

DINAMIKA IN RAZPOREDITEV TEMPERATURE V KOMPOSTNIH KUPIH IZ HMELJEVINE

Lucija LUSKAR¹ in Barbara ČEH²

Izvirni znanstveni članek / original scientific article

Prispelo / received: 24. 10. 2020

Sprejeto / accepted: 6. 12. 2020

Izveček

Kompostiranje na kmetiji je lahko učinkovit, ekonomičen in okoljsko varen proces reciklaže odpadne biomase. V projektu LIFE BioTHOP razvijamo biorazgradljivo vrvico za oporo hmelja, izdelano iz polimlečne kisline (PLA), ki pri kompostiranju pri visokih temperaturah (>50 °C) hidrolizira do netoksičnih snovi. Namen poskusa je bil ugotoviti dinamiko sprememb temperature v kompostnih kupih hmeljevine pri različnih načinih kompostiranja na kmetijah v povezavi z oceno razgrajenosti PLA vrvic. Vsi kompostni kupi so dosegli dovolj visoko temperaturo za začetek razgradnje PLA vrvic, vendar je v večini kupov temperatura prehitro padla. Nepokrit kup z majhnimi delci hmeljevine je visoko temperaturo (nad 55 °C) ohranjal najdlje, okoli 43 dni. Preveliki delci hmeljevine (večji od 10 cm) so pomenili prehitro sušenje kupov; v tem primeru bi bilo potrebno kup pogosto zalivati. Pokrivanje kupa s polprepustno folijo ni smiselno, saj se je kup prehitro osuševal, zalivanje pa je bilo zaradi folije oteženo. V kupu, pokritem z neprepustno folijo, se ne glede na velikost delcev dobro zadržuje vlaga. Črna folija sicer podaljša termofilno fazo, a ne v zunanjem sloju 30 cm, volumsko okrog 1/3 kupa. Najboljša razgradnja vrvic je bila v kupu, kjer je bila trta razrezana na delce, manjše od 5 cm, kup pa je bil nepokrit. Za uspešno razgradnjo večjih delcev PLA je potrebno zmanjšati velikost delcev trte na okoli 3 cm, izvajati vlaženje kupa in spremljati temperaturo kupa ter jo ohranjati na 55 °C vsaj 5 tednov oziroma čim dlje ter kup glede na meritve temperature večkrat premešati. Pridobljeni podatki bodo v pomoč pri oblikovanju smernic za enostavno kompostiranje, ki ga bodo hmeljarji izvajali sami na kmetijah.

Ključne besede: hmeljevine, kompostiranje, temperature, PLA, vrvica, higienizacija

¹ Mag. biotehnol., Inštitut za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije, Cesta Žalskega tabora 2, 3310 Žalec, Slovenija, e-pošta: lucija.luskar@ihps.si

² Dr., isti naslov, e-pošta: barbara.ceh@ihps.si

DYNAMICS AND DISTRIBUTION OF THE TEMPERATURE IN HOP BIOMASS COMPOST PILES

Abstract

On-farm composting could be an efficient, cost-effective and environmentally safe biological process for the recycling of residual agricultural biomass. Project LIFE BioTHOP is developing biodegradable twine for hop plant support, made from polylactic acid (PLA). In composting at elevated temperatures ($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$) the PLA can hydrolyse to non-toxic substances. The research goal was to find out the course of temperature curves in compost piles of hop biomass after harvest (green waste that stays after cones harvest) in different on site compost treatments in correlation with PLA twine degradation assessments. All composts have reached the limit temperature for PLA degradation but in most of the piles the temperature dropped too soon. Uncovered pile with small particles of hop stems maintained high temperature (over $55\text{ }^{\circ}\text{C}$) for the longest time (about 43 days). If the particles of hop stems were too long (over 10 cm), the pile dried out too soon, and in this case moisture should be maintained by regular watering. Covering of the pile with semipermeable cover wasn't efficient as the pile dried out fast and watering was difficult. If the pile was covered with impermeable foil, the particle size didn't play a role as the moisture conditions were good in airtight covered piles. Black impermeable foil extended the thermophilic phase of compost but not on the outer edge of pile (30 cm, 1/3 of the pile). For successful decomposition of larger PLA particles, it is necessary to reduce the size of stem particles to about 3 cm, mix the piles several times according to temperature measurements, perform humidification, monitor the temperature and keep it at $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ for at least 5 weeks or as long as possible. The data obtained will help to formulate guidelines for easy composting, which will be carried out by hop growers themselves on farms.

Key words: hop biomass after harvest, composting, temperature, PLA, twine, hygienisation

1 UVOD

Kompostiranje na kmetiji je lahko učinkovit, ekonomičen in okoljsko varen proces reciklaže odpadne biomase (Maniatakis in sod., 2004). Kompostiranje je eksotermna razgradnja, ki je odvisna od mešanice materiala, vlage, prostornine, velikosti delcev in njihove razporeditve, mešanja in zračenja. Vsi parametri, ki so za kompostiranje pomembni, lahko vplivajo na temperaturo v kompostnem kupu. Temperatura pri kompostiranju nastaja zaradi procesov razgradnje in mikrobne aktivnosti, na katero ima tudi neposreden vpliv; mikrobi med razgradnjo proizvajajo toploto, le-ta pa vpliva na mikrobne populacije (Epstein, 1997). Kontrolirano kompostiranje se izvaja za vzdrževanje temperature, ki omogoča razmnoževanje različnim mikrobnim združbam. Le-te se delijo na psihrofilne

(delujejo pri 4–20 °C; bakterije, glive), mezofilne (delujejo pri 15–42 °C; bakterije, aktinomicete in glive) in termofilne (delujejo pri 45–75 °C; bakterije, aktinomicete, sporogene bakterije) (Amlinger in sod., 2009).

