



PROMOVIRAN JE RJEŠENJA GRIJANJA NA AGROBIOMASU
U RURALNIM PODRUČJIMA U EUROPI

OD OSTATAKA KUKURUZA DO ENERGIJE

UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Ovaj projekt financiran je sredstvima iz Programa za istraživanje
i inovacije Horizon 2020 u okviru Sporazuma o dodjeli
bespovratnih sredstava br. 818369





UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Ovaj projekt financiran je sredstvima iz Programa za istraživanje i inovacije Horizon 2020 u okviru Sporazuma o dodjeli bespovratnih sredstava br. 818369

O DOKUMENTU

Dokument «Od ostataka kukuruza do energije» izradili su Ukrajinska udruga za Bioenergiju (UABIO) i Hellas Centar za Istraživanje i Tehnologiju (CERTH). Dio je serije vodiča izrađenih u sklopu projekta AgroBioHeat koji ima za cilj pružiti znanja o korištenju različitih vrsta agrobiomase. Primarno se odnosi na ostatke proizvodnje kukuruza i načine kako se taj resurs, koji se proizvodi u ogromnim količinama na godišnjoj razini i trenutno je većinom neiskorišten, može učinkovito sakupljati i koristiti za proizvodnju bioenergije.

Projekt AgroBioHeat ima za cilj povećati tržište korištenja unaprijeđenih rješenja grijanja na agrobiomasu u Europi. Agrobiomasa je velik, nedovoljno iskorišten i autohtoni resurs koji može podržati postizanje europskih energetske i klimatskih ciljeva, istovremeno promičući ruralni razvoj i kružno gospodarstvo. Projekt je financiran sredstvima iz Programa za istraživanje i inovacije Horizon 2020 u okviru Sporazuma o dodjeli bespovratnih sredstava br. 818369.

Za više informacija o projektu posjetite www.agrobioheat.eu

Ovaj dokument odražava isključivo stavove autora. Europska izvršna agencija za klimu, infrastrukturu i okoliš (CINEA) ne odgovara za informacije sadržane u dokumentu.

AUTORI:

Georgii Geletukha, Semen Drahnev, Tetiana Zheliezna/
Bioenergy Association of Ukraine (UABIO)
Manolis Karampinis/
Centre for Research & Technology Hellas (CERTH)

U suradnji s i prevedeno na hrvatski jezik od strane
Zelene energetske zadruge.

KRATICE

Kratika	Pojašnjenje
CB	Klipovi
CCM	Mješavina kukuruza i klipova
CHP	Kogeneracija
d.b.	Suha osnova
DM	Suha tvar
ESP	Elektrostatski precipitator
EW	Omot klasa kukuruza
GHG	Staklenički plinovi
GR	Zrno
HI	Indeks žetve
LV	Listovi
Mgy	Milijun galona godišnje
MY	Tržišna godina
OGC	Organski plinski spojevi
PTO	Porast snage
ST	Stabljike
TSP	Ukupna čvrste čestice
VS	Hlapljive krute tvari
W	Sadržaj vode
w.b.	Mokre osnove

SADRŽAJ

Uvod	7
Ostaci kukuruza kao izvor energije	8
Kukuruz u proizvodnji usjeva	8
Ostaci kukuruza	9
Svojstva ostataka kukuruza kao goriva	15
Sakupljanje ostataka kukuruza	17
Tehnologije za žetvu zrna kukuruza	17
Opcije sakupljanja ostataka kukuruza	19
DuPont lanac opskrbe kukuruzne slame	22
Transport bala kukuruzne slame	23
Sakupljanje kukuruzne slame u okruglim balama	24
Sakupljanje isjeckane kukuruzne slame	24
Sustavi sakupljanja klipova kukuruza	25
Skladištenje kukuruzne slame	25
Povećanje gustoće ostataka kukuruza	27
Proizvodnja topline iz ostataka kukuruza	28
Proizvodnja topline iz slame kukuruza	28
Proizvodnja topline iz klipova kukuruza	29
Ostaci kukuruza za proizvodnju energije	31
Ostaci kukuruza za proizvodnju bioetanola	33
Ostaci kukuruza za proizvodnju bioplina	35
Aspekti održivosti korištenja ostataka kukuruza	38
Održivo uklanjanje ostataka kukuruza	38
Emisije stakleničkih plinova iz logističkog lanca ostataka kukuruza	39
Prilog I: Glavne vrste strojeva za sakupljanje i logistiku ostataka kukuruza i njihovu preradu u pelete/ brikete	40
Prilog II: Energetski sustavi za proizvodnju topline iz ostataka kukuruza	44
AgroBioHeat konzorcij	45

LISTA TABLICA

Tablica 1. Glavni proizvođači kukuruza u svijetu tijekom proteklih 5 godina	8
Tablica 2. Usporedba indikativnih svojstava goriva frakcija kukuruznog ostatka s različitim vrstama biomase	15
Tablica 3. Proizvodnja metana iz ostataka kukuruza i kukuruzne silaže	35

LISTA SLIKA

Slika 1. Prinos kukuruza u SAD-u od 1866 do 2019	10
Slika 2. Proizvodnja i prinos kukuruza u zrnu i mješavine kukuruza i klipa u odabranim EU zemljama od 2015 do 2019	10
Slika 3. Različiti nadzemni dijelovi biljke kukuruza i njihovi maseni udjeli	11
Slika 4. Empirijski model izračuna za predviđanje prinosu ostataka kukuruza u ovisnosti o ekonomskim prinosima usjeva	11
Slika 5. Kukuruzna slama ostavljena u polju nakon žetve kombajnom	12
Slika 6. Energetski potencijal ostataka kukuruza u Europi (2019)	13
Slika 7. Različiti krajnji korisnici dijelova biljke kukuruza	14
Slika 8. Kalorijska vrijednost kao funkcija udjela vlage (mokre osnove) u kukuruznoj slami	16
Slika 9. Tehnologije žetve zrna kukuruza s tokovima ostataka kukuruza	17
Slika 10. Žetva kukuruza kombajnom opremljenim hederom za kukuruz	18
Slika 11. Formiranje ostataka kukuruza iza kombajna	19
Slika 12. Tehnološke sheme za sakupljanje kukuruzne slame	20
Slika 13. Modeli poljoprivrednih strojeva za sakupljanje nusproizvoda kukuruza	21
Slika 14. DuPontov model postrojenja za proizvodnju celuloznog etanola za lanac opskrbe kukuruznom slamom	22

Slika 15. Operativni program DuPont postrojenja za proizvodnju celuloznog bioetanola	23	Slika 22. Proces proizvodnje bioetanola iz lignocelulozne biomase	33
Slika 16. Opskrbni lanci usitnjene kukuruzne slame	24	Slika 23. Shematski dijagram predobrade lignoceluloznog materijala za proizvodnju bioplina	36
Slika 17. Sakupljači klipova	25	Slika 24. Ovisnost brzine uklanjanja ostatka kukuruza o ekonomskim i ograničavajućim čimbenicima, te agronomskim strategijama	38
Slika 18. Skladištenje bala kukuruzne slame na otvorenom u Španjolskoj	26	Slika 25. Smanjenje emisija stakleničkih plinova iz alternativnog korištenja slame kukuruza u usporedbi s prosjekom u SAD-u	39
Slika 19. Kvadratne bale kukuruzne slame u selu Krynychne	28		
Slika 20. Miajadas 15 MW postrojenje na biomasu ...	32		
Slika 21. Bale ostataka kukuruza u skladištu elektrane Miajadas	32		

UVOD

Kukuruz je jedan od najvažnijih usjeva na svijetu. To je jako rodna biljka tropskog podrijetla i s mogućnošću fiksacije ugljika C4. Podrijetlom je iz andske regije Srednje Amerike, što objašnjava njegovu potrebu za toplinom kako bi rastao i razvijao se. Kukuruz proizvodi više organske tvari od ostalih usjeva u kratkom vremenskom razdoblju. Ova žitarica uzgaja se za zrno i stočnu hranu (silažu ili je životinje izravno konzumiraju). Naziv kukuruz često označava zrna kukuruza¹, čija je svjetska proizvodnja u razdoblju 2015-2019 izno-

sila između 972 i 1123 Mt godišnje. U tržišnoj godini 2019/2020 EU je proizvela 65 Mt kukuruza ili gotovo 6% svjetske proizvodnje². U Ukrajini je proizvodnja kukuruza premašila proizvodnju pšenice, a kukuruz je po bruto žetvi postao glavna kultura u zemlji. Vrijedna svojstva kukuruza uvjetuju njegovu veliku i konstantnu potražnju na svjetskim i europskim tržištima. Prosječni prinos kukuruza posljednjih je godina veći od 7 t/ha u EU i Ukrajini.

Osim zrna, stvara se i znatna količina ostataka kukuruza³ (stabljike, listovi, klipovi, ljske itd.). Oni se mogu sakupljati i koristiti u različite svrhe kao agrobiomasa, uključujući bioenergiju. Prikupljeni sa polja, ostaci kukuruza smatraju se nusproizvodima. Na primjer, mogu se koristiti kao sirovina za proizvodnju čvrstih biogoriva, bioplina i tekućih biogoriva druge generacije. Trenutno su ostaci kukuruza jako veliki, nedovoljno iskorišten i lokalni obnovljivi resursi koji bi mogli podržati postizanje europskih energetske i klimatskih ciljeva uz promicanje ruralnog razvoja i kružnog gospodarstva.



Ostaci kukuruza kao gorivo imaju specifična svojstva što zahtijeva korištenje posebno dizajniranih kotlova za njihovo sagorijevanje kao agrobiomase. Ekonomičnost iskorištavanja ostataka kukuruza također ovisi o lancu opskrbe "berba – logistika – skladištenje". Ova pitanja

kao i potencijal biomase ostataka kukuruza za energiju u EU i Ukrajini, mogućnost prerade ove agrobiomase u pelete/brikete, bioplina i tekuća biogoriva druge generacije, te aspekti održivosti ostataka kukuruza kao goriva objašnjeni su u ovom vodiču.

¹ U ovome se dokumentu kukuruz i zrna kukuruza ponekad koriste kao sinonimi.

² Svjetska poljoprivredna proizvodnja (World Agricultural Production), USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>

³ Nadzemni dijelovi biljke kukuruza koja se uzgaja za zrno, a koji su ostavljeni u polju nakon žetve (većinom stabljike, listovi, ljske ili klipovi) često se nazivaju kukuruznom stočnom hranom (eng. corn stover) ili kukuruznom slamom (eng. maize straw).

OSTACI KUKURUZA KAO IZVOR ENERGIJE

KUKURUZ U PROIZVODNJI USJEVA

U proizvodnji usjeva kukuruz dominira u svijetu zbog mogućnosti uzgoja s visokim prinosima na raznim lokacijama, kao i sve veće potražnje za kukuruzom koji se koristi za proizvodnju širokog spektra proizvoda, uključujući i biogoriva. U svijetu se oko 60 % bioetanola proizvodi iz kukuruza⁴. U 2019. godini gotovo 30 % kukuruza (105.6 Mt) iskorišteno je za proizvodnju prve generacije bioetanola u SAD-u⁵.

SAD je svjetski lider u proizvodnji kukuruza i prinosima (Tablica 1). EU je četvrti najveći proizvođač kukuruza u svijetu, a Ukrajina zauzima 6. mjesto. Preliminarni podaci pokazuju da je proizvodnja kukuruza u SAD-u

u 2020./2021. iznosila 358.5 Mt (32% globalne proizvodnje), dok je prosječni prinos iznosio 10,8 t/ha. U ostalim zemljama, proizvodnja kukuruza iste godine bila je: Kina – oko 260.7 Mt, Brazil – 87 Mt, EU – 67.1 Mt, Argentina – 50.5 Mt, Indija – 31.5 Mt, i Ukrajina – 30.3 Mt. USDA predviđanja⁶ za 2021./2022. su 70.4 Mt za EU i 40.0 Mt za Ukrajinu, što je više od prethodnih godina. Treba napomenuti da se u EU nedozrjeli kukuruz za biomasu uzgaja većinom za silažu, te zauzima veliku površinu. Tako je u 2019. godini površina zelenog kukuruza iznosila 6,4 milijuna hektara, dok je površina za uzgoj zrna kukuruza i mješavine kukuruza i klipa iznosila 8.9 milijuna hektara⁷. Sva površina za uzgoj kukuruza iznosila je 14.5% obradivih površina u EU28 i 18.5% u Ukrajini.

TABLICA 1:

Glavni proizvođači kukuruza u svijetu tijekom proteklih 5 godina⁶

Nº	Zemlja/ regija	Površina, Mha					Prinos, t/ha					Proizvodnja, Mt				
		2017/ 2018	2018/ 2019	2019/ 2020	2020/ 2021	2021/ 2022	2017/ 2018	2018/ 2019	2019/ 2020	2020/ 2021	2021/ 2022	2017/ 2018	2018/ 2019	2019/ 2020	2020/ 2021	2021/ 2022
1	SAD	33.5	32.9	32.9	33.3	34.4	11.1	11.1	10.5	10.8	11.1	371.1	364.3	346.0	358.5	382.6
2	Kina	42.4	42.1	41.3	41.3	43.3	6.1	6.1	6.3	6.3	6.5	259.1	257.2	260.8	260.7	272.6
3	Brazil	16.6	17.5	18.5	19.9	20.8	4.9	5.8	5.5	4.4	5.7	82.0	101.0	102.0	87.0	118.0
4	EU	8.3	8.3	8.9	9.3	9.4	7.5	7.8	7.5	7.2	7.5	62.0	64.4	66.7	67.1	70.4
5	Argentina	5.2	6.1	6.3	6.4	6.8	6.2	8.4	8.1	7.9	8.0	32.0	51.0	51.0	50.5	54.5
6	Ukrajina	4.4	4.6	5.0	5.4	5.4	5.4	7.8	7.2	5.6	7.4	24.1	35.8	35.9	30.3	40.0
7	Indija	9.4	9.0	9.6	9.9	9.7	3.1	3.1	3.0	3.2	3.1	28.8	27.7	28.8	31.5	30.0
8	Meksiko	7.3	7.2	6.6	7.1	7.3	3.8	3.8	4.0	3.8	3.8	27.6	27.6	26.7	27.4	28.0
	Svijet	192.2	192.1	193.6	198.8	203.0	5.6	5.9	5.8	5.7	6.0	1080	1123	1120	1123	1209

BILJEŠKE: 2020/2021 – PRELIMINARNI PODACI, 2021/2022 – PROJEKCIJA (PROSINAC 2021).

⁴ OECD FAO Agricultural Outlook 2019 2028. <http://www.fao.org/3/ca4076en/ca4076en.pdf>

⁵ World of corn 2020. <http://www.worldofcorn.com/pdf/WOC-2020.pdf>

⁶ World Agricultural Production, USDA Reports <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>

⁷ Eurostat <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>

Povećanje prinosa kukuruza posljednjih desetljeća (Slika 1) povezuje se s razvojem poljoprivrednih znanosti i primjenom biotehnologije za stvaranje hibrida. U usporednim testovima američki su farmeri uspjeli dosegnuti prinose od preko 25 t/ha. 2019. je Nacionalna udruga uzgajivača kukuruza SAD-a (USA National Corn Growers Association) objavila svjetski rekord u saveznoj državi Virginia od gotovo 38.7 t/ha kukuruza za zrno⁸. Očekuje se porast prosječnih svjetskih prinosa kukuruza od 14 % do 2028.

Distribucija stvarnih prinosa i proizvodnje kukuruza za zrno i mješavine kukuruza i klipa u zemljama EU28 prikazan je na Slici 2. Među njima kukuruz u zrnu prevladava. Vodeći proizvođači kukuruza bili su Rumunjska (17.3 Mt u 2019.), Francuska (13.0 Mt u 2019.) i Mađarska (8.3 Mt u 2019.). Od 2015. do 2019. najviši prosječno ostvareni prinos kukuruza za zrno i mješavine kukuruza i klipa imali su Španjolska (11.6 t/ha), Grčka (10.3 t/ha), Austrija i Italija (10.1 t/ha).

OSTACI KUKURUZA

Glavni proizvod uzgoja kukuruza poljoprivrednicima je zrno i to iz ekonomskih razloga. Osim toga, biljka kukuruza sastoji se od različitih podzemnih i nadzemnih dijelova (Slika 3), koji čine ostatke kukuruza. Važno je napomenuti da je kod kukuruza omjer ostataka naspram

zrna znatno veći nego kod drugih žitarica. Prema eksperimentalnim podacima, biomasa sadržana u lišću i stabljikama kukuruza može biti visoka čak i u uvjetima s malo vode, što ovu kulturu čini važnim izvorom biomase poljoprivrednih ostataka¹⁰. Prinos ostataka kukuruza (R) naspram zrna (Y) čini omjer (R/Y) koji ovisi o mnogim čimbenicima, prvenstveno o sorti, postupanju poljoprivrednika, klimi i uvjetima u polju¹¹. Općenito, omjer R/Y smanjuje se povećanjem prinosa kukuruza (Slika 4), ali je odnos između prinosa ostataka i prinosa kukuruza slab. No, omjer R/Y može biti spretan i koristan. Na primjer, u Ukrajini tipični R/Y iznosi 1.3. Tijekom berbe, sadržaj vlage u zrnu kukuruza i ostacima kukuruza može biti različit, a u omjeru se ta činjenica ne uzima u obzir. Često se indeks žetve (HI) koristi za ocjenu prinosa ostatka: omjer zrna prema ukupnoj biomasi uvijek se odnosi na suhu tvar. U SAD-u HI općenito varira oko 0.50¹², što odgovara R/Y = 1.

Postoje različite korelacije za procjenu R/Y omjera na temelju prinosa zrna u znanstvenoj literaturi. U ovom vodiču prikazana je jednadžba od Bentsena¹³ i koristi se za ocjenu potencijala biomase ostataka kukuruza, budući da se smatra da se dobro podudara s eksperimentalnim zapažanjima:

$$R/Y = 2.656 \cdot \exp(-0.103 \cdot Y),$$

R/Y i Y mjerenje u t/ha suhe tvari.

