

<https://doi.org/10.15255/KUI.2022.064>

KUI-34/2023

Stručni rad

Prispjelo 7. listopada 2022.

Prihvaćeno 22. veljače 2023.

Procjena životnog ciklusa sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom: studija slučaja grad Dubrovnik

I. Smoljko* i M. Matić

Sveučilište u Splitu, Kemijsko-tehnološki fakultet, Zavod za elektrokemiju i zaštitu materijala, Ruđera Boškovića 35, 21 000 Split

Ovo djelo je dano na korištenje pod
Creative Commons Attribution 4.0
International License

3. ZORH SUSRET



Sažetak

Količina proizvedenog komunalnog otpada po stanovniku u gradu Dubrovniku je u porastu, a očekuje se i daljnji značajniji porast s obzirom na gospodarski razvoj, turizam te povećanu potrošnju. Proizvedeni otpad u gradu Dubrovniku najvećim dijelom završi na odlagalištu, a samo mala količina odvojeno se prikuplja i oporabljuje. Da bi se smanjile neželjene posljedice za okoliš i društvo u cjelini, potrebno je analizirati utjecaje na okoliš procesa, proizvoda i usluga u sustavima gospodarenja otpadom, tj. u cjeloživotnom ciklusu. U ovom radu analiziran je utjecaj na okoliš sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnik računanim programom IWM-EPIC/CSR procjene životnog ciklusa (engl. *life-cycle assessment*). Analiziran je postojeći sustav gospodarenja komunalnim otpadom grada Dubrovnik (V1) i razmatrane su tri varijante unaprijeđenog sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom (V2, V3 i V4), na temelju podataka o otpadu grada Dubrovnik za 2019. godinu. U varijantama V2, V3 i V4 pretpostavljeno je smanjenje količina odloženog komunalnog otpada u korist odvojenoga sakupljanja otpada po vrstama, načinu obrade i iskorištavanja otpada (materijalna ili energijska uporaba) te postizanje zadanih kvantitativnih i kvalitativnih ciljeva određenih Zakonom o gospodarenju otpadom. Nakon analize i usporedbe utjecaja na okoliš različitih varijanti sustava gospodarenja otpadom može se zaključiti da bi se primjenom varijante V4, u kojoj bi se recikliralo preko 34 % otpada, kompostiralo 54 % biorazgradivog otpada, energijski oporabilo više od 3 % uz kogeneraciju toplinske i električne energije, a na odlagalište odložilo 8 % otpada, smanjili svi važniji utjecaji na zdravlje ljudi, smanjila bi se degradacija okoliša i uvelike smanjilo crpljenje nepovratnih prirodnih bogatstava.

Ključne riječi

Procjena životnog ciklusa, IWM-EPIC/CSR računalni program, komunalni otpad, sustavi gospodarenja otpadom

1. Uvod

Gospodarenje otpadom u Republici Hrvatskoj jedno je od najvažnijih pitanja zaštite okoliša, kao i jedno od najzahtjevnijih područja radi usklađivanja sa standardima Europske unije. U Republici Hrvatskoj su trenutačno na snazi kvantitativni ciljevi gospodarenja otpadom definirani Zakonom o gospodarenju otpadom¹ i podzakonskim aktima i Planom gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. – 2022.² te izmjenama Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. – 2022. godine.³

Ciljevi gospodarenja otpadom i rokovi definirani u Okvirnoj direktivi o otpadu 2008/98/EZ, Direktivi o ambalaži i ambalažnom otpadu 94/62/EZ, Direktivi o odlagalištima 1999/31/EZ, Direktivi o baterijama 2006/66/EZ, Direktivi o otpadnim vozilima 2000/53/EZ i Direktivi o otpadu električne i elektroničke opreme 2012/19/EU preneseni su u hrvatsko zakonodavstvo o gospodarenju otpadom 2013. godine kroz Zakon o održivom gospodarenju otpadom⁴ i podzakonske akte te 2021. godine kroz Zakon o gospodarenju otpadom.

* Autor za dopisivanje: izv. prof. dr. sc. Ivana Smoljko
e-pošta: ismoljko@ktf-split.hr

Napomena: Istraživanja u ovom radu prezentirana su na 3. međunarodnom susretu znanstvenika, stručnih djelatnika i studenata na temu zaštite okoliša u Republici Hrvatskoj (3. ZORH Susret), održanom 28. – 29. travnja 2022. na Kemijsko-tehnološkom fakultetu Sveučilišta u Splitu.

Politike i propisi iz područja gospodarenja otpadom ističu potrebu učinkovitog gospodarenja otpadom kroz cjeloviti sustav gospodarenja. Da bi se izbjegle neželjene posljedice za okoliš i društvo u cjelini, potrebno je analizirati utjecaje na okoliš procesa, proizvoda i usluga u sustavima gospodarenja otpadom, tj. u cjeloživotnom ciklusu. Analitički alat koji se primjenjuje u analizi održivosti procesa, proizvoda i usluga je procjena životnog ciklusa (LCA, engl. *Life-Cycle Assessment*) (HRN EN ISO 14040:2008). U početku se LCA primjenjivala kao metoda analize svih životnih etapa proizvoda “od kolijevke do groba”, ali se od ranih 1990-ih počela primjenjivati i za gospodarenje otpadom.⁵⁻⁷ Do danas su razvijeni brojni LCA računalni programi za procjenu sustava gospodarenja otpadom koji se razlikuju po složenosti algoritma, jednostavnosti uporabe i opsegu namjene (ORWARE (*Organic Waste Research*), IWM-EPIC/CSR (*Integrated Waste Management-Environment and Plastics Industry Council and Corporations Supporting Recycling*), MSW-DST (*Municipal Solid Waste Decision Support Tool*), WISARD (*Waste-Integrated Systems Assessment for Recovery and Disposal*), IWM-2 (*Integrated Waste Management*), SSWMSS (*Strategic Solid Waste Management Supporting Software*), LCA IWM (*Life Cycle Assessment-Integrated Waste Management*), WRATE (*Waste and Resources Assessment Tool for the Environment*), EASEWASTE (*Environmental Assessment of Solid Waste Systems and Technologies*),⁸ EASETECH (*Environmental Assessment System for Environmental Technologies*)⁹ i SWOLF (*Solid Waste Optimization Life-Cycle Framework*).¹⁰

Svim navedenim računalnim programima zajedničko je da sadrže baze podataka karakteristične za jedinične procese (sakupljanje otpada, razvrstavanje, recikliranje, oporabu, odlaganje otpada, kompostiranje ili anaerobnu digestiju) te omogućavaju korisniku oblikovanje sustava gospodarenja otpadom prema njegovim zahtjevima na temelju specifičnosti izvora, vrsti, sastavu i količini otpada i/ili stupnju oporabe i kombiniranjem navedenih jediničnih procesa.^{8,11,12}

U ovom radu analiziran je utjecaj na okoliš integralnog gospodarenja komunalnim otpadom LCA računalnim programom IWM-EPIC/CSR. Integralno gospodarenje otpadom podrazumijeva cjelovito sagledavanje životnog vijeka otpada i njegovo kruženje (kretanje) u okolišu radi optimalnog upravljanja otpadom kroz ekonomsku, socijalnu i teritorijalnu koheziju te visok stupanj zaštite zdravlja i očuvanje okoliša. LCA model primijenjen je za procjenu utjecaja na okoliš životnog ciklusa sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika. Analiziran je postojeći sustav gospodarenja komunalnim otpadom grada Dubrovnika i razmatrane su tri varijante unaprijeđenog sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom radi ostvarivanja ciljeva zakonodavstva o otpadu u Republici Hrvatskoj, na temelju podataka o otpadu grada Dubrovnika za 2019. godinu. Analizom i usporedbom utjecaja na okoliš različitih varijanti sustava gospodarenja otpadom pokušalo se ukazati na ključne razlike u postupanju s otpadom da bi se mogle predložiti smjernice razvoja budućeg učinkovitijeg sustava gospodarenja komunalnim otpadom koji bi imao najmanje štetnih posljedica na okoliš i kvalitetu života.