Kompostiranje je teoretično sestavljeno iz treh faz: mezofilne faze (do 45 °C), termofilne faze (do 70 °C) in faze stabilizacije (ohlajanje). Večina mikrobov, pomembnih za kompostiranje, najbolje uspeva pri temperaturah nad 50 °C (Epstein, 1997). Termofilna faza je pomembna za eliminacijo rastlinskih patogenov (Bollen in Volker, 1996). Če material vsebuje patogene, je v kompostnem kupu potrebno vzdrževati temperaturo nad 55 °C vsaj nekaj dni (Epstein, 1997). To najlažje dosežemo v začetku kompostiranja, ko je na voljo največ lahko dostopnega ogljika in je mikrobná aktivnost največja. Eradikacija patogenov je odvisna od temperature in časa. Kot navaja Uradni list Republike Slovenije (RS) (št: 99/2013), so pri odprtem kompostiranju z naravnim zračenjem potrebna daljša obdobja visokih temperatur kot pri zaprtem kompostiranju s kontinuirnim zračenjem. Iz preglednice v Uradnem listu RS (št: 99/2013) je razvidno, da je za ustrezno higienizacijo kupa, ki doseže 60 °C, kjer temperaturo merimo 1-krat dnevno, potrebno 2-krat obračanje/mešenje kupa, temperatura tega kupa pa mora biti vsaj 3-krat 3 dni na 60 °C. Postopek takšnega kompostiranja je sledeč: temperatura se najprej poveča do 60 °C, počakamo 3 dni (še vedno merimo temperaturo), in če je temperatura v vseh treh dneh višja od 60 °C, potem kup premešamo, počakamo, da se temperatura ponovno dvigne na 60 °C. Ko zabeležimo vsaj tri dni, ko je temperatura enaka ali višja 60 °C, potem ponovno premešamo. Ko se temperatura ponovno dvigne na 60 °C in pri tej ali višji temperaturi vztraja vsaj 3 dni, potem je kompost teoretično higieniziran (preglednica 1).

Preglednica 1: Možnosti režima temperatura/čas za zagotavljanje higienizacije (Ur. L. RS št: 99/2013)

minimalna temperatura	merjenje temperature z uporabo sonde	število obračanj	zahtevano minimalno časovno obdobje dosežene minimalne temperature po posameznem obračanju	število zaporednih dni pri minimalni temperaturi	minimalno obdobje merjenja (dni)
odprto kompostiranje z naravnim ali prisilnim zračenjem					
55 °C	kontinuirano	5	4 ure	–	14
55 °C	diskontinuirano dnevno	3	–	14 x 1 dan	14
60 °C	diskontinuirano dnevno	2	–	3 x 3 dni	14
65 °C	diskontinuirano dnevno	1	–	2 x 3 dni	14
zaprto kompostiranje s prisilnim zračenjem					
55 °C	kontinuirano	–	–	4	10
65 °C	kontinuirano	–	–	3	10

Hmeljevina je ostanek zelene mase rastlin hmelja, ki ostane po strojnem obiranju storžkov (listi in stebela, prepletena z vrvico, ki služi hmelju tekom rastne dobe kot opora). Ker se v času obiranja iz hmeljišča odpelje celotna nadzemna masa hmelja, predstavlja hmeljevina po obiranju storžkov dragocen vir organske mase in hranil za vračanje na kmetijske površine. Z enega hektarja dobimo zajeto v masi hmeljevine 21–22 kg P₂O₅, 50–71 kg K₂O, 32–41 kg MgO, 5,5 kg S in 88–99 kg N, razmerje med C in N pa je 13 (Čeh in sod., 2019). Za mikrobnost rast potrebujemo 15–30 enot ogljika na enoto dušika (Epstein, 1997). Hmeljevina je z vidika hranil dovolj dober medij za rast mikrobov.

Za oporo pri rasti hmelja se najpogosteje uporabljajo polipropilenske vrvice, saj so enostavne za uporabo in cenovno ugodne. Vendar pa le-te pri kompostiranju hmeljevine predstavljajo velik problem, saj so biološko nerazgradljive.

V projektu LIFE BioTHOP za potrebe hmeljarstva razvijamo biorazgradljivo vrvico, izdelano iz polimlečne kisline (PLA), ki pri kompostiranju hidrolizira do netoksičnih snovi, in sicer CO₂, vodo, biomaso in druge naravne snovi (Wilfred in sod., 2018). Cilj je izdelati vrvico, ki bo biorazgradljiva v procesu kompostiranja na kmetijah. PLA je sintetičen kompostabilni biopolimer, ki hidrolizira pri visokih temperaturah (>50 °C), kot produkt pa se izloča mlečna kislina (Drumright in sod., 2000; Garlotta 2002, Kawai, 2010). Za uspešno razgradnjo je pri kompostiranju pomembna toplota (>50 °C), vlaga in prisotnost mikrobov (Kale in sod., 2007; Karamanlioglu in Robson, 2013; Karamanlioglu in sod., 2017; Saadi in sod., 2012). Mikroorganizmi, ki so sposobni razgradnje PLA so: *Penicillium roquefort*, *Amycolatopsis* sp., *Bacillus brevis*, *Rhizopus delemar*, pomembni pa so tudi njihovi encimi, kot so proteinaze, lipaze in PLA depolimeraze (Pathak in Navneet, 2017). Potrebna višina temperature in dolžina trajanja višjih temperatur za uspešno razgradnjo se sicer od materiala do materiala razlikuje, v vsakem primeru pa ustrezne temperaturne razmere v kompostnem kupu vplivajo na stopnjo razgradnje PLA, zato je spremljanje le-te ključnega pomena.

Namen predstavljenega poskusa je bil ugotoviti temperaturne razmere v kompostnih kupih hmeljevine pri različnih načinih kompostiranja. Zanimala nas je tudi razgradnja PLA vrvice po štirih mesecih kompostiranja, s ciljem ugotoviti najbolj primerne postopke ravnanja s hmeljevino za dobro razgradnjo PLA vrvice.

2 MATERIAL IN METODE DELA

Poskus kompostiranja smo izvedli v sezoni 2019/2020 (od septembra 2019 do maja 2020) in je obsegal 5 kupov hmeljevine (preglednica 2). Štiri kupe smo postavili na Inštitutu za hmeljarstvo in pivovarstvo Slovenije (IHPS) in enega pri hmeljarju. Vsak kup smo naredili tako, da smo po obiranju hmelja (1 ha) iz hmeljevine (okrog 15 ton), prepletene s PLA vrvico, z nakladačem oblikovali trapezoidni kompostni

kup višine 2 m. Vsi kupi so bili sestavljeni iz celotne mase hmeljevine (listi in trte), razlika pa je bila v dodatkih za kompostiranje, pogostosti mešanja kupa in uporabi pokrivke.

Preglednica 2: Lastnosti kompostnih kupov v poskusu

Oznaka	Lokacija	Velikost delcev	Dodatek	Pokrivka	Mešanje	Št. temp. sond v kupu
1	IHPS	10–30 cm	/	Toptex	1	3
2	IHPS	10–30 cm	EM	Toptex	3	2
3	IHPS	10–30 cm	EM	Črna folija	/	2
4	IHPS	10–30 cm	Biooglje in <i>Folsomia candida</i>	Črna folija	/	1
5	Hmeljar	2–20 cm	/	/	2	0

Kup 1 smo pokrili s Toptex, perforirano pokrivno folijo, ki po opisu proizvajalca ohranja optimalne razmere vlažnosti, odvaja padavinske vode s površine in preprečuje izsuševanje. Premešali smo ga enkrat, in sicer 4. dan, ko se je temperatura kupa v sredici povišala na 68 °C. Tega kupa nismo vlažili.