⁸ <https://www.ocj.com/2019/12/2019-national-corn-yield-contest-hits-new-yield-record/>

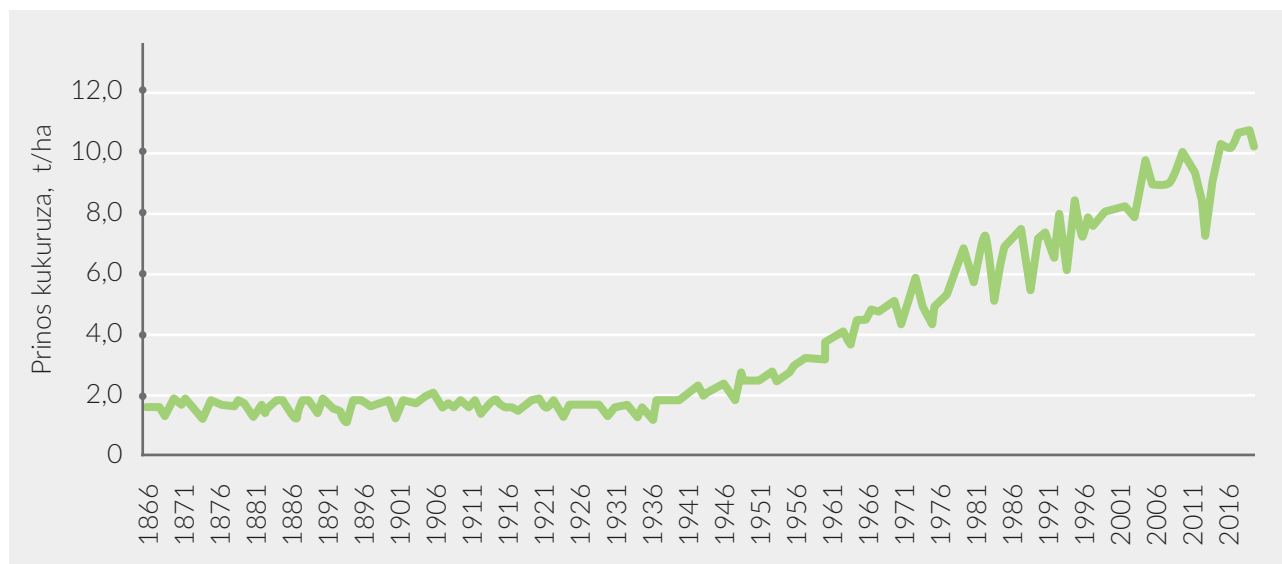
⁹ https://www.nass.usda.gov/Publications/Todays_Reports/reports/croptr18.pdf

¹⁰ Camia A., Robert N., Jonsson R., Pilli R., García-Condado S., López-Lozano R., van der Velde M., Ronzon T., Gurria P., M'Barek R., Tamosiunas S., Fiore G., Araujo R., Hoepffner N., Marelli L., Giuntoli J., Biomass production, supply, uses and flows in the European Union. First results from an integrated assessment, EUR 28993 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN978-92-79-77237-5, doi:10.2760/539520, JRC109869

¹¹ Maximising the yield of biomass from residues of agricultural crops and biomass from forestry. Final report of Ecofys project. https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/Ecofys%20-%20Final_%20report_%20EC_max%20yield%20bio-mass%20residues%2020151214.pdf

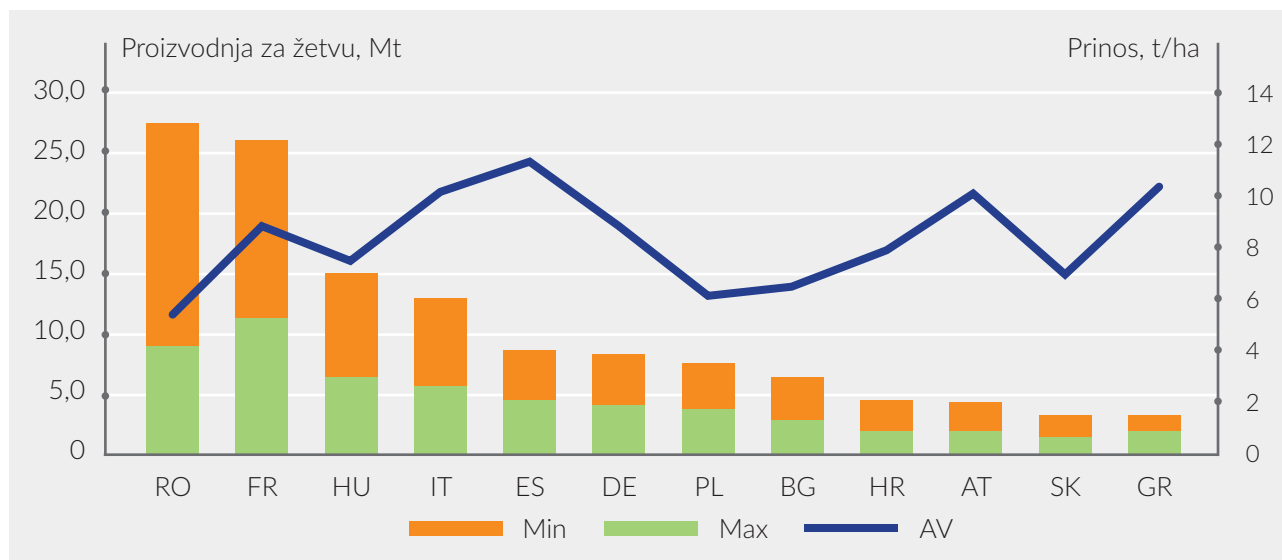
¹² https://www.canr.msu.edu/news/harvest_index_a_predictor_of_corn_stover_yield

¹³ Bentsen NS, Felby C, Thorsen BJ. Agricultural residue production and potentials for energy and materials services. *Progr Energy Combustion Sci* 2014;40:59–73. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.09.003>



SLIKA 1:

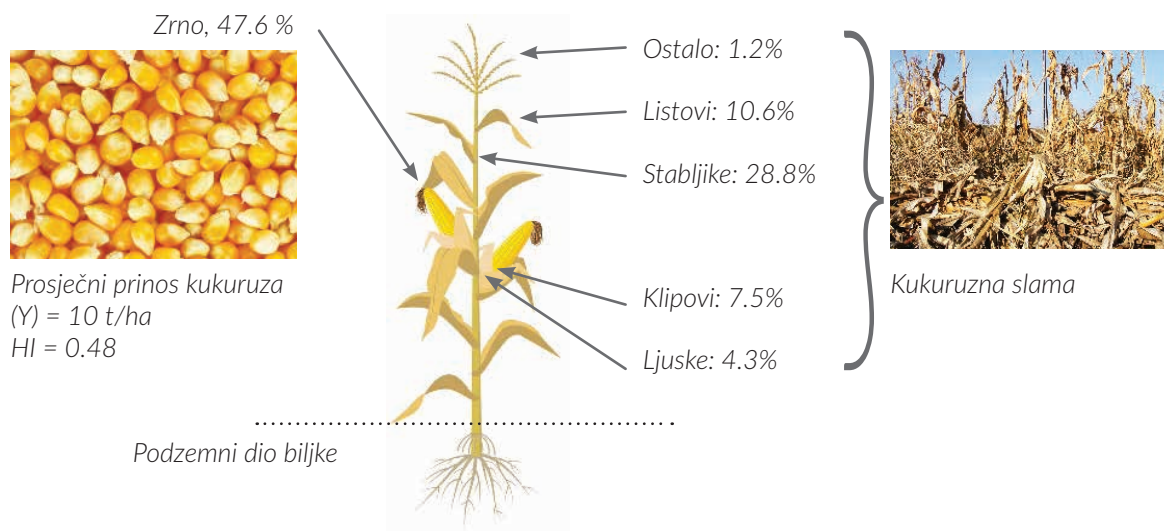
Prinos kukuruza u SAD-u od 1866 do 2019*



SLIKA 2:

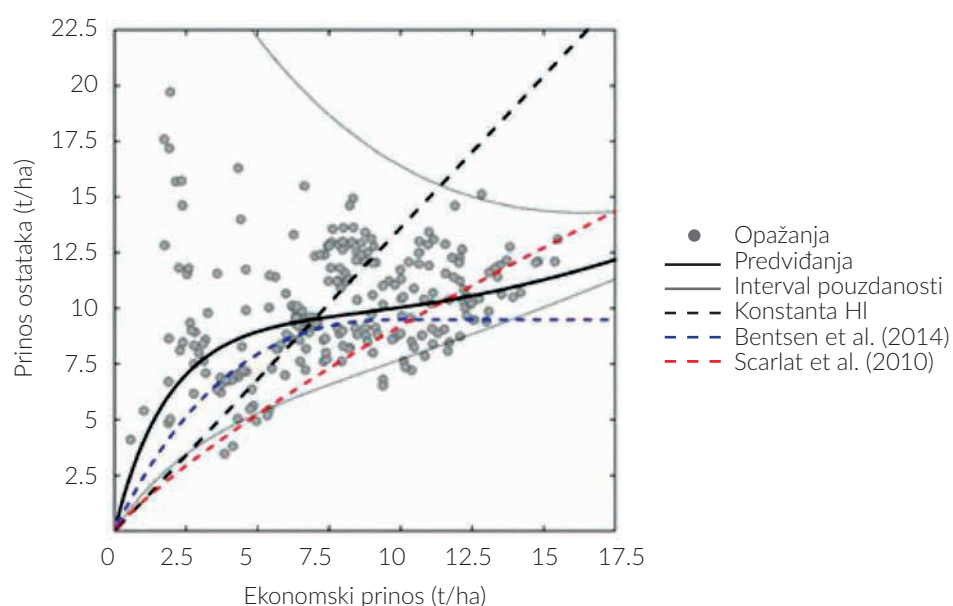
Proizvodnja i prinos kukuruza u zrnju i mješavini kukuruza i klipa u odabranim EU zemljama od 2015. do 2019.

(Izvor: Eurostat online data code: TAG00093, UABIO).



SLIKA 3:

Različiti nadzemni dijelovi biljke kukuruza i njihovi maseni udjeli¹⁴



SLIKA 4:

Empirijski model izračuna za predviđanje prinosa ostataka kukuruza u ovisnosti o ekonomskim prinosima usjeva¹⁵

¹⁴ David Ertl Sustainable corn stover harvest / Iowa Corn Promotion Board, 2013. – 18 p.
https://www.researchgate.net/publication/319493290_Sustainable_Corn_Stover_Harvest_A_publication_of_the_Iowa_Corn_Promotion_Board

¹⁵ García-Condado S, López-Lozano R, Panarello L, et al. Assessing lignocellulosic biomass production from crop residues in the European Union: modelling, analysis of the current scenario and drivers of interannual variability. GCB Bioenergy. 2019;00:1–23. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12604>



SLIKA 5:

Kukuruzna slama ostavljena u polju nakon žetve kombajnom

Nadzemni ostaci (kukuruzna slama) mogu biti djelomično prikupljeni kao nusproizvodi kukuruza koji imaju komercijalnu vrijednost (Slika 5). Ostatak nadzemnih i podzemnih dijelova kukuruza ostavljaju se u polju kao ostaci usjeva koji imaju ulogu organskih gnojiva. Od ključne je važnosti ispravno upravljanje ostacima za kvalitetu tla. Odgovarajuće stope uklanjanja biljnih ostataka trebale bi se temeljiti na minimalnoj razini ostataka usjeva koji se moraju držati na zemlji kako bi se održala kvaliteta tla, zadržale organske tvari u tlu i smanjio rizik od erozije¹⁶.

Aspekti održivosti za skupljanje nusproizvoda kukuruza opisani su u poglavlju "Aspekti održivosti korištenja ostataka kukuruza" u ovome vodiču. Podaci o održivim stopama uklanjanja ostataka kukuruza navedeni u literaturi iznose od 25% do 70%. U ovoj procjeni potencijala biomase za energiju, za ostatke kukuruza uzima se u obzir stopa uklanjanja od 40 %.

Proizvodnja poljoprivrednih ostataka, uključujući i ostatke kukuruza, sezonska je i ovisi o razdobljima žetve. Kukuruz namijenjen korištenju zrna bere se u različitim vremenima, ovisno o sorti, mjestu uzgoja i vremenu sjetve. Obično je vremenski okvir za žetvu kukuruza određen razinom vlage zrna, pa poljoprivrednici prije žetve određuju vlažnost zrna i njegovu zrelost, vodeći računa o rokovima sjetve i zrelosti hibrida. Sadržaj vlage u različitim dijelovima kukuruza nije homogen i brzo opada nakon 120 dana od datuma sjetve¹⁷. U Europi je tipično razdoblje žetve zrna kukuruza od rujna do studenog. Valja napomenuti da neki farmeri beru kukuruz u prosincu, siječnju, pa i kasnije. No, to nije zbog agrotehničkih zahtjeva, već zbog određenih proizvodnih potreba i ekonomske isplativosti.

Tijekom žetve, kukuruzna slama je često vlažnija (vlaga > 30 %) od zrna (EU standardna vlažnost je 14%), ali nakon žetve zrna, vlaga ostataka intenzivno isparava,

¹⁶ Nicolae Scarlat, Milan Martinov, Jean-François Dallemand Assessment of the availability of agricultural crop residues in the European Union: Potential and limitations for bioenergy use / Waste Management, Volume 30, Issue 10, October 2010, Pages 1889-1897. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.016>

¹⁷ C. Igathinathane, Alvin R.Womac, Shahab Sokhansanj, Lester O.Pordesimo. Vertical Mass and Moisture Distribution in in Standing Corn Stalks // 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting (Ottawa, Ontario, Canada, 1-4 August, 2004). – 20 p.

posebice u uvjetima gdje je jako vjetrovito. Također, sadržaj vlage ostataka kukuruza uvelike ovisi o vremenskim uvjetima tijekom žetve, a intenzivne oborine mogu dovesti do vrlo nepovoljnih uvjeta za sakupljanje biomase koja bi se koristila u energetske svrhe.

Za izračun energetskog potencijala ostataka kukuruza korištena je kalorijska vrijednost (suha baza) od 17.5 MJ/kg¹⁸ (Slika 6). Raspodjela energetskog potencijala ostataka kukuruza po Europi nije ravnomjerna. U 2019. najveća koncentracija ostataka kukuruza s energetskim ekvivalentom od 302,5 PJ bila je u Ukrajini. U EU prednjače Rumunjska s 155.2 PJ, Francuska s 97.5 PJ i Mađarska s 64.8 PJ. Ukupni energetski potencijal ostataka kukuruza u EU28 iznosio je 557.9 PJ u 2019. Značajan potencijal postoji i u Španjolskoj, Grčkoj, Belgiji, Austriji i Turskoj.

Energetski potencijal ostataka kukuruza zapravo određuju poljoprivrednici. Oni će osigurati održivu žetvu

kukuruza ako imaju ekonomski interes. Cijena nusproizvoda kukuruza na tržištu ovisi o karakteristikama važnim za krajnje korisnike. Različiti dijelovi nusproizvoda kukuruza imaju različite fizikalne i kemijske karakteristike, ali većinom se radi o lignoceluloznoj biomasi. Glavni načini korištenja zrna i ostataka kukuruza prikazani su na Slici 7. Kukuruzna slama ima relativno nisku nutritivnu vrijednost, posebno stabljike kukuruza, koje se smatraju nekvalitetnom stočnom hranom¹⁹. Hranljiva vrijednost listova i ljuske kukuruza veća je u odnosu na stabljike i klipove kukuruza, ali se svejedno ne koriste u velikim količinama. Trenutačno se kukuruzna slama uglavnom ostavlja na polju, ore se i tako ulazi u tlo. Valja napomenuti da se na nekim područjima na poljima spaljuju ostaci žetve, uključujući i ostatke kukuruza, što uzrokuje brojne negativne posljedice po okoliš²⁰. Stoga bi se postojeće količine nusproizvoda kukuruza mogle koristiti kao sirovina za kruta biogoriva, bioetanol druge generacije i bioplina.

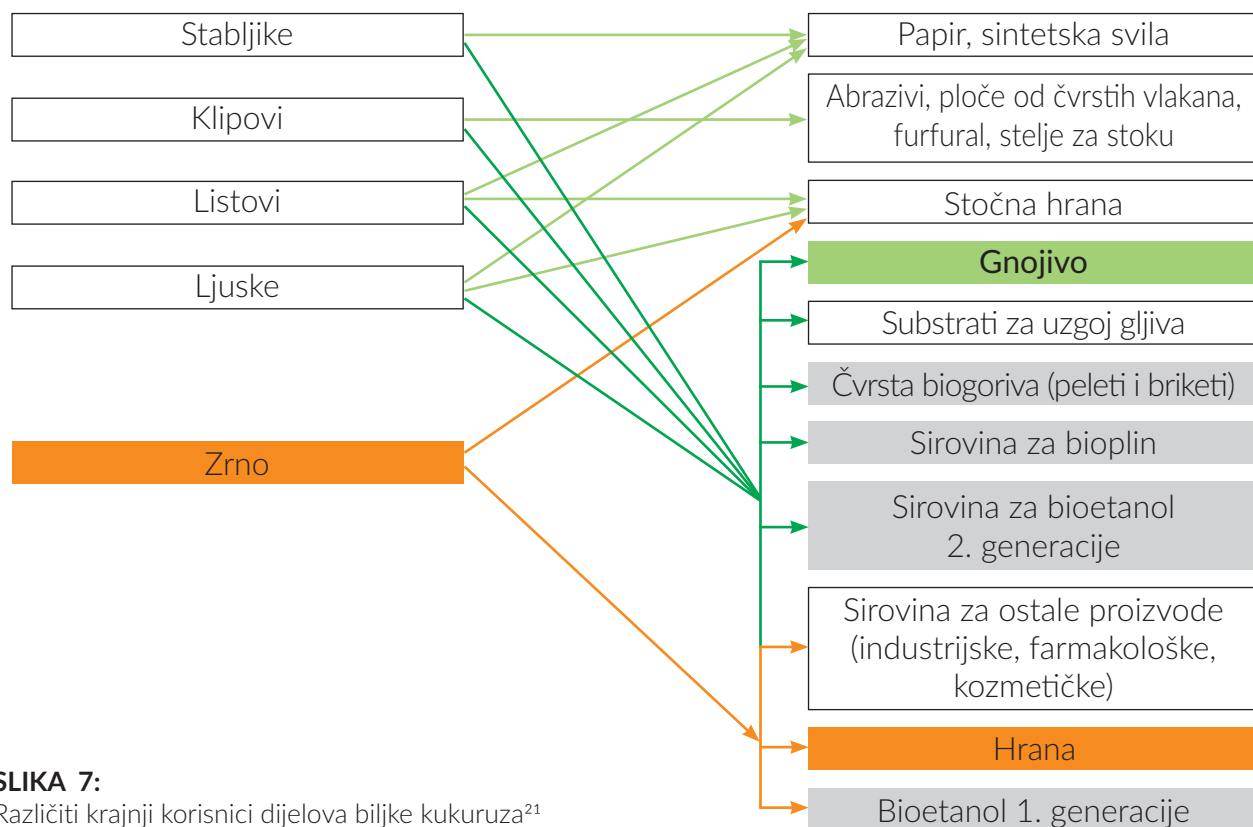


SLIKA 6:
Energetski potencijal ostataka kukuruza u Europi (2019.)

¹⁸ Caroline Schneider, Hanz Hartmann Maize as energy crop for combustion. Agricultural optimization of fuel supply. TFZ, 2006. http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/09_bericht.pdf

¹⁹ Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products. Report of the AgroCycle project. 2016. http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

²⁰ Vladislav Zekić, Vesna Rodić, Milenko Jovanović Potentials and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia. Biomass and Bioenergy, 2010. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.07.012



SLIKA 7:

Različiti krajnji korisnici dijelova biljke kukuruza²¹



²¹ Position paper UABIO N 23 (2020) "Analysis of pellets and briquettes production from corn residues"
<https://uabio.org/wp-content/uploads/2018/05/position-paper-uabio-20-en.pdf>

SVOJSTVA OSTATAKA KUKURUZA KAO GORIVA

Općenito, svojstva ostataka kukuruza kao goriva nisu najbolja za sagorijevanje. No, bolja su od onih od slame žitarica. U svakom slučaju, pri odabiru kotla za ostatke kukuruza treba uzeti u obzir stvarne karakteristike isporučene kukuruzne slame i zahtjeve proizvođača kotlova. Usporedba svojstava goriva ostataka kukuruza s onima ostalih poljoprivrednih ostataka i drvne sječke prikazana je u Tablici 2.