2. Materijali i metode

2.1. Opis sustava gospodarenja komunalnim otpadom u gradu Dubrovniku

Dubrovnik je grad na krajnjem jugu Republike Hrvatske, jedno je od najvažnijih povijesno-turističkih središta Republike Hrvatske te administrativno i gospodarsko središte Dubrovačko-neretvanske županije. Područje na kojem se prostire grad Dubrovnik zauzima površinu od 14 335 km². Prema popisu stanovnika iz 2011. godine Dubrovnik je imao 42 615 stanovnika, tj. 15 345 kućanstava u 32 naselja.^{13–15}

Prvi podatci o sakupljanju otpada u gradu Dubrovniku datiraju iz 1395. godine kad je Malo vijeće Grada Dubrovnika, koje je bilo zaduženo za komunalne poslove u Gradu, zaposlilo prvog čistača.¹⁴ Danas tvrtka Čistoća d. o. o. Dubrovnik prikuplja, odvozi i odlaže komunalni otpad koji nastaje u kućanstvima, poslovnim prostorima i ustanovama na području grada Dubrovnika. Sustav prikupljanja komunalnog otpada sastoji se od sustava prikupljanja miješanog komunalnog otpada (MKO) i biorazgradivog komunalnog otpada (BKO), sustava prikupljanja otpada u spremnicima na javnim površinama, sustava prikupljanja otpada u reciklažnom dvorištu i mobilnom reciklažnom dvorištu, sustava prikupljanja glomaznog otpada te sustava prikupljanja otpadnog tekstila. MKO se sakuplja u spremnicima koji se nalaze na javnim površinama grada. Otpad se u prosijeku sakuplja šest puta tjedno, iznimno sedam puta tjedno za uže gradsko područje te dva puta tjedno izvan turističke

sezone s Elafita, tj. tri puta tjedno u sezoni. U spremnicima na javnim površinama, reciklažnom dvorištu i mobilnom reciklažnom dvorištu odvojeno se sakupljaju komponente komunalnog otpada (papir i karton, staklo, plastika, metal, glomazni otpad, električni i elektronički otpad, metali i biorazgradivi otpad).¹⁶

Prema Izvješću o komunalnom otpadu za 2019. godinu u gradu Dubrovniku ukupno je sakupljeno 21 488,63 t komunalnog otpada, od čega je 18 191,80 t miješanog komunalnog otpada, a 3 296,83 t odvojeno su sakupljene frakcije komunalnog otpada u sklopu javne usluge, u mobilnom i stacionarnom reciklažnom dvorištu. Stopa odvojeno sakupljenog komunalnog otpada iznosila je 15,34 %.^{17,18} Prema podacima za 2019. godinu 14,5 % sakupljenog komunalnog otpada izravno je upućeno na oporabu, dok je preostala količina odvojeno sakupljenog komunalnog otpada privremeno uskladištena ili je prosljeđena na odlagalište, gdje su se eventualno izdvojile iskoristive komponente i prosljeđile na oporabu. Miješani komunalni i biorazgradivi otpad bez dodatne se obrade odlaže na odlagalište Grabovica.

2.2. LCA metodologija

Utjecaj na okoliš sustava gospodarenja komunalnim otpadom grada Dubrovnika analiziran je IWM-EPIC/CSR računalnim programom.¹⁹ Analiziran je utjecaj komunalnog otpada na okoliš kroz sve njegove faze životnog ciklusa; porijeklo, sastav, vrste otpada, sakupljanje, prijevoz, oporaba uključujući razvrstavanje i odlaganje ostatnog otpada.

2.2.1. Cilj i granice sustava

Pod pretpostavkom da je sastav otpada fiksni i da su detalji o sastavu otpada poznati, kao i slijed uzastopnih i međusobno povezanih etapa od nastanka otpada do ponovne uporabe ili konačnog odlaganja, za komunalni otpad se može utvrditi kako će različite varijante gospodarenja otpadom utjecati na okoliš. Osnovni postupak u ovoj studiji slučaja sastojao se u sagledavanju svih aspekata sustava gospodarenja otpadom, proučavanju međuovisnosti različitih varijabli svake varijante gospodarenja otpadom, uzimajući kao jedinicu analize lokalnu zajednicu, tj. grad Dubrovnik. U izradi LCA studije IWM-EPIC/CSR računalnim programom za otpad pretpostavljeno je da se toplina proizvedena u procesu energijske oporabe otpada rabi za kogeneracijsku proizvodnju toplinske i električne energije, da je ostatni otpad i njegovo štetno djelovanje svedeno na najmanju mjeru te da se odlaže prema propisima o gospodarenju otpadom. Ograničenja programa su ta što program ne obrađuje sve dostupne procese gospodarenja otpadom, ne uključuje kućno kompostiranje i potrošnju biomase za ogrjev u kućanstvima, ne obuhvaća pranje i čišćenje reciklabilnih materijala (npr. staklenih boca i tegli, plastičnih posuda ili metalnih konzervi) te se pretpostavlja pravilno razdvajanje otpada na mjestu nastanka otpada. Nadalje, programom se ne analiziraju svi mogući utjecaji procesa gospodarenja otpadom na sastavnice okoliša i opterećenja okoliša, već se razmatraju kategorije utjecaja na okoliš 19 parametara (detaljnije opisano u potpoglavlju 2.2.3.).

2.2.2. Inventar životnog ciklusa

Cjelokupni inventar životnog ciklusa komunalnog otpada određen je analizom svih ulaznih i izlaznih tokova tvari i energije za svaku fazu životnog ciklusa otpada. Potrošena električna energija i emisije iz sustava gospodarenja otpadom u ovoj studiji izračunate su LCA računalnim programom IWM-EPIC/CSR i njegovim unaprijed definiranim standardnim podacima u *Microsoft Excelu* za Office 365 MSO verzija 16 i *Microsoft Visual Basic* za Applications, verzija 2012.

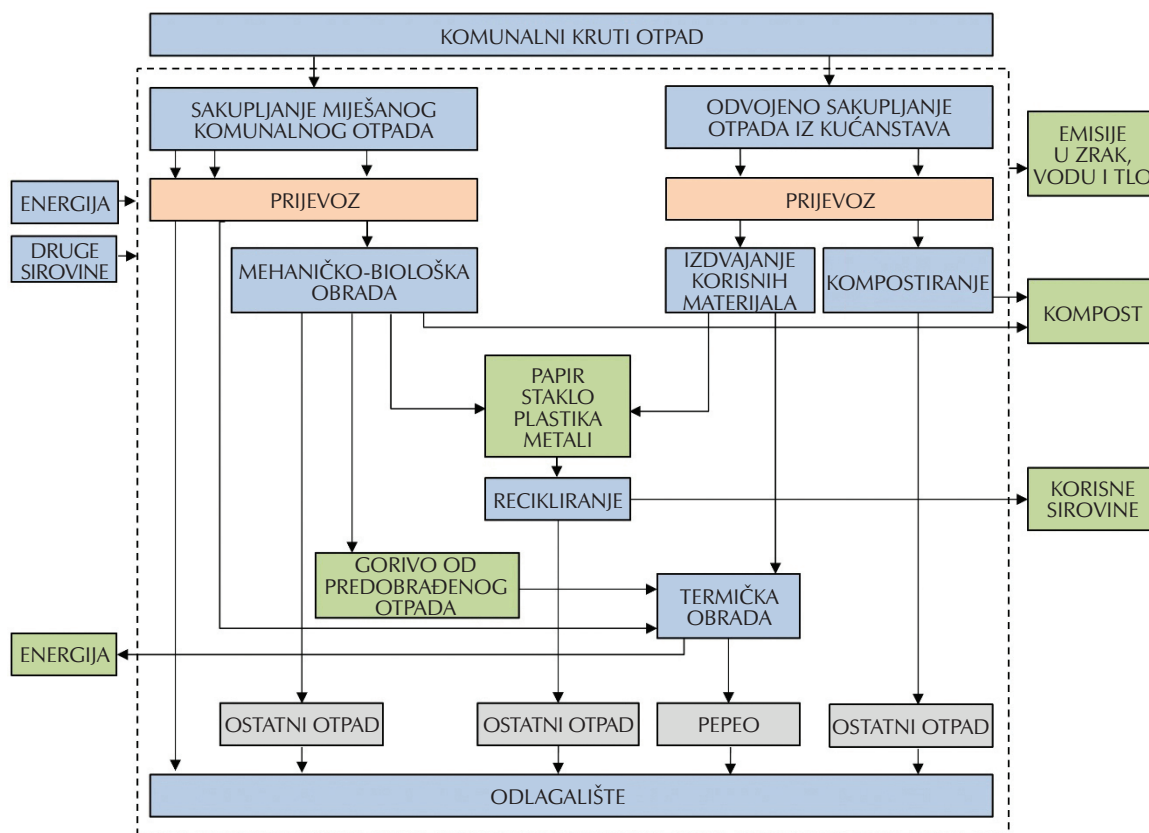
2.2.3. Procjena utjecaja ulaznih i izlaznih tokova na okoliš