Kup 2 smo oblikovali tako, da smo med nasipom hmeljevine s traktorsko škropilnico nanesti 25 litrov učinkovitih mikroorganizmov (EM[®], sestava: voda, melasa sladkornega trsa, mlečnokislinske bakterije, fotosintetske bakterije, kvasovke, morska sol; proizvajalčevo priporočilo o nanosu: 1 L /m³), da preverimo ali lahko z vnosom teh mikroorganizmov vplivamo na potek razgradnje (praksa na nekaterih kmetijah). Prekrili smo ga s TopTex pokrivko. Kup smo po šestih dneh, ko se je temperatura povišala na 60 °C, prvič premešali in zalili z vodo (80 litrov, do primerne omočenosti – test s pestjo). Po 13-ih dneh od začetka kompostiranja se je temperatura spet povišala na 60 °C in kup smo ponovno premešali in pustili odprtega, da je po njem deževalo, saj je bil zelo suh. Po 20-ih dneh smo ponovno opazili, da je kup suh, zato smo ga odkrili in pustili, da ga je omočil dež. Po 22-ih dneh smo kup tretjič premešali. Po dveh mesecih smo ga odkrili, da ga je ponovno omočil dež.

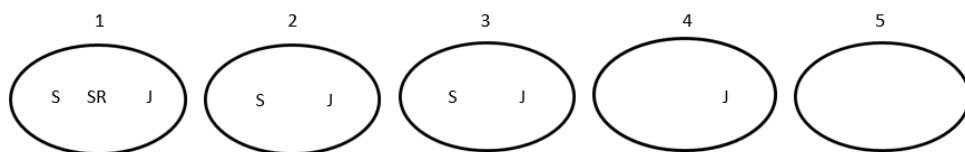
Za tretiranje kupa 3 smo uporabili 35 litrov EM, ker je bil ta kup volumsko večji v primerjavi s kupom 2. Mešanico smo tako kot pri kupu 2 nanesti s traktorsko škropilnico, kup pa prekrili s črno folijo in spremljali razgradnjo po sistemu bokashi – preverjanje sistema, ki se izvaja na nekaterih hmeljarskih kmetijah v praksi. Gre za siliranje oz. mlečno-kislinsko fermentacijo. To pomeni, da poteka fermentacija s pomočjo dodanih mikroorganizmov v odsotnosti oz. pri zelo nizkih koncentracijah kisika (Merfield, 2013). V takem sistemu teoretično do bistvenega pregrevanja naj ne bi prihajalo. Kupa nismo mešali.

Kupu 4 smo dodali 100 kg biooglja (navodila proizvajalca: na površino 1m² in debelino 10–20 cm kompostnega materiala dodamo 1–2 kg biooglja) in 10 kg biooglja, inokuliranega s kandido (členonožec – *Folsomia candida*), in ga pokrili s črno folijo. Biooglje je zaradi visoke poroznosti in velike površine dober absorbent, ki lahko zadrži pomembna hranila, kot so N, C in S pa tudi vlago (Guo in sod., 2016). Dodatek kandidate pomaga pri razgrajevanju organske snovi in uničevanju patogenih gliv (Fountain in Hopkin, 2005). Tega kupa nismo mešali.

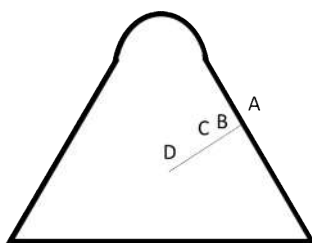
Kup 5 smo pustili nepokrit in ga dvakrat med kompostiranjem premešali, in sicer po enem mesecu, ko je bila temperatura kupa že dalj časa okoli 60 °C in po dveh mesecih, ko je temperatura začela padati.

Mešanje kupov je potekalo z nakladačem tako, da smo kup po delih prestavili na drugo lokacijo in s tem omogočili mešanje in zračenje kupa.

Za kontinuirano merjenje temperature v sredici kupa smo v štiri kupe (slika 1) vstavili TinyTag[®] temperaturne logerje s sondo v merilnem območju od -40 °C do +85 °C (Loggers, 2014). Logerji so podatke beležili vsakih 30 min. Temperaturo po globinah kupov smo merili tudi ročno, in sicer s prirejenim termometrom TFA[®] z merilnim območjem od -20 do +300 °C (slika 2). Ročne meritve smo izvajali enkrat dnevno, 5 dni na teden, 4 tedne, nato pa 1x tedensko. Temperaturni podatki iz sond TinyTag[®] zajemajo obdobje štirih mesecev (september–januar), razen za kup 4, kjer imamo podatke za 2 meseca (september in oktober). Tako logerji s sondami kot ročni termometer so bili pred začetkom izvajanja poskusov kalibrirani.



Slika 1: Tlorisni prikaz pozicije TinyTag temperaturnih sond v kupu. Legenda: S - sever, SR - sredina, J - jug



Slika 2: Kompostni kup v prerezu. Legenda: A - rob, B - 30 cm pod robom, C - 50 cm pod robom, D - sredica oz. 100 cm pod robom

Vlago kompostnih kupov smo preizkušali s testom s pestjo. V dlan smo vzeli kompost in ga stiskali v pesti 10 sekund. Če je med prsti pritekla tekočina, je pomenilo da je kup premoker in ga je potrebno dobro prezračiti, da se osuši, če pa so se delčki lomili in pokali, je pomenilo, da je kup bil presuh in ga bi bilo potrebno zaliti. Primerno navlažen kompost se je po stisku v pesti stisnil v kepo, vendar se je z lahkoto drobil.

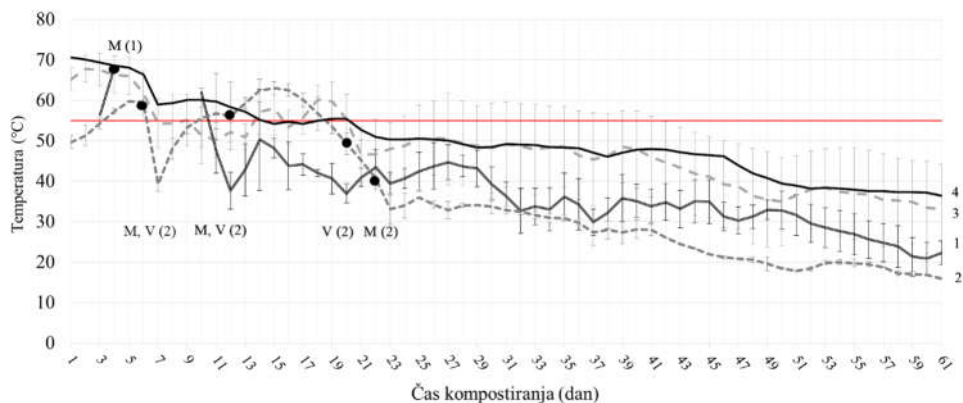
Po sedmih mesecih od postavitve kupov smo naredili vizualno oceno razgrajenosti PLA vrvice v vsakem kupu posebej in le to primerjali s pridobljenimi temperaturnimi podatki.