TABLICA 2:

Usporedba indikativnih svojstava goriva frakcija kukuruznog ostatka s različitim vrstama biomase.

Parametri	Jedinice	Žuta slama ¹	Siva slama ¹	Klipovi kukuruza ²	Stabljike kukuruza ³	Drvena sječka ¹
Udio vlage	%	10-20	10-20	12.5	10-18	40-50
Kalorijska vrijednost	MJ/kg	14.4	15	15.2	15-17	10.4
Udio pepela	%težine	4	3	2.2	5-6.5	1
Ugljik	%težine	42	43	41.3	41	50
Vodik	%težine	5	5	5.2	5.1	6
Kisik	%težine	37	38	38.8	38	38
Klor	%težine	0.75	0.2	0.14	0.13	0.02
Dušik	%težine	0.35	0.41	0.5	0.84	0.3
Sumpor	%težine	0.16	0.13	0.08	0.09	0.05
Kalij (alkalni metal)	%težine suhe osnove	1.03*	0.61**	0.48-1.02	0.61	0.14***
Temperatura deformacije pepela	°C	930*	905**	790-1200 (srednja vrijednost 1033)	820-1160 (srednja vrijednost 1070)	1270***

¹ Straw to Energy. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition

(http://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/11/AgroBioHeat_D7.6_Straw_to_energy_EN.pdf).

² Skupni podaci iz Phyllis baze podataka (<https://phyllis.nl/>); Brunner et al., 2011²²; Brunner et al., 2021²³; Antonenko et al., 2018²⁴; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf.

³ Skupni podaci iz Phyllis baze podataka (<https://phyllis.nl/>); Antonenko et al., 2018²⁴; AgroCycle. Characterisation of Agricultural Waste Co- and By-Products http://www.agrocycle.eu/files/2017/10/D1.2_AgroCycle.pdf

* Srednja vrijednost za slamu pšenice (Danska) iz Phyllis baze podataka (<https://phyllis.nl/>).

** Srednja vrijednost za slamu pšenice (Danska, izložena vremenskim prilikama) iz Phyllis baze podataka (<https://phyllis.nl/>).

*** Srednja vrijednost za netretirano drvo iz Phyllis baze podataka (<https://phyllis.nl/>).

²² Brunner, T., Kanzian, W., Obernberger, I., & Theissl, A. (2011). Combustion properties of maize cobs – results from lab and pilot-scale tests. In *Proceedings of the 19th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 944-951).

²³ Brunner, T., Nowak, P., Mandl, C., Obernberger, I. (2021). Assessment of agrobiomass performance in state-of-the-art residential boilers. In *Proceedings of the 29th European Biomass Conference & Exhibition* (pp. 379-388).

²⁴ V.O. Antonenko, V.I. Zubenko, O.V. Epik Fuel properties of Ukrainian corn stover. DOI <https://doi.org/10.31472/ihe.3.2018.11>

Elementarni sastav ostataka kukuruza gotovo je isti kao i kod slame klasnih žitarica, pa imaju usporedivu ogrjevnu vrijednost. Svojstva slame uvelike ovise o mjestu uzgoja, vremenu i vremenu žetve, tlu i gnojivima²⁵.

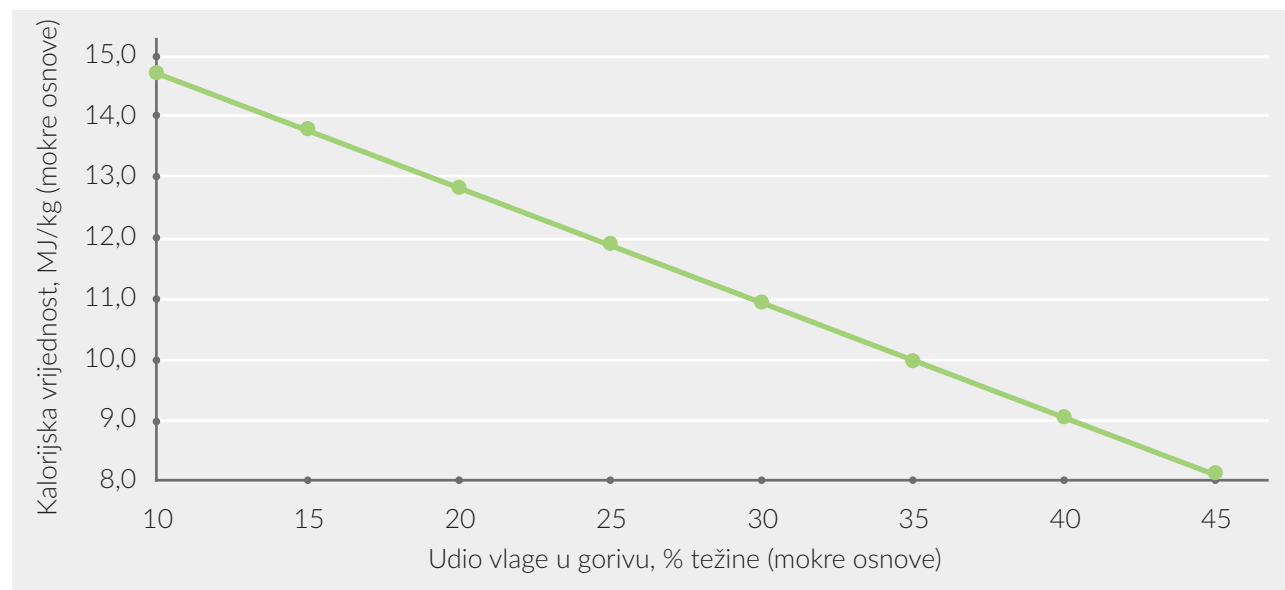
Sadržaj pepela u kukuruznoj slami značajan je čimbenik kvalitete za daljnju proizvodnju biogoriva. Sadržaj pepela ovisi o vrsti žetvene tehnologije jer se količina pepela povećava kada biomasa dođe u kontakt s tlom. Zbog toga postoje dvije vrste pepela: strukturni i nestrukturni²⁶. Strukturni pepeo sastoji se od anorganskih tvari sadržanih u biljnoj biomasi. Uobičajeni strukturni sadržaj pepela u kukuruznoj slami je 3.5 %. Nestrukturni pepeo je anorganska tvar (uglavnom zemlja) koja dopijeva u slamu tijekom žetve, posebice pri oblikovanju otkosa i baliranju. Standardni ukupni udio pepela za više prolaza poljoprivrednih strojeva pri žetvi je 8-10 %.

Što se tiče taljenja pepela, neki uzorci ostataka kukuruza bliži su drvnoj biomasi što pruža bolje uvjete za

izgaranje u usporedbi sa slamom klasnih žitarica. Za usporedbu: temperatura deformacije pepela za drvo je oko 1270 °C, a 790-1200 °C za klip kukuruza i 820-1160 °C za stabljike kukuruza (vidi Tablicu 2). Osim toga, stabljike kukuruza sadrže manje klora (0.13 %) u usporedbi sa svježom ("žutom") slamom klasnih žitarica (0.75 %). To je pozitivno za ostatke kukuruza kao gorivo jer spojevi klora uzrokuju koroziju čeličnih elemenata na uređajima.

Udio vlage iznimno utječe na kalorijsku vrijednost ostataka kukuruza. Dijagram ovisnosti neto kalorijske vrijednosti sadržaja vlage kukuruzne peći, koji je izgrađen na jednadžbi (2.2) iz priručnika²⁷, prikazan je na Slici 8.

Za postizanje relativno niskog udjela vlage nusproizvoda kukuruza nužno je odabrati prikladnu strategiju sakupljanja i logistike.



SLIKA 8:

Kalorijska vrijednost kao funkcija udjela vlage (mokre osnove) u kukuruznoj slami

²⁵ Vyll Varesa. *Handbook for biofuel consumer* // Tallinn: Tallinn Technology University, 2005 – 183 p.

²⁶ Brittany Schon, Matt Darr. *Corn Stover Ash*. <https://store.extension.iastate.edu/Product/Corn-Stover-Ash>

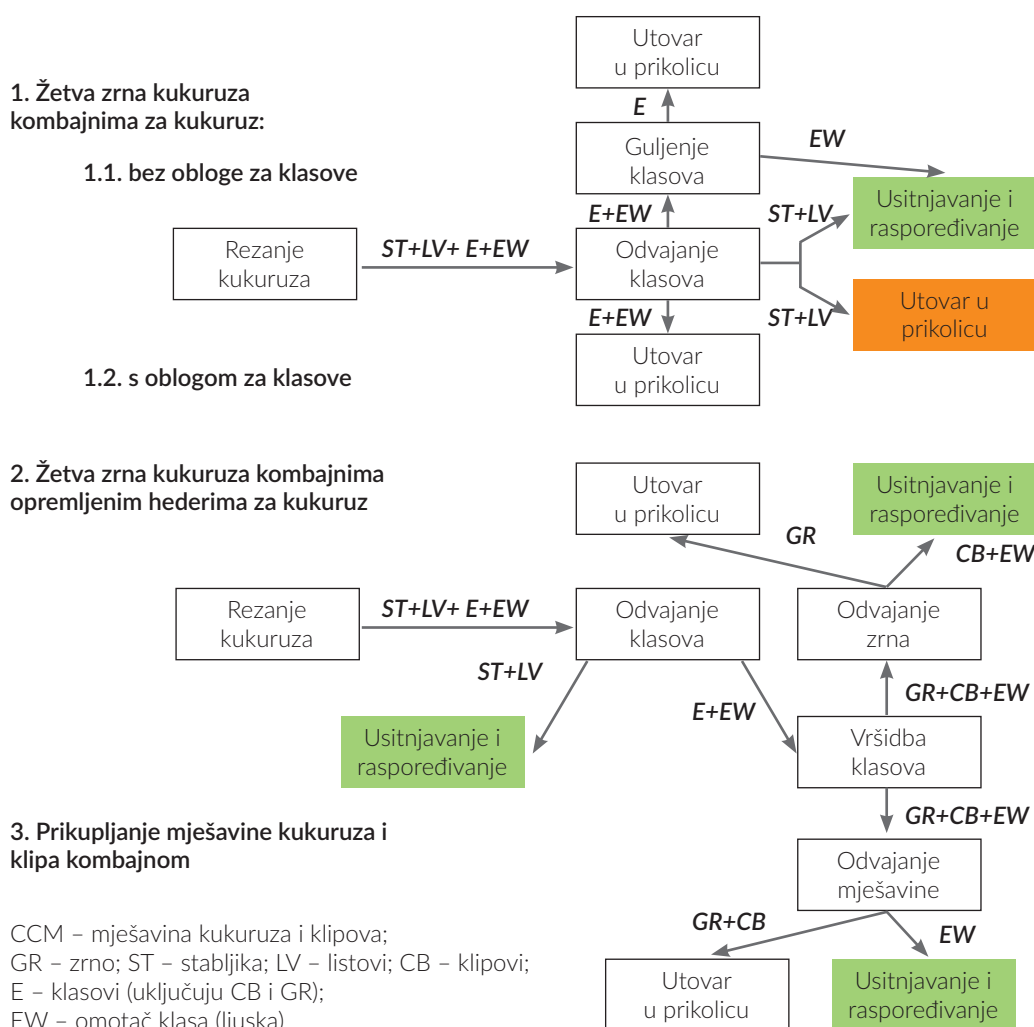
²⁷ Van Loo, S.; Koppejan, J. *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*; Earthscan: London, UK, 2008. – 465 p.

SAKUPLJANJE OSTATAKA KUKURUZA

TEHNOLOGIJE ZA ŽETVU ZRNA KUKURUZA

Tehnologija žetve zrna kukuruza ima izravan utjecaj na vrste ostataka kukuruza koji se dobivaju i način njihovog prikupljanja. Postoje tri glavne tehnološke sheme za žetvu kukuruza u zrnju (Slika 9):

1. Žetva zrna kukuruza s kombajnama za kukuruz uz daljnju stacionarnu obradu klipa:
 - 1.1. uz simultano ljuštenje klasova (odvajanje "omota");
 - 1.2. bez ljuštenja klasova;
2. Žetva zrna kukuruza kombajnama opremljenim hederima za kukuruz;
3. Prikupljanje mješavine žitarica i klipova kombajnom.



SLIKA 9:

Tehnologije žetve zrna kukuruza s tokovima ostataka kukuruza²⁸

²⁸ UABio's Position Paper N 16 (2016) "Opportunities for harvesting by-products of grain corn for energy production in Ukraine"
<http://uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-16-en.pdf>



SLIKA 10:

Žetva kukuruza kombajnom opremljenim hederom za kukuruz.

Zrno kukuruza trebalo bi žnjeti kada vlažnost zrna iznosi od 20 do 40 %, a mješavinu kukuruza i klipa kada je vlažnost zrna 40-50 %. Žetva kukuruza bez vršidbe klipova počinje kada je vlažnost zrna manja od 40 %, a s vršidbom klipova kada je ispod 30 %. S većim sadržajem vlage vršidba je veća, kukuruz se oštećuje, te se produktivnost smanjuje. Najkvalitetnija vršidba se odvija kada je vlažnost zrna 20-22 %²⁹.

U Ukrajini je 1980-ih i 1990-ih godina bila popularna tehnologija žetve zrna kukuruza koja je uključivala prikupljanje kompletnog prinosa usjeva korištenjem kombajna SK-5M, Enisei-1200, Don-1500 i KZS-9- 1 s posebnim zaglavljima PPK-4, KMD- 6, PZKS-6 proizvođača "Khersonmash". Ova su zaglavlja prenosila usitnjenu kukuruznu slamu do prikolice. Trenutno je

glavna metoda žetve komercijalnog kukuruza vršidba klasova u polju kombajnom, usitnjavanje i razbacivanje posječne biomase uz korištenje kombajna opremljenih hederima za kukuruz (Slika 10). Ovakav način žetve zrna kukuruza ekonomski je najisplativiji. U usporedbi sa žetvom klasova, ova metoda omogućuje smanjenje troškova rada za 1.8-2 puta, kao i smanjenje potrošnje goriva za 20-25 %³⁰. Samo neki poljoprivrednici (uglavnom tvornice sjemena) sakupljaju kukuruz kao neovršene klasove uz stacionarnu vršidbu, što omogućuje skupljanje klipova. Tvornice sjemena uzgajaju kukuruz za dobivanje (hibridnog) sjemena kukuruza kao sadnog materijala. U usporedbi s EU, skupljanje mješavine kukuruza i klipa kombajnom još nije jako rasprostranjeno u Ukrajini.

²⁹ V.D. Hrechkosii, M.D. Dmytryshak, R.V. Shatrov and other. *Complex mechanization of grain production: Textbook* // K: Ltd. "Nilan-Ltd", 2012 – 288 p.

³⁰ Cherenkov A.V., Tsykov V.S., Dziubetskyi B.V., Shevchenko M.S. et al. *Intensification of corn technologies – a guarantee for yield stabilization at 90-100 m.c./ha level (practical recommendations)* // Dnepropetrovsk: NU Institute of Steppe zone agriculture NAASU, 2012 – 31 p.

OPCIJE SAKUPLJANJA OSTATAKA KUKURUZA

Prilikom žetve zrna kombajnom opremljenim hederima za kukuruz, ostaci biljke raspodijeljeni su na sljedeći način (Slika 11): ostaci strništa (10 % težine), ostaci iza

hedera za kukuruz (96 % težine) i ostaci iza kombajna (24% težine). Treba napomenuti da hederi za kukuruz zahtijevaju puno više snage nego hederi za žitarice. Obično je to 7.5 kW (10 KS) po redu, a dodatna snaga od 2.3 kW (3 KS) za svaki red je potrebna na hederu ako su ugrađeni priključci za usitnjavanje stabljika³¹.



$$\text{Strnište} = 0.1 * M_{\text{zrna}}$$

$$ST + LV = 0.96 * M_{\text{zrna}}$$

Iza hedera za kukuruz

$$CH + CB = 0.24 * M_{\text{zrna}}$$

Iza kombajna

ST – stabljike, LV – listovi, EW – omot klasa (ljuske), CB – klip, M_{zrna} – masa zrna

SLIKA 11:

Formiranje ostataka kukuruza iza kombajna.

Prešanje biomase u bale radi zbijanja sirovine više od 4 puta (od 40 kg/m³ do preko 160 kg/m³) doprinosi povećanju učinkovitosti logistike i smanjuje potrebnu površinu skladišta. Tehnološke sheme za žetvu ostataka kukuruza mogu se podijeliti u 4 glavne vrste za bale:

1. Jednoprohodni sustav žetve: balirka je pričvršćena na kombajn koji omogućuje formiranje bala nusproizvoda kukuruza istovremeno s vršidbom zrna (Slika 12a).
2. Sustav s dva prolaza: kombajn s hederom za kukuruz koji odvaja stabljike kukuruza, koji se zatim balira balirkom pričvršćenom na traktor (Slika 12b).
3. Sustav s tri prolaza: kombajn + traktor sa strojem za usitnjavanje stabljika + traktor s balirkom za velike četvrtaste bale (ili okrugle bale) (Slika 12c).

4. Višeprolazni sustav: kombajn + traktor s malčermom + traktor s grabljama + traktor s balirkom (Slika 12d).

Uobičajena kukuruzna slama ubrana višeprolaznom metodom rezultirat će razinama pepela između 8 i 12% ovisno o godini i uvjetima usjeva i većinom se sastoji od tla prikupljenog tijekom procesa baliranja. Žetva u jednom prolazu daje kukuruznu slamu s udjelom pepela manjim od 4% i nikada ne dopušta da sirovina dođe do tla dok se ne formira bala (Slika 12a). Kombajni s jednim prolazom imaju gubitak produktivnosti žetve zbog dodatnog protoka biomase kroz njih. Kombajni dizajnirani za rukovanje većim količinama biomase imaju 30% smanjenju produktivnost pri stopama prikupljanja biomase od 3.4 Mg/ha³². Tvrtka AGCO proizvodi Challenger jednoprohodni sustav koji je dostupan na tržištu nekih zemalja uključujući i SAD.

³¹ Corn: Chemistry and Technology, Third Edition. Edited by Sergio O. Serna-Saldivar Woodhead Publishing and AACC International Press, 2018. – 690 p.