Računalnim programom IWM-EPIC/CSR određena je potrošena (ili proizvedena) energija i emisije u zrak, vodu i tlo analiziranih opcija postupanja s komunalnim otpadom.¹⁹ Potencijalni utjecaj sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom na okoliš kvantificiran je specifičnim indikatorima (energija, ugljikov dioksid (CO₂), metan (CH₄), ekvivalentna emisija ugljikova dioksida (CO₂-eq), dušikovi oksidi (NO_x su dušikov monoksid (N₂O) i dušikov dioksid (NO₂), izraženi kao NO₂), sumporov dioksid (SO₂), klorovodik (HCl), čestice aerodinamičnog promjera manjeg od 10 μm (PM₁₀), hlapljivi organski spojevi (HOS), teški metali (Pb, Hg i Cd), doksini i furani (poliklorirani dibenzo-*p*-doksini (PCDD) i poliklorirani dibenzofurani (PCDF)), biološka potrošnja kisika (BPK) i ostatni otpad) i kategorijama

utjecaja (iscrpljivanje prirodnih resursa, klimatske promjene, zakiseljavanje, nastajanje smoga, utjecaj na zdravlje ljudi i degradacija okoliša).

2.3. Varijante sustava gospodarenja komunalnim otpadom

Na temelju podataka o otpadu: porijeklo, sastav, kategorije i vrste otpada, sakupljanje, prijevoz, uporaba uključujući razvrstavanje i odlaganje otpada za 2019. godinu za grad Dubrovnik analiziran je postojeći i tri unaprijedene varijante sustava gospodarenja komunalnim otpadom, radi ostvarivanja ciljeva hrvatskog zakonodavstva o otpadu. Postojeći sustav gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika koji uključuje sakupljanje komunalnog otpada, odvajanje korisnih komponenti otpada na izvoru uz odlaganje otpada na odlagalište bez prethodne obrade i odvajanja predstavljao je varijantu 1 (V1). Da bi se postigli ciljevi povećanja odvojenog sakupljanja i uporabe otpada te smanjenja odlaganja otpada, predložene su tri varijante unaprijeđenog uspostavljenog sustava gospodarenja komunalnim otpadom grada Dubrovnika. Predložene tri varijante (V2, V3 i V4) predstavljaju sustave usklađene s redom prvenstva gospodarenja otpadom, tj. sprječavanje nastanka otpada, priprema za ponovnu uporabu, recikliranje, ostali postupci uporabe, tj. energetska uporaba i odlaganje. U predloženim varijantama sakupljeni MKO



Slika 1 – Životni ciklus komunalnog krutog otpada u V2, V3 i V4 sustavima gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika

Fig. 1 – Life cycle of solid waste in municipal waste management systems V2, V3 and V4 of the city of Dubrovnik

Tablica 1 – Vrste i količine otpada obrađene postupcima oporabe ili konačno odložene u V1
Table 1 – Types and amounts of waste that are recovered or disposed of in V1

Godina Year		2019.			
Grad na području kojeg je otpad sakupljen The town where waste is collected		Grad Dubrovnik			
Broj stanovnika obuhvaćen sakupljanjem ¹⁵ Number of inhabitants covered by waste collection ¹⁵		42615			
Vrsta otpada Waste type	Ukupno skupljeno (preuzeto) u 2019./t Total collected in 2019 /t	Stanje privremenog skladišta na dan 1. 1./t Status of the temporary warehouse as of January 1/t	Stanje privremenog skladišta na dan 31. 12./t Status of the temporary warehouse as of December 31/t	Namijenjeno za postupak oporabe (R) ili odlaganje (D) ¹ Intended for the process of recovery (R) or disposal (D) ¹	Količina /t Quantity /t
Odvojeno sakupljeni metali iz komunalnog otpada	143,87	3,49	15,96	R	131,41
Metalna otpadna ambalaža	4,40	0,05	0,15	R	4,31
Papirna i kartonska otpadna ambalaža	2062,03	1,24	49,33	R	2013,94
Staklena otpadna ambalaža	61,33	0,65	3,98	R	58,01
Plastična otpadna ambalaža	98,86	0,44	4,96	R	94,33
Odvojeno sakupljena plastika iz komunalnog otpada	80,10	1,67	17,79	R	43,98
				D	20,00
Odvojeno sakupljeni biorazgradivi otpad iz kuhinja i kantina	726,94	5,37	3,94	R	723,00
Miješani komunalni otpad	18 191,80	0,00	0,00	D	18 191,80
Ukupno	21 369,33				

bi se mehaničko-biološki ili termički obrađivao uz kogeneraciju toplinske i električne energije. Sakupljanje MKO-a bez odvajanja korisnih vrsta otpada na mjestu nastanka, tj. na "kućnom pragu" primjenjivalo bi se gdje nije moguće postaviti više spremnika za otpad na "kućnom pragu" zbog prostornih ograničenja za smještaj spremnika, transportnih ograničenja i ekonomski neisplativog transporta. Odvojeno sakupljeni otpad (papir, plastika, staklo, metali, ambalažni otpad, otpadna guma, otpadni tekstil/odjeća) pripremao bi se za daljnju obradu te bi se u predloženim varijantama, u različitim udjelima, reciklirao ili energijski oporabio. Biorazgradiv otpad sakupljen na području grada Dubrovnika obrađivao bi se kompostiranjem u kompostani u centru za gospodarenje otpadom (trenutačno u projektnoj fazi). Kompostiranjem bi se proizvodio kompost koji bi se, ovisno o kvaliteti organskog materijala, mogao rabiti kao gnojivo i poboljšivač zemljišta ili bi se odlagao na odlagalište. Energijskom oporabom obradile bi se gorive frakcije komunalnog otpada. Rezultat energijske oporabe otpada bio bi toplinska i električna energija i ostatni otpad, tj. šljaka i pepeo. Postupanje s ostatnim otpadom uvjetovano je njegovim sastavom. Inertni materijal odlagao bi se na odlagalište neopasnog (inertnog) otpada ili bi se rabio kao zamjenski materijal za mineralne agregate. Varijante V2, V3 i V4 razlikuju se u udjelima komponenti komunalnog otpada koje bi se reciklirale ili energijski oporabile ili odložile na odlagalište, a vrijednosti udjela u skladu su s ciljevima hrvatskog zakonodavstva o otpadu. Životni ciklus komunalnog otpada u V2, V3 i V4 prikazan je na slici 1.

