje, frakcioniranje i zgušnjavanje). Ona se može provesti u bilo kojoj točki ili na više točaka u cijelom sustavu opskrbe sirovinama. Predobrada može biti jednostavna, kao mljevenje i oblikovanje biomase radi povećanja nasipne gustoće (eng. bulk density) ili poboljšanja učinkovitosti konverzije, ili može biti složena, kao poboljšanje kvalitete sirovine frakcioniranjem, sušenjem, miješanjem i povećanjem gustoće (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.3. Prikupljanje lignoceluloznog otpada koji potječe iz raznih grana gospodarstva

2.3.1. Procjena količine biomase

Proizvodnja lignocelulozne biomase obuhvaća sve operacije od podizanja usjeva do vremena žetve. Usjev se može uzgajati s ciljem dobivanja primarnog proizvoda, kao što je zrno, i pritom se proizvede dovoljno ostataka (sekundarne biomase), koji se mogu sakupiti za proizvodnju bioenergije i kao biotehnološka sirovina. Proizvodne operacije uključuju i novu strategiju plodosmjena, što podrazumijeva uključivanje energetskih usjeva u plodosmjenu kao osnovnih usjeva, odnosno postrnih usjeva uz reduciranu obradu tla. Neki od primjera energetskih usjeva su: miskantus (kineski šaš; lat. *Miscanthus sinensis*) i ukrasni proso (lat. *Panicum virgatum*) (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.3.1.1. Prinosi usjeva i ostataka usjeva

Prinos ostataka usjeva, izražen u tonama po hektaru, ne mjeri se izravno, već se prinos ostataka [tha^{-1}] procjenjuje iz omjera biomase i zrna (žetveni indeks; eng. *Harvest Index*, HI), koji se može kretati od 0.5 do gotovo 2 (Sokhansanj i Hess, 2009). Žetveni indeks je mjera prinosa žitarica, odnosno masa proizvoda izražena kao postotak mase ukupnog usjeva. Iz žetvenih indeksa i podataka o godišnjoj proizvodnji pojedinih kultura može se izračunati količina otpada dobivenog u poljoprivrednoj proizvodnji (Buljubašić, 2012). Žetveni indeks varira među raznim žitaricama svake godine ovisno o vremenu žetve te raznolikosti i gustoći sadnje. On se povećava s povećanjem ukupnog prinosa te smanjenjem stresnih uvjeta na žitaricu (Sokhansanj i Hess, 2009). Teorijski omjeri prinosa ostataka prema prinosu proizvoda (eng. *residue to crop ratio*) za najrasprostranjenije žitarice u Europi navedeni su u Tablici 2. U Tablici 3 navedeni su tipični prinosi usjeva te maseni omjer ostataka i usjeva. Velika varijacija HI u objavljenim podacima pripisuje se vrstama usjeva, oranju, upravljanju ostacima berbe, primjeni dušikovih gnojiva, klimi i stadiju zrelosti biljke u vrijeme žetve (Sokhansanj i Hess, 2009).

Obzirom na veliku zastupljenost uzgoja pšenice i kukuruza u odnosu na druge poljoprivredne kulture (Buljubašić, 2012), važno je razmotriti njihove žetvene indekse i ostale karakteristike.

Tablica 2. Teorijski omjeri prinosa ostataka i prinosa žitarica u Europi (Holm–Nielsen i Ehimen, 2016).

Žitarica	Omjer prinosa ostataka i prinosa žitarice
Ječam	0.68 – 1.20
Tvrda pšenica (lat. <i>Triticum durum</i>)	0.70 – 1.45
Meka pšenica (vrsta obične pšenice, lat. <i>Triticum aestivum</i>)	0.70 – 1.45
Raž	1.30 – 1.50
Soja	2.12
Kukuruz	1.00
Riža	0.60 – 0.75

Tablica 3. Tipični prinosi usjeva i ostataka temeljeni na prosječnom omjeru ostataka i usjeva (Sokhansanj i Hess, 2009).

Žitarica	Tipičan prinos žitarice [t suhe tvari/ha]	Omjer ostataka i proizvoda	Prinos biomase [t suhe tvari/ha]
Kukuruz	11.0	1.0	11.0
Sirak (porodica trava)	4.3	1.0	4.3
Ječam	3.8	1.5	5.8
Zob	2.2	2.1	4.7
Ozima pšenica	3.6	1.7	6.1
Jara pšenica	2.7	1.3	3.6
Soja	2.9	2.0	5.8
Riža	8.8	1.5	13.0
Pamučna vlakna	0.9	3.0	2.7
Ostalo	2.9	1.0	2.9

Jara (meka) i ozima pšenica vrste su obične pšenice (lat. *Triticum aestivum*). U svijetu, ozima pšenica zauzima veće površine i u prosjeku daje veće prinose od jare te je njezin opći ekonomski značaj time veći. Ozima pšenica daje ne samo veći, nego i stabilniji prinos u odnosu na jaru. Jara i ozima pšenica razlikuju se prema (Sokhansanj i Hess, 2009):

1. Prema vremenu sjetve - ozima se sije u jesen te prezimljuje u fazi od nicanja do busanja, dok se jara sije u proljeće.
2. Prema dužini vegetacije - ozima ima dužu vegetaciju od jare pšenice.
3. Prema busanju - ozima jače busa od jare pšenice.
4. Prema otpornosti na zimu - ozima je otpornija na niske temperature.
5. Prema dužini stadija jarovizacije - ozima ima znatno duži stadij jarovizacije.
6. Prema otpornosti na visoke temperature i sušu - jara je otpornija od ozime.
7. Prema kvaliteti zrna - jara daje kvalitetnije zrno i brašno od ozime.

Jarovizacija (rus. *jarovoj*: jari, proljetni) je postupak kojim se navlaži sjeme i ostavi stajati u polju 5 do 7 tjedana na temperaturi od 2°C, čime se zamjenjuje termofaza koju biljka prolazi u polju te time ubrzava razvoj biljke i omogućuje sjetva ozimih kultura u proljeće. Kada se klica razvije do polovice veličine sjemena, sjeme se postupno osuši i sije (Anonymous 1). Jarovizacijom se skraćuje vegetacijski period i povisuje prirod (Anonymous 2).

Kukuruz (*Zea mays* L.) je, poslije riže, druga po redu na listi žitarica koje se najviše proizvode u svijetu. Kukuruz raste na svakom kontinentu, osim na Antarktici, a 43% svjetske proizvodnje potječe iz Sjeverne Amerike. Kukuruz se koristi kao glavni izvor životinjske prehrane, te kao stabilna sirovina za proizvodnju škroba i industrijskih proizvoda na bazi škroba. On je također jedan od glavnih izvora hrane u mnogim dijelovima svijeta (Eckhoff i sur., 2003).

Većina navedenih omjera lignocelulozne biomase i zrna ne odnosi se na ručno uklanjanje i frakcioniranje cjelokupne nadzemne biomase biljke (slame i zrna), već iskazani omjer HI odražava performanse opreme za prikupljanje. Dokazano je da je omjer biomase i zrna usko povezan s postavkama kombajna, osobito visinom rezanja. Za kukuruzovinu donji dijelovi stabljike (eng. stalk sections) čine 66% ukupne suhe mase (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.3.1.2. Lignocelulozna biomasa koja se može iskoristiti

Nije moguće s polja ukloniti sve proizvedene ostatke usjeva jer su različite količine površinskih ostataka potrebne za kontrolu erozije, ovisno o teksturi tla i nagibu polja. Tla grube teksture (pješčana tla) zahtijevaju relativno velike količine ostataka za kontrolu erozije izazvane vjetrom. Količina površinskih ostataka potrebnih za kontrolu erozije uzrokovane vodom povećava se s nagibom polja. Preporuča se zadržavanje prosječnih 1300 kg ha^{-1} ostataka usjeva na svim tlima u svrhu sprečavanja erozije tla. Za jaru pšenicu količina očuvanja iznosi 812 kg ha^{-1} , a za ozimu pšenicu 1159 kg ha^{-1} (Sokhansanj i Hess, 2009).

Ostaci koji se mogu iskoristiti kao lignocelulozna biomasa izravno su povezani s prinosom usjeva tokom njihova uzgoja. Što je veći prinos usjeva, veći je i prinos ostataka obzirom na to da ostaci sačinjavaju određeni postotak same biljke koja se uzgaja. Poljoprivredni ostaci predstavljaju onaj dio koji zaostaje nakon žetve usjeva, uključujući stabljike, slamu, lišće, granje, pljevicu, oklaske, i drugo. Prinos usjeva i udio ostataka, te njihov agronomski razvoj ovisi i o okolišnim faktorima, kao što su klima te vrsta i stanje tla (Avcioglu i sur., 2019).

Tablica 4. Svojstva poljoprivrednih ostataka ispitivana u različitim regijama (Avcioglu i sur., 2019).

