

## **Analiza upravičenosti reciklaže odpadne komunalne plastike**

### **Analisis of the eligibility of post- consumer plastic waste recycling**

**Igor MADON**

Komunalno stanovanjska družba, Goriška 23B, 5270 Ajdovščina ; igor.madon@ksda.si

**Povzetek:** Okoljevarstveni smisel recikliranja je v snovni izrabi uporabnega odpadnega materiala v namene proizvodnje novih izdelkov, s čimer se zmanjšajo tako potrebe po primarnih surovinah kot količine odpadkov divergiranih v odlaganje. Vendar je pri tem treba upoštevati, da je reciklabilnost nekega materiala odvisna od tehnoloških in ekonomskih zmožnosti njegove transformacije v surovino za proizvodnjo novih izdelkov, kot tudi dejstvo, da odlaganje praviloma ne predstavlja edinega možnega ponora, ki ga za konkretno vrsto odpadka imamo na razpolago. Piramidalna stratifikacija prednostnih metod ravnanja z odpadki je bila skonstruirana v obdobju, ko je strategija razvoja evropske družbe še temeljila na povojni paradigmi hitrega dviga življenjskega standarda prebivalstva, ne pa na paradigmi trajnostnega razvoja, kakršna je aktualna danes. A ne glede na strategijo, metoda recikliranja ne more in ne sme imeti apriorne prednosti pred katero koli drugo metodo ravnanja z odpadki, če so ultimativni učinki njene implementacije na okolje in gospodarstvo primerjalno slabši. Komparativna analiza primerjajoč različne sisteme integralnega gospodarjenja za posamezne tokove odpadkov lahko poda zadovoljiv odgovor na tovrstne dileme. Celovita analiza bo predstavljena v enem izmed naslednjih člankov. V tem članku se osredotočamo na iskanje odgovora na vprašanje, ali se z reciklažo odpadne plastike, zlasti tiste komunalne provenience, res zmanjšajo potrebe po eksploataciji in rafinaciji deviških surovin, kar je po definiciji osnovni smoter recikliranja. Z relativnim primerjanjem masno-energetskih bilanc porabe nafte dveh antagonističnih integriranih konceptov ravnanja z odpadki, enega s- in drugega brez prakticiranja metode reciklaže, smo ugotovili, da je poraba nafte v obeh primerih enaka. Ultimativni učinek recikliranja komunalne odpadne plastike je tako negativen, saj so stroški obratovanja tovrstnega integralnega sistema gospodarjenja z odpadki, kot tudi spremljajoča okoljevarstvena tveganja ter obremenjevanje okolja lahko primerjalno samo večji.

**Ključne besede:** odpadna komunalna plastika, recikliranje, integrirani sistem ravnanja z odpadki, energetska izraba odpadkov, komparativna analiza

**Abstract:** Concept of recycling implies converting waste materials into new products, thereby reducing consumption of primary raw materials and saving landfill space. The well known pyramid of waste hierarchy favoring recycling over all kinds of waste disposal methods appears to be constructed during the time when European development strategy was still focusing on fast economic growth rather than on principles of sustainable development, preserving natural resources. However, when prioritizing recycling we have also to consider the fact that recyclability of a material depends on its technological adequacy to reacquire the properties it had in its original state as well as the fact that waste-to-energy is a recovery method, although it works as a final sink. Whatever the strategy, it does not seem to be legitimate to favor recycling when some other method, whichever it is, provides better solutions for the environment and the economy. Comparative analyses scrutinizing environmental and economic performance of different systems of integrative waste management for selected materials, which will be presented in the ensuing articles, can provide valid answers to such dilemmas. In this article, the focus is put on the alleged potential of plastic waste recycling methods regarding their ability to reduce virgin crude oil consumption. By comparing long- term mass balances of crude oil consumption comparing two antagonistic systems of waste management, one with- and other without practising plastic waste recycling, we concluded the result is ultimately the same in both of these cases. Preserving natural resources, which is the main objective of waste recycling by definition, is therefore not fulfilled, while costs, environmental risks and emissions running such a technologically complicated system can be only larger than without recycling.

**Key words:** post- consumer plastic waste, recycling, integral system of waste management, waste to energy, comparative analysis

## 1. Uvod

V komplementarnem članku [1] so bili predloženi predpostavljene razlogi kontradiktornega delovanja obstoječih sistemov integralnega gospodarjenja s komunalnimi odpadki (INTGO) v Sloveniji. Problematika je bila skrutinirana s praktičnega vidika upravljalca lokalnega CER, a tudi z bolj filozofskega aspekta, iščoč odgovor na retorično vprašanje, zakaj imajo nepreverjeni ideološki koncepti tako odločujoč vpliv na dolgoročne usmeritve odpadkovne politike. Članek se je zaključilo s tezo, da je relativna neučinkovitost delovanja obstoječih sistemov INTGO posledica nesmotrnih načinov aplikacije teoretičnih konceptov gospodarjenja z odpadki v prakso, ki so medsebojno le pogojno kompatibilni. Govorimo o konceptih, kot so

- podaljšana proizvajalčeva odgovornost (PRO)
- petstopenjska hierarhija prednostnih metod ravnanja z odpadki ( $\Delta 5$ )
- "ničelna" toleranca do okoljevarstvenega tveganja ( $Tol_0$ )
- trajnostni razvoj in krožno gospodarstvo (TR&KGO)
- obvezne javne službe varstva okolja (OJS).

Menimo, da je z izvedbo ustrezno koncipiranih komparativnih analiz, kvantitativno primerjajoč okoljevarstveno in ekonomsko učinkovitost delovanja antagonistično zasnovanih teoretičnih modelov INTGO med seboj, možno detektirati sistemske napake na tem področju, kot tudi njihovo odpravo. Problematična sta predvsem obstoječa načina upravljanja s t.i. suhimi, gorljivimi frakcijami KO ( $LZF_{\text{suh}}$ ) ter z blati KČN. Če bi obstoječi sistem INTGO želeli transformirati v priporočenega, kakršen je bil predložen v komplementarnem članku [1], in če se osredotočimo zgolj na ravnanje  $LZF_{\text{suh}}$ , bi morale biti na državnem nivoju izpeljane sledeče strukturalne spremembe:

- i. Poenostavitev obstoječe prakse ločenega zbiranja KO s poudarkom na razvrščanju gospodinjskih odpadkov na dve principielni mešani frakciji: suho- ( $LZF_{\text{suh}}$ ) in mokro- ( $LZF_{\text{mokr}}$  oz.  $LZF_{\text{bio}}$ ). Ukinitve veljavnosti koncepta PRO za področje odpadne embalaže, ki je komunalni odpadke. To bi omogočilo izpeljavo racionalizacije sistema ločenega zbiranja, drastično zmanjšanje deleža MKO na vhodni strani sistema (tudi pod 15%) ter optimizacijo obdelave problematičnih tokov KO v sukcesivnih tehnoloških fazah.