U ovoj analizi primijenjeni su podaci iz baze podataka alata za izradu LCA, dok su podaci o količinama i prijevozu otpada preuzeti iz literature (stručni časopisi, publikacije i baze podataka na internetu). U analizi postojećeg i predloženih varijanti sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom primijenjeni su podaci o komunalnom otpadu grada Dubrovnika za 2019. godinu koje su davatelji javne usluge prikupljanja miješanog komunalnog otpada i davatelji javne usluge prikupljanja biorazgradivog komunalnog otpada prijavili u bazu Registra onečišćavanja okoliša i podaci iz Izvješća o radu davatelja javne usluge.^{17,18}

Zbog ograničenja IWM-EPIC/CSR računalnog programa u ovom radu su razmatrani odvojeno sakupljeni sastojci komunalnog otpada iz podgrupe 20 01 Kataloga otpada osim otpada ključnog broja (KB) 20 01 99 (ostali sastojci komunalnog otpada koji nisu specificirani na drugi način), odvojeno sakupljena otpadna ambalaža iz komunalnog otpada iz podgrupe 15 01 te otpad iz podgrupa 20 02 i 20 03: KB 20 02 01 (biorazgradivi otpad iz vrtova i parkova) i KB 20 03 01 (miješani komunalni otpad). Nadalje, zbog ograničenja programa u radu nije analiziran otpad KB 20 02 03 (ostali otpad koji nije biorazgradiv), KB 20 03 03 (ostaci od čišćenja ulica), KB 20 03 07 (glomazni otpad) te KB 20 03 99 (otpada koji nije specificiran na drugi način). Vrste i količine otpada koje su upotrijebljene u LCA analizi postojećeg sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika V1 prikazane su u tablici 1.

Varijante V2, V3 i V4 predstavljaju unaprijeđenja postojećeg sustava gospodarenja otpadom i predviđaju smanjenje količina odloženog komunalnog otpada u korist odvojena sakupljanja otpada po vrstama te obrade i iskorištavanja otpada (materijalna ili energijska uporaba) kao i postizanje zadanih kvantitativnih i kvalitativnih ciljeva određenih Zakonom o gospodarenju otpadom. U navedenim varijantama analizirano je 21 369,33 t otpada. Budući da Grad Dubrovnik nije analizirao sastav MKO-a, da bi se dobili podatci o sastavu i količinama komunalnog otpada potrebni za LCA V2, V3 i V4, u radu je primijenjena procjena sastava MKO-a u Republici Hrvatskoj za 2015. godinu koja je izrađena u okviru projekta "Izrada jedinstvene metodologije za analize sastava komunalnog otpada, određivanje prosječnog sastava komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj i projekcija količina komunalnog otpada".²⁰ Sastav miješanog komunalnog otpada prikazan je u tablici 2.

Ukupne količine komunalnog otpada dobivene su zbrajanjem količine miješanog komunalnog otpada i količine sastavnica komunalnog otpada koje su izdvojene u zasebnom toku. Na osnovi tih podataka interpolirani su rezultati sastava komunalnog otpada grada Dubrovnika (V2, V3 i V4) (tablica 3).

Nadalje, nakon određivanja sastava miješanog komunalnog otpada te određivanja udjela sastavnica komunalnog otpada, određen je udio biorazgradive komponente u komunalnom otpadu. Udio biorazgradive komponente određen je množenjem udjela pojedine sastavnice otpada s pripadajućim koeficijentom za izračunavanje biorazgradive komponente.²⁰ U tablici 4 prikazani su koeficijenti za izračunavanje biorazgradive komponente pojedinih sastavnica komunalnog otpada te udjeli biorazgradive komponente u komunalnom otpadu.

Tablica 2 – Sastav miješanog komunalnog otpada za grad Dubrovnik u 2019. godini prema procjeni sastava miješanog komunalnog otpada u Republici Hrvatskoj u 2015. godini²⁰

Table 2 – Dubrovnik's 2019 mixed municipal waste composition according to an estimate of the Republic of Croatia's mixed municipal waste in 2015²⁰

Sastavnica MKO Primary categories of MMW	Sekundarna sastavnica Secondary categories	Udio pojedine sastavnice MKO ²⁰ / % MMW composition ²⁰ / %	Količina sastavnice u MKO / t Quantity of waste in MMW / t
Metal	Metalna ambalaža (limenke)	2,07	376,57
	Metalna ambalaža pod tlakom (spremnici s raspršivačem)		
	Ostali otpad od metala (metalni predmeti i dijelovi)		
Drvo	Netretirano drvo	0,98	178,28
	Tretirano drvo		
	Drvena ambalaža		
Tekstil/odjeća	Odjeća i obuća	3,71	674,92
	Tkanine		
	Tekstilna ambalaža		
Papir i karton	Tiskovine – časopisi, novine, knjige, plakati, letci itd.	23,19	4218,68
	Papirna i kartonska ambalaža		
Staklo	Ravno staklo	3,65	664,01
	Staklena ambalaža		
Plastika	Plastika (meka i tvrda plastika, plastični proizvodi i dijelovi)	22,87	4160,46
	Plastična ambalaža (meka i tvrda plastična ambalaža, npr. plastične boce)		
Guma	Guma	0,22	40,02
Organski otpad	Koža/kosti	0,45	81,86
	Kuhinjski otpad	30,93	5626,72
	Vrtni otpad	5,68	1033,29
Ostali otpad	Zemlja, prašina, pijesak, nedefinirano	6,25	1136,99
	Ukupno	100,00	18 191,80

Tablica 3 – Interpolacija sastava miješanog komunalnog otpada na sastav ukupnog komunalnog otpada

Table 3 – Interpolation of the mixed municipal waste composition to the composition of the overall municipal waste

Sastavnica krutog komunalnog otpada Types of municipal solid waste	Odvojeno prikupljeno/t Separately collected/t	Količina iz MKO/t Quantity of waste in MMW/t	Ukupna količina sastavnica komunalnog otpada/t Total amount in municipal solid waste/t	Udio u krutom komunalnom otpadu/% Share in municipal solid waste/%
Metal	143,87	376,57	520,44	2,72
Drvo	0,00	178,28	178,28	0,93
Tekstil/odjeća	0,00	674,92	674,92	3,53
Papir i karton	0,00	4218,68	4218,68	22,04
Staklo	0,00	664,01	664,01	3,47
Plastika	80,10	4160,46	4240,56	22,15
Guma	0,00	40,02	40,02	0,21
Koža/kosti	0,00	81,86	81,86	0,43
Kuhinjski otpad	726,94	5626,72	6353,66	33,19
Vrtni otpad	0,00	1033,29	1033,29	5,39
Ostali otpad	0,00	1136,99	1136,99	5,94
Ukupno	950,91	18 191,80	19 142,71	100,00

Tablica 4 – Udio biorazgradive komponente u komunalnom otpadu

Table 4 – Share of biodegradable component in municipal waste

(1) Sastavnica krutog komunalnog otpada (1) Types of municipal solid waste	(2) Udio u krutom komunalnom otpadu/% (2) Share in solid municipal waste/%	(3) Koeficijent za računanje biorazgradive komponente ²⁰ (3) Coefficient for calculating the biodegradable component ²⁰	(2) × (3) Udio biorazgradive komponente u krutom komunalnom otpadu/% (2) × (3) Share of biodegradable component in solid municipal waste/%
Metal	2,72	0,00	0,00
Drvo	0,93	0,50	0,47
Tekstil/odjeća	3,53	0,50	1,76
Papir i karton	22,04	1,00	22,04
Staklo	3,47	0,00	0,00
Plastika	22,15	0,00	0,00
Guma	0,21	0,00	0,00
Koža/kosti	0,43	1,00	0,43
Kuhinjski otpad	33,19	1,00	33,19
Vrtni otpad	5,39	1,00	5,39
Ostali otpad	5,94	0,00	0,00
Ukupno	100,00	–	63,28