Žitarica	Vrsta ostataka	Udio ostataka nakon žetve (Ratio of product residue)	Vlaga [%]
Pšenica	slama	0.5 – 1.75	10 – 15
Ječam	slama	1.08 – 1.36	11 – 15
Zob	slama	0.34 – 0.39	9 – 14
Raž	slama	0.99	15
Kukuruz	stabljika – oklasci	0.70 – 2.50	40 – 65
	stabljike	1.50 – 2.25	15 – 17
	oklasci	0.27 – 0.86	7 – 9
Uljana repica	stabljike	1.60 – 1.80	45
Suncokret	stabljike i lišće	0.70 – 3.50	14 – 40
Pamuk	stabljike	1.10 – 3.50	6 – 12
Šećerna repa	lišće	0.12 – 0.14	75
Šećerna trska	vrh i lišće	0.10 – 0.30	50 – 63
	otpacu u preradi	0.10 – 0.30	50 – 75
Riža	slama	0.45 – 1.75	10 – 25
	pljevica	0.20 – 0.27	10 – 13
Proso	slama	1.40 – 3.00	15
Soja	slama	0.76 – 3.50	15

Avcioglu i sur. (2019) proveli su istraživanje gdje su određivali važna strukturna i fizička svojstva različitih tipova žitarica za dobivanje energije iz ostataka koji su se koristili kao biomasu. Svojstva koja su se određivala bila su: omjer količine ostataka prema količini usjeva, količina vlage u ostacima te energetska vrijednost ostataka. Uzevši u obzir srednje vrijednosti

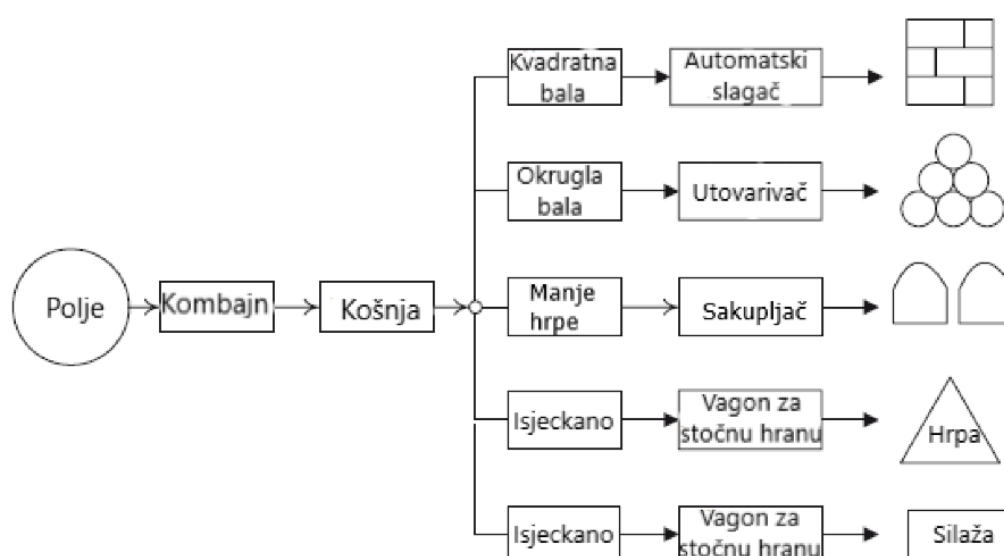
navedenih svojstava, došli su do zaključka koji poljoprivredni usjevi daju veće udjele ostataka pogodnih za biomasu, te koji ostaci imaju veći energetski potencijal.

Količina i karakteristike ostataka poljoprivrednih kultura dobivenih nakon žetve variraju ovisno o mnogim čimbenicima, uključujući lokalne klimatske uvjete, razlike poljoprivredne prakse (kao na primjer visina rezanja biljke tokom žetve) i tip žitarice koji se uzgaja. Također, svojstva pojedinih usjeva te njihovi prinosi mogu se razlikovati u različitim regijama uzgoja (Avcioglu i sur., 2019).

Avcioglu i sur. (2019) su u svojem istraživanju povezali i analizirali istraživanja iz različitih svjetskih regija, pri čemu su prikupljeni podaci o poljoprivrednim ostacima u Europskoj Uniji, Turskoj, Indiji, Kamerunu, Kini, Pakistanu, Grčkoj, Nigeriji i Ugandi. Karakteristike koje su se gledale bile su udio dobivenih ostataka (eng. ratio of product residue, RPR) te stupanj vlažnosti ostataka, a rezultati istraživanja prikazani su u Tablici 4. Neke biljke, kao što su kukuruz, suncokret, pamuk i soja, daju veći udio ostataka od ostalih biljaka.

2.3.2. Operacije žetve

U kontekstu logističke opskrbe biomasom, žetva se definira kao rezanje ili otkidanje biljke koja raste u polju, a uključuje i pripremu za uklanjanje biljke s polja te njezino transportiranje i spremanje bilo pored farme na kojoj je uzgojena ili u većem, centraliziranom skladišnom prostoru. Slika 3. prikazuje različite oblike biomase nakon odvajanja zrna, kao i razne transportne uređaje za premještanje biomase na farmu. Biomasa se može sjeckati, balirati ili izravno oblikovati u velike stogove (Sokhansanj i Hess, 2009).



Slika 3. Mogućnosti prikupljanja biomase (Sokhansanj i Hess, 2009).

Odabir određenog oblika biomase ovisi o dostupnosti opreme, vrsti biomase i logistici. Cilj je povećati nasipnu gustoću biomase do razine koja troškove skladištenja i transporta svodi na minimum. Tablica 5. navodi tipične vrijednosti nasipne gustoće biomase u različitim oblicima. Nasipna gustoća peletirane biomase gotovo je jedan red veličine veća od gustoće rastresite usitnjene biomase (Sokhansanj i Hess, 2009).

Tablica 5. Nasipna gustoća biomase (Sokhansanj i Hess, 2009).

Oblik biomase	Oblik i veličina	Gustoća [kgm^{-3}]
Rezana biomasa	Duljine 20 – 40 mm	60 – 80
Mljevene čestice	1.5 mm rastresit materijal (eng. loose fill)	120
Mljevene čestice	1.5 mm gusta ispunjenost	200
Briketi	32 mm promjer x 25 mm debljina	350
Kocke	33 mm x 33 mm (poprečni presjek)	400
Peleti	6.24 mm promjer	500 – 700

2.3.2.1. Košnja i kondicioniranje

Košnja je proces rezanja biljke. Pojam kondicioniranje odnosi se na operacije koje ubrzavaju sušenje pokošene biljke. Košnja se može integrirati s kondicioniranjem, ukoliko se koristi uređaj koji ujedno i kosi i sabija pokošeno sijeno (eng. mower-conditioner), a time omogućuje brže i ujednačenije sušenje sijena. Većina modernih kombajna za berbu kukuruza reže i uzima samo gornji dio biljke. Donji dio biljke često ostaje stajati u polju. Većina tih stabljika čvrsto je pričvršćena u zemlju i često je potreban dodatni operativni korak rezanja kako bi se ona uklonila. Usitnjeni materijal ravnomjerno se raspršuje po cijelom polju radi sušenja, a potom se grablja po polju u hrpe (stogove) radi baliranja. Neki umjesto grabljanja koriste sjeckalicu koja izbacuje usitnjene stabljike izravno na hrpu, no takav način potencijalno produljuje vrijeme sušenja u polju (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.3.2.2. Sakupljanje usitnjene biomase

Nakon košnje biomasa se prikuplja i pakira. Slika 3 prikazuje da se biomasa iz polja uklanja u jednom od tri oblika: kao bala (eng. bale), sjeckani materijal (eng. chop) ili kao štruca (eng. loaf). Sakupljač krme (eng. forage harvester) uzima rezani usjev iz otkosa (eng. swath) i sjecka ga na komade (25 do 50 mm), koje potom otpuhuje u kola. Sakupljač krme može biti samohodan s vlastitim pogonom ili radi s polužnom snagom traktora koji ga vuče. Samohodne su žetelice namijenjene za veće površine i obično se koriste za dehidraciju primjenom visoke temperature. Maseni udio vlage sjeckane krme na polju može varirati od 80% za stojeći usjev, do 10-15% za usjev koji leži na polju. Za proizvodnju silaže, udio vlage u krmi trebao bi biti između 40-60% (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.3.2.3. Sakupljanje biomase u obliku bala

Baliranje je najčešća metoda prikupljanja i uklanjanja biomase iz polja. Stroj za baliranje (eng. bailer) (Slika 4) skuplja biomasu u snop i veže ju u okrugle ili četvrtaste bale. Većina kružnih balirki proizvode bale koje teže 250 - 1087 kg i različite su veličine od 0.76 m (promjer) × 1.0 m (širina) do 1.9 m (promjer) × 1.57 m (širina). Okrugle bale kakve se najviše koriste na farmama dimenzija su 1.5 m × 1.8 m. Velike četvrtaste bale mogu imati poprečni presjek od 1.2 m × 1.2 m i dužinu do 2.4 m. Manje pravokutne bale s presjekom od 0.9 m × 1.2 m također su popularne za biomasu i imaju dvije prednosti: (1) učinkovitije koriste raspoloživi prostor na kamionu, pa se na svaki kamion može ukrcati 33% više bala; i (2) ove bale mogu se komprimirati do veće nasipne gustoće. Korištenjem pravokutnih bala kamioni se mogu natovariti tako da se postigne maksimalni dopušteni teret. Masa bale kreće se od 500 kg do preko 900 kg, ovisno o vrsti biomase i udjelu vlage u biomasi (Sokhansanj i Hess, 2009).



Slika 4. Stroj za baliranje (Anonymous 3, 2016).