³² J. Darr, K. Webster, A. Shah Machinery Innovations to Meet Industrial Biomass Harvesting Demands in Expanding United States Markets / Land.Technik AgEng 2013. Conference Proceedings, 2013. – 399-406 p.



a) Jednoprohodni sustav žetve: kombajn s balirkom



b) Kombajn s hederom za vuču + traktor s balirkom



c) Kombajn + traktor sa strojem za usitnjavanje stabljika + traktor s balirkom



d) Kombajn + traktor s rezačem stabljika + traktor s grabljama + traktor s balirkom

SLIKA 12:

Tehnološke sheme za sakupljanje kukuruzne slame³³.

Za učinkovito sakupljanje i baliranje nusproizvoda od kukuruza važno je napraviti redove hrpa od ostataka. U dvoprolaznom sustavu koristi se kombajn s posebnim hederom za kukuruz koji odmah radi takvu stazu od ostataka kukuruza (Slika 12b). Žetalica za kukuruz Geringhoff Mais Star Collect može usitniti i raširiti lišće i stabljike kukuruza po polju ili ih rasporediti u takvu stazu, odnosno red. Na vrh reda od ostataka mogu se dodati usitnjeni klipovi i ljuske koje se formiraju iza kombajna. Tvrtka New Holland proizvodi uređaje Cor-

nrower™ za formiranje redova koji se mogu pričvrstiti na kombajn. Usporedna ispitivanja jedno i dvoprolazne žetve kukuruza³⁴ pokazala su da je produktivnost žetve zrna kod sustava s dva prolaza bila 9% niža od one kod konvencionalne konfiguracije kombajna. Za obje tehnologije žetve poljoprivrednici moraju ulagati u specijalnu opremu (sustav jednoprohodne žetve ili hedere za kukuruz), što smanjuje produktivnost žetve zrna kukuruza.

³³ Report on "Analysis of utilisation of corn straw as an energy source" (2018). Prepared by SEC Biomass for EBRD under the Contract C38842/1018/5362.

³⁴ K. J. Shinnars, R. G. Bennett, D. S. Hoffman Single- and two-pass corn grain and stover harvesting Transactions of the ASABE. 55(2): 341-350. (doi: 10.13031/2013.41372) @2012 <https://elibrary.asabe.org/login.asp?search=0&JID=3&AID=41372&CID=t2012&v=55&i=2&T=2>

Poljoprivrednici obično nemaju potrebne resurse za žetvu biomase kukuruza, jer se fokusiraju primarno na proizvodnju zrna. Najčešće imaju tendenciju žetve zrna kukuruza standardnim kombajnima i kukuruznim hederima bez povećanja opsega posla za dodatnu žetvu ostataka. Za učinkovitu žetvu ostataka kukuruza bolje je angažirati tvrtke koje imaju odgovarajuću mehanizaciju i kvalitetno prikupljaju agrobiomasu, što se može postići u sustavima s tri i više prolaza.

U troprolaznom sustavu za usitnjavanje i formiranje redova kukuruznog ostatka koristi se specijalna sjeckalica za usitnjavanje stabljika (Slika 12c). U tom slučaju kombajn može povećati svoj učinak tijekom žetve zrna. Američka tvrtka Hiniker proizvodi strojeve serije 5600 širine 15, 20 i 30 stopa (cca 4.5, 6 i 9 metara) za usitnjavanje i formiranje redova biljnih ostataka. Kako bi se osigurala velika linearna težina stroja za redove i kako bi se smanjio broj prolaza stroja, Hiniker 5610 i 5620 spajaju dva prolaza u jednu mašinu. Sjeckalica širine 30 stopa mora biti pričvršćena na traktor s motorom od 200 KS.

U sustavu s više prolaza koristi se drobilica za usitnjavanje ostataka kukuruza koja je pričvršćena na traktor. Drobljeni ostaci se u sljedećem koraku grabljaju grabljama pričvršćenim na traktor u stroju za usitnjavanje (Slika 12d). Za rad sa stabljikama kukuruza, grablje moraju biti jače u odnosu na grablje za sijeno. Kao i grablje, prinos žetve iz sjeckalica za stabljike može se prilagoditi promjenom razmaka između noževa za usitnjavanje i tla. Budući da drobilice za stabljike imaju manje mogućnosti da zahvate tlo, kontaminacija tla je manja, a stoga i razina pepela od slame kukuruza³⁵.

Kako bi se spriječili gubici i pogoršanje kvalitete biomase, bale se moraju brzo maknuti s polja i spremiti na skladištenje. Primjerice, samoutovarna prikolica

16K Plus Bale Runner u jednom prolazu skuplja 12 velikih bala širine 1.2 m i visine 0.9 m i montira se na traktor snage 180 KS. U SAD-u se također koriste posebni samohodni viličari. Stroj Stinger Stacker 6500 ima snagu motora od 305 KS, 6-brzinski automatski mjenjač koji tijekom 1 sata može pokupiti, izvaditi i staviti na hrpu 80-120 velikih pravokutnih bala.

Od navedenih tehnologija, troprolazni sustav (Slika 12c) je najprimjenjiviji za europske uvjete zbog mogućnosti korištenja standardnih strojeva dostupnih poljoprivrednim proizvođačima i manjeg kontakta biomase s tlom. U različitim fazama procesa žetve mogu se koristiti različite vrste opreme. Nekoliko primjera takvih strojeva prikazano je na Slici 13. Više informacija o strojevima za žetvu, logističkim ostacima kukuruza i njihovoj preradi u pelete/brikete nalazi se u Dodatku I.

DUPONT LANAC OPSKRBE KUKURUZNE SLAME

Primjer cijelog lanca opskrbe ostacima kukuruza (balirana biomasa) prikazan je na Slici 14. Radi se o lancu opskrbe koji je implementirala i koristila tvrtka DuPont (SAD) za opskrbu sirovinom za svoju tvornicu celuloznog etanola. Dana 30. listopada 2015. otvorena je velika napredna biorafinerija Duponta u gradu Nevada, u saveznoj državi Iowi. Kapacitet tvornice bio je više od 110 milijuna litara celuloznog etanola godišnje. Kukuruz su ubirali lokalni poljoprivrednici, dok su ostale poslove obavljali djelatnici tvornice. 2018. godine Verbio North America Corp. je kupio DuPont Cellulosic Ethanol LLC. Novi vlasnik planira proizvodnju obnovljivog prirodnog plina (RNG), ali prije toga će morati napraviti određene promjene u postrojenju³⁶.

³⁵ Matt Darr *Industrial harvesting of corn stover as a biomass* (2012). *Proceedings of the Integrated Crop Management Conference*. 9. <https://lib.dr.iastate.edu/icm/2012/proceedings/9>

³⁶ <http://ethanolproducer.com/articles/15885/burgeoning-biomethane>

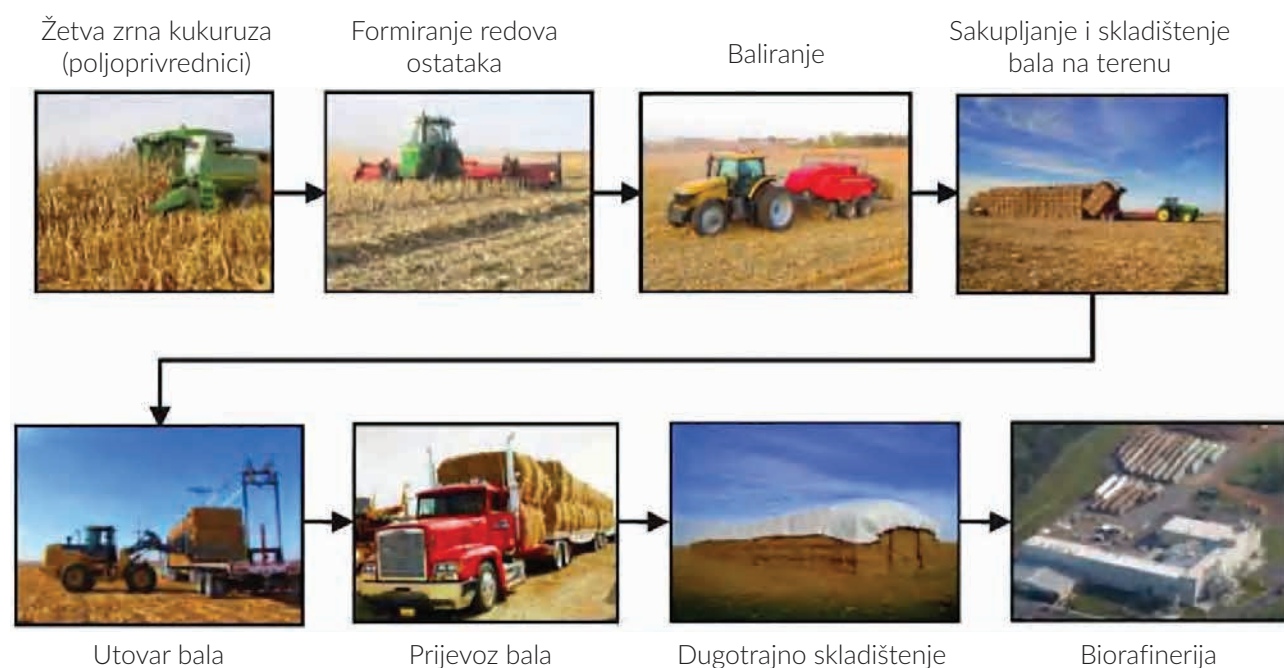


Korišteni u SAD-u	Slični primjeri u EU
1. Formiranje redova ostataka	
Hiniker 5600	Biochipper 300, 400, 500, 600
2. Baliranje	
Massey Ferguson 2270XD	Krone Big Pack 1290 HDP
3. Sakupljanje bala u polju	
ProAg 16 K Plus Bale Runner	Arcusin Autostack XP 54T



SLIKA 13:

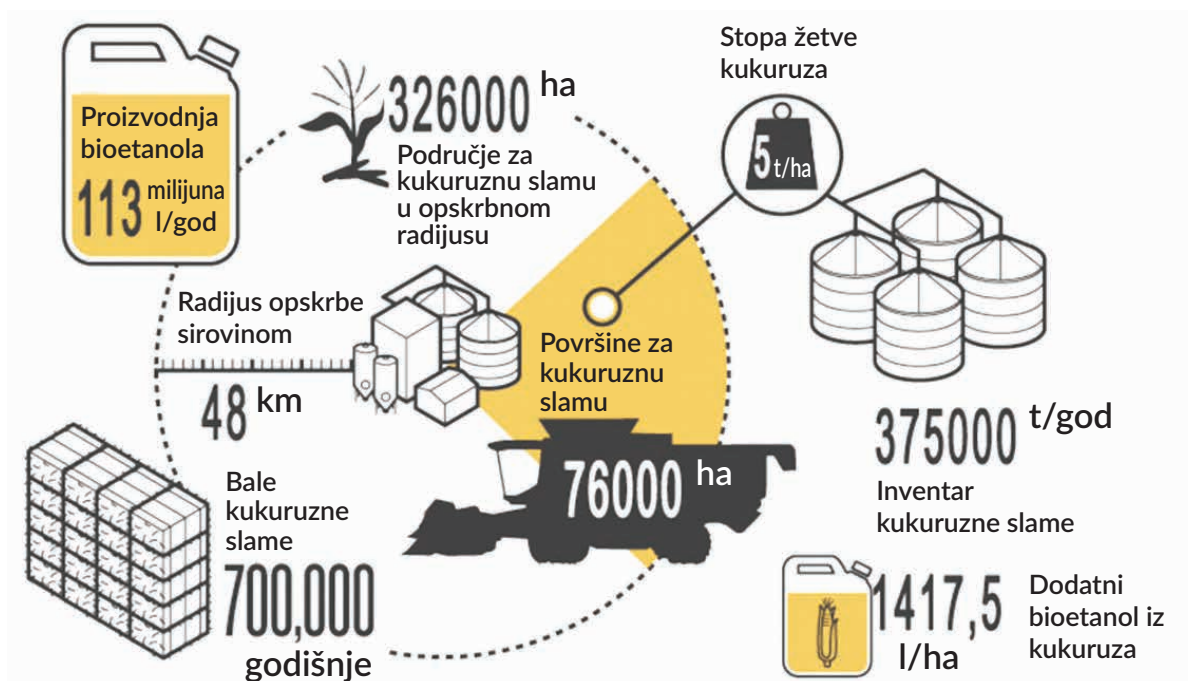
Modeli poljoprivrednih strojeva za sakupljanje nusproizvoda kukuruza.



SLIKA 14:

DuPontov model postrojenja za proizvodnju celuloznog etanola za lanac opskrbe kukuruznom slamom³⁷.

³⁷ DuPont Nevada Site Cellulosic Ethanol Facility Feedstock Collection Program
http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/industrial-biotechnology/documents/IB-PDF-04-Feedstock_Collection_Program_2015.pdf



SLIKA 15:

Operativni program DuPont postrojenja za proizvodnju celuloznog bioetanola³⁸

Operativni program prikazan je na Slici 15. DuPontova tvornica plaćala je uzgajivačima dozvolu za berbu kukuruza i upravljanje troškovima berbe, skladištenja i transporta. Uzgajivači su primili troškove za pristup polju i za količine hranjivih tvari koje su uklonjene zajedno s nusproizvodima kukuruza. Kukuruz je ubran s 500 najbližih farmi. U tvornici je bilo 85 stalnih radnih mjesta, a na prikupljanju, transportu i skladištenju sezone sirovine bilo je uključeno 150 osoba.

Zbog DuPont-ovog programa za žetvu kukuruzne slame za celulozni etanol, DuPont je sklapao ugovore s uzgajivačima za berbu, skladištenje i isporuku kukuruzne slame u DuPontovu tvornici celuloznog etanola. Kvalificirani uzgajivači morali su zadovoljiti sljedeće kriterije:

- Nalaziti se u krugu od 48 km od Nevada, Iowa;
- Jutra kukuruza moraju se uzgajati bez oranja ili konzervacijskim sustavom obrade tla;
- Prinos od 12.2 tone po ha ili veći;
- Relativno ravno zemljište (s nagibom od 4 % ili manje).

TRANSPORT BALA KUKURUZNE SLAME

Slično gore navedenom, sustav žetve nusproizvoda kukuruza u velikim kvadratnim balama koriste i druge tvrtke. Nakon saganja bala na operativnim skladištima u blizini polja, treba ih transportirati u glavno (centralno) skladište. Za poslove utovara u skladištima koriste se čeon i teleskopski utovarivači. Za prijevoz od lokalnog do centralnog skladišta koriste se kamioni s poluprikoličnim platformama. Takva se oprema tradicionalno koristi za logističke operacije s balama slame i sijena. No, bale od nusproizvoda kukuruza općenito imaju veći udio vlage i stoga su teže u odnosu na bale od slame žitarica i uljane repice, pa to treba uzeti u obzir pri odabiru strojeva za skupljanje i saganje bala. Neophodno je pravilno pričvrstiti teret pomoću traka za vezivanje ili zatezanja na prikolicama s ravnim platformama ili prikolicama bez stranica³⁹. Do 36 velikih četvrtastih bala prosječne suhe težine od 0.43 t može se transportirati na standardnoj američkoj poluprikolici od 48 stopa (oko 14.5 metara). Potrebno je ciljati na

³⁸ <http://www.dupont.com/products-and-services/industrial-biotechnology/advanced-biofuels/articles/nevada-cellulosic-ethanol-by-the-numbers.html>

³⁹ Justin McGill, Matt Darr *Transporting Biomass on Iowa Roadways*. PM 3051G (2014) <https://store.extension.iastate.edu/product/Transporting-Biomass-on-Iowa-Roadways>

gustoću suhих bala od 196 kg/m³ kako bi se maksimizirala učinkovitost transporta standardnih poluprikolica. Teret mora biti pravilno pričvršćen kako bi se osiguralo da se bale ne pomiču tijekom transporta.

SAKUPLJANJE KUKURUZNE SLAME U OKRUGLIM BALAMA

Biomasa se također može balirati u okrugle bale pomoću balirke za okrugle bale umjesto velike balirke za četvrtaste. Balirke za okrugle bale također su vrlo održive za proizvodnju biomase i nude prednost jednostavnijeg rada uz manje poteškoća s održavanjem⁴⁰. Balirke za okrugle bale trebaju do 75 dodatnih konjskih snaga na raspolaganju za baliranje. Za odgovarajuću snagu vučne trake i maksimalnu produktivnost balirke, preporučuje se korištenje traktora od 120+ konjskih snaga za industrijsko baliranje. Balirke za okrugle bale visoke gustoće s predobradom za usitnjavanje mogu postići gustoću bala od 160 kg/m³. Velike balirke za četvrtaste bale zahtijevaju znatno više snage od balirke za okrugle bale. Velike balirke za četvrtaste bale visoke gustoće i kapa-

citeta obično zahtijevaju najmanje 180+ konjskih snaga. Ako se koriste balirke visoke gustoće, dodatna snaga može biti potrebna. Takve balirke mogu proizvesti bale gustoće od preko 184 kg/m³. No, općenito su balirke za okrugle bale manje produktivne od velikih balirki za četvrtaste. S obzirom na manju volumnu učinkovitost transporta i skladištenja, logistika za okrugle bale u odnosu na četvrtaste je složenija i skuplja.

SAKUPLJANJE ISJECKANE KUKURUZNE SLAME

Osim tehnologije baliranja, kukuruzna slama može se sakupljati u usitnjenom obliku kao mješavina različitih frakcija nusproizvoda kukuruza ili odvojeno, poput klipova. Dijagrami toka žetve usitnjenih ostataka kukuruza uz korištenje kombajna ili utovarivača stočne hrane koji se koriste za žetvu silažnog kukuruza, prikazani su na Slici 16. Pokusima na terenu u Bavarskom državnom istraživačkom centru za poljoprivredu 2014. i 2015. pokazalo se da je udio pepela u kukuruznoj slami bio 7.0 % ± 1.9 za kombajn i 6.9 % ± 2.0 za utovarivač za stočnu hranu⁴¹.



a) Sustav kombajna:

kombajn + traktor sa strojem za usitnjavanje stabljika + sakupljač stočne hrane + traktor s prikolicom



b) Sustav utovarivača stočne hrane:

kombajn + traktor sa strojem za usitnjavanje stabljika + traktor s utovarivačem stočne hrane

SLIKA 16:

Opskrbni lanci usitnjene kukuruzne slame

⁴⁰ Matt Darr, Keith Webster Corn Stover Harvesting Machinery. PM3051A (2014)

<https://store.extension.iastate.edu/product/Corn-Stover-Harvesting-Machinery>

⁴¹ Monika Fleschhut, Kurt-Jurgen Hulsbergen, Stefan Thurner, Joachim Eder Analysis of different corn stover harvest systems / LANDTECHNIK, 71 (6), 2016. – 252-270 p.