- ii. Sortiranje  $LZF_{\text{suh}}$  (s ciljem izločitve škodljivih frakcij odpadkov ter visoko- vrednih reciklatov, kar skupaj predstavlja kvečjemu 15% masnega toka  $LZF_{\text{suh}}$ ) ter proizvodnjo visoko-kvalitetnega goriva "TGO<sub>SRF</sub>" ("*solid recovered fuel*") iz  $LZF_{\text{suh}}$  in prebranih gorljivih frakcij kosovnih odpadkov uzakoniti kot OJS varovanja okolja. Večina občin oz. skupnosti občin si obdelave LZF ni sposobna zagotoviti v okviru obratovanja lastnih LCERO, zato bi se v ta namen bile dolžne povezovati s sosednjimi LCERO, regionalnimi RCERO ali s privatnimi koncesionarji. Slovenija bolj ali manj že razpolaga z ustrežno infrastrukturo in opremo zadostne kapacitete za tovrstne potrebe, predvsem v okviru obstoječih kompleksov RCERO in podobno zasnovanih zasebnih CERO, le nekoliko prirediti in nadgraditi bi jih bilo potrebno.
- iii. Prekinitev s sistemskim prioritiziranjem recikliranja tistih frakcij KO, ki so zgolj ideološko, ne pa tudi tehnično in okoljsko usklajeni z načeli  $\Delta 5$  in TR&KGO, npr. raznih vrst odpadne komunalne plastike in kompozitnih materialov, izsortiranih iz MKOE in MKO<sub>LF</sub>. V zameno favorizirati proizvodnjo goriva tehnično in okoljevarstveno ustrežne kvalitete. Tovrstnemu gorivu ukiniti status odpadka, ne pa tudi gorivu dvomljive kvalitete TGO<sub>RDF</sub> ("*refuse derived fuel*"), ki nastaja pri obdelavi klasičnih MKO ali kot nezaželeni produkt pri pripravi reciklatov iz MKOE. S tem bi TGO<sub>SRF</sub> na prostem trgu pridobil pozitivno ali vsaj ničelno ekonomsko vrednost, z daljnosežnimi pozitivnimi okoljskimi in ekonomskimi učinki na delovanje sistemov INTGO<sub>LZF<sub>suh</sub></sub> in INTGO<sub>MKOpreostanek</sub>. Vzpodbujanje energetske izrabe TGO<sub>SRF</sub> v že obstoječih industrijskih napravah (t.j., v ustrežno modificiranih cementarnah, termoelektarnah/ toplarnah), saj je njihova kapaciteta zadostna [2]. Samo nezaželeni preostanek gorljivih frakcij KO, npr. odpadni PVC (okoli 10% mase gorljivih frakcij KO) bi še bilo potrebno odpremljati v klasične sežigalnice ali na odlaganje.

V evropskih statistikah se celotno maso odpadkov, oddano reciklažnim podjetjem, smatra za reciklirano [3], vse vrste odpadkov, ki se generirajo v nadaljnjih fazah gospodarjenja z odpadki, pa se obravnava kot nekomunalne. Tovrsten način zajema podatkov družbam za ravnanje z odpadno embalažo (DROE) ustreza, saj lažje zadostijo zahtevam po zagotovitvi predpisanih deležev KO, ki jih je na letnem nivoju formalno treba divergirati v reciklažo. Za potrebe izvedbe komparativnih analiz pa se ne da ignorirati dejstva, da se tudi v reciklažnih podjetjih znaten del od DROE in RCERO prejete predsortirane mase MKOE oz. MKO<sub>LF</sub> ultimativno ne vgradi v strukturo novih izdelkov. Do izločitve neprimerne materiala pride predvsem v fazi predpriprave surovine. Tovrstne industrijske odpadke se kot gorivo TGO<sub>RDF</sub> ali kot surovino za proizvodnjo TGO<sub>SRF</sub> proti plačilu odpremlja podjetjem, ki razpolagajo z ustreznimi kurilnimi napravami. Kot drugi "skriti" učinek sistemskega vzpodbujanja reciklaže moramo upoštevati tudi fenomen slabše kvalitete izdelkov proizvedenih iz recikliranega materiala ([4], [5], [6]), posledičnega skrajšanja življenjske dobe tovrstnih proizvodov ter povečane generacije novih odpadkov.

V tem članku se bomo osredotočili na generalizirano analizo smotnosti reciklaže odpadne komunalne plastike (in drugih frakcij iz nabora  $LZF_{\text{suh}}$ , kakršna je npr. "tetrapak" embalaža). Konstrukcija komparativne metode ter izvedba komparativnih analiz, primerjajoč učinkovitost različno zasnovanih sistemov INTGO med seboj, pa bo predvidoma prikazana v ločenih člankih.

## 2. Računska ocena hitrosti naraščanja vsebnosti neželenih primesi v surovini iz naslova repetitivnega recikliranja

Recimo, da bi v splošnem želeli oceniti, kolikšen odstotek recikliranega materiala lahko konstantno divergiramo v proces proizvodnje novih izdelkov, da delež neželenih primesi ne bi prekoračil neke tehnološko določene mejne vrednosti. Zaradi poenostavitve sponirajmo surovino na vhodu v proizvodni proces sestavljeno iz 50% deviškega- ter 50% 1- krat že recikliranega materiala, z vsebnostjo 5% neželenih primesi. Premešana surovina na vhodu v proces v tem primeru vsebuje 2,5% neželenih primesi. Nadalje, če je sekundarna surovina bila že 2-krat reciklirana, torej z vsebnostjo 7,5% primesi (iz 5% novih + 2,5% izhajajočih iz 1. šarže recikliranja), v procesu uporabljena surovina vsebuje  $7,5/2 = 3,75\%$  nečistoč. S ponavljajočim recikliranjem dobimo v limiti sledeči rezultat:

$$2,5+2,5/2+2,5/4+2,5/8+2,5/16+2,5/25+2,5/26+\dots+2,5/2n + \dots = 5\% \quad (1)$$

Masa reciklirajočega materiala (izdelki + reciklati) bi se hitro akumulirala v krožnem sistemu, če odpadkov ne bi tudi odstranjevali. V n- letih bi narasla na vrednost prikazano spodaj:

$$m_{\text{vhod v proizvodnjo}/2} + m_{\text{vhod v proizvodnjo}/2} + \dots = n \cdot m_{\text{vhod v proizvodnjo}/2} \quad (2)$$