2.3.2.4. Troškovi prikupljanja biomase

Kako bi se procijenili ukupni troškovi prikupljanja biomase, vrši se izračun troškova operacija i utroška energije za opskrbne lance biomase. Trošak baliranja u četvrtaste bale je među najmanjima (23,72 \$/t), a za suho sjeckanje i slaganje na hrpu (eng. piling) (35,71 \$/t) te za siliranje (35,12 \$/t) cijene su veće radi veće cijene sjeckanja. Tablica 6 sumira tipične troškove prikupljanja različitih oblika biomase, kao i utrošak energije za sakupljanje. On se kreće od 0,319 GJ/t suhe tvari za rastresito slaganje do 0,590 GJ/t suhe tvari za sustav suhe sječke (eng. dry chop system). Potrošnja energije ovisi o snazi potrebnoj za rad opreme. Sjekači biomase zahtijevaju veliku snagu (preko 200 kW). Utrošak energije za siliranje malo je manji nego za suho sjeckanje (Sokhansanj i Hess, 2009).

Tablica 6. Cijena prikupljanja biomase i potrošnja energije pri različitim načinima prikupljanja (Sokhansanj i Hess, 2009).

Način sakupljanja biomase	Cijena sakupljanja [\$/t]	Potrošnja energije [GJ/t]
Četvrtaste bale	23.72	0.339
Štruce (eng. loafs)	19.69	0.319
Suho rezanje i nagomilavanje	35.71	0.592
Vlažno rezanje i siliranje	35.12	0.470

2.3.3. Specifičnosti opskrbe različitim lignoceluloznim sirovinama

2.3.3.1. Drvna biomasa i oprema za njezino prikupljanje

Sakupljanje drvene biomase može se podijeliti u pet koraka (Holm-Nielsen i Ehimen, 2016): sječa, ekstrakcija (izvlačenje), prerada, utovar i transport. Najprije se deblo posiječe, a zatim se iz šume odvlači na drugu lokaciju (ekstrakcija), na kojoj se drvo prerađuje uklanjanjem grana te sječom debela u manje komade. Tako dobiveni komadi se potom razvrstavaju, slažu, utovaruju u kamione te se transportiraju do postrojenja koje će iskoristiti tu biomasu.

Kao sirovina za dobivanje bioenergije i bioprodukata, drvna biomasa se skladišti i dostavlja u jednom od ova tri oblika (Yang i sur., 2016):

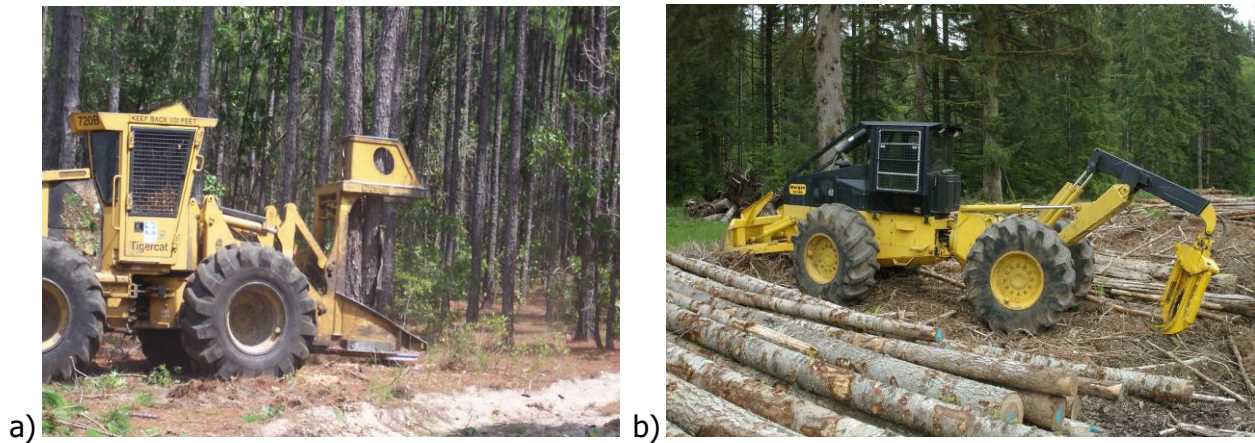
- kao mješoviti drvni ostaci (eng. unconsolidated logging residues);

- kao strugotine (eng. chips); ili druga usitnjena biomasa (eng. comminuted biomass materials); te
- kao upakirani materijali (eng. bundled materials).

Mješoviti drvni ostaci posječenog drveća koji zaostaju nakon odvajanja od stabala prije su se smatrali neupotrebljivim materijalom, koji se obično nakon sječe ostavlja na terenu. Takvi ostaci mogu se transportirati pomoću kamiona ili prikolica do postrojenja koja koriste drvenu biomasu za daljnju preradu, a alternativno se mogu i koncentrirati u specijaliziranim spremnicima (eng. containers) te se onda transportirati u tom obliku. Posječeno deblo se sjecka i drobi, pri čemu nastaju veći komadi drveta, strugotine i prah (Yang i sur., 2016).

Veliki ostaci sječe drveća (npr. velike grane) obično se sabijaju u cilindrične bale ili u svežnjeve (eng. composite residue logs, CRLs). To olakšava rukovanje i osigurava dulje skladištenje bez gubitka suhe tvari. Međutim, za ovakav način prikupljanja drvne biomase potrebni su specijalni strojevi, čime poskupljuje cijeli proces. Neki lomljivi materijali, ili kratki komadi debla velikog promjera ne mogu se lako upakirati (Yang i sur., 2016).

Za sakupljanje se koriste strojevi koji istovremeno prikupljaju trupce i drvenu biomasu. U te strojeve ubrajaju se sakupljači (eng. harvester), traktori (eng. skidders) te otpremnici (eng. forwarders) koji služe za žetvu i oporavak drvne biomase. Najučinkovitija metoda za sječu cijelog stabla je pomoću posebnog stroja za sječu stabala, koji sadrži dodatak za rezanje debla prije no što ga sasiječe. Taj stroj (eng. feller buncher/skidder) (Slika 5a) omogućuje rezanje, držanje te odlaganje posječenog debla na tlo. Nakon odlaganja na tlo, specijalizirano vozilo (eng. skidder) (Slika 5b) premješta posječeno deblo na drugu lokaciju, gdje drobilica (eng. chipper) (Slika 5c) usitnjava biomasu, dok se drugi iskoristivi dijelovi drveta transportiraju do odgovarajućeg tržišta (Yang i sur., 2016).



Slika 5. Strojevi za sječu i sakupljanje drvene biomase:

- a) Stroj za sječu stabala i njihovo odlaganje na tlo (eng. feller buncher) (Anonymous 4, 2005).
- b) Stroj koji služi za transport stabala od mjesta sječe do mjesta procesiranja (eng. skidder) (Anonymous 5, 2007).
- c) Stroj koji služi za usitnjavanje velikih komada drveta; drobilica (eng. chipper) (Anonymous 6, 2008).

2.3.3.2. Ostaci od žetve

Žetva kukuruza obično se vrši pomoću dva stroja, pri čemu prvi preko polja prelazi žetelac plodova kukuruza (eng. corn grain harvester – windrower), a zatim balirka sakuplja nakupine ostataka od žetve kukuruza te ih sakuplja u bale. Ostaci su u obliku bala vrlo gusto spakirani, te se kao takvi transportiraju do natkrivenog skladišta ili izravno do biorafinerije.

Biljke kao što su kukuruz, pšenica, zob, raž, ječam, soja i lan obično se žanju pomoću kombajna (Slika 6), koji je tako nazvan zato što kombinira i ujedinjuje tri različite operacije: žetvu, odvajanje ploda od ostatka biljke (eng. threshing) te odvajanje zrna biljke od pljeve (eng. winnowing) (Yang i sur., 2016).

Ostaci od žetve kukuruza obično se sakupljaju kao suhi proizvod te se pakira u obliku velikih okruglih ili četvrtastih bala. Žetva kukuruzovine slijedi nakon žetve usjeva, a uključuje usitnjavanje, sušenje u polju, skupljanje ostataka u hrpe, baliranje, sakupljanje bala, transport do skladišta, istovar te skladištenje. Problemi sa sustavom višekratnog prelaženja strojeva preko polja (eng. multipass system) uključuju: sporo sušenje materijala u polju, česte zastoje zbog vremenskih prilika, kontaminaciju tla, mali prinos te veće operativne troškove. Žetveni sustav u kojem se koristi stroj koji kombinira istovremenu žetvu ploda kukuruza te ostataka (stabljike, lišće, osušeni klipovi, komušina) uključuje manje operacija na polju te manje operativne troškove (Yang i sur., 2016).



Slika 6. Kombajn (eng. combine harvester) (Anonymous 7, 2004).