SUSTAVI SAKUPLJANJA KLIPOVA KUKURUZA

Alternativna mogućnost sakupljanja ostataka kukuruza je prikupljanje jednog dijela nakon vršidbe* žitarica kombajnom. 2018. godine istraživači u talijanskom CREA-IT (Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria) proveli su pokuse na terenu u projektu BECOOL kako bi ocijenili performanse inovativnog mehaniziranog sustava Harcob za prikupljanje klipova kukuruza⁴² (Slika 17a). Korištenjem kombajna sa sustavom Harcob bilo je moguće ubrati u prosjeku 2 t klipova po hektaru (4.1 t/sat)⁴³. Tvrtka Vermeer razvila je stroj za žetvu klipova CCX770 (Slika 17b), koji je dostupan na tržištu⁴⁴. Vermeer CCX770

kombajn je prikolica za prikupljanje klipova pričvršćena na kombajn. Ova mehanizacija poljoprivrednicima omogućuje berbu i kukuruza i klipa - odvojeno i istovremeno u jednom prolazu. U Ukrajini, neki farmeri prilagođavaju sustav odvajanja svojih kombajna kako bi smanjili odvajanje zrna kukuruza od klipova. Na taj se način zrno skupa s klipovima posprema u skladišta za zrno. Tek nakon toga se odvajaju na stacionarnim jedinicama za separaciju, a klipovi se koriste kao biomasa za sušare zrna kukuruza. Ova tehnologija temelji se na postojećim strojevima i ne zahtijeva veća kapitalna ulaganja u dodatnu opremu. No, koristi se samo za zadovoljavanje vlastitih potreba poljoprivrednika i ne primjenjuje se za masovno prikupljanje ove vrste biomase za sektor bioenergije.

* Vršidba - odvajanje zrnja različitih poljoprivrednih kultura, nakon žetve, od ostalih dijelova biljaka (slame, pljeve, mahuna i sl.). Obavlja se ručno, stokom ili strojevima (vršilicama). Pri žetvi kombajnima istodobno se obavlja i vršidba, Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2021.



a)



b)

SLIKA 17:

Sakupljači klipova: a) Harcob sustav; b) Vermeer CCX770.

SKLADIŠTENJE KUKURUZNE SLAME

Kukuruznu slamu treba čuvati tako da se održava normalna razina vlage zbog kiše i potencijalnog napanja iz zemlje, izbjegavanjem propadanja i štiteći od požara. Odabir vrste skladišta ovisi o njegovoj lokaciji i uvjetima. Kukuruzna slama može se pohraniti u otvorenom skladištu, prekrivenom skladištu, trajnom skladištu ili anaerobnom skladištu⁴⁵. Prilikom odabira odgovarajućih sustava skladištenja potrebno je uzeti

u obzir nekoliko čimbenika: stabilnost sirovine tijekom skladištenja, cijenu skladišne infrastrukture, dostupnost sirovine tijekom cijelog trajanja skladištenja, te integraciju skladišne platforme s postrojenjem za preradu. Važno je osigurati slobodan pristup biomasi za utovarivače. Skladištenje biomase u trajnim objektima nudi mnoge prednosti u usporedbi s drugim sustavima. No, zbog relativno male gustoće kukuruza što se odnosi i na bale, te visokih kapitalnih troškova za izgradnju novih skladišta, trajna skladišta su ekonomski

⁴² <https://www.becoolproject.eu/2018/10/22/recovering-maize-cob-converting-untapped-biomass-resource-into-valuable-feed-stock/>

⁴³ <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=15215>

⁴⁴ https://www.vermeer.com/NA/en/N/equipment/cob_harvester

⁴⁵ Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster Corn Stover Storage Methods <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>



SLIKA 18:
Skladištenje bala kukuruzne slame na otvorenom u Španjolskoj

neisplativa. Ako korisnik već ima trajna skladišta, onda ih može na isplativi način koristiti za kukuruznu slamu.

Skladišta na otvorenom mogu se koristiti za privremeno skladištenje kukuruza kada gornji sloj biomase služi kao pokrivač (Slika 18). Također, može se koristiti i kao glavno skladište u nekim regijama, ali je to potrebno učiniti vrlo oprezno zbog gubitaka suhe tvari biomase.

Anaerobno skladištenje ili siliranje je široko rasprostranjena metoda skladištenja mokrih sirovina u stočarskoj industriji. Anaerobno skladištenje je ekonomski isplativo za sirovine s visokim udjelom vlage, posebno za skladištenje bala u ranoj sezoni ili za hitno skladištenje tijekom ekstremno vlažnih sezona⁴⁵.

Natkriveno skladište kukuruzne slame nudi optimalnu ravnotežu cijene i kvalitete čuvanja. Agrovlakno se može koristiti kao materijal za ceradu jer pruža zaštitu

od kiše i snijega. Omogućuje i prolazak zraka kroz nje, što sprječava nastanak gljivica i plijesni. Agrovlakno se koristi za sušenje drvene sječke, te se može koristiti više od 5 godina⁴⁶. Skladišni prostori za slamu kukuruza moraju biti uređeni u skladu s Propisima o protupožarnoj sigurnosti. Na primjer, u Ukrajini⁴⁷ površina jedne hrpe bala slame mora biti manja od 500 m², a usitnjene slame mora biti manja od 300 m². Dopusšteno je odlaganje bala (usitnjene slame) u dvostruke hrpe s razmakom ne manjim od 6 m između hrpa u paru i najmanje 30 m između susjednih dvostrukih hrpa.

POVEĆANJE GUSTOĆE OSTATAKA KUKURUZA

Daljnjom preradom nusproizvoda kukuruza u brikete i pelete povećava se dodana vrijednost biomase. Briketi od biomase su prešani materijali cilindričnog, pravo-

⁴⁵ Matt Darr, Ajay Shah, Kevin Peyton, Keith Webster Corn Stover Storage Methods <https://store.extension.iastate.edu/product/14077>

⁴⁶ <http://zavod-kobzarenko.derevo.ua/catalog/details/6019>

⁴⁷ <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0313-07>

kutnog ili bilo kojeg drugog oblika poprečne dimenzije ne manje od 25 mm i duljine 100-400 mm. Tipični promjer briketa je 60-75 mm, a njegova duljina obično je unutar pet dužina promjera. Ne postoje standardne veličine za ovaj proizvod. Briketi mogu biti vrlo različitih oblika, ali u cjelini se razlikuju tri vrste: NESTRO, RUF i Pini&Kay (nazivi se temelje na nazivima tvrtki koje proizvode poznate preše za proizvodnju ovih vrsta briketa). Tipičan proces proizvodnje briketa od biomase uključuje sedam faza: primanje sirovine, usitnjavanje, kalibriranje, sušenje, prešanje sirovine u brikete (briketiranje), hlađenje i pakiranje briketa. Dobivanje čvrstog briketa iz usitnjene biljne mase osiguravaju fizička i mehanička svojstva materijala i uvjete samog procesa briketiranja. Pritom se mora postići određena razina kvalitete. To su gustoća briketa ($0.8-1.3 \text{ t/m}^3$), sadržaj vlage, dimenzije (promjer i duljina) i pravilan oblik. Gustoća je glavni čimbenik koji određuje mehaničku čvrstoću i vodootpornost briketa.

Važna prednost briketa kao goriva je konstantna temperatura tijekom višesatnog izgaranja. Briketi od biomase mogu se koristiti u kućnim kotlovima i malim kotlovima na kruta goriva s ručnim punjenjem (do približno 100-150 kW), koji su često već dostupni u kućanstvima, državnim institucijama ili društvenim ustanovama. Na tržištu postoje i automatizirani kotlovi (do cca 240 kW) namijenjeni za brikete od biomase. Briketi manje gustoće (koji su "mekši" zbog prešanja vlažnije sirovine) mogu se koristiti u velikim kotlovima s punjenjem vijkom. Očekuje se da će vijak izrađen od čvrstog metala moći drobiti brikete i osigurati njihovo nesmetano dopremanje u peč.

Poljoprivredna biomasa se peletizira kako bi se povećala logistička učinkovitost i proširila mogućnost njenog korištenja za energiju. Peleti od ostataka kukuruza spadaju u nedrvenaste pelete, a tehnički proces njihove proizvodnje sličan je briketiranju biomase s obzirom na karakteristike sirovine. Nedrveni peleti su zgusnuto biogorivo napravljeno od mljevene biomase sa ili bez dodataka. Imaju oblik cilindra promjera $< 25 \text{ mm}$, različite duljine (obično 3.15 do 40 mm), s lomljenim krajevima dobivenim mehaničkim sabijanjem⁴⁸. Glavne karakteristike koje utječu na proces proizvodnje određene granulacije su početno stanje biomase poput veličine čestica, smanjenja početnog volumena, prisutnosti nečistoća i sadržaja vlage. Prilikom prerade žetvenih ostataka, ljuski suncokreta, trske itd., moguće je koristiti tipičnu shemu za proizvodnju peleta od slame.

Da sumiriziramo, mnoge tehnologije koje se temelje na različitim strojevima se mogu primijeniti za žetvu nusproizvoda kukuruza. Za žetvu velikih razmjera razumno je koristiti posebne strojeve visoke produktivnosti, uključujući stroj za usitnjavanje stabljika, balirke, prikolice itd. No, za žetvu malih razmjera to se može izvesti na različite načine ovisno o postojećoj opremi. Važno je smanjiti onečišćenje biomase tlom i spriječiti visok udio vlage u nusproizvodima kukuruza. Glavni elementi troškova natkrivenog skladištenja kukuruza su troškovi zakupnine zemljišta, troškovi pripreme tla, materijala za natkrivanje, troškovi utovara/istovara, troškovi zaštite i troškovi povezani s gubicima sirovine zbog gubitka suhe tvari biomase. Prerada kukuruzne slame u brikete i pelete povećava energetska gustoća biomase, što je posebno važno kod transporta biomase na velike udaljenosti.

⁴⁸ ISO 17225-6:2014 Solid biofuels – Fuel specifications and classes – Part 6: Graded non-woody pellets

BPROIZVODNJA TOPLINE IZ OSTATAKA KUKURUZA

PROIZVODNJA TOPLINE IZ SLAME KUKURUZA

Ostaci kukuruza kao i druge vrste žetvenih ostataka koriste se za grijanje u ruralnim područjima s hladnom zimom, posebice na područjima s nedostatkom šuma. Na primjer, u južnim selima regije Odesa u Ukrajini već desetljećima lokalni stanovnici iznajmljuju dijelove polja kukuruza od poljoprivrednih poduzeća ili poljoprivrednika. Nekada su mještani ručno vršili žetvu kukuruza, a danas koriste mehanizaciju uključujući balirke za kukuruz. Skupljaju ostatke kukuruza i odlažu ih u blizini svojih kuća (Slika 19). U hladnom razdoblju mještani ostatke kukuruza koriste kao stočnu hranu i biomasu za grijanje. Slamu kukuruza pale u tradicionalnim pećima, čija se upotreba posljednjih godina smanjuje.

Sjeckana slama kukuruza je zahtjevna biomasa za korištenje u kućanstvima zbog svoje male gustoće. Također, rukovanje velikim balama može predstavljati problem. U ovom slučaju, proizvodnja briketa i peleta od takve biomase može biti prihvatljiva opcija za moderne kotlove. Za sada u Ukrajini i Europi nije pokrenuta široka proizvodnja čvrstih biogoriva iz ostataka kukuruza. Postoji samo nekoliko slučajeva generatora topline na bale kukuruzne slame koji služe za grijanje i sušenje zrna. Glavni razlog tome je problem sa žetvom biomase za vrijeme kišnog vremena te njezinim onečišćenjem tla.

Kao što je gore spomenuto, ostatak kukuruza može se smatrati boljom biomasom za izgaranje u usporedbi sa slamom žitarica, ali karakteristike goriva agrobiomase ovise o mnogim lokalnim uvjetima i žetvenoj praksi.



SLIKA 19:
Kvadratne bale kukuruzne slame u selu Krynychne.

U svakom slučaju, kotlovi moraju odgovarati uvjetima za sagorijevanje ostataka kukuruza. To može biti kao poboljšani kotao za sagorijevanje drvene biomase kao i posebno dizajnirani kotao. Općenito, kotlovi koji rade na slamu žitarica mogu se smatrati prikladnima i za slamu kukuruza, no pod uvjetom da ima prikladno nizak sadržaj vlage. Također, mogu se koristiti otopine za grijanje za izgaranje mješavine biomase, kao npr. drva s ostacima kukuruza. U znanstvenim člancima^{49, 50} opisani su testovi sagorijevanja malih bala kukuruza u kotlu od 146 kW s dvije komore za drva bez ikakvih preinaka i sagorijevanje okruglih bala kukuruza u kotlu na biomasu Farm 2000 nazivne izlazne snage 176 kW. Oba kotla su pokazala dobar potencijal za proizvodnju topline korištenjem bala kukuruza, ali bi se trebali poboljšati radi podizanja učinkovitosti izgaranja. Tako su u malom kotlu od 146 kW bale kukuruza davale u prosjeku 7.5 % pepela, što je uključivalo oko 2 % nesaгорjelih ostataka, dok je drvo proizvodilo svega 1.7 % pepela. Emisije dimnih plinova u prosjeku su iznosile 1324 mg/m³ CO i 99.1 Nox za slamu kukuruza (118 mg/m³ CO i 50.6 NOx za drvo). Ukupna učinkovitost prijenosa topline za slamu kukuruza bila je niža nego za drvo (57 % prema 77 %). U kotlu s loženjem na biomasu, prosječne emisije iz kukuruzne slame bile su 2725 mg/m³ CO, 9.8 mg/m³ NOx i 2.1 mg/m³ SO₂, koje su bile niže u odnosu na emisije NOx i SO₂ i veće u odnosu na emisije CO kod slame pšenice (CO 2210 mg/m³, NOx 40.4 mg/m³ i SO₂ 3.7 mg/m³).

Treba napomenuti da su oba kotla koristila sustave izgaranja s fiksnom rešetkom, koji često pokazuju nisku učinkovitost i visoku emisiju neizgorjelih onečišćujućih tvari pri izgaranju agrobiomase s visokim udjelom pepela. Sustavi s pokretnim rešetkama mogu postići veću brzinu i učinkovitost izgaranja u usporedbi s fiksnim rešetkama, jer se kruto gorivo kreće preko rešetke od ulaznog dijela do odjeljka za ispuštanje pepela i to omogućuje bolje miješanje zraka i goriva te olakšava distribuciju materijala koji tada brže gori⁵¹.

Interes za korištenje kukuruzne slame za grijanje postoji na područjima koja namjeravaju postupno izbaciti

ugljen kao gorivo za grijanje, te imaju veliki potencijal kukuruza. U Grčkoj je gradska poduzeće za daljinsko grijanje Amyntaio (DETEPA) u regiji Zapadna Makedonija u jesen 2020. otvorilo novu toplanu na biomasu (2 x 15 MW). Ta je toplana zamijenila staru elektranu koja je koristila lignit. U svojoj prvoj godini, tvornica se više oslanjala na sirovine biomase koje su se mogle nabaviti od etabliranih proizvođača (drvena sječka i peleti suncokretove ljuske), ali DETEPA ima veliki interes za razvoj lokalnih lanaca opskrbe agrobiomasom, s ciljem nabavke oko 5.000 tona kukuruzne slame i rezidbe vinograda u ogrjevnoj sezoni 2021. - 2022.⁵² U Kini postoji ogroman potencijal poljoprivrednih ostataka uključujući i kukuruznu slamu. Tvrtka Great Resources razvila je različite projekte za korištenje kukuruzne slame, od postrojenja za sušenje zrna koja koriste brikete od kukuruzne slame do višegeneracijskih postrojenja koja proizvode hlađenje, toplinu, paru, električnu energiju i gnojivo od kukuruzne slame⁵³.

PROIZVODNJA TOPLINE IZ KLIPOVA KUKURUZA

Na prvi pogled, svojstva klipova kukuruza kao goriva čine se prilično obećavajućim zbog nižeg sadržaja pepela i dušika u usporedbi s mnogim drugim gorivima dobivenim iz agrobiomase. Glavni izazov u izgaranju klipa kukuruza je visok sadržaj kalija u gorivu, koji snižava temperaturu taljenja pepela. Na rešetki peći mogu se formirati rastaljeni dijelovi koji ometaju prolaz zraka. Osim toga, naslage pepela na površinama za izmjenu topline djeluju kao izolatori i mogu dovesti do značajnih gubitaka učinkovitosti zbog smanjenog prijenosa topline. Konačno, klipovi kukuruza obično sadržavaju visok udio klora koji u kombinaciji s kalijem i drugim spojevima može dovesti do stvaranja korozivnih spojeva.

U znanstvenom radu²² su opisani rezultati izgaranja klipa kukuruza u laboratorijskom reaktoru i pilot postrojenju za izgaranje biomase na rešetku u Austriji. Gustoća energije klipova kukuruza iznosi 518 kWh/m³ (oko 55 % energetske gustoće drvene sječke s usporedivim

⁴⁹ R.Morissette, P.Savoie, J.Villeneuve Combustion of Corn Stover Bales in a Small 146-kW Boiler // *Energies*, 2011, 4. – 1102-1111 p.

⁵⁰ R.Morissette, P. Savoie, J. Villeneuve. Corn Stover and Wheat Straw Combustion in a 176-kW Boiler Adapted for Round Bales // *Energies*, 2013, 6. – 5760-5774 p.

⁵¹ https://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/10/AgroBioHeat_D4.2_agrobiomass-fuels-and-utilization-systems_v1.0.pdf

⁵² www.ot.gr/2021/10/05/english-edition/kozani-green-heating-from-corn-and-vine-residues/

⁵³ Hong Hao Unlock the huge potential of agro residue. Presentation. 9.12.2021

<https://www.worldbioenergy.org/news/574/50/WBA-Webinar-1-Agricultural-residues-to-energy/>

sadržajem vlage). Zbog većeg sadržaja dušika u klipu kukuruza u usporedbi s kemijski neobrađenom drvnom sječkom za očekivati su povećane emisije NOx. Tijekom probnih ispitivanja postrojenje za izgaranje radilo je na 70 do 85% svog nazivnog kapaciteta kotla (350 kW). Uočeno je stvaranje malih komadića troske u pepelu na rešetki, što je većinom posljedica stvaranja silikata obogaćenih kalijem i natrijem pri temperaturama taljenja od oko 1050 °C. Što se tiče emisija plinova, možemo zaključiti da se s emisijama CO i organskog plinovitog ugljika od prosječnih 15.6 i 1.3 mg/Nm³ (suhi dimni plin, 13 vol% O₂) može postići vrlo dobro izgaranje plinske faze. Prosječna emisija NOx iznosila je 247 mg/Nm³, no dodatno smanjenje emisija NOx od oko 30 % moglo bi se postići optimiziranom primjenom primarnih mjera. Kao što se očekivalo iz evaluacije mokrih kemijskih analiza goriva, prepoznate su povišene emisije HCl i SOx koje iznose u prosjeku 34 mg/Nm³ odnosno 30 mg/Nm³. U ukupnoj emisiji čestica (nakon prolaska multiciklonom) jasno su dominirale emisije finih čestica, koje su u prosjeku iznosile 91 mg/Nm³. Posljedično, posebno za primjene većih razmjera, potrebna je ugradnja vrećastog filtera ili elektrostatskog percipitatora (ESP-a) za kontrolu emisije finih čestica. Analize ciklonskog i pepela na rešetki pokazale su da bi se ciklus biljnih hranjivih tvari (osim dušika) mogao gotovo zatvoriti recikliranjem, odnosno povratom pepela s rešetke ili mješavine pepela s rešetke i ciklonskog letećeg pepela nazad na kukuruzna polja.