Iz razlage zgoraj sledi, da mora na dolgi rok iz reciklirajočega sistema v povprečju ponikniti tolikšna masa odpadnega materiala letno, kot znaša vsakoletni input novega materiala proizvedenega iz primarnih virov:

$$m_{\text{vhod v proces, primarna surovina}} = m_{\text{ponori}} (m_{\text{izgube v sistemu}} + m_{\text{odstranjevanje nastalih odpadkov}}) \quad (3)$$

Teoretično bi lahko delež odstranjevanja zmanjšali tako, da bi povečali delež recikliranega materiala, česar pa potencialno ne smemo storiti, ker smo omejeni z maksimalno še znosno količino neželenih primesi na vходу v proizvodni proces. Lahko bi poskušali zmanjšati delež primesi, ki nastaja v sistemu, vendar je to potencialno povezano z nesorazmerno visokimi stroški in/ali povečanim obremenjevanjem okolja.

Različne vrste plastike sicer prenesejo zelo različne odstotke neželenih primesi v surovini (poleg zunanjih nečistoč imajo lahko detrimentalen učinek tudi v reciklatih vsebujoči aditivi, primesi drugih polimerov, itd. - [7], [8], [9], [10]). Dodatno, obstajajo različne metode recikliranja (generalno se delijo na mehanske in kemijske [11]). Ob predpostavki konstantnih razmerij med primarno in reciklirano surovino pri procesu ponavljajočega recikliranja, lahko ugotovimo, da se delež neželenih primesi v limiti ustali pri neki določeni vrednosti. Primeri:

Če vsebuje 1-krat recikliran material 10% primesi, in v proizvod vgrajujemo 25% reciklatov, bo prvič pripravljena surovina za recikliranje vsebovala 2,5% primesi (deviški material + 1-krat rec. material v razmerju 3:1), drugič 3,125% primesi (deviški material + 2-krat rec. material v razmerju 3:1), v limiti pa 3,33% nečistoč, t.j. 3-krat manj kot 1-krat reciklirani material. Gre za zaporedje

$$10 \cdot (1/4) + 10 \cdot (1/4)^2 + 10 \cdot (1/4)^3 + 10 \cdot (1/4)^4 + 10 \cdot (1/4)^5 + \dots + 10 \cdot (1/4)^n = 2,5 + 0,625 + 0,156 + 0,039 + 0,001 + \dots = 3,33\% \quad (4)$$

Če vsebuje 1-krat recikliran material 10% primesi, in v proizvod vgrajujemo 75% reciklatov, bo prvič pripravljena surovina za recikliranje vsebovala 7,5% primesi (deviški material + 1-krat rec. material v razmerju 1:3), drugič 13,125% primesi (deviški material + 2-krat rec. material v razmerju 1:3), v limiti pa 30% primesi, 3-krat toliko kot 1-krat reciklirani material. Gre za zaporedje

$$10 \cdot (3/4) + 10 \cdot (3/4)^2 + 10 \cdot (3/4)^3 + 10 \cdot (3/4)^4 + 10 \cdot (3/4)^5 + \dots + 10 \cdot (3/4)^n = 7,5 + 5,625 + 4,219 + 3,164 + 2,373 + 1,779 + 1,335 + 1,001 + 0,751 + 0,563 + 0,422 + \dots = 30\% \quad (5)$$

Če vsebuje material, ki bo recikliran prvič, 1% primesi, in v proizvod vgrajujemo 90% reciklatov, bo 1. šarža recikliranja vsebovala 0,9% primesi (deviški material + 1-krat rec. material v razmerju 1:9), 2. šarža recikliranja 1,71% primesi (deviški material + 2-krat rec. material v razmerju 1:9), n-ta šarža pa v limiti 9% primesi, 10-krat toliko kot 1-krat reciklirani material. Gre za zaporedje

$$1 \cdot (9/10) + 1 \cdot (9/10)^2 + 1 \cdot (9/10)^3 + 1 \cdot (9/10)^4 + 1 \cdot (9/10)^5 + \dots + 1 \cdot (9/10)^n = 0,9 + 0,81 + 0,729 + 0,656 + 0,590 + 0,531 + 0,478 + 0,430 + 0,387 + 0,349 + 0,314 + 0,282 + 0,254 + 0,229 + 0,206 + 0,185 + 0,167 + 0,150 + 0,135 + 0,122 + 0,110 + 0,099 + 0,089 + 0,080 + 0,072 + \dots = 9\% \quad (6)$$

Formula za vsoto zaporedja se v splošnem torej glasi:

$$D_{n\text{-primesi}} = \sum_{n=1}^{\infty} d_{\text{primesi}} \cdot d_{\text{Re}}^n \quad (7)$$

$D_{n\text{-primesi}}$ ..... delež škodljivih primesi v surovini za proizvodnjo po sukcesivni izvedbi n-te reciklaže (v limiti teče "n" od "1" do "neskončno")

$d_{\text{primesi}}$  ... delež primesi v reciklatu za proizvodnjo (vnos primesi ob vsakokratni stopnji recikliranja)

$d_{RC}$  ..... delež recikliranega materiala za pripravo vsakokratne surovinske mešanice

Poleg vstopanja zunanjih nečistoč ter že vsebujočih aditivov v surovino pri vsakokratni stopnji reciklaže, je treba dodatno upoštevati tudi vzporedno potekajoče procese degradacije recirkulirajočega materiala (polimerov), do česar prihaja tako med izvajanjem repetitivnih tehnoloških postopkov reciklaže, kot v času življenjske dobe uporabe plastičnih proizvodov [4]. Celovita formula za izračun bi lahko izgledala takole :

$$D_{n\text{-primesi}} = \sum_{n=1}^n d_{\text{primesi}} \cdot (d_{RC} \cdot f_d)^n, \quad \text{kjer pomeni} \quad (8)$$