Podatke smo uredili z računalniškim programom Excel.

3 REZULTATI Z RAZPRAVO

3.1 Temperatura v sredici kupov, izmerjena s TinyTag sondami

Slika 3 prikazuje povprečno maksimalno dnevno temperaturo posameznega kupa v sredici (merjeno s TinyTag). Zaradi preglednosti je prikazana krivulja le do 61. dne. Povprečna maksimalna dnevna temperatura kompostnega kupa v sredici, glede na čas meritve na sliki, prikazuje razpon maksimalnih temperatur iz različnih sond enega kupa. Linija na grafu je povprečje maksimalnih temperatur enega kupa, standardna deviacija pa je razlika med maksimalnimi temperaturami v določenem dnevu med vsemi sondami enega kupa (slika 1).



Slika 3: Povprečna maksimalna dnevna temperatura kompostnega kupa v sredici glede na čas meritve (dan kompostiranja 1 do 61) in kompostni kup (linija 1 = kup 1, linija 2 = kup 2, linija 3 = kup 3 in linija 4 = kup 4; črni krogi ponazarjajo aktivnost, in sicer: M (1)= mešanje kupa 1, M,V (2) = mešanje in vlaženje kupa 2, V(2) = vlaženje kupa 2, M(2) =mešanje kupa 2). Prikazan tudi razpon meritve – razlika med temperaturo na S in J strani kupa.

V preglednici 3 so prikazane povprečne standardne deviacije temperatur med sondami enega kupa in tudi posameznih sond v enem dnevu.

Razvidno je, da se temperatura v kompostnem kupu hmeljevine poviša zelo hitro, in sicer lahko že po enem dnevu na 70 °C, kar se je zgodilo v kupu 3 z dodanimi mikroorganizmi in pokritim s črno folijo in kupu 4 z dodanim bioogljem in *Folsomia candida* ter pokritim s črno folijo. Dodani mikroorganizmi in *Folsomia* najverjetneje pri tej temperaturi propadejo, a ker je temperatura tako visoka le v sredici, se lahko mikroorganizmi v drugih predelih ohranijo in razmnožijo. Prisotnosti mikroorganizmov tekom procesa sicer nismo spremljali.

Temperaturna grafa kupov 3 in 4 sta si zelo podobna, saj sta bila oba kupa pokrita s črno folijo. Temperatura v teh dveh kupih je bila skoraj ves čas višja kot v kupih, pokritih s TopTex pokrivko (kupa 1 in 2). Najdlje je uspelo temperaturo v sredici ohranjati višjo od 55 °C v kupu 4, in sicer 17 dni. Po tem času noben kup ni več presegel te temperature. Torej je zelo pomembno, da kompostni kup postavimo takoj po obiranju, saj je razgradnja najbolj intenzivna prve tri tedne; takrat je največ lahko dostopnih hranil in so obenem tudi zunanje temperature višje kot kasneje v letu. Vlažnost v kupih 3 in 4 je bila ugodna (pri testu s pestjo se delci niso lomili, temveč so se ob stisku oblikovali v krhko grudo), ker črna folija ne prepušča vlage. Kupa 3 in 4 prikazujeta anaerobno razgradnjo (bila sta zrakotesno zaprta). Po navedbah Epsona (1997) tudi v kupih z aerobno razgradnjo že 2 uri po prezračevanju pade koncentracija kisika v sredici kompostnega kupa na 0 %. To nakazuje dobre temperaturne pogoje za mikrobno aktivnost in higienizacijo v sredici kupa.

Tudi v kupu 2 (s TopTex pokrivko in trikratno mešanje) smo z mešanjem uspeli dalj časa ohraniti višjo temperaturo, a ne dlje kot v kupih, pokritih s črno folijo. V kupu 1 (TopTex pokrivka in enkratno mešanje) je temperatura padla najhitreje. Po pregledu smo ocenili, da je bil kup presuh (kup smo odkopali in naredili test s pestjo; vsebina je bila krhka), zaradi česar je bila mikrobna aktivnost onemogočena. Tudi pri kupu 2 smo opazili hitro izsuševanje zaradi mešanja, zato smo kup tudi zalivali. Kljub temu se je kup precej izsušil, kar pripisujemo precej velikim delcem, ki so omogočali boljši pretok zraka, s tem pa tudi sušenje. Tak način kompostiranja (samo enkratno mešanje in brez dodatkov) za tako velike delce hmeljevine (10–30 cm) ni najbolj primeren, oziroma bi bilo potrebno veliko truda vložiti v redno navlaževanje in preverjati temperaturno nihanje. Vsekakor se nakazuje velik pozitiven vpliv trikratnega mešanja v primerjavi z mešanjem kupa le enkrat. Som in sod. (2004) so kompostirali zeleni odpad in bio-odpad iz gospodinjstev v razmerju 4:1. Kup so vlažili in obračali vsakih 18 dni v termofilni fazi, ki je trajala 75 dni, kar nakazuje na to, da bi bilo v našem primeru bolje večkrat premešati kup. Milinkovič in sod. (2019) so kompostirali zeleni odpad iz parkov, ki so ga mešali na začetku procesa vsakih 10 dni, po termofilni fazi pa

enkrat na mesec. Večina poskusov nima priloženega temperaturnega grafa, kar otežuje primerjavo naših podatkov z drugimi.