2.3.3.3. Šećerna trska

Šećerna trska je biljka koja pripada obitelji trava *Poaceae*. Njezin ciklus sadnje ovisi o uvjetima u regiji u kojoj se proizvodi, a jednom sadnjom dobiva se 8 – 10 berbi. Nova sadnja provodi se tek kada urodi počnu drastično padati i kada se gustoća posađenog usjeva razrijedi. Razvijeni su mehanizirani sustavi za žetvu šećerne trske. Obzirom na oblik požnjevene stabljike, mehanička žetva šećerne trske može se podijeliti u dvije kategorije: žetva sjeckanjem (eng. chopper harvesting) i žetva cijele stabljike (eng. whole stalk harvesting). Strojevi za žetvu cijele stabljike na vlastiti pogon žanju cijele stabljike šećerne trske pomoću fleksibilnog dijela stroja, stavljajući 4 do 6 redova obrađene trske na jednu hrpu (eng. windrow). Nakon toga, sva trska se prikuplja i utovaruje na kamione ili prikolice pomoću specijalnih utovarivača (eng. loader), kao što je na primjer 2254 John Deere utovarivač (Slika 7). Mane ovog sustava su što mehaničko odvajanje trske od nepotrebnih ostataka predstavlja dodatni trošak, te ovakav

sustav koji reže cijele stabljike ne može dobro obraditi stabljike koje su presavijene ili polegnute na tlo (Yang i sur., 2016).



Slika 7. Utovarivač šećerne trske (Anonymous 8).

Kombajni koji omogućuju sjeckanje stabljika trske (eng. combine chopper harvesters) (Slika 8) požanju jedan ili dva reda trske te zatim stabljike trske isjeckaju u komadiće duljine 300 – 450 mm. Nakon toga se zaostali vrhovi trske, otpad i druge nepotrebne tvari uklanjaju pomoću ekstrakcijskih ventilatora kombajna (eng. harvester extractor fans), a usitnjeni komadići trske se utovaruju na prikolice koje se po polju kreću uz kombajn (Yang i sur., 2016).



Slika 8. John Deere 3520 žetelac - sjeckalica šećerne trske (Anonymous 9, 2009).

2.3.3.4. Drugi energetske usjevi

Kineski šaš (lat. *Miscanthus sinensis*), divlje proso (lat. *Panicum virgatum*), trstasti blještac (lat. *Phalaris arundinacea*) te neke druge trave klasificirane su kao energetske usjevi. Prema tvrdnji USDA (United States Department of Agriculture), energetske usjevi postat će

dominantni resurs nakon 2022. godine, a njihova cijena kretat će se iznad 50\$ po toni suhe tvari (Yang i sur., 2016).

2.3.3.4.1. Miskantus

Miskantus (kineski šaš) (Slika 9a) je višegodišnja gomoljasta trava koja potječe iz istočne Azije, a Europi je predstavljena oko 1930. godine, gdje se sljedećih 50 godina koristila kao ukrasna biljka. Razvojem biljke *Miscanthus x giganteus* (Slika 9b), sterilnog hibrida varijeteta *M. sinensis* i *M. sacchariflorus*, došlo je do rasta interesa za tom biljkom, jer se uvidjelo da može poslužiti za dobivanje velike količine energije obzirom na veliku količinu biomase koju proizvodi (Yang i sur., 2016).

Uzgojem energetskih usjeva proizvodi se velika količina biomase po jedinici površine, s ciljem njezine pretvorbe u energiju. Jedna od takvih kultura je vrsta *Miscanthus x giganteus* (prosjeak prinosa biomase je 15 – 20 t/ha) (Bilandžija, 2014).

Glavne karakteristike ove trave su (Bilandžija, 2014): mogućnost uzgoja na tlima lošije kvalitete, prilagodljivost uzgoju u različitim klimatsko–pedološkim uvjetima (od razine mora do 3000 m nadmorske visine), ne postoji mogućnost njezinog nekontroliranog širenja (prirodan je sterilni hibrid), izuzetno je otporna na bolesti i štetočine, zemlju na kojoj raste nije potrebno puno gnojiti, te sama trava ima veliku energetska vrijednost (17.05 – 19.21 MJ/kg).



Slika 9. Vrste trave miskantus:

a) *Miscanthus sinensis* (kineski šaš; Anonymous 10, 2019).

b) *Miscanthus x giganteus* (gigantski miskantus) (Anonymous 11, 2011).

Žetva miskantusa vrši se svake godine koristeći konvencionalnu opremu za žetvu (Holm–Nielsen i Ehimen, 2016), a žanje se u suhom obliku (vlaga <16%) (Bilandžija, 2014). U Tablici

7. prikazana su morfološko–gospodarska svojstva kulture *Miscanthus giganteus* uzgojene na području Republike Hrvatske.

Tablica 7. Morfološko – gospodarska svojstva kulture *Miscanthus x giganteus* uzgojene na području Republike Hrvatske (Bilandžija, 2014).

Lokacija	Prinos suhe tvari [t/ha]	Visina biljke [m]	Broj izboja po biljci
Medvednica	16.84	2.28	30.86
Donja Bistra	20.08	3.38	31.00

2.3.3.4.2. Divlje proso

Divlje proso (lat. *Panicum virgatum*) (Slika 10) je višegodišnja trava porijeklom iz Sjeverne Amerike. Može narasti do visine 90 – 300 cm i prilagođena je velikom rasponu staništa i klimatskih uvjeta. Korisna je za dobivanje energije, ispašu i proizvodnju sijena te za očuvanje tla i vode. Prinos usjeva ove biljke jako je uvjetovan vrstom, vremenskim prilikama, plodnošću tla te lokacijom. Za žetvu i baliranje divljeg prosa može se koristiti konvencionalna oprema za žetvu sijena. Divlje proso se može žeti dva puta godišnje, no ekonomski je isplativije i veći su prinosi ako se žetva obavlja jednom godišnje (Yang i sur., 2016).



Slika 10. *Panicum virgatum* (divlje proso; Anonymous 12, 2015).

2.4. Skladištenje lignoceluloznih sirovina

Budući da su vrijeme žetve i prinosi varijabilni, biomasa se mora skladištiti tako da se tijekom cijele godine redovito isporučuje u pogon za njezinu preradu. Pohranjivanje biomase u suhom obliku i u obliku bala lakše je nego pohranjivanje biomase visoke vlažnosti. Trošak poduzetih mjera zaštite biomase tijekom skladištenja treba uravnotežiti s vrijednošću konačnog prinosa šećera (Sokhansanj i Hess, 2009). Sastav lignoceluloznih sirovina ovisi o vremenu, metodi berbe i skladištenju, a u Tablici 8. prikazano je kako se mijenja sastav kukuruzovine tijekom skladištenja.

Tablica 8. Promjene sastava kukuruzovine tijekom skladištenja (Buljubašić, 2012).

Sastojak	Prije skladištenja	Nakon 26 tjedana skladištenja		Nakon 52 tjedna skladištenja	
	Udio suhe tvari [%]	Iznutra [%]	Izvana [%]	Iznutra [%]	Izvana [%]
Lignin	18.5	+2.7	+0.9	+3.7	+3.0
Arabinan	3.4	-0.7	-0.5	-1.0	-0.8
Ksilan	20.1	<0.8	+0.9	+2.0	+2.8
Manan	0.7	-0.1	-0.1	-0.2	-0.2
Galaktan	1.1	-0.1	<0.1	-0.3	+0.1
Glukan	40.7	-1.5	<1.6	-1.6	<0.6

Način skladištenja, konfiguracija stogova i zaštitne barijere mogu se koristiti za smanjenje gubitaka šećera tijekom skladištenja. Osim toga, dizajn suhog skladišta treba biti takav da se smanji rizik od požara (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.4.1. Metode skladištenja biomase

Postoje različiti tipovi skladištenja biomase, a svaki od njih pogodan je za određene tipove biomase te ima svoje prednosti i mane. Prikladan način skladištenja za određenu sirovinu ovisi o nekoliko ključnih čimbenika, uključujući (Rentizelas, 2016):

- Tip biomase koji se skladišti;
- Oblik u kojem se biomasa nalazi (u koji oblik je prerađena);
- Prosječna i maksimalna količina biomase potrebne u skladišnom prostoru;
- Regionalni vremenski uvjeti;
- Očekivano trajanje skladištenja;

- Svrha za koju će se lignocelulozna biomasa upotrijebiti;
- Udaljenost na koju se biomasa transportira;
- Lokacija skladištenja;
- Dostupnost resursa (kapital, prostor i postojeća infrastruktura).

U praksi, cjelokupni lanac opskrbe biomasom u većini slučajeva uključuje više od jednog načina skladištenja (Rentizelas, 2016).

2.4.1.1. Skladištenje na otvorenom prostoru

Ovaj oblik skladištenja biomase je najjeftinija opcija i zbog toga se u praksi široko primjenjuje. Skladištenje na otvorenom obično se provodi u polju, ali također se može provoditi u blizini postrojenja za proizvodnju bioenergije ili za neku drugu biotehnošku primjenu. Takav način skladištenja koristi se za otpadnu poljoprivrednu biomasu, kao i za drvnu biomasu, a biomasa može biti postavljena na zemlju koja prethodno nije pripremljena (Slika 11a), na šljunčanu podlogu ili na asfaltiranu površinu. Cijena skladištenja biomase na otvorenom prostoru procjenjuje se na $1.1 \text{ €m}^{-3}\text{god}^{-1}$. U nekim slučajevima, osobito ako je biomasa pakirana u obliku bala, koristi se neki oblik zaštite od raznih vremenskih uvjeta, kao što je pokrivanje biomase ceradom ili nekom drugom plastičnom folijom (Slika 11b) (Rentizelas, 2016).