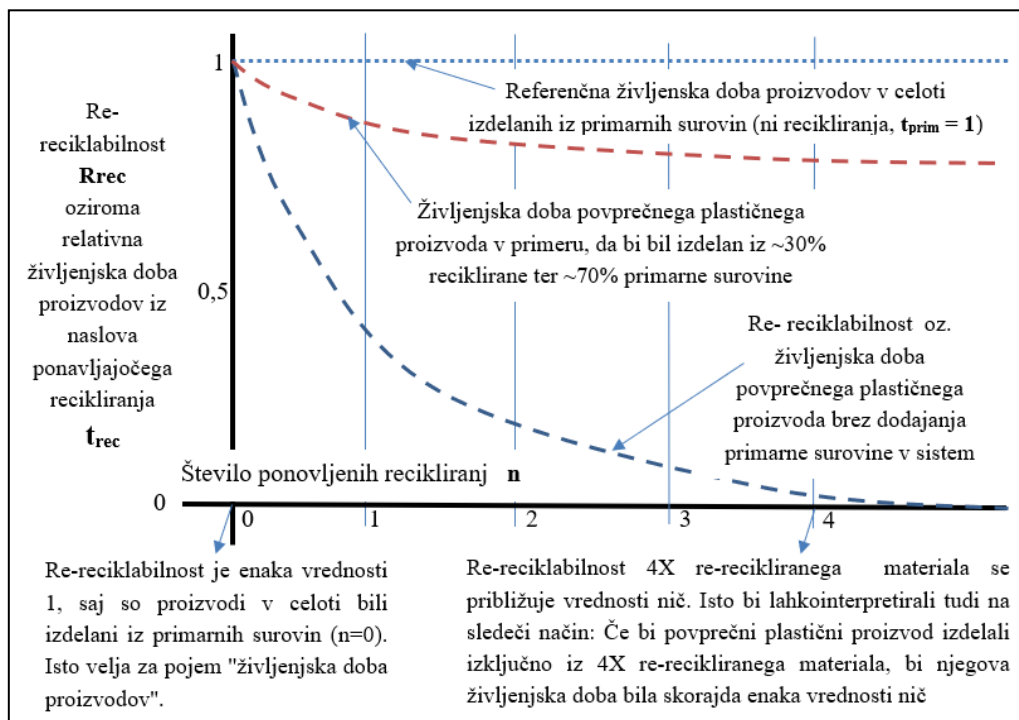
$f_d$  ..... faktor hitrosti degradacije reciklirajočega materiala ( $f_d > 1$ , običajno manjši od 3)

Npr., če bi pri vsakokratni reciklaži v reciklirano surovino vstopalo po 5% neželenih primesi (kar lahko pri odpadni plastiki komunalne provenience zlahka pričakujemo) in bi delež reciklata za pripravo granulata za proizvodnjo novih izdelkov znašal 50% (50% pa deviški material), bi ob ocenjeni hitrosti degradacije  $f_d = 1,5$  (relativno šibki degradacijski procesi, npr. PET od ločenega zbiranja), delež neželenih primesi v surovini pri izvajanju tretje re-reciklaže znašal 8,672%, v limiti pa bi se približeval vrednosti 15%. Če bi delež reciklata znašal 100% (recikliranje brez dovajanja primarne surovine), bi delež škodljivih primesi že po tretji reciklaži znašal 35,6%. Ob vstavljanju še neugodnejših vhodnih podatkov v zgornjo formulo, bi matematična vrednost  $D_{n\text{-primesi}}$  zlahka limitirala preko teoretično možne vrednosti 100%, seveda bi se reciklažno podjetje v praksi bilo prisiljeno prilagoditi že veliko prej, ali pa propasti.

### 3. Reciklabilnost komunalne odpadne plastike

Na svetovnem spletu je možno najti mnogo definicij pojma "reciklabilnost" [12, 13, 14], pri čemer se poleg vpliva objektivnih, t.j. tehnoloških, ekonomskih in okolje-varstvenih dejavnikov, velikokrat kot samoumevne upošteva tudi vplive reciklažnim metodam naklonjenih zakonodajnih, ideoloških in finančno- stimulativnih dejavnikov. V našem primeru bomo pojem reciklabilnosti poskušali definirati kvantitativno, kot število tehnološko izvedljivih reciklov, ki jih je v zaprtem sistemu možno izvesti na ekonomsko sprejemljiv način. Tako definirana reciklabilnost se nanaša na čiste, istovrstne odpadke, ki jih načeloma ni potrebno sortirati (praviloma gre za odpadke industrijskega izvora) ter na konkreten tehnološki postopek reciklaže. Različne vrste plastike imajo v praksi zelo različen reciklažni potencial. Mehansko je potencialno možno reciklirati samo termo- plastične materiale, prevsem PET platenke (do 8-krat), polietilen (PE) do 5-krat, polipropilen (PP) morda 1-krat, polistiren (PS) in PVC pa v povprečju manj kot 1-krat [4, 9, 10, 11, 15, 16]. Prisotnost raznovrstnih aditivov lahko močno spremeni karakteristike nekaterih vrst odpadne plastike, kot sta npr. "PE" ali "PVC", pri čemer so nekatere podvrste lahko medsebojno v tehnološkem smislu nekompatibilne, druge ne-reciklabilne, itd. [4, 9, 10, 11, 15, 16, 29].

Pojem reciklabilnosti je s statističnega stališča možno aplicirati tudi na odpadno plastiko kot celoto. To storimo tako, da upoštevamo količinska razmerja letno generiranih količin posameznih vrst odpadne plastike ter število tehnološko izvedljivih reciklov za vsako vrsto plastike posebej, na koncu pa izračunamo povprečno število reciklov za celotno količino. Reciklabilnost odpadne plastike komunalnega izvora ("*post-consumer plastic waste*") je seveda še bistveno slabša od industrijske, tako zaradi prisotnosti zunanjih nečistoč [6, 17], kot zaradi tehnološke in ekonomske nezmožnosti zadovoljive separacije mešanega toka odpadne plastike na vse tiste frakcije, ki bi potencialno lahko bile reciklabilne [4, 9, 11, 15, 16, 17]. Plastični materiali vsebovani v raznovrstnih kompozitnih odpadki so tudi praviloma neregulirani [4]. Kemijska reciklaža se je primerjalno izkazala kot tehnološko izredno zahtevna, ne-ekonomična in okoljsko težko opravičljiva [11, 15, 16, 19, 20, 21]. Lahko zaključimo, da imamo pri reciklaži odpadne plastike opraviti s tehnološko heterogenim in kompliciranim sistemom upravljanja z odpadkom, veliko ranljivejšim v primerjavi s sistemi za reciklažo papirja, pločevink ali stekla. Če privzamemo Nemčijo kot vzorčen primer okoljevarstveno osveščene, tehnološko visoko- razvite države, v kateri se sistematično favorizira recikliranje in kjer se na to temo izvaja obsežne raziskave, lahko ugotovimo, da so tam v letu 2018 uspeli zreciklirati 1/3 celotno generirane količine odpadne plastike (mehanska reciklaža 32%, kemijska reciklaža 1%), preostali 2/3 pa so skoraj izključno končali svojo pot v sežigalnicah in napravah za sosežig odpadkov [4].