Potencijalni utjecaj visokog udjela kalija u klipu kukuruza dokazan je nizom ispitivanja provedenih u sklopu projekta AgroBioHeat²³. Testirana su dva najsuvremenija sustava izgaranja (kotao s pokretnom rešetkom u kombinaciji s ESP-om za kontrolu čestica, kotao s inovativnim konceptom ekstremnog zračnog odvajanja), pogodna za stambene primjene i razne vrste goriva od agrobiomase (koštice masline, peleti od ljuske suncokreta, šaš, topola, agropeleti i klipovi kukuruza). Testirani klipovi kukuruza pokazali su posebno visok udio kalija, čak više od 1 % težine suhe osnove što je rezultiralo iznimno visokim emisijama čestica u odnosu na druga testirana goriva. Isto tako, to je rezultiralo i povećanom temperaturom dimnih plinova, te stoga i gubicima učinkovitosti. Osobitosti izgaranja klipa kukuruza mogu se riješiti u primjenama srednje veličine, korištenjem odgovarajućih tehnologija i znanja. Francuski proizvođač kotlova Compteur od 2012. razvija nekoliko takvih kotlova za klipove kukuruza. Ključne značajke takvih sustava uključuju korištenje vodeno hladjenih rešetki koje održavaju temperaturu ispod 850 °C, odgovarajući dizajn i konstrukciju komore za izgaranje i površine izmjenjivača topline kako bi se temperatura dimnih plinova na ulazu u cjevaste ploče snizila ispod 650 °C. Nadalje, nužno je korištenje odgovarajućih sustava za čišćenje dimnih plinova kako bi se izbjeglo ispuštanje sitnih čestica u atmosferu⁵⁴. Kotlovi za klipove kukuruza Compteur koriste se u poduzećima za preradu žitarica, ali i u toplanama.

ECO₂WACKEN DALJINSKO GRIJANJE U STRASBURGU⁵⁵

Od 2016. godine nekoliko ključnih zgrada u četvrti Wacken u Strasburgu opskrbljuje se toplinom iz kotlovnice koja sadrži dva Compteur kotla. Jedan je kotao na drva od 3.2 MW, a drugi na klipove kukuruza od 2 MW. Mreža Eco₂Wacken isporučuje 30 GWh topline godišnje i koristi 8.000 t šumske sječke i 3.000 t klipa kukuruza godišnje, uz prosječnu učinkovitost od 87 %. Goriva se dostavljaju kamionima i istovaruju u dva odvojena područja. Skladi-

šte za drva je kapaciteta 300 m³, što je dovoljno za četiri smjene, dok je skladište za klip veličine 180 m³ silosa, čime se osigurava dva dana rada. Pepeo od izgaranja klipova kukuruza bogat je kalijem i reciklira se natrag na farme za gnojidbu. Vrećasti filteri se koriste za održavanje emisije sitnih čestica na vrlo niskim razinama (ispod 10 mg/Nm³). Pohranu osiguravaju dva plinska kotla snage 6 MW, dok spremnik tople vode od 95 m³ pruža mogućnost skladištenja topline. Računa se da se kroz rad ovog sustava daljinskog grijanja godišnje uštedi više od 7.000 t CO₂.

⁵⁴ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51630/compteur-r-confirme-son-expertise-en-combustion-des-agrocombustibles-solides/>

⁵⁵ <https://www.bioenergie-promotion.fr/51570/bois-rafle-de-mais-pour-la-chaufferie-eco2wacken-de-strasbourg/>

OSTACI KUKURUZA ZA PROIZVODNJU ENERGIJE

Ostatke kukuruza mogu koristiti kogeneracijska postrojenja i elektrane koje koriste slamu kao gorivo. U nekim slučajevima ostaci kukuruza mogu se koristiti kao dodatna biomasa za zajedničko loženje s drvima. Tipična elektrana na biomasu koristi izravno izgaranje za sagorijevanje biomase u kotlu za proizvodnju pare pod visokim tlakom, koja tada pokreće turbinu i proizvodi električnu energiju. CHP postrojenje dodatno hvata toplinu i tako osigurava toplinu i energiju.

DP CleanTech razvio je mnoge projekte elektrana koje koriste ostatke kukuruza kao gorivo. Tvrtka je 2007. godine isporučila naprednu elektranu na slamu Liaoyuan s kapacitetom od 30 MW u kineskoj provinciji Jilin. Elektrana koristi gorivo lokalnih izvora uglavnom iz poljoprivrednih ostataka poput kukuruzne slame. Kotao na slamu je dizajniran za rukovanje tvrdim gorivima kao što je drvena sječka, koja se može puniti u kotao preko pomoćnog silosa i doprinosi do 35 % ukupnog unosa goriva. Postrojenje troši više od 160.000 tona slame godišnje i postiže 7800 h godišnje. Parni kotao na slamu radi s parom na 92 bara i 540 °C, što rezultira neto ukupnom učinkovitošću postrojenja od više od 32 % i učinkovitosti kotla od preko 93 %. Slama se uvodi u kotao kroz ložionicu i zatim se spaljuje na vodom hlađenoj vibrirajućoj rešetki u pažljivo kontroliranim uvjetima gdje vibrirajući pokreti reguliraju stupnjeve izgaranja⁵⁶.

Elektrana na biomasu Miajadas od 15 MW u Španjolskoj (Slike 20 i 21), koja je u funkciji od 2010. godišnje troši 110.000 tona biljne (slama žitarica i kukuruza) i drvene (obrezivanje i šumski otpad) biomase. Razvijena

je u sklopu R&D projekta zajedno s tvrtkama i tehnološkim centrima u Španjolskoj, Finskoj i Danskoj uz potporu 7. okvirnog programa Europske unije za potporu istraživanju. Njome upravlja Acciona Energia. Prosječna godišnja proizvodnja elektrane je 128 GWh, što je ekvivalent potražnji električne energije u 40.000 prosječnih kućanstava. Izbjegnuto je 123 000 tona CO₂ godišnje⁵⁷. Elektrana koristi parni kotao s vibrirajućom rešetkom i kapacitetom pare od 71 t/h, Rankineov ciklus bez regeneracije i sustav dvostrukog punjenja za bale i sječku⁵⁸.

Danska tvrtka Babcock & Wilcox Vølund isporučila je tehnološko rješenje energetske postrojenja na biomasu u tvornici papira Bulleh Shah Packaging Limited u Pakistanu⁶⁰. Postrojenje može iskoristiti nekoliko različitih poljoprivrednih ostataka (pšeničnu slamu, stabljike kukuruza, stabljike riže, grančice pamuka i dr.) domaćih poljoprivrednika za proizvodnju pare s protokom od 150 t/h. Nominalni kapacitet goriva je 37.7 t/h. Kotao ima B&W Vølund vodeno hlađenu vibrirajuću rešetku za učinkovito sagorijevanje biomase. Pepeo proizveden iz ovog kotla nudi se besplatno, a može se koristiti kao gnojivo za usjeve u vrijeme uzgoja, u procesu izrade opeke, te kao alternativa pijesku prilikom polaganja pločica za podove⁶¹.

Više informacija o toplinskim i elektranama na slamu možete pronaći u drugom izdanju AgroBioHeat vodiča «Od slame do energije» (eng. «Straw to Energy. Technologies, policy and innovation in Denmark. Second edition») (http://agrobioheat.eu/wp-content/uploads/2020/11/AgroBioHeat_D7.6_Straw_to_energy_EN.pdf).

⁵⁶ <https://www.dpcleantech.com/waste-and-biomass-clean-energy-technologies/combustion-technology/dp-wcv-grate/download/994/30/22>

⁵⁷ https://www.acciona.com/projects/miajadas-biomass-plant/?_adin=01010174103

⁵⁸ http://ghesa.com/en/portfolio_page/miajadas/

⁵⁹ https://www.acciona-energia.com/es/areas-de-actividad/?_adin=0744759730

⁶⁰ <https://www.babcock.com/-/media/documents/case-profiles/renewables/pch201-130-packages.ashx?la=ru-ru&hash=-F11E957E430907C7A937EE06E6AA6FAA852EB0A2>

⁶¹ <https://www.packages.com.pk/wp-content/uploads/2020/09/Packages-Group-Sustainability-Report-2019.pdf>



SLIKA 20:
Miajadas 15 MW postrojenje na biomasu



SLIKA 21:
Bale ostataka kukuruza u skladištu elektrane Miajadas⁵⁹

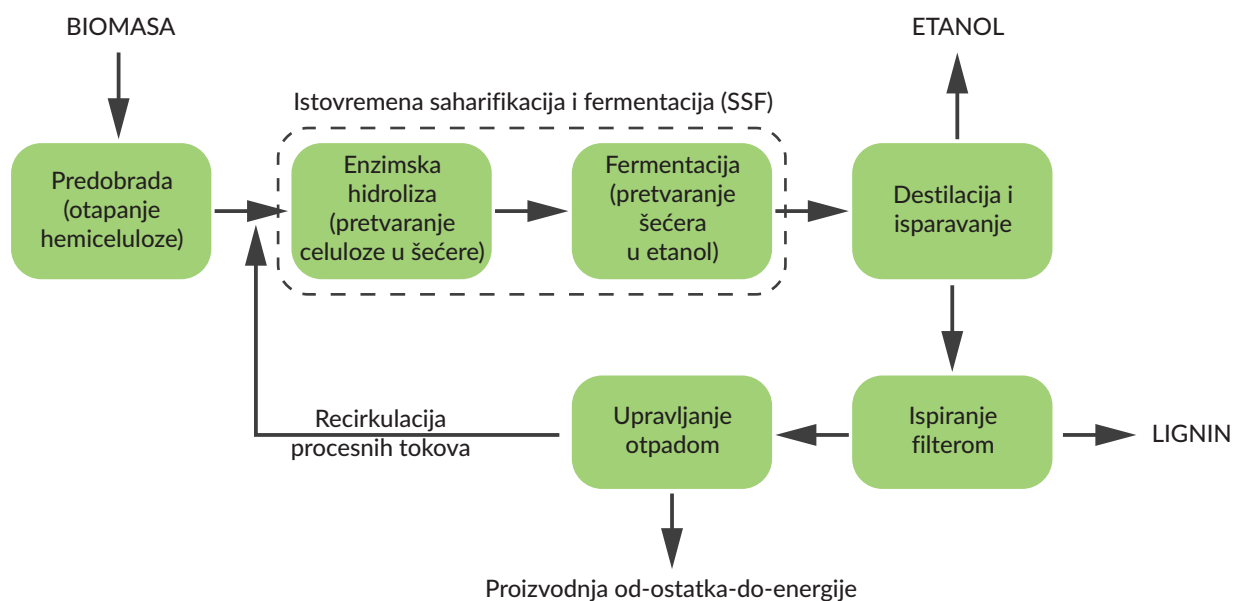
OSTACI KUKURUZA ZA PROIZVODNJU BIOETANOLA

Kukuruz igra ključnu ulogu kao sirovina za proizvodnju etanola. Prema izvješćima Europske udruge za obnovljivi etanol (ePURE), europska industrija obnovljivog etanola konstantno raste. Postavljeni proizvodni kapacitet (EU27 + UK) u 2020. iznosio je 9.992 milijuna litara, dok je 2019. bio 9.893 milijuna litara. Članovi ePURE-a su za tu svrhu 2020. godine iskoristili 6.67 milijuna tona kukuruza, što je 49.5 % ukupne količine proizvedenog bioetanola (odnosno 6.56 milijuna tona ili 48.6 % u 2019.), što pokazuje važnost kukuruza u proizvodnji bioetanola prve generacije u EU⁶².

Očekuje se da bi ostaci kukuruza mogli biti važna sirovina za bioetanol druge generacije, koji je napredno biogorivo iz lignocelulozne biomase. Doprinos naprednih biogoriva i bioplina proizvedenih iz sirovina navedenih u dijelu A Priloga IX Direktive

RED II kao udio u finalnoj potrošnji energije u prometnom sektoru bit će najmanje 0.2 % u 2022., najmanje 1 % u 2025., te najmanje 3.5 % u 2030.

Proizvodnja bioetanola iz ostataka kukuruza zahtijeva fazu predobrade za uništavanje lignocelulozne strukture, što olakšava pristup enzima celuloznim lancima, te usmjerava korištenje njihovih lignoceluloznih frakcija. Tipična shema proizvodnje bioetanola iz lignocelulozne sirovine prikazana je na Slici 22. Iz jedne tone suhog kukuruza potencijalni prinos etanola iznosi 428 litara. Prema podacima DuPont Nevada Site Cellulosic Ethanol Facility-a, 283.5 l bioetanola može se proizvesti iz 1 t ubranog kukuruza (Slika 15). Također, kukuruz s polja mogao bi se koristiti za proizvodnju prve generacije bioetanola. Ukupno se izgaranjem ostataka i biogoriva s hektara kukuruza može dobiti 140.8 GJ⁶³.



SLIKA 22:

Proces proizvodnje bioetanola iz lignocelulozne biomase⁶⁴.

⁶² <https://www.epure.org/wp-content/uploads/2021/09/210823-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2020-web.pdf>

⁶³ *Second-Generation Biofuel Markets: State of Play, Trade and Developing Country Perspectives*. United Nations conference on trade and development – 69 p.

⁶⁴ M. N. A. M. Yusoff, N. W. M. Zulkifli, B. M. Masum and H. H. Masjuki *Feasibility of bioethanol and biobutanol as transportation fuel in spark-ignition engine: a review*. RSC Adv., 2015, 5, 100184–100211.

Samo mali broj postrojenja za proizvodnju etanola iz celuloznih materijala uspješno je radio diljem svijeta do kraja 2020. godine⁶⁵. Aktivnosti usmjerene na lansiranje lignoceluloznog bioetanola na tržište nedavno su se odvijale uglavnom u SAD-u i Brazilu⁶⁶. Također, pokrenuta su postrojenja druge generacije za bioetanol u EU i Kini, ali samo nekoliko njih su komercijalna postrojenja koja mogu proizvoditi bioetanol iz ostataka kukuruza.

U SAD-u je ukupni instalirani proizvodni kapacitet bioetanola 2020. iznosio 66.000 milijuna l godišnje. Prošle je godine proizvedeno 52.239 milijuna l⁶⁷. 4.1 % američkih proizvodnih kapaciteta bioetanola može koristiti celuloznu biomasu kao sirovinu, dok 0.4 % radi isključivo na celuloznoj biomasi. Neki od njih proizvode bioetanol iz ostataka kukuruza. Trenutno najveća postrojenja su VERBIO North America Corp u Nevadi s proizvodnim kapacitetom od 113.5 milijuna l godišnje⁶⁸. Tu je tvrtku kupio DuPont. Nadalje, Project LIBERTY u Emmetsburgu proizvodi 75.7 milijuna l godišnje, Seaboard Energy Kansas u Hugotonu 94.6 milijuna l godišnje.

U Brazilu, bagas je glavna sirovina za celulozni bioetanol. Očekuje se da će se 178 tisuća tona ove biomase iskoristiti za proizvodnju 32 milijuna l u 2020.⁶⁹. Postrojenja nisu postigla puni kapacitet zbog operativnih/mehaničkih izazova. U Kini je 2012. Longlive Bio-technology Co. Ltd pokrenuo pogon za celulozni etanol s kapacitetom od 60.000 tona godišnje u Shandongu⁷⁰.

Predviđanja USDA-e (Ministarstvo poljoprivrede SAD-a) su 25 milijuna l proizvodnje celuloznog etanola u EU 2020.⁷¹. Jedan od najvećih svjetskih pogona za proizvodnju celuloznog etanola, tvornica Beta Renewables službeno je otvorena u Crescentinu (Italija)

2013., ali je od 2017. zatvorena zbog restrukturiranja matične tvrtke Mossi & Ghisolfi. Postrojenje je imalo godišnji kapacitet od 40.000 t etanola proizvedenog od pšenične slame, rižine slame i divovske trske (Arundo donax)⁷². Tvornicu je kupila Eni-jeva kemijska podružnica Versalis u studenom 2018. Novi operater planirao je pokrenuti postrojenje 2020. godine.

Projektom COMETHA financiranim iz FP7 programa EU od 2014. do 2018. planirana je izgradnja i rad integriranog predkomercijalnog industrijskog pogona za godišnju proizvodnju 80.000 t bioetanola druge generacije od lignocelulozne biomase u Porto Margheri (Italija)⁷³. Projekt se bavio razvojem održivog lanca opskrbe biomasom koji se temeljio na 360.000 tona lignocelulozne biomase godišnje dobivene iz regije Veneto, kao što su namjenski višegodišnji usjevi Arundo donax (obični trst) i poljoprivredni ostaci (kukuruz, najprikladnija sirovina za proizvodnju bioetanola u razmatranom zemljopisnom području).

2021. švicarska tvrtka Clariant u jugozapadnoj Rumunjskoj dovršila je prvu komercijalnu tvornicu za proizvodnju celuloznog etanola u Europi. Inovativno rješenje koje je tvrtka razvila je tehnologija sunliquid® koja pretvara poljoprivredne ostatke poput slame žitarica, kukuruzne slame, rižine slame ili slame šećerne trske u celulozni etanol. Tvornica sunliquid® u Rumunjskoj će proizvoditi 50.000 tona celuloznog etanola iz 250.000 tona održive pšenične slame iz lokalnih izvora. Više od 400 zelenih radnih mjesta trajno će se otvoriti izgradnjom tvornice u pretežno ruralnom području, od čega 100 u samoj tvornici i 300 u susjednim područjima poput lanca opskrbe sirovinama. Osim toga, projekti celuloznog etanola s Clariant-ovom tehnologijom⁷⁴ također su u tijeku u tri druge europske zemlje - Slovačkoj, Poljskoj i Bugarskoj

⁶⁵ Renewables 2021 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

⁶⁶ Technical options for retrofitting industries with bioenergy. BioFitHandbook <https://www.biofit-h2020.eu/publications-reports/BioFitHandbook-2020-03-18.pdf>

⁶⁷ Essential energy. 2021. Ethanol industry outlook. Renewable fuels association report. https://ethanolrfa.org/wp-content/uploads/2021/02/RFA_Outlook_2021_fin_low.pdf

⁶⁸ Million gallons per year

⁶⁹ Biofuels Annual. Brazil. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_08-03-2020

⁷⁰ <https://www.etipbioenergy.eu/value-chains/conversion-technologies/advanced-technologies/sugar-to-alcohols>

⁷¹ Biofuels Annual. European Union. https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Biofuels%20Annual_The%20Hague_European%20Union_06-29-2020

⁷² Monica Padella, Adrian O'Connell, Matteo Prussi. What is still Limiting the Deployment of Cellulosic Ethanol? Analysis of the Current Status of the Sector Appl. Sci. 2019, 9, 4523; doi:10.3390/app9214523

⁷³ <https://cordis.europa.eu/project/id/322406>

⁷⁴ <https://www.euractiv.com/section/alternative-renewable-fuels/opinion/making-european-sustainable-mobility-a-reality-with-cellulosic-ethanol/>

OSTACI KUKURUZA ZA PROIZVODNJU BIOPLINA

Silaža kukuruza jedna je od najpopularnijih sirovina koja se koristi u poljoprivrednim bioplinskim postrojenjima. Međutim, zbog rasta cijena silaže kukuruza, mnogi operateri bioplinskih postrojenja počeli su tražiti alternativne sirovine koje se mogu lako nabaviti, koje su jeftine i imaju dobru produktivnost metana⁷⁵. Ostaci kukuruza su jedna od tih sirovina.