Slika 11: Skladištenje biomase na otvorenom prostoru (Rentizelas, 2016):

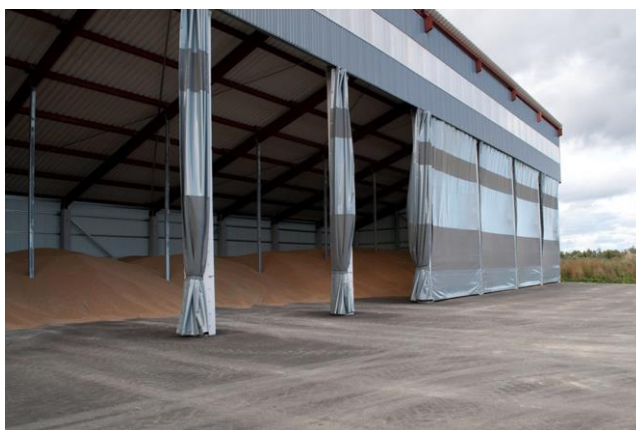
a) U polju bez dodatne zaštite.

b) U polju sa djelomičnom zaštitom od snijega i kiše.

Tijekom skladištenja na otvorenom bale sijena koje su poslagane na tlo u godini dana gube 30% suhe tvari, a ukoliko su omotane mrežom, taj postotak pada na 23%. Također, mana ovakvog načina skladištenja je što farmeri ne odlažu biomasu dugo vremena na polju jer tlo moraju pripremiti za sljedeću sjetvu.

2.4.1.2. Skladištenje u zatvorenom prostoru bez kontrole klimatskih uvjeta

Koristi se nekoliko oblika pokrova za biomasu kako bi se smanjili negativni učinci vremenskih prilika na suhu tvar biomase, koji uključuju gubitak mase i pad kvalitete suhe tvari lignocelulozne biomase. Ovakav način skladištenja uključuje omatanje bala plastičnom folijom, pokrivanje biomase ceradama, te u nekim slučajevima i pohranjivanje biomase u natkrivene otvorene prostore (Slika 12). Ovakav način skladištenja bolje štiti biomasu od snijega i kiše, ali ne i od vjetra te drugih vremenskih faktora koji mogu utjecati na gubitak mase i kvalitete suhe tvari biomase. Cijena skladištenja biomase u natkrivenom prostoru procjenjuje se na $87 \text{ €m}^{-3}\text{god}^{-1}$ (Rentizelas, 2016).



Slika 12. Natkriveno skladište bez kontrole vremenskih prilika (Rentizelas, 2016).

Pri ovakvom načinu skladištenja zabilježeni su godišnji gubici suhe tvari biomase od 5 do 8%. Mjesečni gubici za drvene strugotine u rasponu su od 1.1 do 2.6%, ovisno o početnoj količini vlage u njima. Za baliranu biomasu kukuruznih ostataka zabilježeni su u 8 mjeseci gubici od 4.8 do 4.9% suhe tvari za zatvoreno skladištenje, u usporedbi sa gubicima od 10.7 do 29.1% suhe tvari za skladištenje na otvorenom. Za biomasu divljeg prosa zabilježeni su u 6 mjeseci gubici suhe tvari od 0 do 2% za zatvoreni način skladištenja, u usporedbi sa gubicima od 5 do 13% za skladištenje na otvorenom (Rentizelas, 2016).

2.4.1.3. Siliranje

Siliranje (Slika 13) je prikladno za skladištenje biomase s visokim udjelom vlage, jer dolazi do anaerobne bakterijske razgradnje, pri čemu se šećeri prevode u mliječnu kiselinu. Siliranje je pogodno za dugotrajno čuvanje uz minimalne gubitke suhe tvari. Mana ovakvog

načina čuvanja biomase je što ne dolazi do smanjenja udjela vlage u biomasi, a to je nepoželjna karakteristika za većinu primjena biomase za proizvodnju bioenergije (Rentizelas, 2016).



Slika 13. Čuvanje biomase siliranjem (Rentizelas, 2016).

2.4.1.4. Skladištenje u zatvorenom uz kontrolu klimatskih uvjeta

Ovakav način skladištenja jedna je od najskupljih opcija, zbog toga što svodi na minimum gubitak materijala te omogućuje kontrolu razine vlage u lignoceluloznoj biomasi. Skladištenje u zatvorenom (Slika 14) može imati utjecaj i na sušenje materijala, osobito ako se takvi prostori nalaze u blizini pogona za proizvodnju bioenergije, gdje je moguće iskoristiti izlaznu toplinu od procesa za sušenje biomase. Procjenjuje se da je investicijski trošak za ovakav oblik skladištenja duplo veći od onog koji je potreban za natkriveno skladištenje bez kontrole klimatskih uvjeta, a operativni troškovi i troškovi održavanja još su i veći (Rentizelas, 2016).



Slika 14. Zatvoreno skladištenje s kontrolom klimatskih uvjeta (Rentizelas, 2016).

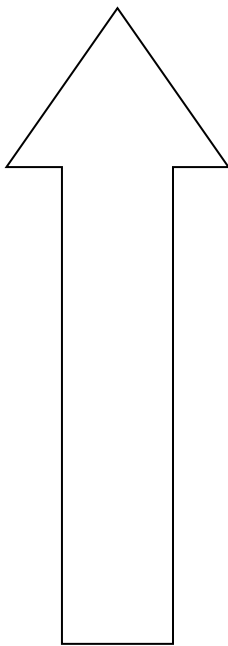
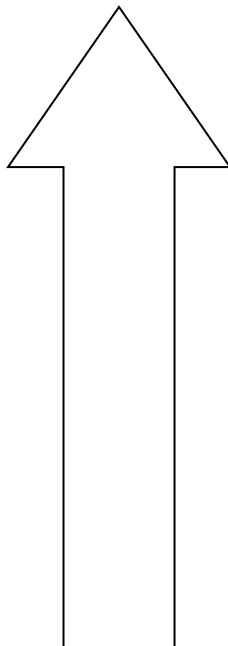
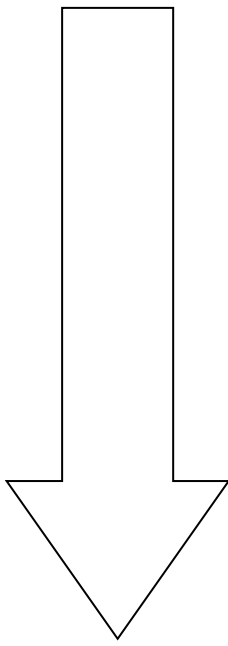
2.4.1.5. Skladištenje u čeličnim ili betonskim silosima

Neke vrste biomase, kao što su drvni peleti ili strugotine, skladište se u silosima s konusnim dnom (Slika 15). Ova metoda olakšava rukovanje biomasom i njezino premještanje, no uvjet za ovakav način skladištenja je da se biomasa već nalazi u isjeckanom obliku ili u obliku peleta. Procjenjuje se da je trošak za ovakav način skladištenja sličan kao za zatvoreni oblik skladištenja, ali znatno ovisi o instaliranoj opremi, veličini skladišnog prostora, te o zahtjevima koje treba zadovoljiti za svaku pojedinu primjenu biomase. U Tablici 9. prikazana je usporedba različitih načina skladištenja biomase, uzevši u obzir gubitak suhe tvari biomase, smanjenje kvalitete biomase te cijenu samog skladištenja (Rentizelas, 2016).



Slika 15. Čelični silos koji se koristi za skladištenje biomase u obliku kuglica (Rentizelas, 2016).

Tablica 9. Usporedba različitih načina skladištenja biomase (Rentizelas, 2016).

Metoda skladištenja	Gubitak suhe tvari biomase	Smanjenje kvalitete biomase	Cijena
Otvoreno – na tlu			
Otvoreno – na šljunku			
Otvoreno – na asfaltiranom tlu			
Natkriveno ceradom			
Natkriveno skladište s otvorenim stranama			
Zatvoreno skladište			
Siliranje			
Čelični i betonski silosi			
Zatvoreno skladište s kontrolom klimatskih uvjeta			

2.4.2. Svojstva biomase koja utječu na skladištenje i mijenjaju se tokom skladištenja

2.4.2.1. Vlažnost

Sirova biomasa prilikom prikupljanja sadrži relativno velik udio vlage (4-50%), pri čemu se gornja granica odnosi na većinu drvnih i poljoprivrednih ostataka. Razina vlage kod nekih vrsta biomase, kao što su trstasti blještac i miskantus, znatno se mijenja ovisno o godišnjem dobu. Udio vlage u biomasi tijekom i nakon skladištenja utječe na krajnju primjenu te biomase. Za većinu primjena, posebice za uplinjavanje (eng. gasification), te za proizvodnju topline i električne struje, biomasa mora sadržavati malo vlage (maksimalno 10%). Što je udio vlage biomase niži, veća je učinkovitost većine sustava za dobivanje energije iz biomase. Vlažnost biomase utječe ne samo na krajnju uporabu biomase, već i na sam proces skladištenja. Pri metodama suhog skladištenja biomasa bi se trebala najprije osušiti u polju, dok se razina vlage ne spusti ispod 25%. Velika količina vlage u lignoceluloznoj biomasi dovodi do povećanog aktiviteta vode, koji uzrokuje propadanje i gubitak suhe tvari biomase. Također, utvrđeno je da razina vlage ispod 15% inhibira anaerobne mikrobiološke procese, što omogućuje sigurno

dugoročno skladištenje biomase. Sušenje biomase može se odvijati prirodno, tj. sunčevom toplinom i konvekcijom zraka, no to nije prikladno za regije u kojima ima puno padalina. U takvim uvjetima biomasa se mehanički suši zagrijanim zrakom, toplinom iz biorafinerije (ukoliko se biomasa nalazi u okolini biorafinerije), ili čak vrućim plinovima iz motora sa unutarnjim sagorijevanjem. Sušenje biomase lakše je što su manje čestice biomase. S druge strane strane, ukoliko biomasa u slučaju padalina nije dovoljno zaštićena, manje čestice lakše upijaju vodu i povećava im se vlažnost (Rentizelas, 2016).