Slika 1: Re-reciklabilnost odpadne kom. plastike v odvisnosti od števila ponovljenih recikliranj.

Na podlagi zgornjih informacij smo konstruirali diagram, ki je okvirno reprezentativen za odpadno komunalno plastiko kot celoto povprečne sestave (slika 1). Razvidno je, da komunalne odpadne plastike v povprečju sploh ni možno reciklirati, ne da bi tudi primarno surovino izdatno dovajali v krožni sistem. Formula za izračun ocene relativne življenjske dobe recikliranih proizvodov bi lahko izgledala tako:

$$t_{RC} = t_{prim} \cdot [(1 - d_{RC}) + d_{RC} \cdot f_{RC}^{-n}] \quad , \quad \text{kjer je} \quad (9)$$

$t_{RC}$ .....	relativna življenjska doba povprečnega recikliranega proizvoda
$t_{prim=1}$ .....	relativna življenjska doba primerljivega nerekicliranega proizvoda
$d_{RC}$ .....	delež v surovinski mešanici vmešanega rec. materiala pri ponavljajočem recikliranju
$f_{RC}$ .....	faktor hitrosti upadanja življenjske dobe recikliranih proizvodov pri ponavljajočem recikliranju brez dodajanja primarne surovine v sistem
$f_{RC} \approx 1 \rightarrow$	visoko-reciklabilen material (npr. odpadno železo, Al pločevinke)
$f_{RC} \approx 2 \rightarrow$	slabo-reciklabilen material (npr., presortirani PET iz komunalne sfere)
$f_{RC} > 3 \rightarrow$	skorajda nerekiclabilen material (npr., mešana odpadna plastika iz komunalne sfere)
$n$ .....	število ponavljajočih recikliranj

Pri ponavljajoči reciklaži imamo v praksi opraviti z reciklirnim materialom, ki je mešanica snovi z različnim pedigrejem. Del vsebuječe snovi je v preteklosti že bil bodisi en-krat-, dva-krat ali n-krat uporabljen za proizvodnjo novih izdelkov. Glede na diagram (slika 1) lahko sklepamo, da pri repetitivno reciklirani odpadni komunalni plastiki v povprečju prevladuje snov, ki je bila reciklirana 1-krat, kot tudi, da imamo v povprečju opraviti s približno 1,5- krat reciklirano snovjo ( $n_{ref} = 1,5$ ). Temu je tako zato, ker odpadna plastika v sistemu krožnega gospodarstva tudi izdatno ponira. Vsebnost mnogokratno reciklirane snovi v reciklirni mešanici je inherentno veliko manjša v primerjavi s vsebnostjo 1- krat reciklirane snovi, saj je bila v preteklosti že mnogokrat, ne samo 1-krat izpostavljena možnosti izločitve iz recirkulirajočega sistema.

Če uporabimo formulo (9), bi se pri ponavljajočem recikliranju plastike z uporabo surovinske mešanice v razmerju 0,6 : 0,4 (deviška : reciklirana surovina), življenjska doba novih izdelkov skrajšala na ~82% originalne (privzeli smo  $f_{RC} = 1,5$  in  $n_{ref} = 1,5$ ). Skrajšanje življenjske dobe proizvodov pa obratno-sorazmerno vpliva na povečanje letne količine generiranih odpadkov nastalih iz teh proizvodov, kot sledi

$$Q_{Rc} = Q_{brez Rc} / t_{Rc}, \quad \text{OZ.} \quad Q_{brez Rc} = Q_{Rc} \cdot t_{Rc}, \quad \text{OZ.} \quad Q_{INTGO2} = Q_{INTGO1} \cdot t_{Rc} \quad (10)$$

Lahko torej konstatiramo, da se pri zgoraj navedenih predpostavkah zaradi izvajanja recikliranja komunalne odpadne plastike idr. nizko- uporabnih reciklatov na dolgi rok na letni ravni generira  $1/0.82 = 1,22$  krat več odpadkov, kot bi se jih brez izvajanja reciklaže. Reciklaža komunalne odpadne plastike in drugih nizko-uporabnih odpadkov (tetrapak embalaža ipd.) je značilnost obstoječega sistema gospodarjenja z odpadki (t.j., sistema INTGO<sub>1</sub>). Z vzpostavitvijo sistema INTGO<sub>2</sub>, kjer se nizko-uporabnih reciklatov ne reciklira, bi se torej količina novo- nastajajočih odpadkov, ki se generirajo iz naslova v nove izdelke vgrajene reciklirane snovi, zmanjšala za faktor  $t_{Rc} = 82\%$ . Seveda se to zmanjšanje nanaša samo na tisti del masnega toka KO, ki je bil kot PET idr. nizko- uporabni materiali vgrajen v nove izdelke. Ta delež lahko označimo s simbolom " ${}_{nu}Rc$ " (za razliko od deleža visoko- uporabnih reciklatov " ${}_{vu}Rc$ ", npr. iz MKOE izsortiranih odpadnih pločevink).

Krožno gospodarstvo nizko-uporabnih reciklatov ni pripravljeno prevzemati brez plačila, saj je kvaliteta izdelkov slabša v primerjavi z izdelki, ki so v celoti proizvedeni iz primarnih surovin. Nekatera reciklažna podjetja se torej zaradi prihodkov iz naslova prevzemanja " ${}_{nu}Rc$ " reciklatov ter zaradi družbeno- političnega vzpodbujanja uporabe postopkov reciklaže kljub tveganju prizadevajo v svoje proizvode vgrajevati nizko-uporabni reciklirani material, a le do tolikšne mere, da se življenjska doba (oz. kvaliteta proizvodov) iz naslova vsebnosti vgrajene reciklirane surovine " $t_{nuRc}$ " v primerjavi s življenjsko dobo (kvaliteto) proizvodov, v celoti izdelanih iz primarne surovine " $t_{prim}$ ", ne bi skrajšala preveč. V nasprotnem bi se kupci pričeli izogibati tovrstnim proizvodom, ne glede na trud, eventualno vložen v ekološki marketing s strani reciklažnega podjetja.