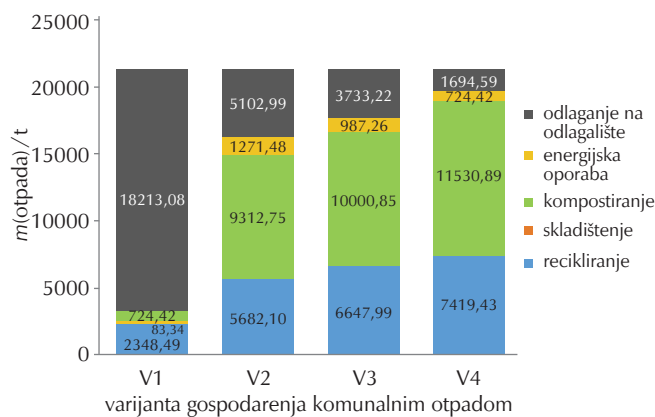
Na osnovi sastava i količine komunalnog otpada te udjela biorazgradivog otpada dobiveni su podatci važni za predviđanje količina otpada koje su materijalno ili energijski oporabljene ili odložene na odlagalište u varijantama V2, V3 i V4 gospodarenja krutim komunalnim otpadom prema ciljevima hrvatskog zakonodavstva o otpadu (tablica 5).

Uzimajući u obzir sastav i količine komunalnog otpada te prethodno navedene pretpostavke i ograničenja IWM-EPIC/CSR računalnog programa, količine otpada u V1, V2, V3 i V4 su oporabljene ili su odložene na odlagalište kako je to prikazano na slici 2.

Tablica 5 – Pretpostavke varijanti V2, V3 i V4 gospodarenja komunalnim otpadom prema ciljevima zakonodavstva o otpadu u Republici Hrvatskoj

Table 5 – Assumptions of the V2, V3, and V4 municipal waste management versions in accordance with the goals of the legislative framework for waste management in Croatia

Varijanta gospodarenja otpadom Variation of the municipal solid waste management system							
Vrsta otpada Waste type	Količina pojedine vrste otpada /t Quantity of waste /t	V2		V3		V4	
		Namijenjeno za postupak oporabe (R) ili zbrinjavanja (D) ¹ Intended for the process of recovery (R) or disposal (D) ¹	Udio otpada namijenjen za postupak oporabe (R) ili zbrinjavanja (D) ¹ /% Share of waste intended for recycling (R) or disposal (D) ¹ /%	Namijenjeno za postupak oporabe (R) ili zbrinjavanja (D) ¹ Intended for the process of recovery (R) or disposal (D) ¹	Udio otpada namijenjen za postupak oporabe (R) ili zbrinjavanja (D) ¹ /% Share of waste intended for recycling (R) or disposal (D) ¹ /%	Namijenjeno za postupak oporabe (R) ili zbrinjavanja (D) ¹ Intended for the process of recovery (R) or disposal (D) ¹	Udio otpada namijenjen za postupak oporabe (R) ili zbrinjavanja (D) ¹ /% Share of waste intended for recycling (R) or disposal (D) ¹ /%
Komunalni otpad							
Metal	520,44	R 4	50,00	R 4	60,00	R 4	90,00
		D 1	50,00	D 1	40,00	D 1	10,00
Drvo	178,28	R 3	50,00	R 3	75,00	R 3	85,00
		R 1	50,00	R 1	25,00	R 1	15,00
Tekstil/odjeća	674,92	R 1	50,00	R 1	45,00	R 1	40,00
		R 3	50,00	R 3	55,00	R 3	60,00
Papir i karton	4218,68	R 3	65,00	R 3	50,00	R 3	15,00
		R 3	35,00	R 3	50,00	R 3	85,00
Staklo	664,01	R 5	60,00	R 5	70,00	R 5	90,00
		D 1	40,00	D 1	30,00	D 1	10,00
Plastika	4240,56	R 3	22,50	R 3	50,00	R 3	90,00
		D 1	77,50	D 1	50,00	D 1	10,00
Guma	40,02	R 1	100,00	R 1	100,00	R 1	100,00
Koža/kosti	81,86	R 1	100,00	R 1	100,00	R 1	100,00
Kuhinjski otpad	6353,66	R 3	100,00	R 3	100,00	R 3	100,00
Vrtni otpad	1033,29	R 3	100,00	R 3	100,00	R 3	100,00
Ostali otpad	1136,99	D 1	100,00	D 1	100,00	D 1	100,00
Otpadna ambalaža							
Metalna ambalaža	4,4	R 4	50,00	R 4	60,00	R 4	90,00
		D 1	50,00	D 1	40,00	D 1	10,00
Papirna i kartonska ambalaža	2062,03	R 3	65,00	R 3	75,00	R 3	85,00
		R 1	35,00	R 1	25,00	R 1	15,00
Staklena ambalaža	61,33	R 5	60,00	R 5	70,00	R 5	90,00
		D 1	40,00	D 1	30,00	D 1	10,00
Plastična ambalaža	98,86	R 3	22,50	R 3	50,00	R 3	90,00
		D 1	77,50	D 1	50,00	D 1	10,00
Ukupno	21 369,33						



Slika 2 – Količine otpada u varijantama sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika

Fig. 2 – Amount of input waste for solid municipal waste management versions of Dubrovnik

Područje grada Dubrovnika opskrbljuje se električnom energijom iz dvaju izvora i to iz hidroelektrana 96 % te 4 % iz vjetroelektrane Rudine.²¹ Zbog ograničenja programa uzeto je da se Dubrovnik opskrbljuje 100 % električnom energijom iz hidroelektrana. Podatak o srednjoj godišnjoj količini oborina izmjerenoj za grad Dubrovnik u 2019. godini (1108,0 mm) preuzet je s mrežne stranice Državnog hidrometeorološkog zavoda.²²

3. Rezultati i rasprava

Utjecaj sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom na okoliš kvantificiran je specifičnim indikatorima i kategorijama utjecaja, a rezultati su prikazani u tablici 6. Tablični prikaz sažeto analizira razmatrane varijante sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika, a ovdje se iznose ključni nalazi analize. Pozitivni

Tablica 6 – Usporedba varijanti sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika

Table 6 – Comparison of various versions of the municipal solid waste management system of Dubrovnik

Indikator Indicator	Varijanta gospodarenja otpadom Variation of the municipal solid waste management system			
	V1	V2	V3	V4
Energija/GJ	33 063,00	−62 302,00	−97 172,00	−14 7832,00
Staklenički plinovi				
CO ₂ /t	10 614,00	10 109,00	10 883,00	12 039,00
CH ₄ /t	906,00	132,00	82,00	4,00
CO ₂ -eq/t	33 264,00	13 409,00	12 933,00	12 139,00
Plinovi koji utječu na zakiseljavanje				
NO _x /t	20,30	−7,43	−15,08	−26,18
SO ₂ /t	3,38	−13,45	−18,80	−26,07
HCl/t	0,17	−13,23	−29,71	−53,71
Prekursori smoga				
NO _x /t	20,30	−7,43	−15,08	−26,18
PM ₁₀ /t	8,50	−3,90	−6,50	−10,40
HOS/t	11,30	−10,61	−18,19	−28,83
Teški metali i organski spojevi				
– Zrak				
Pb/kg	0,10	0,38	−0,15	−1,11
Hg/kg	0,00	0,34	0,18	−0,11
Cd/kg	0,03	0,09	0,03	−0,05
PCDD/PCDF/g	3,00 · 10 ^{−3}	1,40 · 10 ^{−3}	1,20 · 10 ^{−3}	1,00 · 10 ^{−3}
– Voda				
Pb/kg	1,63	−2,43	−5,63	−10,54
Hg/kg	0,03	0,02	0,02	0,03
Cd/kg	1,93	0,64	0,48	0,21
BPK/kg	14 888,00	7 718,00	8 612,00	9 699,00
PCDD/PCDF/g	1,40 · 10 ^{−4}	5,10 · 10 ^{−5}	3,80 · 10 ^{−5}	1,70 · 10 ^{−5}
Ostati otpad/t	20 401,00	6 204,00	4 185,00	949,00

brojevi u tablici 6 predstavljaju emisije ili utrošenu energiju, dok negativni brojevi označavaju smanjenu emisiju i proizvodnju energije ili uštedu energije te predstavljaju poželjan doprinos zaštiti okoliša analiziranih varijanti.