2.4.2.2. Gustoća

Većina tipova biomase ima relativno malu gustoću tijekom prikupljanja, što predstavlja logistički izazov za transportna sredstva, koja nisu toliko ograničena masom prevožene robe koliko njezinim volumenom. Kako bi se povećala učinkovitost transporta i cjelokupnog lanca opskrbe, biomasu treba preraditi. Prerada biomase može uključivati povećanje nasipne gustoće biomase ili homogeniziranje (npr. sakupljanje slame ili miskantusa od otkosa u bale). Prerada biomase može se odviti u bilo kojoj fazi lanca opskrbe, ali se obično provodi prije transporta, te je taj proces jeftiniji ako se objedini sa žetvom. Uobičajene metode povećanja gustoće biomase i smanjenja poroznosti su: peletiranje (eng. pelleting), baliranje, prešanje u brikete (eng. briquetting) ili pakiranje. Biomasa je najgušće pakirana ukoliko se peletira, pri čemu gustoća dostiže vrijednosti i do 0.7 tm^{-3} , ovisno o vrsti biomase. Ukoliko biomasa sadrži velik udio vlage, povećanjem gustoće biomase može se povećati gubitak suhe tvari, kao i rizici povezani sa zdravljem i sigurnošću. Gustim pakiranjem biomase smanjuje se prozračnost materijala, što dovodi do povećanja temperature i mikrobiološke aktivnosti, a time i do gubitka suhe tvari. Time se povećava opasnost od samozagrijavanja biomase te nastajanja fungalnog rasta. Kod nekih oblika sabijanja biomase (npr. kod peletiranja) biomasa se najprije osuši do određene vlažnosti, što znatno smanjuje navedene rizike (Rentizelas, 2016).

2.4.2.3. Gubitak suhe tvari

Biomasa gubi masu tijekom različitih faza žetve i tijekom skladištenja. Općenito, gubici suhe tvari biomase mogu se podijeliti u dvije kategorije: (1) oni koji se javljaju tijekom strojne obrade, i (2) oni koji se odvijaju tijekom čekanja na provođenje sljedeće operacije (Sokhansanj i Hess, 2009). Gubici biomase tijekom strojne obrade uglavnom su fizički (tj. gubici zbog fizičke dezintegracije biomase do tog stupnja da se ne može sakupiti s polja). Strojno uzrokovani gubici ovise o udjelu vlage biljke u vrijeme žetve, prinosu, fizičkim svojstvima polja, dizajnu stroja i prevladavajućim vremenskim uvjetima (vjetar, kiša i snijeg). Kemijski gubici uzrokovani su razaranjem strukturnih i nestrukturnih ugljikohidrata, što se zbiva zbog biotičkih razloga,

poput aktivnosti plijesni i odvijanja respiracije. Abiotičko razaranje su oksidacijske reakcije, uključujući određeni stupanj pirolize.

Shinners i suradnici (2007) istraživali su skladištenje kukuruznih ostataka metodama skladištenja na otvorenom i u zatvorenim prostorima. Koristili su različite konfiguracije skladištenja na otvorenom, uključujući čuvanje na tlu i na paletama, pri čemu su istraživali i različite metode očuvanja biomase (bale omotane mrežom, užetom te plastičnim omotom). Tablica 10. ukratko prikazuje raspon udjela vlage i gubitak suhe tvari biomase za različite konfiguracije pohrane. U zatvorenim skladištima biomasa je imala najmanji gubitak suhe tvari, u rasponu od 1.1 do 4.9% za udjel vlage u rasponu od 13,2 do 19,3%. Bale pohranjene na otvorenom primile su znatan udio vlage, posebno one koji su postavljene izravno na tlo. Gubitak suhe tvari u balama pohranjenim na otvorenom bio je također visok i u nekim slučajevima dosegao je 38,5%.

Tablica 10. Raspon sadržaja vlage i gubitaka suhe tvari tijekom skladištenja bala kukuruzovine u razdoblju od 7-8 mjeseci (Shinners i sur., 2007).

Način skladištenja	Udio vlage [% wb]	Gubitak suhe tvari [%]
Četvrtaste bale u zatvorenom	13.2 – 19.3	1.1 – 4.8
Okrugle bale u zatvorenom	13.6 – 19.2	2.2 – 4.9
Okrugle bale omotane mrežom na paletama na otvorenom	23.5 – 47.9	7.0 – 8.2
Okrugle bale omotane užetom na paletama na otvorenom	30.9 – 55.4	17.7 – 36.1
Okrugle bale omotane plastičnim omotom na paletama na otvorenom	32.2 – 54.1	11.0 – 11.4
Okrugle bale omotane mrežom na tlu na otvorenom	30.3 – 53.3	10.7 – 14.7
Okrugle bale omotane užetom na tlu na otvorenom	37.7 – 54.0	29.1 – 38.5
Okrugle bale omotane plastičnim omotom na tlu na otvorenom	36.4 – 59.1	14.3 – 19.0

Slično okruglim balama, gubici suhe tvari za četvrtaste bale ovise o načinu skladištenja. Četvrtaste bale lakše se slažu od okruglih bala i ukoliko se dobro pokriju ceradom ili se čuvaju ispod nadstrešnice, zadržavat će svoj izvorni oblik bolje nego okrugle bale. Neotkrivene

četrvtaste bale na kiši i snijegu lako apsorbiraju vlagu, što može uzrokovati kvarenje. U usporedbi s okruglim balama, naslagani slojevi kvadratnih bala su čvršći i skloniji zagrijavanju zbog nedostatka protoka zraka i prirodnog sušenja (Sokhansanj i Hess, 2009).

2.4.2.4. Zdravlje i sigurnost ljudi tijekom skladištenja biomase

Mnoge vrste lignocelulozne biomase su zapaljivi materijali i zbog toga je potrebno biti oprezan pri skladištenju velikih količina biomase. Sa smanjenjem vlažnosti biomase povećava se opasnost od njezina zapaljenja. Ukoliko skladišni prostor nema sustav kontinuirane ventilacije, biomasa s udjelom vlage iznad 25% početak će se spontano zagrijavati uslijed bioloških i kemijskih procesa koji se odvijaju u biomasi. Kod skladištenja svježih klada ili kore drveta, temperatura u jezgri hrpe može narasti i do 60°C u prvih nekoliko dana. U slučaju kore drveta i piljevine, takvo slaganje na hrpe može dovesti do samozapaljenja, što se može spriječiti ograničavanjem visine hrpe materijala ili osiguravanjem prirodne konvekcije zraka kroz hrpu (Rentizelas, 2016).

Prašina suhog drveta je eksplozivna. Do eksplozije može doći ako u blizini materijala postoji izvor vatre, ako se eksplozivno gorivo pomiješa sa zrakom u određenoj koncentraciji, ili ako je mješavina materijala zatvorena u spremniku. Eksplozije se mogu spriječiti uklanjanjem goriva ili izvora vatre, kontrolom koncentracije prašine ili ograničavanjem količine kisika potrebne za održavanje gorenja. Osim požara i eksplozija, zdravstvena i sigurnosna pitanja odnose se i na udio vlage u biomasi. Pri udjelima vlage iznad 20%, koji su prisutni u biomasi prilikom njezina sakupljanja, može doći do fungalnog rasta, što izaziva zdravstvene probleme u zaposlenika koji udišu taj zrak, budući da udisanje spora predstavlja ozbiljan zdravstveni rizik (Rentizelas, 2016).

2.4.3. Dizajn, veličina i nadzor skladišnih prostora

Odabir odgovarajućeg skladišnog prostora bitan je čimbenik u cjelokupnom lancu opskrbe sirovinama, obzirom na to da se mnogi čimbenici moraju uzeti u obzir, uključujući vrstu biomase koja se skladišti, lokalnu dostupnost biomase (količina, sezonski karakter), fleksibilnost potencijalnih dobavljača biomase, dostupnost prostora, potencijalna ograničenja fizičkog pristupa, lokalne klimatske uvjete, zahtjeve koji moraju biti zadovoljeni za biomasu ovisno o njezinoj krajnjoj uporabi te topografiju i geologiju odabranog mjesta za skladištenje, osobito u slučaju podzemnog skladištenja (Rentizelas, 2016).