Zmanjšanje količine odpadkov moramo izraziti tako, da se razmerja pred- in po uvedbi sistema INTGO sklicujejo na celotne količine nastalih KO, s kakršnimi imamo opravka na vhodni strani sistema v fazi zbiranja, t.j.:

$$Q_{KO, INTGO2} = Q_{KO, INTGO1} \cdot (1 - t_{Rc} \cdot {}_{nu}Rc) \quad (11)$$

Če bi delež nizko- uporabnih komunalnih reciklatov, ki se jih vgrajuje v novo-nastale proizvode, ocenili na vrednost okoli  ${}_{nu}Rc = 6\%$  KO, povprečno vrednost  $t_{Rc}$  pa optimistično ocenili kot  $80\% t_{prim}$ , se celotna količina KO torej zmanjša za faktor 0.952 oz. za 4,8%. Zaradi zmanjšanja količine odpadkov se zmanjšajo tudi vse vrste emisij v okolje iz naslova ravnanja s KO na njihovi poti od zibelke do groba, kot sledi:

$$\text{Vse vrste sp. emisij (INTGO2)} = \text{Vse vrste sp. emisij (INTGO1)} \cdot (1 - t_{Rc} \cdot {}_{nu}Rc) \quad (12)$$

Vidimo, da prioritiziranje metode recikliranja odpadne plastike rezultira v povečanje nastajanja novih odpadkov. Prehod na sistem s prioritiziranjem energetske izrabe lahko smatramo za ukrep s ciljem zmanjšanja nastajanja novih odpadkov. Takšen pristop se smatra kot okoljevarstveno najpreferenčnejši v hierarhični piramidi prednostnih metod ravnanja z odpadki. Kot neodvisni opazovalci lahko na proces ponavljajoče reciklaže odpadne komunalne plastike resnično gledamo negativistično, kot na tehnološki postopek, ki podrazumeva dodajanje deviških materialov v krožni sistem z namenom redčenja vsebnosti nezaželenih primesi v surovini za recikliranje, ob hkratnem zavedanju, da bodo proizvodi v vsakem primeru slabše kvalitete, kot bi le-ti bili, če bi bili proizvedeni izključno iz primarnih surovin.

#### 4. Vzroki razlik v reciklabilnosti odpadnega papirja in odpadne plastike

Kadar je reciklaža okoljevarstveno smiselna, se to praviloma odrazi tudi na ekonomskem področju: krožno gospodarstvo je v tem segmentu učinkovitejše od linearnega. Za razliko od odpadnega železa in nekaterih barvnih kovin, ki jih je možno repetitivno reciklirati v nedogled, se v drugih branžah krožnega gospodarstva soočajo s tehnološkim dejstvom, da se kvaliteta osnovne surovine ob ponavljajočem recikliranju progresivno hitro poslabšuje (slika 1). Npr., v primeru reciklaže odpadne plastike prihaja do naraščanja deleža tehnološko težko odstranljivih primesi v recirkulirajočem materialu, ki v surovino vstopajo v obliki zunanjih nečistoč ter tujih polimerov, zlasti pa je značilen fenomen transmisije v reciklatih vsebujočih aditivov ter njihova

akumulacija v surovini ter v samih proizvodih [4, 5, 11, 23]. Gre za UV in toplotne stabilizatorje, barvila in pigmente, vezivna sredstva ("crosslinkers"), plastifikatorje, trdilce, ekspandirna sredstva/ penilce, zaviralce gorenja, antioksidante, polnila, antistatična sredstva, mikrobiološke substance, idr.

**Tabela 1:** Primerjava karakteristik odpadnega papirja in odp.kom. plastike z aspekta njune reciklabilnosti.

Karakteristika ↓	Odpadek →	Odpadni papir	Odpadna plastika	Odpadni "tetrapak"
Število možnih reciklov iste šarže materiala		4 - 7	0 - 3	0 - 1
Intenziteta poniranja materiala iz krožnega sistema (energetske izrabe in odlaganja ne upoštevamo)		Izdatna	Šibka	Težko oceniti
Možnost selekcioniranja odpadkov glede na vsebnost v preteklosti že večkrat recikliranega materiala		Precejšnja	Neznatna	Nikakršna
Možnost proizvodnje izdelkov, ki ne potrebujejo visoke kvalitete vgradnega materiala		Velika	Mala	Neznatna
Možnost prekomerne kontaminacije surovine z nezaželenimi sestavinami		Mala	Velika	Velika
Tehnološke možnosti za odstranjevanje nečistoč in nezaželenih primesi pri pripravi surovine		Precejšnje	Zelo kompleksen problem	Male
Tehnološka možnost reciklaže izvorno in snovno mešanega materiala		Velika	Mala	Težko oceniti
Masni delež odpadnega materiala, ki ga tehnično/ ekonomsko ni možno na smislen način reciklirati		Majhen	Velik	Velik
Ekonomska vrednost reciklata komunalne provenience		Rahlo pozitivna	Negativna	Negativna
Karakteristična (povprečna) doba trajanja enega reciklažnega cikla - ocena		Relativno kratka (leto)	Relativno dolga (več let)	Težko oceniti

Vzporedno z naraščanjem deleža primesi, poteka tudi proces degradacije repetitivno recirkulirajočega materiala, tako v času proizvodnje, kot v času uporabe izdelka. Npr., pri ponavljajoči reciklaži odpadnega papirja prihaja do pojava krajšanja dolžine celuloznih vlaken [27, 28], pri odpadni plastiki pa do raznih pojavov fotokemične, radiacijske, mehanske, kemične, termične in drugačne degradacije polimerov [4, 5, 11, 15, 16]. Da bi se kvaliteta materiala krožečega v sistemu ohranjala na tehnološko sprejemljivem nivoju, je potrebno "deviško" (primarno) surovino nenehno dodajati v sistem. Ker papir v krožnem sistemu inherentno tudi izdatno ponira, je deviško surovino potrebno dovajati že zaradi ohranjanja masne bilance. Papir v EU je v povprečju 3,5 krat recikliran [27]. Pri tem so časopisi in nekatere vrste embalaže lahko tudi 90 in večodstotno izdelani iz recikliranega papirja, a so zato nekateri specialni papirji skoraj izključno izdelani iz deviške surovine. Za potrebe poslednje reciklaže (npr. za proizvodnjo toaletnega papirja) obstaja tehnološka možnost selekcije prav takšne vrste odpadnega papirja, ki je bil v preteklosti že večkrat recikliran in s tem že precej degradiran (npr., časopisnega).