Preglednica 3: Povprečno dnevno variiranje temperatur (standardna deviacija (°C)) glede na kompostni kup

	Vrsta variiranja temperature	Zajeto obdobje	Št. kompostnega kupa			
			1	2	3	4
Povprečno dnevno variiranje (SD)	Med najvišjimi dnevnimi temperaturami med vsemi sondami v kupu	Čas merjenja*	3	1	8,5	/ **
	Med najnižjo in najvišjo izmerjeno temperaturo na eni sondi	Čas merjenja*	3,5	2	2	1
	Med najnižjo in najvišjo izmerjeno temperaturo na eni sondi	1. mesec	7	6	5	1,5

* V času merjenja temperatur; kup 1=132 dni; kup 2= 122 dni; kup 3= 122 dni; kup 4= 68 dni

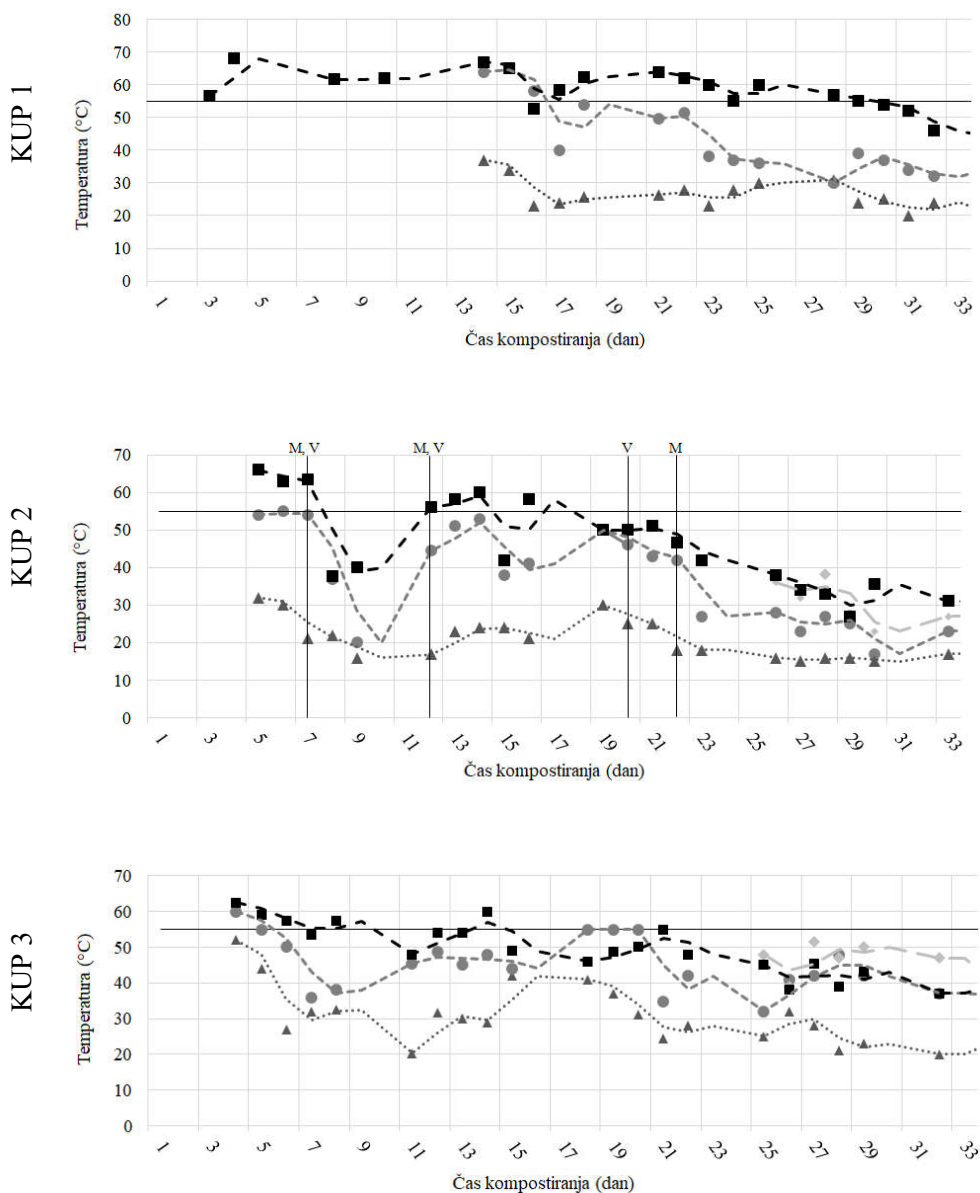
** Le ena delujoča sonda v kupu

Če pogledamo posamezne kupe, so si bile najvišje izmerjene dnevne temperature med sondami znotraj enega kupa v kupih pokritih s Toptex bolj podobne (kupa 1 (SD = 3 °C) in 2 (SD = 1 °C)) kot v kupu pokritem s črno folijo, kjer je bila razlika med sondami tudi do 17 °C (kup 3 (SD = 8,5 °C)). V kupu 3 so temperature med sondo na severu in sondo na jugu velike razlike, kar lahko vidimo tudi na sliki 3, kjer je grafično prikazana razlika (SD je razlika med S in J). Na jugu je temperatura v povprečju za 10 °C višja kot na severu kupa. To jasno nakazuje potrebo po rednem mešanju kupa, da pride vsa biomasa vsaj enkrat v toplejše predele. Na severu kupa 4 sonda na žalost ni delovala, zato nimamo podatkov za primerjavo. Kup 2 je bil trikrat premešan, zato je temperatura v takšnem kupu bolj homogena, zato je tudi manjše variiranje temperature med sondama.

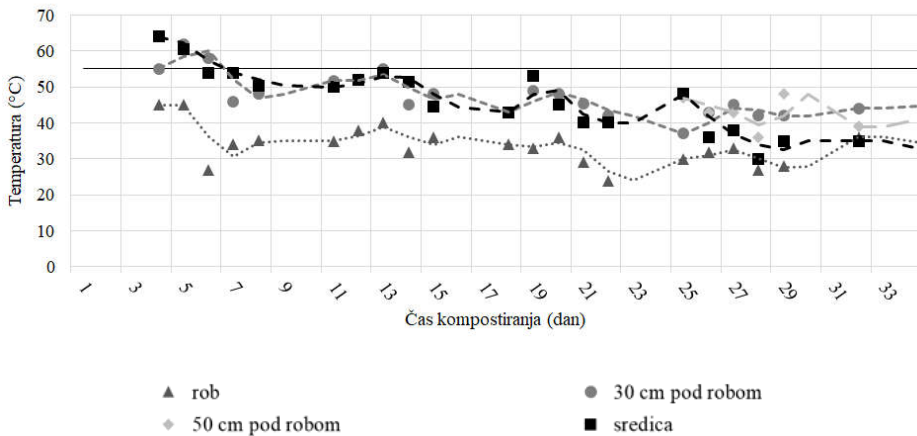
Temperaturna dnevna nihanja med najvišjo in najnižjo izmerjeno temperaturo v kupu 1 so zelo velika in v povprečju znašajo okoli 3,5°C od povprečja, kar pomeni, da se v povprečju tekom štirih mesecev kompostiranja temperatura v enem dnevu lahko spremeni za 7 °C. Kupi 2, 3 in 4 so imeli manjše dnevno nihanje temperatur. V prvem mesecu kompostiranja so dnevna temperaturna nihanja med najvišjo in najnižjo temperaturo največja. Kup 1 je imel največjo temperaturno nihanje. Do velikih dnevnih nihanj je v prvem mesecu kompostiranja prišlo tudi v kupu 2, kjer smo kup mešali in ga s tem dodatno ohladili a tudi homogenizirali, ter v kupu 3. V kupu 4 nismo izmerili velikih dnevnih temperaturnih nihanj. V kupu 3 velikih dnevnih nihanj nismo pričakovali, saj se kup manj ohladi čez noč, lahko pa so nihanja posledica močnejšega segrevanja tekom dneva zaradi vpivanja toplote preko črne folije.