Kod odabira veličine skladišnog prostora, važno je odrediti najveću količinu biomase koja se može u tom skladištu držati kroz period od godinu dana. U slučaju sezonske dostupnosti

biomase, kao što je to slučaj kod većine poljoprivrednih ostataka, skladišni prostor će veći dio godine biti nedovoljno iskorišten. U takvim slučajevima, gdje je potrebno skladištenje velike količine sezonski dostupne biomase, puno je isplativije skladištiti u zatvorenom održavanom prostoru minimalnu potrebnu količinu biomase kroz period od 20 dana, a ostatak biomase skladištiti nekom jeftinijom metodom (npr. u polju pokriveno ceradom). Nakon prikupljanja biomase obično se određena količina biomase drži blizu postrojenja gdje će se biomasa u konačnici preraditi. To omogućuje neometan proces proizvodnje. Takvo skladištenje biomase je poželjno, ali se uz postrojenje za obradu biomase mogu skladištiti manje količine biomase. Glavnina biomase se skladišti u skladištu dobavljača, pa je cijena skladištenja lignocelulozne biomase znatno veća. To povećava i cijenu biomase za postrojenje, a time se povećava i cijena krajnjeg proizvoda dobivenog obradom te biomase. U nekim drugim slučajevima, dobavljači biomase mogu odgoditi operacije koje zahtijevaju natkriveno skladištenje biomase (npr. odgađanje cijepanja drva i ostavljanje posječenih neobrađenih stabala u šumi dok ne ponestane zaliha drvne biomase) (Rentizelas, 2016).

Ključne stvari koje se moraju uzeti u obzir kod biranja dizajna i konstrukcije skladišnog prostora za biomasu su sljedeće (Rentizelas, 2016):

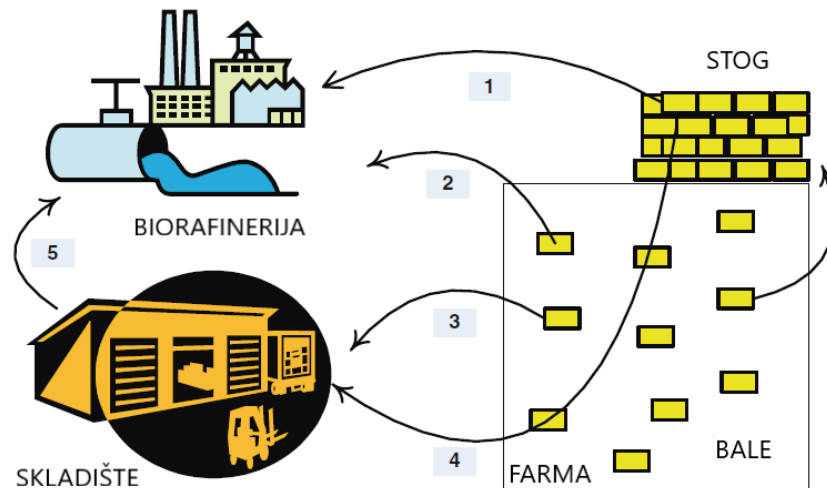
- Struktura skladišnog prostora trebala bi moći izdržati opterećenje ukupne količine biomase;
- Skladišni prostor mora imati odgovarajuću opremu za sigurno rukovanje biomasom;
- Treba spriječiti pristup vodi do biomase te treba osigurati adekvatnu ventilaciju za sušenje biomase, te spriječiti samozagrijavanje biomase i potencijalni požar;
- Treba smanjiti dostupnost potencijalnih izvora plamena u blizini biomase;
- Treba smanjiti stvaranje i nakupljanje prašine u skladišnom prostoru, što se može postići osiguravanjem dobrog protoka zraka u skladištu te ugradnjom sustava za usisavanje nakupljene prašine;
- Vlažna i suha biomasa ne smiju se miješati na istim hrpama u skladištu, jer može doći do pojačane mikrobiološke aktivnosti te samozagrijavanja biomase;
- Biomasa bi se trebala dostaviti na siguran način te, ako je moguće, uz minimalnu ljudsku intervenciju.

Osim navedenih stvari na koje se treba obratiti pozornost pri dizajniranju skladišnog prostora, za nadzor i sigurnost skladišnog prostora preporučuje se (Rentizelas, 2016):

- Koristiti odgovarajuću metodu analize skladištene biomase;
- Redoviti nadzor i mjerenje temperature skladištene biomase kako ne bi došlo do naglog samozapaljenja; i
- Redoviti nadzor i mjerenje koncentracije plinova CO, CO₂ i O₂ unutar skladišnog prostora, kako ne bi došlo do požara.

2.5. Transport lignoceluloznih sirovina

Kroz cijeli lanac opskrbe biomasa se obrađuje i prevozi u više navrata. Biomasa se prevozi s jednog polja na drugo ili se centralizirano pohranjuje na farmi, nakon čega se prevozi u biorafineriju, ili u centralizirano postrojenje za predobradu, odakle se naknadno transportira u biorafineriju (Slika 16). Ovisno o obliku u kojem se biomasa nalazi, koriste se različite metode transporta biomase. Primarna briga kod takvih operacija je minimiziranje vremena skladištenja, broja operacija tijekom rukovanja i udaljenosti za transport (Sokhansanj i Hess, 2009).



Slika 16. Shema logistike opskrbe biomasa od farme do biorafinerije (Sokhansanj i Hess, 2009).

Važni čimbenici koje je potrebno uzeti u obzir kod odabira načina transporta biomase su (Sokhansanj i Hess, 2009):

- Najveća brzina transporta biomase (eng. biomass transport rate) do biorafinerije;
- Oblik i nasipna gustoća biomase;
- Udaljenost koju prijevozno sredstvo mora prijeći pri transportu biomase do biorafinerije;
- i
- Dostupne opcije prijevoza između točke gdje je biomasa skladištena ili predobrađena i biorafinerije.

Transport primarno uključuje operacije utovara i istovara te prevoženje biomase od mjesta predobrade do glavnog procesnog pogona ili biorafinerije. Uglavnom se za transport koriste kamioni i vlakovi, dok transport teretnim brodovima, cjevovodima (eng. pipelines), i u nekim slučajevima vlakovima, zahtijeva kombinaciju transporta sa kamionima (Rentizelas, 2016).

Najveći utjecaj na biranje najjeftinije i najučinkovitije metode transporta biomase ima oblik i kvaliteta same biomase. Što je veća nasipna gustoća biomase, više se mase biomase može transportirati po jedinici udaljenosti (Anonymus 13, 2019).

2.5.1. Cestovni transport

Najekonomičnija metoda transporta biomase je željeznicom, no većina mjesta gdje se skladišti biomasa ne nalazi se u blizini željezničkih čvorišta, a kombinacija transporta kamionom i vlakom dodatno povećava troškove. Zbog toga se biomasa uglavnom transportira kamionima (Slika 17a). Za ovakav način transporta biomase problem predstavlja biomasa male nasipne gustoće ($<400 \text{ kgm}^{-3}$), jer se njezinim utovarom u kamione (unutarnjeg volumena 70 m^3) ne iskoristi u potpunosti maseni kapacitet koju oni mogu natovariti, čime se povećava cijena po toni prevezene biomase (Whittaker i Shield, 2018).

2.5.2. Željeznički transport

Za razliku od kamiona, kod vlakova nije lako procijeniti volumen biomase koju mogu prevesti jer su oni fleksibilni s masom prevožene biomase, obzirom da mogu kombinirati broj željezničkih cisterni. Teretni vlakovi (Slika 17b) mogu biti električni, ali u 93% slučajeva su pogonjeni na dizelski motor (Whittaker i Shield, 2018).

2.5.3. Lučki transport

Biomasa se može prevoziti i teretnim brodovima (Slika 17c), čiji je kapacitet transporta oko 80 000 tona, pa i više. Obzirom da su teretnjaci tako veliki, količina biomase koja se njima prevozi umjesto volumenom ograničena je masom (Whittaker i Shield, 2018).



Slika 17. Načini transporta biomase:

- a) Cestovni transport biomase (Anonymous 14).
- b) Teretni vlak za transport biomase (Anonymous 15).
- c) Teretni brod za transport biomase (Anonymous 16, 2018).

2.5.4. Transport cjevovodima

Transport biomase cjevovodima najmanje je poznata tehnologija te u bliskoj budućnosti možda se pokaže kao najjeftinija i najsigurnija metoda transporta biomase (Anonymus 17, 2019). Trošak dostave biomase cjevovodima, u kojima se materijal osuši dok dođe do krajnje točke, sličan je onom procijenjenom za transport kamionom (Rentizelas, 2016).

2.5.5. Cijena transporta biomase

Cijena transporta biomase ovisi o sljedećim ključnim čimbenicima (Whittaker i Shield, 2018): udaljenosti transporta, potrebnom vremenu dostave biomase, te vrsti i obliku biomase koja se prevozi. U Tablici 11. navedeni su troškovi transporta biomase za tri načina transporta: kamion, vlak i cjevovod.

Tablica 11. Jednadžbe za izračunavanje cijene i energetske potrošnje za transport biomase kamionom, vlakom i cjevovodom (Sokhansanj i Hess, 2009).

Način transporta	Trošak [\$/t]	Potrošnja energije [MJ/t]
Kamion	$5.70 + 0.1367 L$	1.3 L
Vlak	$17.10 + 0.0277 L$	0.68 L
Cjevovod ^a	$2.67 Q^{-0.87} + 0.37 LQ^{-0.44}$	$160.2 Q^{-0.87} + 22.2 LQ^{-0.44}$

L: udaljenost (km); Q: godišnja zaliha (milijun tona suhe tvari)

^aTrošak i energetske vrijednosti za cjevovod su u \$ i u MJ.