V EU se danes v reciklažo divergira 71% odpadnega papirja. Povprečno razmerje vsebnosti recikliranih in deviških vlaknin znotraj mase na novo proizvedenega papirja se je ustalilo in znaša danes 49% : 51% [27]. Reciklažni potencial odpadnega papirja se je torej bolj ali manj izčrpal, papirna industrija lahko kot celota nemoteno obratuje naprej le pod pogojem, da se v krožni sistem dovaja primarno surovino v deležu približno ene polovice. Lahko zaključimo, da je reciklaža odpadnega papirja pozitiven okoljevarstveni proces, saj se s tem ultimativno prihrani približno polovico potrebne mase primarne surovine, ki bi jo sicer morali pridobiti s sekanjem gozdov, itd. To lahko razberemo primerjajoč poenostavljene sumarne masne bilance, kot sledi:

Proizvodnja papirja brez reciklaže:

$$1 L \rightarrow 1 P_{\text{proizvodi}}$$

$$1 P_{\text{proizvodi}} \rightarrow 1 P_{\text{odp}} \rightarrow 1 P_{\Sigma\text{ponori}}$$

Trajnostna reciklaža in poniranje papirja iz krožnega sistema :

$$\frac{1}{2} L + \frac{1}{2} P_{\text{odpRc}} \rightarrow 1 P_{\text{proizvodi}}$$

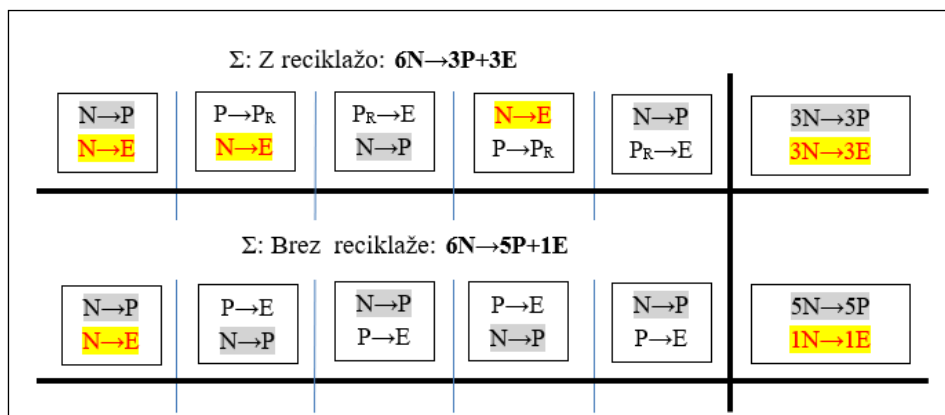
$$1 P_{\text{proizvodi}} \rightarrow \frac{1}{2} P_{\text{odpRc}} + \frac{1}{2} P_{\Sigma\text{ponori}}$$

Obrazložitev okrajšav:



L .....(deviška surovina, lesovina);  $P_{\text{proizvodi}}$  ... (papir kot proizvod);  $P_{\text{odp}}$  ... (odpadni papir);  $P_{\text{odpRc}}$  ... (odpadni papir, divergirani v reciklažo);  $P_{\Sigma\text{ponori}}$  (odpadni papir, ki se izgublja iz sistema krožnega gospodarstva); primeri možnih ponorov: (1) toaletni papir, papirnate brisače in robčki; (2) ubegle frakcije odpadnega papirja, vmešane med MKOE, MKO in BIO, ki ultimativno končajo svojo pot v kurilnih napravah, na odlagališčih ali v kompostarnah; (3) papir uporabljen v gradbeništvu; (4) rejekti iz papirne industrije pri reciklaži odpadnega papirja; (5) smetenje okolja, itd.

Za razliko od odpadnega papirja, predstavlja energetska izraba edini realistični ponor, ki ga imamo na voljo za odstranjevanje odvečne odpadne plastike iz sistema [26] (upoštevamo dejstvo, da je odlaganje odpadkov z veliko kurilno vrednostjo prepovedano in okoljevarstveno nesprejemljivo, razen izjemoma za nekatere frakcije). Vendar obstaja še veliko drugih razlogov, ki odpadni papir opredeljujejo kot primeren material za reciklažo, odpadne plastike pa ne (glej tabelo 1).



**Slika 2:** Poenostavljen prikaz relativne porabe nafte za proizvodnjo plastičnih mas ter derivatov za energetske potrebe, primerjajoč 2 sistema INTGO (z- in brez prakticanja reciklaže odpadne plastike)

Tolmač k sliki 2:

Naftna industrija kontinuirno proizvaja tako goriva kot surovine za proizvodnjo plastičnih mas (masno razmerje deležev znaša okoli 10 : 1). Ohranjanje primarnih surovinskih virov se smatra za pglavilni smisel izvajanja recikliranja odpadne plastike. Resničnost te trditve želimo preveriti z izvedbo preproste komparacijske analize, primerjajoč masni bilanci dveh sistemov ravnanja z odpadki, pri čemer eden prakticira reciklažo odpadne plastike, drugi pa ne. Najprej upoštevajmo osnovni pogoj, da mora gospodarski sistem v katerem-koli časovnem obdobju biti sposoben družbi zagotoviti tako surovine za proizvodnjo plastičnih izdelkov ( $N \rightarrow P$ ), kot goriva za proizvodnjo energije ( $N \rightarrow E$ ). Zaradi večje nazornosti suponirajmo, da razmerje potreb med enimi in drugimi znaša 1:1. Nadalje upoštevajmo dejstvo, da je odpadno plastiko možno bodisi reciklirati ( $P \rightarrow P_R$ ), bodisi energetsko izrabiti ( $P \rightarrow E$ ). Povprečni tehnološki potencial odpadne komunalne plastike za njeno repetitivno recikliranje poenostavljeno prikažimo kot možnost izvedbe enega reciklažnega ciklusa brez dodajanja primarne surovine. V resnici je povprečni reciklažni potencial manjši (glej sliko 1). Naš primerjalni sistem torej suponira, da je odpadke iz enkrat že reciklirane plastike tehnično možno le še energetsko izrabiti ( $P_R \rightarrow E$ ), ne pa tudi ponovno reciklirati. Razdelbo na virtualna časovna obdobja smo izvedli tako, da je njihovo trajanje usklajeno s povprečno življenjsko dobo plastičnih proizvodov, preden le-ti postanejo odpadki. Na sliki 2 je to ponazorjeno s 5 časovnimi enotami- fazami, ponazorjenimi s petimi stolpci. Vidimo, da znaša končna vrednost porabe primarne surovine ( $\approx$ nafte) v obeh primerih 6N, ne glede na to, ali odpadno plastiko recikliramo ali ne. Ker je poraba nafte za proizvodnjo goriv  $\sim 10$ -krat večja v primerjavi s porabo nafte za proizvodnjo plastičnih mas, bi realna masna bilanca v primeru prakticanja reciklaže sicer znašala  $51N \rightarrow 3P + 48E$ , v primeru brez reciklaže pa  $51N \rightarrow 5P + 46E$ . Poraba nafte je torej za oba sistema enaka, le da se v sistemu krožnega gospodarstva  $\sim 6\%$  porabi za proizvodnjo plastičnih mas in  $\sim 94\%$  za proizvodnjo goriv, v nekrožnem pa  $\sim 10\%$  za proizvodnjo plastičnih mas ter  $\sim 90\%$  za goriva.