3.2 Temperatura glede na globino

Slika 4 prikazuje ročno izmerjene temperature glede na globino v kompostnem kupu (slika 2) v prvem mesecu kompostiranja.



KUP 4



Slika 4: Temperatura kupa glede na globino, merjena z ročno sondo. Liki predstavljajo meritve, ki smo jih povezali s trendno črto, M = mešanje kupa, V = vlaženje kupa.

Pri merjenju temperatur na različnih globinah smo ugotovili, da je temperatura kupa običajno najvišja v sredici. V pokritih kupih se temperatura kupa na globini 30 cm v povprečju razlikuje od temperature v na globini 1 m za 10 °C. Zaradi tega smo dodali še eno točko meritve, to je 50 cm pod površjem in v 4. tednu ugotovili, da je temperatura v območju 50 cm pod površjem lahko višja kot v sredici kupa. Temperatura v površinskem sloju kupa (sloj debeline okrog 30 cm) nikoli ne preseže 55 °C, kar pomeni, da v nepremešanem kupu ta zunanji sloj ni higieniziran. Takšni predeli so potencialen vir fitopatogenov, kot je na primer verticilij, in se lahko prenesejo na preostali del kupa. Nehigieniziran kompost je neuporaben za kmetijske površine. Težava v tem primeru pa je tudi razgradnja PLA vrvice, do katere v robnem delu takšnega komposta ne pride. Temperatura roba (okrog 30 cm) je v kupih, pokritih s črno folijo, višja kot v drugih dveh, vendar vseeno ne dovolj visoka za higienizacijo ali razgradnjo PLA vrvice. Mikrobne združbe, ki vršijo razgradnjo, se spreminjajo glede na temperaturo v določenem delu kompostnega kupa. Hitra sprememba temperature pomeni spremembo mikrobne združbe, to pomeni, da v prehodu iz mezofilne v termofilno fazo eno mikrobno združbo zamenja druga (Ryckeboer in sod., 2003). Pri višjih temperaturah od 60 °C lahko pride do zaviranja procesa mikrobne aktivnosti (McKinley in Vestal, 1984). Razgradnja pri različnih temperaturah je, poleg ostalih ključnih parametrov, odvisna od pestrosti mikrobnih združb (Chandna in sod., 2013).

Če primerjamo temperaturo v sredici kupov, izmerjeno z ročnimi meritvami in meritvami s TinyTag sondami, opazimo razlike. V kupih 2 in 3 je bila ročno

izmerjena temperatura med maksimalno in minimalno temperaturo, izmerjeno s TinyTag sondo, kar je razumljivo, saj smo ročno meritev izvajali v eni časovni točki dneva, ki je bila lahko nekje med minimalno in maksimalno temperaturo. V kupu 1 je bila ročno izmerjena temperatura višja od maksimalne temperature, izmerjene s TinyTag sondo, kar je posledica nižje heterogenosti kupa. V kupu 4 je delovala le sonda na južni strani, kjer je bil verjetno zaradi dodatnega segrevanja preko črne folije temperatura višja kot drugod v kupu, kjer je bila merjena temperatura na različnih globinah, zato so bile ročno izmerjene temperature nižje.

Ugotovili smo, da je temperatura v kompostnem kupu razporejena nehomogeno. Sonda, ki je kontinuirano merila temperaturo, je bila v enem delu kupa, z ročno sondo pa smo merili v različnih predelih. Pri kupih 2, 3 in 4 je ročno izmerjena temperatura nekje med min in max T določenega dneva, saj je bila ročno izmerjena temperatura izmerjena v eni časovni točki dneva. S tem smo ugotovili, da slednje ni dovolj oziroma je pri takšnem načinu merjenja potrebno biti zelo pozoren, saj je lahko temperatura v enem dnevu zelo različna, kar je razvidno iz preglednice 3. Razporeditev temperature v kompostnih kupih sta podrobno preučevala Fernandes in Zhan (1994), ki se ugotovila, da se je temperaturna razporeditev odvisna od načina kompostiranja in se tekom kompostiranja spreminja, vsekakor pa je različna v različnih predelih kupa.

Pridobljeni podatki bodo v pomoč pri oblikovanju smernic za enostavno kompostiranje, ki ga bodo hmeljarji izvajali sami na kmetijah.

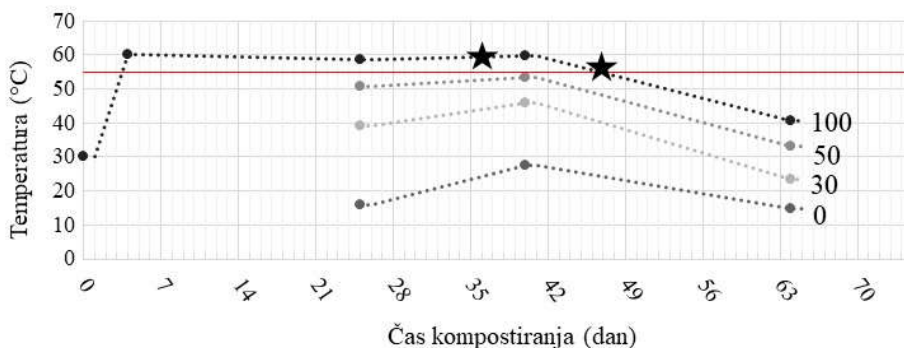
3.3 Ustreznost temperaturnih razmer za razgradnjo PLA

PLA je trajen material, ki se razgradi le v določenih pogojih. Karamanliogu in Robson (2013) sta pokazala, da PLA izgubi svojo natezno trdnost v kompostu pri 55 °C že po 9–12-ih dneh, po treh tednih pa fizično razpade. Za razgradnjo PLA v kompostu potrebujemo okoli 3 tedne (Ho in sod., 1999), vse pa je odvisno od oblike materiala in parametrov kompostiranja. Karamanliou in sod. (2017) so ugotovili, da PLA začne hidrolizirati po 9-ih dneh pri 55 °C, za popolno razgradnjo pa je potrebno to temperaturo komposta vzdrževati vsaj 1 mesec. V kupu 1 je po podatkih ročno izmerjenih temperatur visoka temperatura vztrajala dovolj dolgo, da bi se PLA vrvica lahko razgradila (preglednica 4). Iz opazovanj in na podlagi testov s pestjo vemo, da je bil ta kup presuh in vrvica je bila še vedno vidna, kljub temu da je bil v prvem tednu, ko je bila temperatura najvišja, enkrat premešan. V kupu 2 temperatura nad 55 °C ni vztrajala dovolj dolgo, da bi teoretično prišlo do popolne razgradnje PLA vrvic. V kupu 3 in 2 je visoka temperatura vztrajala najdlje, vendar kupa nista bila premešana. V sredici je res prišlo do pogojev za razgradnjo PLA vrvic, vendar na robovih ti pogoji niso bili doseženi.