3. Zaključak

1. Velika količina lignoceluloznog materijala, čiji su glavni sastojci celuloza, hemiceluloza i lignin, nastaje u šumarstvu i poljoprivredi. Lignocelulozni materijali često se smatraju otpadom, no oni se mogu koristiti kao jeftina, ali istovremeno i kompleksna obnovljiva sirovina za dobivanje visokovrijednih proizvoda u brojnim biotehnološkim procesima. Biotehnološka primjena lignoceluloznih materijala moguća je samo uz postojanje odgovarajućeg sustava za opskrbu sirovinom, koji obuhvaća prikupljanje i pohranu sirovina te odgovarajuće rukovanje i transport.
2. Lignocelulozna biomasa se mora skladištiti tako da se tijekom cijele godine redovito isporučuje u pogone za preradu biomase. Postoje različiti načini skladištenja biomase, koji se odabiru ovisno o tipu biomase koji se skladišti, obliku u kojem se biomasa nalazi, prosječnoj i maksimalnoj količini biomase potrebne u skladišnom prostoru, regionalnim vremenskim uvjetima, očekivanom trajanju skladištenja, svrsi za koju će se lignocelulozna biomasa upotrijebiti, udaljenosti na koju se biomasa transportira, lokaciji skladištenja te raspoloživosti skladišnog prostora.
3. Lignocelulozna biomasa se može skladištiti na otvorenom prostoru bez zaštite ili uz djelomičnu zaštitu od vremenskih uvjeta. Također je moguće skladištenje u potpuno zatvorenom prostoru uz kontrolu klimatskih uvjeta ili u natkrivenom prostoru sa otvorenim stranama, koji ne pruža mogućnost kontrole klimatskih uvjeta. Osim toga, može se čuvati siliranjem i u čeličnim ili betonskim silosima.
4. Svojstva biomase koja treba uzeti u obzir pri odabiru odgovarajućeg načina skladištenja su vlaga i gustoća. Također, treba voditi računa o mogućem utjecaju na ljudsko zdravlje i sigurnost. Posebnu pažnju treba posvetiti zaštiti od požara i eksplozija.
5. Biomasa gubi suhu tvar tijekom različitih faza žetve i skladištenja, a najviše suhe tvari gubi se uslijed strojne obrade biomase. Obzirom na vrstu skladištenja, najviše suhe tvari gubi se čuvanjem biomase na otvorenom, osobito ako je ona postavljena izravno na tlo, a najmanji gubitak suhe tvari zabilježen je skladištenjem biomase u zatvorenim prostorima.
6. Transport primarno uključuje operacije utovara i istovara te prevoženje biomase od mjesta predobrade ili skladištenja do prerađivačkog pogona. Koriste se razne metode transporta biomase, ovisno o obliku i nasipnoj gustoći biomase, udaljenosti koju transportno sredstvo treba prijeći te o dostupnim opcijama transporta na određenom području, a najviše upotrebljavana sredstva transporta lignocelulozne biomase su kamion, vlak i brod.

4. Literatura

A.O. Avcioglu, M.A. Dayioglu, U. Türker (2019) Assessment of the Energy

Potential of Agricultural Biomass Residues in Turkey. *Renewable Energy* **138**: 610 - 619

Anonymous 1 *Pojam jarovizacije*, <<http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=28782>>

Datum pristupanja: 8. rujna 2019.

Anonymous 2 *Pojam jarovizacije*, <<http://proleksis.lzmk.hr/28834/>>

Datum pristupanja: 8. rujna 2019.

Anonymous 3 (2016) *Stroj za baliranje*, <https://www.metalfach.com.pl/en/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/baler_Z562_1.jpg>

Datum pristupanja: 5. rujna 2019.

Anonymous 4 (2015) *Stroj za sječu stabala i njihovo odlaganje na tlo*,

<<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Buncher12.jpg>>

Datum pristupanja: 5. rujna 2019.

Anonymous 5 (2007) *Stroj koji služi za transport stabala od mjesta sječe do mjesta procesiranja*,

<<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Skidderdualfunction.jpg>>

Datum pristupanja: 5. rujna 2019.

Anonymous 6 (2008) *Stroj koji služi za usitnjavanje velikih komada drveta*,

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/Europe_Chippers_1.jpg>

Datum pristupanja: 5. rujna 2019.

Anonymous 7 (2004) *Kombajn*, <<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Claas-lexion-570-1.jpg>>

Datum pristupanja: 6. rujna 2019.

Anonymous 8 Utovarivač šećerne trske,

<<https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjgVlaN08bkAhVILVAKHXJOAHsQjRx6BAgBEAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.agriavis.com%2Fproduit-2275-moissonneuses%2Bbatteuses%2Ba%2Bsecoueurs-john%2Bdeere-2254.html&psig=AOvVaw2CtnnOv44IPiG2bB7cYnRZ&ust=1568218378548825>>

Datum pristupanja: 6. rujna 2019.

Anonymous 9 (2009) John Deere 3520 žetelac - sjeckalica šećerne trske,

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9b/Sugarcane_harvesting_equipment_Piracicaba_05_2009_5845.JPG>

Datum pristupanja: 6. rujna 2019.

- Anonymous 10 (2019) *Miscanthus sinensis*,
<<https://www.bluestoneperennials.com/viewer.html?itemcode=MIOK&startwith=0>>
Datum pristupanja: 2. rujna 2019.
- Anonymous 11 (2011) *Miscanthus x giganteus*,
<https://en.wikipedia.org/wiki/Miscanthus_giganteus#/media/File:Miscanthus_Bestand.JPG>
Datum pristupanja: 10. rujna 2019.
- Anonymous 12 (2015) *Panicum virgatum*, <<https://www.highcountrygardens.com/perennial-plants/ornamental-grass/panicum-virgatum-shenandoah>>
Datum pristupanja: 2. rujna 2019.
- Anonymous 13 Transport biomase, <<https://www.bioenergyconsult.com/biomass-transportation/>>
Datum pristupanja: 5. rujna 2019.
- Anonymous 14 Cestovni transport biomase, <http://nnimgt-a.akamaihd.net/transform/v1/crop/frm/QTtkamEC9Vqmbfp7vWfCc3/ad60a660-abc8-434d-8d62-91e5078cb5de.jpg/r0_42_640_623_w1200_h678_fmax.jpg>
Datum pristupanja: 9. rujna 2019.
- Anonymous 15 Teretni vlak za transport biomase,
<http://www.climatetechwiki.org/sites/ climatetechwiki.org/files/images/extra/low_carbon_freight_cargo_train.jpg>
Datum pristupanja: 9. rujna 2019.
- Anonymous 16 (2018) Teretni brod za transport biomase, <<https://peltrade.com/wp-content/uploads/2018/03/containership-1.jpg>>
Datum pristupanja: 9. rujna 2019.
- Bilandžija N. (2014), Perspektiva i potencijal korištenja kulture *Miscanthus x giganteus* u Republici Hrvatskoj. *Inženjerstvo okoliša* **1**(2): str. 81-87
- Buljubašić M. (2012), Mogućnosti korištenja lignoceluloznih sirovina poljoprivrednog porijekla u Republici Hrvatskoj. Završni rad. Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- Chen H. (2014) Biotechnology of Lignocellulose: str. 25–47
- Eckhoff S.R., Paulsen M.R., Yang S.C. (2003) Maize. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* **2**: str. 3647-3653
- Howard R.L., Abotsi E., Jansen van Rensburg E.L., Howard S. (2003) Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. *African Journal of Biotechnology* **2**(12): str. 602-619
- Isikgor F.H., Becer C.R. (2015) Lignocellulosic biomass: a sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers, *Polymer Chemistry* **6**(25): str. 4497–4559

- Kumar, A., Cameron, J. B., and Flynn, P. C. (2005) Pipeline transport and simultaneous saccharification of corn stover. *Bioresource Technology* 96(7): str. 819–829
- Rentizelas A.A. (2016) Biomass storage. U: *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining*, Holm-Nielsen J.B., Ehimen E.A., ur., Woodhead Publishing Series in Energy: Number 94. Elsevier Ltd. 2016: str. 127–142
- Sokhansanj S., Hess R. (2009) Biomass Supply Logistics and Infrastructure. U: *Biofuels: Methods and Protocols*, Methods in Molecular Biology, izd. 581, Jonathan R. Mielenz, ur., Humana Press, dio Springer Science + Business Media, LLC, New York 2009, str. 1-25
- Škoro Gabrijela (2014) Enzimaska hidroliza lignoceluloznih sirovina. Završni rad. Prehrambeno-biotehnološki fakultet Sveučilišta u Zagrebu
- Whittaker C., Shield I. (2018) Biomass harvesting, processing, storage, and transport. *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems* : str. 97-106
- Yang C., Li R., Zhang B. (2016) Biomass harvesting and collection. U: *Biomass Supply Chains for Bioenergy and Biorefining*, Holm-Nielsen J.B., Ehimen E.A., ur., Woodhead Publishing Series in Energy: Number 94. Elsevier Ltd. 2016: str. 103–117