Promatrajući postojeći sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika, može se primijetiti da sustav nije potpuno zadovoljavajući. Naime, iako su se u 2019. godini u gradu Dubrovniku odvojeno sakupljale korisne vrste otpada iz komunalnog otpada, obrada navedenog otpada nije zadovoljavajuća. Sortiranje, priprema i recikliranje metala, plastike, stakla i papira iz komunalnog otpada ne provodi se u dovoljnoj mjeri. Čak 85,5 % komunalnog otpada se bez prethodne obrade odlaže na odlagalište. Iako se organiziraju akcije odvojenog sakupljanja otpada, provode edukativne kampanje i informiranje javnosti o gospodarenju otpadom, ulaže u nove infrastrukture, potrebno je još mnogo da bi se postigli ciljevi navedeni u Zakonu o gospodarenju otpadom za odvajanje, pripremu za ponovnu uporabu, uporabu korisnih komponenti komunalnog otpada te smanjenje odlaganja otpada na odlagalište.

Predložene varijante V2, V3 i V4 sustava gospodarenja komunalnim otpadom grada Dubrovnika uključuju pretpostavke temeljene na kvantitativnim ciljevima postojećeg zakonodavstva o otpadu u Republici Hrvatskoj za povećanje količine materijalno ili energijski oporabljene krutog otpada te smanjenje odlaganja otpada. U predloženim varijantama pretpostavljeno je odvojeno sakupljanje i povećanje količine recikliranog krutog otpada, povećanje količine biorazgradivog otpada koji bi se kompostirao, energijska uporaba otpada uz kogeneraciju toplinske i električne energije te smanjenje količine odloženog krutog otpada na odlagalište. Uspostavom sustava gospodarenja komunalnim otpadom V2 recikliralo bi se preko 25 % otpada, kompostiralo 43 % biorazgradivog otpada, energijski bi se oporabilo više od 5 % uz kogeneraciju toplinske i električne energije, a na odlagalište bi se odložilo gotovo 24 % otpada. U varijanti V3 recikliralo bi se preko 30 % otpada, kompostiralo 47 % biorazgradivog otpada, energijski bi se oporabilo više od 4 % uz iskorištavanje nastale energije, dok bi se na odlagalište odložilo 17 % otpada. Primjenom V4 recikliralo bi se preko 34 % otpada, kompostiralo 54 % biorazgradivog otpada, energijski bi se oporabilo više od 3 % uz kogeneraciju toplinske i električne energije, a na odlagalište bi se odložilo 8 % otpada (slika 2).

Prema podacima prikazanim u tablici 6 može se zaključiti da bi se uspostavom sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom V2, V3 i V4 smanjile vrijednosti većine parametara od sveukupno 19 analiziranih parametara. Iz prikazanih rezultata potrošnje i proizvodnje energije za razmatrane varijante gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika (tablica 6), vidljivo je da se u varijantama V2, V3 i V4 ostvaruje pozitivna bilanca energije, tj. proizvodnja ili ušteda energije. U odnosu na postojeći sustav gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika, proizvodnja ili ušteda energije ostvarila bi se implementacijom navedenih varijanti, tj. povećanjem količine otpada obrađenog kompostiranjem, energijskom uporabom otpada uz kogeneraciju električne i toplinske energije te smanjenjem količine odloženog otpada. Budući da je u LCA energija indikator kategorije iscrpljivanja pri-

rodnih resursa, V4 bi predstavljala najpovoljniju varijantu s obzirom na uštedenu energiju, tj. smanjenje iscrpljivanja prirodnih resursa.

Aktivnostima gospodarenja otpadom, kao što su odlaganje, biološka obrada krutog otpada, uporaba otpada te upravljanje otpadnim vodama, dolazi do emisije stakleničkih plinova, koje uključuju CO₂, CH₄ i N₂O.²³ Rezultati LCA su prikazani kao emisije pojedinih stakleničkih plinova (CH₄ i CO₂) i kao ukupne emisije navedenih stakleničkih plinova svedenih na ekvivalentnu emisiju CO₂. Budući da pojedini staklenički plinovi imaju različita svojstva zračenja te shodno tome različito doprinose efektu staklenika, emisija svakog plina pomnožena je s njegovim stakleničkim potencijalom GWP (engl. *Global Warming Potential*). Staklenički potencijal mjera je utjecaja nekog plina na staklenički efekt u odnosu na utjecaj CO₂ koji je dogovorno uzet kao referentna vrijednost (GWP = 1). Za izračun ekvivalentnih emisija CH₄ upotrijebljen je staklenički potencijal 25.²³ Usporedbom prikazanih vrijednosti emisija stakleničkih plinova (tablica 6) može se zaključiti da se primjenom varijanti s povećanim udjelom recikliranja, kompostiranjem dijela biorazgradivog otpada, uporabom otpada te smanjenjem odloženog otpada emisija CO₂ povećava u nizu V2 < V3 < V4. Nadalje, u tablici 6 uočava se da je najveća vrijednost emisije CH₄ u V1, tj. u postojećem sustavu gospodarenja otpadom, u kojem se kruti otpad najvećim dijelom odlaže na odlagalište, dok je u ostalim varijantama gospodarenja komunalnim otpadom ta vrijednost znatno niža. Dobiveni rezultati potvrđuju prednosti recikliranja, kompostiranja, energijske uporabe i odlaganja na uređena odlagališta. Naime, što je veći postotak recikliranja, kompostiranja i dobivanja energije energijskom uporabom otpada, to je manje otpada koji je potrebno odložiti na odlagalište. Primjenom navedenih postupaka obrade otpada, odnosno iskorištavanjem materijalnih i energetskih svojstva otpada u granicama tehničkih, ekoloških i ekonomskih mogućnosti, ne samo da se smanjuje ukupna količina otpada za odlaganje već se smanjuje i sadržaj biorazgradivog otpada, čime se znatno smanjuje emisija CH₄ u atmosferu a posljedično i CO₂-eq. Budući da u je IWM-EPIC/CSR programu indikator emisije stakleničkih plinova povezan s kategorijom utjecaja klimatske promijene, može se zaključiti da se najveće smanjenje emisije stakleničkih plinova izraženih CO₂-eq, a time najmanji doprinos klimatskim promjenama ostvaruje primjenom V4.

Dušikovi oksidi (NO_x), SO₂ i HCl glavne su onečišćujuće tvari koje uzrokuju zakiseljavanje.²³ U različitim prostornim i vremenskim razmjerima, navedene tvari pridonose zakiseljavanju tla, zraka i vode. Sa stajališta LCA otpada, najveće vrijednosti tih zakiseljavajućih tvari nastaju emisijom iz procesa sakupljanja i transporta otpada, odnosno sagorijevanjem fosilnih goriva, aerobnim postupkom razgradnje organskog otpada, tj. kompostiranjem, uporabom te odlaganjem otpada. Usporedbom razmatranih sustava gospodarenja otpadom može se vidjeti da se emisije svih triju zakiseljavajućih tvari smanjuju u nizu V1 > V2 > V3 > V4. Kao rezultat smanjenja emisija svih triju onečišćujućih tvari, smanjuje se zakiseljavanje.