Jedna od prednosti korištenja ostataka kukuruza za anaerobnu digestiju je da na sam proces ne utječe njihov visok sadržaj vlage nakon žetve, no to može biti

problematično za procese izravnog izgaranja. Fermentirani supstrat iz bioplinskog postrojenja može se primijeniti kao biognojivo za recirkulaciju hranjivih tvari nazad u poljoprivredno zemljište, zajedno s dijelom ugljika. U usporedbi s kukuruznom silažom, anaerobna digestija kukuruznih ostataka (slame) ima manji bioplinski potencijal (Tablica 3). Također zahtijeva veće vrijeme zadržavanja u usporedbi sa silažom kukuruza, ali se smatra da bi takvu razliku bioplinska postrojenja mogla prihvatiti.

TABLICA 3:

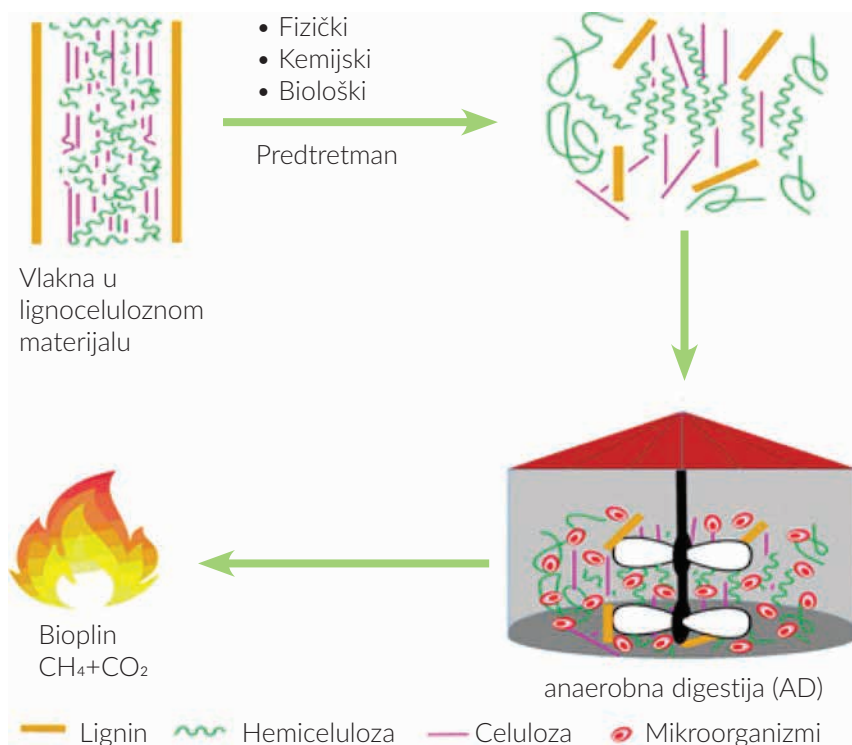
Proizvodnja metana iz ostataka kukuruza⁷⁶ i kukuruzne silaže⁷⁷.

	Suha tvar, % moke težine	Bioplin, l _N /kg hlapljivih krutina	Metan CH ₄ , l _N /kg hlapljivih krutina	Degradirana suha tvar, %
1. Dijelovi ostataka kukuruza				
• Stabljike	25.5 ± 0.8	424.3	233.8	53.9
• Lišće	63.3 ± 0.8	442.9	244.5	57.0
• Ljuske	58.2 ± 0.6	544.4	307.0	70.4
• Klipovi	43.5 ± 0.2	379.8	206.6	51.3
2. Silaža od kukuruza	27.7	673	345	77.9

⁷⁵ Mazurkiewicz, J.; Marczuk, A.; Pochwatka, P.; Kujawa, S. Maize Straw as a Valuable Energetic Material for Biogas Plant Feeding. *Materials* 2019, 12, 3848. <https://doi.org/10.3390/ma12233848>

⁷⁶ Simona Menardo, Gianfranco Airolti, Vincenzo Cacciatore, Paolo Balsari Potential biogas and methane yield of maize stover fractions and evaluation of some possible stover harvest chains, *Biosystems Engineering*, Volume 129, 2015, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.11.010>.

⁷⁷ Bauer, A., Leonhartsberger, C., Bösch, P., Amon, B., Friedl, A., & Amon, T. (2009). Analysis of methane yields from energy crops and agricultural by-products and estimation of energy potential from sustainable crop rotation systems in EU-27. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(2), 153–161. doi:10.1007/s10098-009-0236-1.



SLIKA 23:

Shematski dijagram predobrade lignoceluloznog materijala za proizvodnju bioplina⁸¹

Zbog visokog sadržaja lignoceluloznih kemijskih spojeva u ostacima kukuruza (Tablica 2), potrebno ih je prethodno obraditi mehaničkim, fizičkim, biološkim ili kemijskim uništavanjem prije fermentacije (Slika 23). Ovim procesima se poboljšavaju prinosi bioplina i smanjuje vrijeme zadržavanja supstrata u anaerobnom digestoru. No, zahtijeva dodatnu energiju i troškove. S energetske stajališta, činilo se da je samo kemijska obrada održiva⁷⁸. Analiza sedam kemijskih predtretmana na kukuruzne slame pokazuje da je slama prethodno

obrađena s 3 % H_2O_2 i 8 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$ postigla najveće prinose metana od 216.7 i 206.6 ml CH_4/g hlapivih krutina, a koji iznose 115.4 % i 105.3 % više nego kod neobrađene slame⁷⁹. Ova dva procesa su ekonomski i efektivno bolja od ostalih uspoređenih predtretmana. Također, biološki predtretman je obećavajuć. Kukuruzna slama prethodno obrađena kompozitnim mikrobima proizvela je 131.6 % više ukupnog metana od neobrađenih kontrolnih uzoraka⁸⁰.

⁷⁸ Croce, S., Wei, Q., D'Imporzano, G., Dong, R., & Adani, F. (2016). Anaerobic digestion of straw and corn stover: The effect of biological process optimization and pre-treatment on total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34(8), 1289–1304. doi:10.1016/j.biotechadv.2016.09.004

⁷⁹ Song Z, GaiheYang, Liu X, Yan Z, Yuan Y, et al. (2014) Comparison of Seven Chemical Pretreatments of Corn Straw for Improving Methane Yield by Anaerobic Digestion. *PLoS ONE* 9(4): e93801. doi:10.1371/journal.pone.0093801

⁸⁰ Panpan Li, Chao He, Gang Li, Pan Ding, Mingming Lan, Zan Gao & Youzhou Jiao (2020) Biological pretreatment of corn straw for enhancing degradation efficiency and biogas production, *Bioengineered*, 11:1, 251-260, DOI: 10.1080/21655979.2020.1733733

⁸¹ Amin, F.R., Khalid, H., Zhang, H. et al. Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Expr* 7, 72 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>

2013. u rad je pušteno pilot postrojenje za monodigestiju kukuruzne slame s električnim kapacitetom od 50 kW u Renjiu u Kini⁸². Bioplinско postrojenje se sastoji od 40 m³ kontinuirane hidrolize za predtretman i 2 digestora od 476 m³. U prosincu 2019., AB Energy SPA iz Španjolske, u Milanu je pokrenuo proizvodnju biometana iz poljoprivrednih sirovina, uključujući stabljike kukuruza, s protokom od 606 m³/h. Proizvedeni biometan pušta se u talijansku plinsku mrežu⁸³.

Industrijske bioplinске tehnologije za korištenje ostataka kukuruza i drugih biljnih ostataka kao sirovine se konstantno razvijaju. Jedan takav novi projekt tvrtke EnviTec Biogas (Njemačka) biti će pokrenut u blizini grada Qin Xian u kineskoj provinciji Shaanxi. Nakon dovršetka, četiri digestora bioplinскоg postrojenja pro-

izvodit će oko 37.000 m³ bioplina dnevno iz ostataka s farme kao što su stabljike kukuruza⁸⁴. Trostupanjski postupak nadogradnje membranskog plina, koji je patentirao Evonik, omogućuje pročišćavanje bioplina u biometan uz niske razine gubitka metana⁸⁵. U regiji Khmelnytsky u Ukrajini, tvrtka Teofipol Energy Company gradi bioplinско postrojenje s električnim kapacitetom od 10.5 MW. Postrojenje će koristiti ostatke usjeva, uključujući veliku količinu ostataka kukuruza. Verbio (Njemačka) je najavio puštanje novog anaerobnog digestora u pogon u bivšoj DuPont-ovoj tvornici celuloznog etanola u Nevadi u SAD-u. Pogon će koristiti 100.000 tona kukuruzne slame godišnje za proizvodnju biometana s energetskekvivalentom od 80 milijuna litara benzina⁸⁶.

⁸² Bionova Biogas GmbH. Map with references Semi-aerobic Hydrolysis Facilities in Germany and around the world https://bionova-biogas.de/en/pdf/2014_References_Bionova.pdf

⁸³ Biogas success stories 2020. European Biogas Association. https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2020/11/EBA_catalogue2020_WEB-1.pdf

⁸⁴ Biogas barometer 2020. EurObserv'ER <https://www.eurobserv-er.org/pdf/biogas-barometer-2020/>

⁸⁵ <https://www.bioenergy-news.com/news/construction-underway-on-two-envitec-biogas-projects-in-china/>

⁸⁶ Renewables 2021 Global Status Report. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf

ASPEKTI ODRŽIVOSTI KORIŠTENJA OSTATAKA KUKURUZA

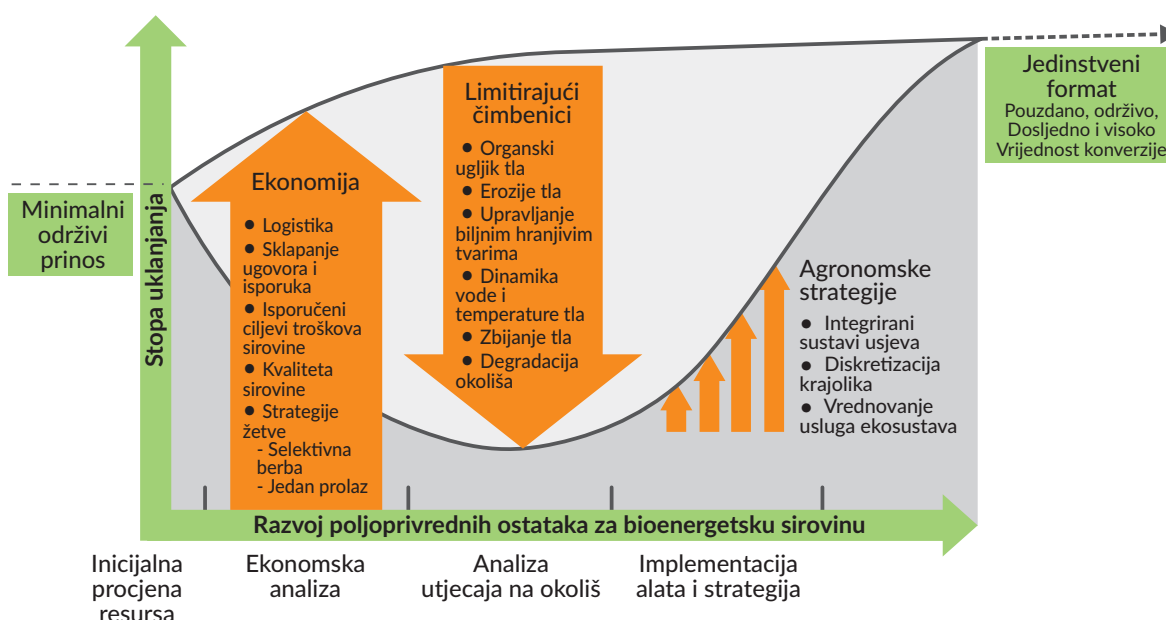
ODRŽIVO UKLANJANJE OSTATAKA KUKURUZA

Neplansko sakupljanje biljnih ostataka može izazvati štetne učinke na funkcioniranje tla, rast biljaka i druge aspekte ekosustava⁸⁷. Smanjenje unosa organskih ostataka u tlo podrazumijeva izravno smanjenje zaliha ugljika, što negativno utječe na biotu tla. No, utjecaji upravljanja biljnim ostacima na emisiju stakleničkih plinova u tlu još uvijek nisu u potpunosti jasni i zahtijevaju dodatno istraživanje. Skupljanje ostataka smanjuje emisije CO₂ i N₂O koje nastaju raspadanjem i nema utjecaja na emisiju CH₄. Međutim, postupnim iscrpljivanjem zaliha ugljika i dušik, povezana sa zamjenom ugljika mineralnim gnojivima, može potaknuti disbalans ugljika i veće emisije N₂O na područjima gdje se sakupljaju ostaci. Reakcija biljaka na upravljanje ostacima usjeva ovisi o lokaciji, a za održivu proizvodnju bioenergije mogu se primi-

jeniti različiti principi upravljanja (npr. očuvanje obrade tla, plodoreda i pokrovnih usjeva, upravljanje hranjivim tvarima i/ili organski ostaci).

Slično, strategija sakupljanja ostataka kukuruza ovisi o uvjetima na lokaciji. Na Slici 24. može se vidjeti konceptualna ilustracija kako se gospodarski pokretači moraju uravnotežiti s ograničavajućim čimbenicima na temelju zaštite tla i ekosustava.

Kako bi se poljoprivrednicima pomoglo da donesu racionalnu odluku, Služba za očuvanje prirodnih resursa američkog Ministarstva poljoprivrede razvila je posebne smjernice za sakupljanje ostataka u nastojanju da spriječi degradaciju tla kao rezultata prekomjerne žetve ostataka kukuruza⁸⁹. U dokumentu je navedeno da održive stope uklanjanja biljnih ostataka za proizvodnju biogoriva ovise o čimbenicima kao



SLIKA 24:

Ovisnost brzine uklanjanja ostatka kukuruza o ekonomskim i ograničavajućim čimbenicima, te agronomskim strategijama⁸⁸. Trake s desne strane ilustriraju različite prakse upravljanja tlom i usjevima koje se mogu implementirati kako bi se osigurao razvoj i dostupnost održivih zaliha sirovina..

⁸⁷ Cherubin Mauricio et al. (2018). Crop residue harvest for bioenergy production and its implications on soil functioning and plant growth: A review. *Scientia Agricola*, v.75, n.3, 55-272. 75. doi:10.1590/1678-992X-2016-0459

⁸⁸ <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2442&context=usdaarsfacpub>

⁸⁹ Susan S. Andrews. White paper. Crop Residue Removal for Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations // USDA-Natural Resource Conservation Service – February 22, 2006.

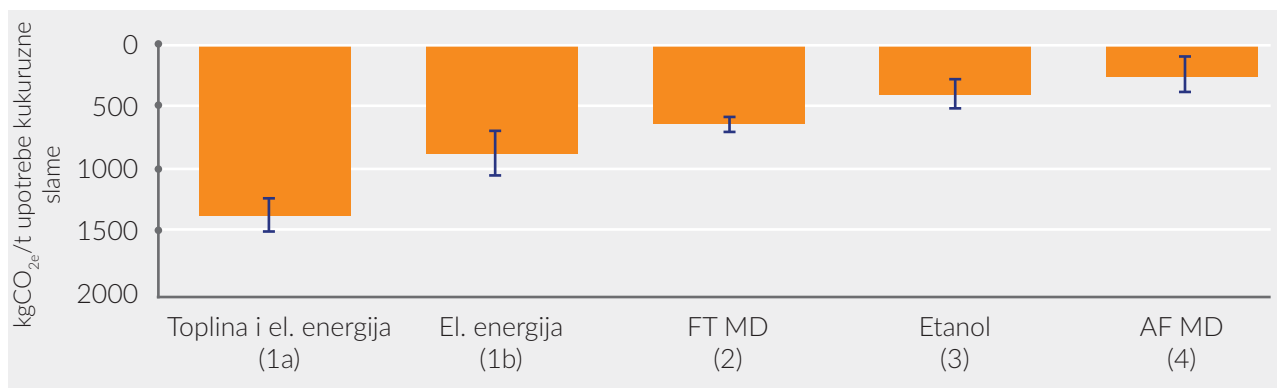
što su upravljanje, prinos i vrsta tla. Alati poput RUSLE, WEQ i Indeks kondicioniranja tla vjerojatno će biti najpraktičniji načini za predviđanje sigurnih stopa uklanjanja.

Stope uklanjanja nisu iste kao postotak pokrivenosti tla: potrebna je odgovarajuća konverzija i ona ovisi o tipu usjeva i regiji. Dok je u područjima s malim nagibima i visokim prinosima moguće vršiti sakupljanje ostataka, u mnogim će područjima količine ostataka potrebne za održavanje kvalitete tla biti veće od trenutne prakse pokrivanja tla. Neke tvrtke osiguravaju održivo uklanjanje ostataka žetve. Na primjer, Pacific Ag⁹⁰ za svakog uzgajivača određuje pravu količinu ostatka za žetvu, polje po polje, kako bi osigurao zadovoljenje potreba za vlagom i zaštitom tla uz optimiziranje učinkovitosti obrade, unosa i nicanja.