Preglednica 4: Kumulativno število dni s temperaturo višjo od 55 °C - primerjava z maksimalno izmerjeno temperaturo

		Kompostni kup				
		1	2	3	4	5
Št. dni nad	TinyTag *	8	12	13	17	/
55 °C	Ročno	22	9	12	5	ocenjeno na 43

Za primerjavo dodajamo kup št. 5, ki je bil postavljen pri hmeljarju. Od IHPS kupov se je razlikoval po velikosti delcev, ki so bili v tem kupu manjši. Hmeljar je kup dvakrat premešal, namočen pa je bil ob vsakih padavinah. Visoka temperatura (nad 55 °C) v kupu je po podatkih ročnih meritve vztrajala okoli 43 dni (slika 5), kar je dovolj za razgradnjo PLA vrvice. Za kompostiranje je najbolj optimalna velikost delcev od 5–20 cm (Román in sod., 2015). Preveliki delci povečujejo zračne prostore, kar povzroči pretirano ohlajanje in sušenje kupa, to pa onemogoči mikrobnno delovanje. Nasprotno pa manjši delci onemogočajo dostop kisika, kar povzroči anaeroben način razgradnje in nastanek smradu (Duckworth, 2005).



Slika 5: Kompostni temperatura po globinah v kompostnem kupu 5. Z debelejšimi pikami so prikazane meritve, z zvezdico pa je označeno mešanje. Desno je označena globina kupa za posamezno temperaturno krivuljo v cm.

Zadnje vzorčenje kompostov je potekalo v aprilu, kar je 7 mesecev od začetka kompostiranja. Vrvica je bila takrat vidna še v vseh kupih, torej se v nobenem kupu ni popolnoma razgradila. Razgrajenost je korelirala z velikostjo delcev, kot smo opazili že v vmesnih pregledih. V kupu 5, kjer je bila vrvica narezana na zelo majhne koščke oz. je bila scefšana, kar je omogočalo večjo kontaktno površino, je bila vrvica najboljše razgrajena. V kupih 1–4 je bilo vidno več vrvice. V kupu 1 je bila vrvica najslabše razgrajena, kar je verjetno posledica velikih delcev in prenizke vlage. Vrvica v kupu 2 je bila boljše razgrajena kot v kupu 1, saj je bil kup premešan. Zaradi ohranjanja vlage je bila vrvica v sredici kupov 3 in 4 boljše razgrajena kot v kupih 1 in 2. Kljub temu vrvica ni bila razgrajena po zunanjih delih kupa, kjer ni prišlo do hidrolize in kasnejšega razpada.

4 ZAKLJUČKI

Termofilne razmere (>45 °C) se vzpostavijo že en dan po postavitvi kupa hmeljevine in lahko vztrajajo dolgo ob primernem ravnanju s kompostom. Kup je potrebno mešati, da dosežemo higienizacijo. Kupi 1–4 niso dosegli zahtev za higienizacijo kompostov, saj kljub doseženi visoki temperaturi le-ta ni vztrajala dovolj dolgo, ali pa kup ni bil premešan dovolj pogosto. Ustrezne temperature za higienizacijo je zaradi dovolj na drobno narezanega materiala in mešanja dosegel kup 5, kar kaže na velik pomen velikosti delcev – da so le-ti čim manjši. Pomembno je tudi zalivanje s ciljem vzdrževanja vlage v optimalnem okvirju 50–60 % v kupu za podaljšanje termofilne faze.

V primeru kupov 1 in 2 so bili delci preveliki (10–30 cm ali večji) za aerobno razgradnjo, zato so se kupi hitro sušili. V tem primeru bi bilo potrebno podrobneje nadzorovati vlago in kup pogosto zalivati. V kupih 3 in 4 se je vlaga zaradi črne folije ne glede na velikost delcev dobro zadrževala. V kupu 5 so bili delci primerne velikosti (manjši od 5 cm), zato je kup dolgo ohranjal visoko temperaturo in tudi vlago, saj je bilo manj zračnih niš.

Temperatura pri nenadzorovanem kompostiranju (domače kompostiranje) je različna glede na mesto meritve kot tudi na del dneva, v katerem izvajamo meritve. Temperatura se dnevno niža in viša, različna je glede na globino, zato jo je potrebno izmeriti večkrat dnevno, vsak dan ob enakem času ali pa meritve izvajati kontinuirano.

Pokrivanje s TopTex se v primeru delcev velikosti od 10–30 cm ni dobro obneslo, saj je prišlo do sušenja. V tem primeru bi bilo bolje kupe izpostaviti vremenskim razmeram, saj bi z deževjem dosegli primerno vlago v kupih, ali pa bi morali izvajati zalivanje kupov. Kompostiranje hmeljevine namreč poteka od sredine septembra do marca/aprila, ko ni poletne vročine. Pokrivanje kupov je smiselno za namen preprečevanja spiranja hranil v času stabilizacije komposta. V primeru uporabe črne folije smo ugotovili, da folija sicer podaljša termofilno fazo, a je bila v zunanjem sloju po kompostiranju vrhica še vidna, zato bi v tem primeru bilo bolje, da bi kompostiranje v prvem mesecu potekalo aerobno in bi kup vsaj štirikrat premešali, nato pa bi ga pokrili s črno folijo, da preprečimo izpiranje hranil in izhlapevanje.

Nakazalo se je, da dodatka bioogljje in mikroorganizmi v naših primerih nista zaznavno vplivala na potek temperaturnih krivulj.

Ustrezne razmere za kompostiranje neposredno vplivajo na razgradnjo PLA vrvice. Le-ta se je po sedmih mesecih kompostiranja najbolje razgradila v primeru kupa 5 (ni bila več vidna), kjer so bili delci na obiralnem stroju razrezani na dolžino, krajšo od 5 cm, in se je zaradi tega tudi bolje ohranjala vlaga. Večja površina

vrvice omogoča več kontaktne površine, s čimer se poveča možnost hidrolize in mikrobne razgradnje. Iz našega poskusa sklepamo, da je za uspešno razgradnjo večjih delcev PLA vrvice potrebno zmanjšati velikost delcev trte na okoli 3 cm, izvajati vlaženje kupa, spremljati temperaturo ter jo ohranjati na 55 °C vsaj 5 tednov oziroma čim dlje ter kupe glede na meritve temperature večkrat premešati.