Aktivnosti u sustavu gospodarenja otpadom, kao što su prijevoz otpada, biološka razgradnja otpada na odlagalištu te uporaba otpada, uzrokuju otpuštanje velikog broja tva-

ri koje uzrokuju onečišćenje atmosfere i znatno utječu na ljudsko zdravlje i okoliš. U radu su analizirani prekursori smoga²³ NO_x, PM₁₀ i HOS, te se iz prikazanih rezultata može vidjeti da se njihova emisija smanjuje primjenom sustava gospodarenja otpadom opisanih V2, V3 i V4, što pridonosi poboljšanju kvalitete zraka u sve tri varijante.

Ključni izvori emisije teških metala (Pb, Hg i Cd), dioksina i furana (PCDD/PCDF) su prijevoz otpada i procesi oporabe otpada, a mogu se susresti u svim dijelovima sustava gospodarenja otpadom.^{24,25} Emisija navedenih teških metala iz spomenutih aktivnosti javlja se zbog njihova sadržaja u energentima, u ulaznoj sirovini proizvodnih procesa te u otpadnim plinovima. Teški metali emitirani iz procesa u sustavima gospodarenja otpadom mogu se, pričvršćeni za čestice nošene zrakom, prenijeti atmosferom na velike udaljenosti, a atmosfersko taloženje na nekim područjima može biti važan, ako ne i dominantan, udio u onečišćavanju tla i voda. Budući da su stabilni i ne mogu se razgraditi ili uništiti, imaju tendenciju nakupljanja u tlima i sedimentima. Zbog svoje toksičnosti i drugih spomenutih svojstava, teški metali također su opasni za žive organizme. Dioksini i furani su organski spojevi koji nastaju kao produkt izgaranja organskih tvari koje sadrže klor. Postojani su (otpornost na kemijsku, fotokemijsku i biološku razgradnju), imaju svojstvo bioakumulacije, a mogu se prenijeti na velike udaljenosti, jer se zbog svojstva djelomične hlapljivosti nalaze u parnoj fazi ili se adsorbiraju na čestice u atmosferi te tako štetno djeluju na okoliš i ljudsko zdravlje.^{24,25} Prema podacima prikazanim u tablici 6 može se zaključiti da bi se uspostavom sustava gospodarenja komunalnim otpadom V2, zbog energijske oporabe otpada uz istodobnu proizvodnju toplinske i električne energije, povećale emisije teških metala i organskih spojeva, tj. dioksina i furana, u zrak, što bi kao posljedicu imalo povećanje štetnog djelovanja na život i zdravlje ljudi i stanje okoliša. Međutim, s obzirom na analizirane kategorije utjecaja, prelaskom na V2 smanjio bi se doprinos klimatskim promjenama, smanjilo bi se zakiseljavanje i nastanak smoga. Primjenom V3 i V4 vrijednosti smanjile bi se emisije teških metala i postojanih organskih spojeva u zrak, što bi pozitivno djelovalo na život i zdravlje ljudi te stanje okoliša. Emisije teških metala, dioksina i furana u vodu smanjuju se u nizu V1 > V2 > V3 > V4. Nadalje, u radu je analizirana vrijednost BPK koja je jedan od pokazatelja stupnja onečišćenja vode organskim tvarima.²⁶ Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da bi se povećanjem udjela biorazgradivog otpada obrađenog aerobnim postupkom razgradnje, vrijednost BPK povećavala u slijedu V2 < V3 < V4. Kao pokazatelj degradacije okoliša u LCA razmatran je indikator ostatni otpad, a vrijednosti su prikazane u tablici 6. Očito je da su najveće količine ostatnog otpada u V1 koji opisuje postojeći sustav gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika. U analiziranim varijantama V2, V3 i V4 odvojenim sakupljanjem, recikliranjem, oporabom otpada količina krutog ostatnog otpada za odlaganje svedena je na minimum. Najmanja količina ostatnog otpada je u V4 i iznosi 949,00 t, što je smanjenje od 95 % u odnosu na V1.

Dobiveni podatci navode na zaključak da bi se primjenom V4 smanjilo iscrpljivanje prirodnih resursa, smanjio bi se doprinos klimatskim promjenama, smanjilo bi se zakiseljavanje, nastajanje smoga te degradacija okoliša, što bi doprinijelo kakvoći okoliša, življenja te zdravlja ljudi. Međutim, za implementaciju tog sustava gospodarenja potrebno je razmatrati širi aspekt doprinosa energijske oporabe otpada, uzimajući pri tome u obzir zaštitu okoliša i važnost tog postupka obrade za ostvarenje zakonski postavljenih ciljeva. Također, u tom slučaju napredak bi zahtijevao i velika ekonomska ulaganja.

4. Zaključak

Primjena LCA metodologije kao analitičkog alata za potporu pri odlučivanju u planiranju novih strategija i učinkovitijeg sustava gospodarenja komunalnim otpadom koji bi najmanje štetno utjecao na okoliš i kvalitetu života nije jako raširena praksa u Republici Hrvatskoj. U ovom radu primijenjen je LCA model za procjenu utjecaja na okoliš životnog ciklusa sustava gospodarenja otpadom grada Dubrovnika. Računalnim programom IWM-EPIC/CSR analiziran je postojeći sustav gospodarenja otpadom grada Dubrovnika i razmatrane su tri varijante unaprijeđenog sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom radi ostvarivanja ciljeva zakonodavstva o otpadu u Republici Hrvatskoj, na temelju podataka o otpadu grada Dubrovnika za 2019. godinu. Predložene tri varijante predstavljale su sustave usklađene s redom prvenstva gospodarenja otpadom, a razlikovale su se u udjelima komponenti komunalnog otpada koje bi se reciklirale ili energijski oporabile ili bi se odložile na odlagalište. Zbog ograničenja računalnog programa nisu analizirane sve vrste komunalnog otpada, nisu obuhvaćeni svi dostupni procesi gospodarenja otpadom te nisu analizirani svi mogući utjecaji procesa gospodarenja otpadom na sastavnice okoliša i opterećenja okoliša. Nakon analize i usporedbe utjecaja na okoliš različitih varijanti sustava gospodarenja otpadom može se zaključiti da bi se primjenom varijanti s recikliranjem, kompostiranjem i energijskom oporabom uz kogeneraciju energije smanjili svi važniji utjecaji na zdravlje ljudi, smanjila bi se degradacija okoliša i uvelike smanjilo crpljenje nepovratnih prirodnih bogatstava. Najveće smanjenje specifičnih indikatora i kategorija utjecaja te postizanje ciljeva povećanja količine materijalno ili energijski oporabljenog otpada te smanjenja odlaganja otpada postiglo bi se implementacijom V4. Međutim, s obzirom na to da grad Dubrovnik do 2022. godine nije uspio ostvariti niti ciljeve predviđene za 2020. godinu, uvođenje ovog sustava gospodarenja otpadom do 2035. godine teško je izvedivo. Nadalje, da bi se odabrala najbolja varijanta gospodarenja komunalnim otpadom, ovu studiju potrebno je nadopuniti financijskom i socioekonomskom analizom varijanti, jer LCA analiza ne može poslužiti kao isključiva osnova za odlučivanje o implementaciji najbolje varijante sustava gospodarenja otpadom.