EMISIJE STAKLENIČKIH PLINOVA IZ LOGISTIČKOG LANCA OSTATAKA KUKURUZA

Ostaci kukuruza kada se koriste u velikim postrojenjima (≥ 20 MW) trebaju zadovoljavati kriterije europske RED II direktive za smanjenje emisija stakleničkih plinova i održivost bez stakleničkih plinova (npr. kakvoća tla i ugljik u tlu, biološka raznolikost i zalihe ugljika). Održiva procjena kogeneracijskog lanca opskrbe kukuruzom u Rumunjskoj predstavljena je u izvješću istraživačkog projekta EU Smart CHP⁹¹. Ovaj lanac opskrbe procjenjuje se na temelju ukupnih emisijskih vrijednosti za opskrbu biomasom, procesa proizvodnje bio-ulja brzom pirolizom (FPBO) i transporta FPBO od lokacije virtualnog postrojenja do krajnjeg korisnika. U procesu se ne

proizvodi samo navedeno ulje, već i para i električna energija kao dodatni proizvodi. Rezultati pokazuju da vrijednosti smanjenja emisija iz Smart CHP opskrbnog lanca slame kukuruza iznose 95 % za električnu energiju i 96 % za toplinu ako se pretpostavi minimalna udaljenost FPBO transporta od 50 km, a 94 % odnosno 96 % za pretpostavku od 150 km. Ukupne emisije stakleničkih plinova iz opskrbe kukuruznom slamom iznose $2.0 \text{ gCO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$ biomase, uključujući emisije sakupljanja kukuruzne slame od $0.88 \text{ gCO}_{2\text{-eq}}/\text{MJ}$. U SAD-u su, kod električne energije i goriva dobivenih iz slame kukuruza, smanjene emisije stakleničkih plinova za 21-92% u odnosu na ostale izvore. Korist za okoliš je najveća za kogeneraciju u referentnom scenariju za mrežu SAD-a i prirodnog plina ($1.4 \text{ tCO}_{2\text{-eq}}$ po t kukuruzne slame)⁹², što je prikazano na Slici 25. Studija provedena u provinciji Jilin u Kini⁹³ ukazuje na to da korištenje peleta od kukuruzne slame može eliminirati 90.46 % emisija stakleničkih plinova tokom životnog ciklusa u usporedbi sa sagorijevanjem ugljena. Međutim, postoje različiti izazovi povezani s ostacima kukuruza, koji su slični drugim vrstama žetvenih ostataka s polja. Proizvodnja energije iz ostataka kukuruza emitira relativno male emisije stakleničkih plinova, koje se daju izračunati korištenjem odobrene metodologije izračuna smanjenja emisija za određeni lanac vrijednosti. U slučaju krute biomase samo postrojenja koja proizvode električnu energiju, grijanje i hlađenje ili goriva s ukupnim nazivnim toplinskim ulazom jednakim ili većim od 20 MW moraju ispunjavati kriterije održivosti i uštede emisija stakleničkih plinova prema Europskoj direktivi o obnovljivoj energiji (REDII).



SLIKA 25:

Smanjenje emisija stakleničkih plinova iz alternativnog korištenja slame kukuruza u usporedbi s prosjekom u SAD-u gdje: FT je Fischer-Tropsch; MD je srednji destilat; AF je napredna fermentacija⁹².

⁹⁰ <https://pacificag.com/harvesting/>

⁹¹ D5.1 SUSTAINABILITY ASSESSMENT_ BTG_ JUNE 2020 https://www.smartchp.eu/?jet_download=1799

⁹² Trivedi, P., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2015). Environmental and economic tradeoffs of using corn stover for liquid fuels and power production. *Energy & Environmental Science*, 8(5), 1428–1437. doi:10.1039/c5ee00153f

⁹³ Shizhong Song, Pei Liu, Jing Xu, Chinhao Chong, Xianzheng Huang, Linwei Ma, Zheng Li, Weidou Ni, Life cycle assessment and economic evaluation of pellet fuel from corn straw in China: A case study in Jilin Province, *Energy* (2017), doi: 10.1016/j.energy.2017.04.068

PRILOG I: GLAVNE VRSTE STROJEVA ZA SAKUPLJANJE I LOGISTIKU OSTATAKA KUKURUZA I NJIHOVU PRERADU U PELETE/BRIKETE

Više informacija o proizvođačima strojeva i distributerima možete pronaći u online tablici na poveznici ispod:
https://docs.google.com/spreadsheets/d/1o-u1S0B5IXwjQW72b7C_G5kNAwmxE6-l6VcyEd6myog/edit#gid=0

Logo	Kontakt	Opis	Usitnjavanje/ umotavanje	Baliranje	Sakupljanje/ utovar	Prijevoz	Peletiranje/ Briketiranje
	BioG GmbH Weilbolden 18, 4972 Utzenaich Austria +43 (0) 7751/50149-0 office@biog.at https://biog.at	BioChipper koji je razvio BioG, koncept malča s integriranim otkosom omogućuje žetvu poljoprivrednih ostataka kao što su kukuruzna slama, slama uljane repice, slama od žitarica, usjevi i materijali za uređenje okoliša. Radnje usisavanja, sjeckanja i otkosa izvode se u jednom koraku.	●				
	HINIKER COMPANY 58766 240th Street Mankato, MN 56002 USA (507)-625-6621 (800)-433-5620 https://www.hiniker.com	Hiniker 5600 serija mlatilice za vitlanje može značajno smanjiti vrijeme na polju usitnjavanjem i poslagivanjem stabljika u jednom prolazu.	●				
	LOFTNESS COMPANY 650 South Main Street PO Box 337 Hector, MN 55342 USA 320-848-6266 info@loftness.com https://www.loftness.com	Windrowing Shredder najnoviji je primjer Loftnessa koji izazov pretvara u priliku. Nepredvidiva tržišta i potražnja za biomasom pretvaraju ostatke usjeva u središte profita.	●				
	CLAAS https://www.claas-group.com/	Claas je svjetski proizvođač samohodnih skupljača stočne hrane i kombajna. CLAAS je također vrhunski proizvođač traktora, poljoprivrednih balirki i strojeva za zelenu žetvu u svjetskom poljoprivrednom inženjerstvu.		●	●		

Logo	Kontakt	Opis	Usitnjavanje/ umotavanje	Baliranje	Sakupljanje/ utovar	Prijevoz	Peletiranje/ Briketiranje
	Maschinenfabrik Bernard KRONE GmbH & Co. KG Zentrale: Heinrich- Krone-Straße 10 D-48480 Spelle Tel.: +49 (0)5977/935-0 Fax: +49 (0)5977-935- 339 Info.Idm@krone.de https://landmaschinen.krone.de/	Kao stručnjak za stočnu hranu, KRONE proizvodi disk kosilice, okretače, grablje, prikolice za stočnu hranu i prikolice za silažu, balirke za okrugle i četvrtaste bale, kao i samohodne kosilice velikog kapaciteta BiG M i naše BiG X kombajne.		●	●	●	
	Kuhn Group KUHNSAS 4 Impasse des Fabriques BP 50060 F-67706 Saverne CEDEX +33(0)3 88 01 81 00 Fax: +33(0)3 88 01 81 01 https://www.kuhn.com/	Kuhn Group je svjetski proizvođač strojeva za žetvu sijena i stočne hrane. Kuhn proizvodi drobilice, grablje i balirke.	●	●			
	AGCO Corporation https://www.agcocorp.com	Kroz poznate robne marke uključujući Challenger®, Fendt®, GSI®, Massey Ferguson® i Valtra®, AGCO Corporation isporučuje poljoprivredna rješenja poljoprivrednicima diljem svijeta kroz cijelu liniju traktora, kombajna, opreme za sijeno i stočnu hranu, strojeva za sjetvu i obradu tla, sustava za skladištenje žitarica i proizvodnju proteina. AGCO-va rješenja za sijeno i stočnu hranu kreću se od kosilica i balirki do puhalica za krmu i kutija za skladištenje, sve s inovacijama u veličini, kapacitetu i učinkovitosti.		●	●		
	CNH Industrial https://www.cnhindustrial.com/	CNH Industrial proizvodi i prodaje poljoprivrednu i građevinsku opremu, kamione, gospodarska vozila. Brendovi tvrtke, koji predstavljaju strojeve za žetvu poljoprivrednih ostataka i logistiku, su New Holland, Case, Iveco.	●	●	●	●	

Logo	Kontakt	Opis	Usitnjavanje/ umotavanje	Baliranje	Sakupljanje/ utovar	Prijevoz	Peletiranje/ Briketiranje
	John Deere https://www.deere.com	Od osnutka 1837., John Deere isporučuje proizvode i usluge za podršku onima koji su povezani sa zemljom. John Deere proizvodi široku paletu strojeva za žetvu biomase, uključujući balirke i utovarivače.	●	●	●		
	Arcusin S.A. Polígono Industrial Pla d'Urgell - Av. Merlet, 8 - 25245 VILA-SANA Lleida (Spain) T 973 71 28 55 - 696 98 29 10 arcusin@arcusin.com https://www.arcusin.com	Tvrtka proizvodi strojeve za sektor rukovanja balama. Automatski utovarivač bala AutoStack FSX i XP54. Akumulator bala ForStack 8.12			●		
	ZAVOD KOBZARENKO LTD Ukraine, 42500, Sumy region., Lypova Dolyna, Rusaniwska street, 17 +38 (044) 451-68-77, +38 (095) 277-63-98 www.kobzarenko.com.ua	Proizvodnja opreme za sakupljanje i transport bala. - prikolica za četvrtaste bale PT-16 KVADRO; - samoutovarne prikolice za okrugle bale; - platformske prikolice.			●	●	
	ProAG 2131 Airport Drive Saskatoon, SK Canada S7L 7E1 306-933-8585 https://www.proagdesigns.com/	ProAG nosači bala dizajnirani su za branje i slaganje okruglih ili velikih četvrtastih bala.			●		
	URSUS S.A. DOBRE MIASTO - HQ ul. Fabryczna 21, 11-040 Dobre Miasto Poland +48 22 506 56 00 dobremiasto@ursus.com https://www.ursus.com/	URSUS je nedvojbeno najstariji poljski zaštitni znak vozila, strojeva i uređaja proizvedenih za poljoprivredne potrebe, a uključuje balirke (uključujući i one namijenjene za silažu sijena) i platforme za prijevoz bala.		●		●	

Logo	Kontakt	Opis	Usitnjavanje/ umotavanje	Baliranje	Sakupljanje/ utovar	Prijevoz	Peletiranje/ Briketiranje
	AMANDUS KAHL GmbH & Co. KG Dieselstrasse 5–9 21465 Reinbek Hamburg, Germany +49 (0) 40 72 77 10 info@akahl.de https://akahl.de	Peletiranje obnovljivih sirovina za povrat energije glavna je tema za tvrtku KAHL. Postrojenja za peletiranje slame i sušene stočne hrane dio su KAHL-ovog programa isporuke.					
	CPM Europe B.V. Rijder 2, 1507 DN Zaandam The Netherlands +31 75 65 12 611 info@cpmeurope.nl https://www.cpmeurope.nl/	CPM Europe proizvodi vrhunsku opremu za peletiranje i mljevenje velikog broja drvnih i poljoprivrednih proizvoda.					
	ANDRITZ Feed and Biofuel A/S Esbjerg, Denmark Phone: +45 72 160 300 andritz-fb.dk@andritz.com https://www.andritz.com	ANDRITZ može projektirati, proizvoditi, opskrbljivati i optimizirati strojeve za proizvodnju visokokvalitetnih peleta od biomase. Njihova rješenja su potkrijepljena tehničkim savjetovanjem, inženjeringom, instalacijom i naknadnom uslugom globalnih servisnih centara.					
	ICK GROUP office 222, 89 A, Prospect Peremogy, Kyiv, 03115, Ukraine tel.: +38 (067) 215 10 32 fax: +38 (044) 451 02 30 e-mail: info@ick.ua https://ick.ua/	ICK Grupa proizvodi opremu pod vlastitim zaštitnim znakom GRANTECH. Dugogodišnje iskustvo u implementaciji štedljivih tehnologija i tehnologija za peletiranje različitih materijala.					
	C.F. Nielsen A/S Solbjergvej 19 DK-9574 Baelum tel: +45 9833 7400 https://cfnielsen.com/	C. F. Nielsen je vodeći svjetski brend u projektiranju i proizvodnji mehaničkih rješenja za briketiranje biomase i otpada.					
	PE "Briquetting Technologies" 13313, Ukraine, Zhytomyr region, c. Berdychiv, Semenivska str., 116 +38 (067) 410 21 02 bricteh@gmail.com https://briq-tech.com/	Oprema za proizvodnju gorivnih briketa i peleta.					

PRILOG II: ENERGETSKI SUSTAVI ZA PROIZVODNJU TOPLINE IZ OSTATAKA KUKURUZA

Više informacija o proizvođačima kotlova može se pronaći u online tablici na poveznici niže:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1hb1IEKxIR_OStT5LOibOfZzggeZ-BjeARq33iwjiaE/edit#gid=0

Logo	Kontakt	Opis	Mali kotlovi (100-500 kW)	Srednji kotlovi (500 kW – 1 MW)	Veliki kotlovi (above 1 MW)	Parni kotlovi
	Group COMPTE.R https://www.compte-r.com/en/	Preko 130 godina COMPTE.R inovira i stvara nova rješenja za grijanje na biomasu za razvoj obnovljivih energija čime postaje specijaliziran za energiju biomase.			●	●
	DP CleanTech https://www.dpcleantech.com/	DP-ov portfelj rješenja za biomasu sastoji se od dokazanih, patentiranih i vodećih tehnologija za izgaranje, rasplinjavanje i bioplinску pretvorbu biomase u čistu energiju.			●	●
	Babcock & Wilcox Vølund https://www.babcock.com/	B&W isporučuje ekološki osviještena, tehnološki vođena rješenja i usluge energetske i industrijske kupcima diljem svijeta.			●	●
	TTS eko s.r.o. https://www.ttsboilers.cz/	U okviru ekološkog programa, tvrtka TTS se uglavnom bavi razvojem, proizvodnjom, montažom i servisiranjem industrijskih kotlova i kotlovnica za izgaranje biomase.			●	
	Volyn-Kalvis LLC https://www.volyn-kalvis.com.ua/en/	Volyn-Kalvis LLC proizvodi automatizirane kotlove na kruta goriva za grijanje vode s pokretnom rešetkom za različite vrste biomase: piljevinu, drvenu sječku, otpad od žitarica, stabljike suncokreta i kukuruza, kao i pelete od drva, suncokreta, treseta i drugih biljnih materijala.	●	●	●	
	Kruger boiler plant https://kruger.com.ua/	Tvornica kotlova Kruger je tvrtka sa zaokruženim ciklusom izgradnje po sistemu ključ u ruke za poslove koji se odnose na proizvodnju toplinske energije.		●	●	●

AGROBIOHEAT KONZORCIJ

Logo	Opis
	CERTH je jedno od vodećih istraživačkih središta u Grčkoj. U njihovo područje stručnosti uključene su aktivnosti obnovljivih izvorima energije, proizvodnja i korištenje čvrstih biogoriva, ušteda energije i zaštita okoliša. www.certh.gr
	AVEBIOM je španjolsko udruženje za bioenergiju koje predstavlja sve tvrtke iz cijelog lanca opskrbe bioenergijom u Španjolskoj. www.avebiom.org
	BIOS je austrijska tvrtka za istraživanje, razvoj i inženjering s više od 20 godina iskustva u području korištenja energetske biomase. www.bios-bioenergy.at
	Bioenergy Europe (prije poznat kao AEBIOM) glas je europske bioenergije. Cilj mu je razviti održivo tržište bioenergije temeljeno na pravednim uvjetima poslovanja. www.bioenergyeurope.org
	Danski poljoprivredni i prehrambeni klaster je nacionalni danski klaster za hranu i bioresure. Promovira povećanu suradnju između istraživanja i poslovanja, a članovima nude pristup mrežama, financiranju, razvoju poslovanja, projektima i objektima na jednom mjestu te nude razne savjetodavne usluge. www.foodbiocluster.dk
	Tehnološki centar osnovan u Španjolskoj 1993. godine koji nastoji pružiti inovativna rješenja u području energije za održivi razvoj. www.fcirce.es
	INASO-PASEGES je civilna neprofitna organizacija koju je 2005. godine u Ateni osnovala Panhelenska konfederacija sindikata poljoprivrednih zadruga (PASEGES). www.neapaseges.gr
	Zelena energetska zadruga (ZEZ) je društveno poduzeće osnovano 2013. godine kao dio Programa Ujedinjenih Naroda za Razvoj (UNDP) u Hrvatskoj. Danas djeluje kao krovna organizacija za područje energetskog zadrugarstva u Hrvatskoj i regiji. Pomažu građanima u razvoju, investiranju i korištenju obnovljivih izvora energije. www.zez.coop
	Glavna svrha Green Energy Clustera je razvoj bioenergetskog sektora u Rumunjskoj i podizanje interesa za proizvodnju i korištenje biomase. www.greencluster.ro
	UABIO je osnovan 2013. godine kao javna organizacija. Svrha aktivnosti Udruge je stvaranje zajedničke platforme za suradnju na ukrajinskom tržištu bioenergije. www.uabio.org

Logo	Opis
	AILE radi na obnovljivim izvorima energije i uštedama energije u poljoprivrednim i ruralnim područjima zapadne Francuske. www.aile.asso.fr
	White Research je poduzeće za socijalno istraživanje i savjetovanje specijalizirano za ponašanje potrošača, analizu tržišta i upravljanje inovacijama sa sjedištem u Bruxellesu. www.white-research.eu
	Agronergy je francuski ESP (pružatelj energetske usluge) posvećen obnovljivom grijanju. www.agronergy.fr



PUBLIKACIJA

Ova publikacija Ukrajinske udruge bioenergije (UA-BIO) i Hellas centra za istraživanje i tehnologiju (CERTH) daje pregled trenutnog stanja proizvodnje kukuruza, značajki njegove proizvodnje i mogućnostima korištenja ostataka kukuruza za energiju. Vodič pruža pregled tehnologija za prikupljanje ostataka kukuruza i njihovo korištenje za proizvodnju topline, energije, bioplina i bioetanola. Također, uključuje i listu tvrtki koje nude opremu za žetvu i logistiku vezanu uz ostatke kukuruza, njihovu preradu u pelete/brikete i energetske sustave za proizvodnju topline iz tih ostataka. Vodič je izrađen u sklopu projekta AgroBioHeat koji je sufinanciran iz programa Europske unije EU Obzor 2020. Projekt AgroBioHeat ima za cilj promovirati ekonomski i okolišno održiva rješenja za grijanje na poljoprivrednu biomasu u Europi.

ZELENA ENERGETSKA ZADRUGA (ZEZ)

Zelena energetska zadruga osnovana je 2013. godine u sklopu projekta "Razvoj energetskih zadruga u Hrvatskoj" koji je provodio Program Ujedinjenih Naroda za Razvoj (UNDP) u Hrvatskoj. Po završetku projekta ZEZ nastavlja samostalno djelovanje. Danas je ZEZ krovna organizacija za područje energetskog zadržarstva u Hrvatskoj i regiji, sudjeluje u osnivanju te daje podršku drugim energetskim zadrugama. ZEZ je aktivan član REScoop.eu, europske federacije energetskih zadruga.

Misija ZEZ-a je pomoći građanima u razvoju, investiranju i korištenju obnovljivih izvora energije. Naš cilj je postizanje stvarnih promjena u razvoju energetike i uključanje građana u proces energetske tranzicije. Želimo omogućiti da i građani sudjeluju u planiranju, odlučivanju, izgradnji i proizvodnji energije te da sudjeluju u podjeli dobiti. Kroz svoje djelovanje potičemo razvoj društvenog poduzetništva u energetici, utječemo na ravnopravnost društva i očuvanje okoliša. Mi razvijamo konkretna i održiva rješenja koja unapređuju razvoj lokalne zajednice.

Za više informacija posjetite www.zez.coop.



UABIO



CERTH
CENTRE FOR
RESEARCH & TECHNOLOGY
HELLAS



Ovaj projekt financiran je sredstvima iz Programa za istraživanje i inovacije Horizon 2020 u okviru Sporazuma o dodjeli bespovratnih sredstava br. 818369