Zahvala. Raziskava in članek sta nastala v okviru evropskega projekta LIFE BioTHOP Vpeljava biorazgradljive vrvice v hmeljišča in uporaba hmeljevine v novih industrijskih produktih. Projekt je sofinanciran v okviru programa LIFE Evropske Unije, Ministrstva za okolje RS, občin Spodnje Savinjske doline (Braslovče, Polzela, Prebold, Tabor, Vranksko in Žalec) in Združenja hmeljarjev Slovenije. Za prispevek sta odgovorni avtorici in v nobenem primeru Evropska Komisija.

5 LITERATURA

- Amlinger F., Peyr S., in Müsken J. State of the art of Composting. Austrian Ministry for Agriculture and Forestry, Environment and Water Management. 2009.
- Bollen G. J. in Volker D. Phytohygienic aspects of composting. V: The science of composting. Springer, Dordrecht. 1996; 233-246.
- Chandna P., Nain L., Singh S. in Kuhad R. C. Assessment of bacterial diversity during composting of agricultural byproducts. BMC microbiology. 2013; 13(1):99.
- Čeh B., Luskar L., Čremožnik B. Hmeljevina kot vhodni material za kompostiranje. Hmeljarski bilten. 2019; 26:81-90.
- Drumright R. E., Gruber P. R. in Henton D. E. Polylactic acid technology. Advanced materials. 2000; 12(23):1841-1846.
- Duckworth, G. (2005). The Composting industry Code of Practice. Composting Association.
- Epstein, E. Basic Concepts. V: The Science of Composting. Epstein E. , 1997. Lancaster, Technomic Publishing Inc. 1991; 19-52.
- Fernandes L., Zhan W., Patni N. K. in Jui P. Y. Temperature distribution and variation in passively aerated static compost piles. Bioresource Technology. 1994; 48(3):257-263.
- Fountain M. T. in Hopkin, S. P. Folsomia candida (Collembola): a "standard" soil arthropod. Annu. Rev. Entomol. 2005; 50, 201-222.
- Garlotta D. A Literature review of Poly(lactic acid). Journal of Polymers and the Environment. 2002; 9:63e84.
- Guo M., He Z., in Uchimiya S. M. Introduction to biochar as an agricultural and environmental amendment. Agricultural and environmental applications of biochar: Advances and barriers. 2016; 63, 1-14.
- Ho K. L. G., Pometto A. L., Gadea-Rivas A., Briceño J. A. in Rojas A. Degradation of polylactic acid (PLA) plastic in Costa Rican soil and Iowa state university compost rows. Journal of environmental polymer degradation. 1999; 7(4):173-177.
- Kale G, Auras R, Singh SP. Comparison of the degradability of poly(lactide) packages in composting and ambient exposure conditions and science. Packaging Technology and Science: An International Journal, 2007; 20(1):49-70.
- Karamanlioglu M. in Robson G. D. The influence of biotic and abiotic factors on the rate of

- degradation of poly (lactic) acid (PLA) coupons buried in compost and soil. *Polymer Degradation and Stability*, 2013; 98(10):2063-2071.
- Karamanlioglu M., Preziosi R. in Robson G. D. The compostable plastic poly (lactic) acid causes a temporal shift in fungal communities in maturing compost. *Compost Science & Utilization*. 2017; 25(4): 211-219.
- Kawai F. Polylactic acid (PLA)-degrading microorganisms and PLA depolymerases. *Green Polymer Chemistry: Biocatalysis and Biomaterials* American Chemical Society. 2010. 405-414.
- Loggers G. D. Tinytag Plus 2 Internal Temperature (-40 to+ 85 C) TGP-4017 Data Sheet, Issue 9: 17th October 2014 (E&OE). 2014.
- Maniadakis K., Lasaridi K., Manios Y., Kyriacou M., Manios T. Integrated waste management through producers and consumers education: composting of vegetable crop residues for reuse in cultivation. *Journal of Environmental Science and Health Part B*. 2004; 39:169–183.
- McKinley V. L. in Vestal J. R. Biokinetic analyses of adaptation and succession: microbial activity in composting municipal sewage sludge. *Applied and Environmental Microbiology*. 1984; 47(5): 933-941.
- Merfield, C. N. Treating food preparation ‘waste’ by Bokashi fermentation vs. composting for cropland application: A feasibility and scoping review. Lincoln, New Zealand: The BHU Future Farming Centre. 2013.
- Milinković M., Lalević B., Jovičić-Petrović J., Golubović-Čurguz V., Kljujev I. in Raičević V. Biopotential of compost and compost products derived from horticultural waste—effect on plant growth and plant pathogens' suppression. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019; 121:299-306.
- Pathak V. M. Review on the current status of polymer degradation: a microbial approach. *Bioresources and Bioprocessing*. 2017; 4(1):15.
- Pathak V. M., Navneet (2017) Review on the current status of polymer degradation: A microbial approach. *Bioresour. Bioprocess* 4: 1-31
- Román P., Martínez M. M. in Pantoja A. Farmer’s compost handbook Experience in Latin America. 2015. Dostopno na: <http://www.fao.org/3/a-i3388e.pdf> (oktober 2020)
- Ryckeboer J., Mergaert J., Vaes K., Klammer S., De Clercq D., Coosemans J. in Swings J.. A survey of bacteria and fungi occurring during composting and self-heating processes. *Annals of microbiology*, 2003; 53(4):349-410.
- Saadi Z, Rasmont A, Cesar G, Bewa H, Benguigui L. Fungal degradation of poly(l-lactide) in soil and in compost. *Journal of Polymers and the Environment*. 2012; 20(2):273-282.
- Som M. P., Lemée L. in Amblès A. Stability and maturity of a green waste and biowaste compost assessed on the basis of a molecular study using spectroscopy, thermal analysis, thermodesorption and thermochemolysis. *Bioresource technology*. 2009; 100(19): 4404-4416.
- Uredba o predelavi biološko razgradljivih odpadkov in uporabi komposta ali digestata. Uradni list RS (99/2013). 2013; 99: 10787.
- Wilfred O., Tai H., Marriott R., Liu Q., Tverezovskiy V., Curling S. in Wang W. Biodegradation of polylactic acid and starch composites in compost and soil. *International Journal of Nano Research*. 2018; 1:1-11.