Popis kratica i simbola**List of abbreviations and symbols**

LCA	– procjena životnog ciklusa – life-cycle assessment
ORWARE	– Organic Waste Research
IWM-EPIC/ CSR	– Integrated Waste Management-Environment and Plastics Industry Council and Corporations Supporting Recycling
MSW-DST	– Municipal Solid Waste Decision Support Tool
WISARD	– Waste-Integrated Systems Assessment for Recovery and Disposal
IWM-2	– Integrated Waste Management
SSWMSS	– Strategic Solid Waste Management Supporting Software
LCA IWM	– Life Cycle Assessment-Integrated Waste Management
WRATE	– Waste and Resources Assessment Tool for the Environment
EASEWASTE	– Environmental Assessment of Solid Waste Systems and Technologies
EASETECH	– Environmental Assessment System for Environmental Technologies
SWOLF	– Solid Waste Optimization Life-Cycle Framework
MKO	– miješani komunalni otpad – mixed municipal waste
BKO	– biorazgradivi komunalni otpad – biodegradable municipal waste
V1, V2, V3, V4	– varijante sustava gospodarenja krutim komunalnim otpadom grada Dubrovnika – variations of the city of Dubrovnik's municipal solid waste management system
KB	– ključni broj otpada sukladno Katalogu otpada – key number of the waste in accordance with the Waste catalogue
CO ₂ -eq	– ekvivalentna emisija ugljikovog dioksida, t – carbon dioxide equivalent, t
NO _x	– dušikovi oksidi, t – nitrogen oxides, t
PM ₁₀	– čestice aerodinamičnog promjera manjeg od 10 μm, t – particulate matter (< 10 μm), t
HOS	– hlapljivi organski spojevi, t – volatile organic compounds, t
PCDD/ PCDF	– poliklorirani dibenzo- <i>p</i> -dioksini/poliklorirani dibenzofurani, g – polychlorinated dibenzo- <i>p</i> -dioxins / polychlorinated dibenzofurans, g
BPK	– biološka potrošnja kisika, kg – biochemical oxygen demand, kg
GWP	– staklenički potencijal – global warming potential

Literatura**References**

- Zakon o gospodarenju otpadom, Narodne novine br. 84/2021.
- Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. – 2022., Narodne novine br. 3/2017.
- Izmjena Plana gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. – 2022. godine, Narodne novine br. 1/2022.
- Zakon o održivom gospodarenju otpadom, Narodne novine br. 94/2013, 73/2017, 14/2019, 98/2019.
- P. R. White, P. Hindle, K. Drager, Lifecycle assessment of packaging, u G. M. Levy. (ur.), Packaging in the Environment, Springer New York, NY, 1993.
- P. R. White, M. Franke, P. Hindle, Integrated Solid Waste Management: A Lifecycle Inventor, Chapman & Hall Food Science Book, Aspen Publishers, Inc. Gaithersburg, Maryland, 1999.
- F. McDougall, P. White, M. Franke, P. Hindle, Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory, Blackwell Science Ltd, Blackwell Publishing Company, Oxford, UK, 2001.
- E. C. Gentil, A. Damgaard, M. Hauschild, G. Finnveden, O. Eriksson, S. Thorneloe, P. O. Kaplan, M. Barlaz, O. Muller, Y. Matsui, I. Ryota, T. H. Christensen, Models for waste life cycle assessment: Review of technical assumptions, Waste Manag. **30** (2010) 2636–2648, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.004>.
- J. Clavreul, H. Baumeister, T. H. Christensen, A. Damgaard, An environmental assessment system for environmental technologies, Environ. Model. Softw. **60** (2014) 18–30, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.06.007>.
- J. W. Levis, M. A. Barlaz, J. F. DeCarolis, S. R. Ranjithan, A generalized multistage optimization modeling framework for life cycle assessment-based integrated solid waste management, Environ. Model. Softw. **50** (2013) 51–65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.08.007>.
- A. Björklund, G. Finnveden, L. Roth, Application of LCA in Waste Management, u Solid Waste Technology & Management, 1&2, T. H. Christensen (ur.), Wiley: Hoboken, NJ, USA, 2010., str. 137–160.
- J. Winkler, B. Bilitewski, Comparative evaluation of life cycle assessment models for solid waste management, Waste Manag. **27** (2007) 1021–1031, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.023>.
- URL: <https://www.dubrovnik.hr/uploads/posts/14394/18.2.Demografska-razvojna-strategija-Grada-Dubrovnika.pdf> (14. 6. 2022.).
- URL: <http://www.zavoddbk.org/> (14. 6. 2022.).
- URL: <https://dzs.gov.hr/istaknute-teme-162/popis-istanovnistva-2/popis-istanovnistva-2011/196> (14. 6. 2022.).
- URL: https://dura.hr/wp-content/uploads/2021/02/Plan_gospodarenja_otpadom_2018_2023.pdf (14. 6. 2022.).
- URL: <http://www.haop.hr/hr/tematska-podrucja/otpad-registri-oneciscavanja-i-ostali-sektorski-pritisci/gospodarenje-otpadom-0> (22. 8. 2022.).
- URL: [http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/lzvjesca/obveze_jls/OTP_2019_IRDJU_pregled%20podataka%20\(final%20WEB\).pdf](http://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/dokumenti/021_otpad/lzvjesca/obveze_jls/OTP_2019_IRDJU_pregled%20podataka%20(final%20WEB).pdf) (22. 8. 2022.).
- EPIC/CSR (Environment and Plastics Industry Council/Corporations Supporting Recycling). Integrated Solid Waste Management Tools: User Guidance Document; EPIC/CSR (Environment and Plastics Industry Council/Corporations Su-

- pporting Recycling): Carrey, NC, USA, 2000.
20. URL: https://www.haop.hr/sites/default/files/uploads/specificni-dokumenti/publikacije/knjige/Metodologija_za_odredivanje_sastava_i_kolicina_komunalnog_otpada.pdf (12. 8. 2022.).
 21. URL: <https://www.hep.hr/ods/pristup-mrezi/distribucijska-podrucja-25/elektrojug-dubrovnik/78> (17. 6. 2022.).
 22. URL: https://meteo.hr/klima.php?section=klima_podaci¶m=k2_1&Godina=2019 (17. 6. 2022.).
 23. URL: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/24-cp-19_tcm30-508433.pdf (20. 11. 2022.).
 24. URL: https://mingor.gov.hr/UserDocImages/klimatske_aktivnosti/zrak_tlo_svjetošno/tehcnical_guidelines_hr/pccd_pcdf_12_5_add4_rev1_hr.pdf (20. 11. 2022.).
 25. URL: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/full/2021_04_42_827.html (20. 11. 2022.).
 26. URL: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2020_03_26_622.html (20. 11. 2022.).

SUMMARY

Life-Cycle Assessment of Municipal Solid Waste Management Systems: A Case Study of the City of Dubrovnik

Ivana Smoljko and Matea Matić*

Due to changes in economic development, tourism, and higher consumption, the daily per capita municipal solid waste generation in the city of Dubrovnik is expected to rise. Dubrovnik's waste largely ends up in landfill, with only a small fraction collected and recovered independently. To minimise negative effects on the environment and society as a whole, it is vital to assess the environmental implications of waste management processes, goods, and services throughout their entire cycles. Using the life-cycle assessment IWM-EPIC/CSR software, this study examined the environmental impacts of Dubrovnik's municipal solid waste management system. Based on data on Dubrovnik's waste for 2019, the existing municipal waste management system of Dubrovnik (V1) was reviewed, and three enhanced variations of the municipal solid waste management system (V2, V3, and V4) were taken into consideration. In variants V2, V3, and V4, it was assumed that less municipal waste would be disposed of in favour of type-specific waste collection, processing, and utilisation (such as recycling or energy recovery), as well as the accomplishment of the quantitative and qualitative targets established by the Waste Management Act. After examining and contrasting the effects of various waste management system variations on the environment, it was possible to draw the conclusion that, by implementing variant V4, in which more than 34 % of waste would be recycled, 54 % of biodegradable waste would be composted, more than 3 % of energy would be recovered through cogeneration of heat and electricity, and 8 % of waste would be disposed of at the landfill, all significant negative effects on human health would be mitigated, as would environmental degradation and the extraction of irreversible natural resources.

Keywords

Life-cycle assessment, IWM-EPIC/CSR software, municipal solid waste, waste management system

University of Split, Faculty of Chemistry and Technology, Department of Electrochemistry and Materials Protection, Ruđera Boškovića 35, 21 000 Split, Croatia

Professional paper
Received October 7, 2022
Accepted February 22, 2023