Na voljo obstajajo tehnološko, ekonomsko in okoljevarstveno zelo učinkovite metode energetske izrabe komunalne odpadne plastike [32, 33], ne pa tudi učinkovite metode za njeno reciklažo [30,31]. Po drugi strani pa za primarno surovino (pretežno gre za nafto) inherentno velja, da obstajajo na voljo tako učinkovite

metode energetske izrabe (via proizvodnja tekočih goriv), kot njene uporabe za proizvodnjo plastičnih mas. Poanta je v tem, da tudi če odpadno plastiko recikliramo, mora le-ta zaradi omejene reciklabilnosti in pomanjkanja alternativnih ponorov ultimativno vseeno končati svojo pot v kurilnih napravah, seveda s predhodno valorizacijo v njej vsebujoče kemične energije. Ta fenomen so nekateri raziskovalci v preteklosti že bili zaznali [26]. Intuitivno se zdi, da je recikliranje komunalne odpadne plastike okoljevarstveno in ekonomsko nesmiselno, če se končni učinek uporabe te metode odraža le kot prehodno skladiščenje določene mase odpadnega materiala v reciklatih ter manj uporabnih proizvodih. Dokaz, da je temu res tako, smo poskušali izpeljati s shematsko ponazoritvijo na sliki 2. Iz priložene obrazložitve lahko razberemo, da se za potrebe proizvodnje plastičnih mas in energije skupaj ultimativno res potroši enako količino primarne surovine /goriva, pa če odpadno plastiko recikliramo ali ne. Substituirano obremenjevanje okolja je torej v obeh primerih enako – zaradi izvajanja recikliranja odpadne plastike se ne zmanjšajo potrebe po ekstrakciji in rafinaciji potrebnih primarnih surovin.

## 5. Zaključek

Leta 2020 je Evropska komisija obnovila svoj originalni akcijski plan za vzpodbujanje krožnega gospodarstva iz leta 2015 [34], pri čemer si je kot pomemben okoljevarstveni cilj ponovno zastavila bistveno povečanje deleža odpadne plastike, ki bi naj bila divergirana v reciklažo, raje kot v sežig z energetske izrabe odpadka. Plan se zdi s tehnološkega in okoljevarstvenega stališča kontra-intuitiven, ne pa tudi s kognitivno-ideološkega stališča, saj je jasno, da si del evropskega prebivalstva takšnih planov, pa četudi neuresničljivih, želi, saj dajejo občutek pripadnosti naprednejšemu sloju družbe, ki se bori za višje ideale. Seveda je to podlaga več-desetletne izloženosti idealiziranim okoljevarstvenim narativom s strani vladajočih struktur. Ne glede na tovrstne trende pa so v srednje- in severno-evropskih državah ravno v tem času uspeli razviti okoljevarstveno in ekonomsko zelo uspešne metode energetske izrabe gorljivih frakcij KO s sosežigom ustrezno predpripravljenih TGO v kurilnih napravah in industrijskih pečeh [32, 33]. Le manjši delež gorljivih frakcij, predvsem tistih z veliko vsebnostjo nezaželenih kovin in nekovin (Hg, Cl, itd.) je še potrebno odstranjovati s sežigom v namenskih sežigalnicah, a tudi tam okoljevarstveno neoporečno in z energetske valorizacije odpadka. Zaradi načrtovanega izvajanja ukrepov za vzpodbujanje krožnega gospodarstva se lahko zgodi, da se bo v obstoječih evropskih napravah za sosežig ponovno pričel povečevati delež porabe fosilnih goriv, delež TGO pa zmanjševati, čeprav bo šlo le za prehodni pojav, saj se je ekonomskim in tehnološkim zakonitostim v globalni družbi na dolgi rok težko zoperstavljati. V članku smo izvedli primerjave dolgoročnih masno-energetskih bilanc značilnih za sisteme gospodarjenja z odpadki z- in brez izvajanja reciklaže odpadne plastike ter prišli do spoznanja, da se z reciklažo odpadne plastike čisto nič ne zmanjšajo potrebe po črpanju surove nafte. Četudi bi se zaradi obsežnega subvencioniranja raziskav na tem področju reciklabilnost odpadne plastike v povprečju nekaj-kratno povečala, se poraba primarne surovine kljub temu ne bi zmanjšala, le dolgoročno razmerje deležev izčrpane nafte namenjene proizvodnji goriv v.s. proizvodnji plastičnih mas bi se nekoliko spremenilo. Drugi primerjalni efekti iz naslova izvajanja reciklaže (povečani stroški, slabša kvaliteta in skrajšana življenjska doba proizvodov, povečano obremenjevanje okolja) pa v celoti demantirajo smiselnost recikliranja komunalne odpadne plastike. Temu lahko prištejemo še nepotrebno izpostavljenost tveganjem zaradi povečane vsebnosti okoljevarstveno neželjenih substanc v recikliranih plastičnih proizvodih, kot so ftalatni plastifikatorji, bisphenol A, organotin, PFAS, alkilfenoli, brominirani zaviralci gorenja, težke kovine in mikrobiološke substance, itd. [4, 5, 8, 23, 24, 25], od katerih so prvi trije izlučljivi tudi pri običajnih okoljskih pogojih.

## 6. Reference

- [1] Madon I. Konceptualni razlogi neučinkovitega delovanja sistema integriranega gospodarjenja s komunalnimi odpadki v Sloveniji. V: *Znanstveno posvetovanje z mednarodno udeležbo "Gospodarjenje z odpadki '23, Urbano rudarjenje"*, Ljubljana, konferenčni zbornik. Ljubljana : Naravoslovnotehniška fakulteta, Oddelek za geotehnologijo in rudarstvo, 2023, ID 012, 10 str. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://www.ksda.si/dejavnosti/odpadki>
- [2] Madon I. Ping pong pred sklepno obravnavo novele zakona o varstvu okolja. *Pismo bralca, objavljeno v časopisu Primorske novice, pn št. 48, 28.02.2024*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://www.ksda.si/dejavnosti/odpadki>

- [3] UL EU – Direktiva 2018/851 Evropskega parlamenta in Sveta o spremembi Direktive 2008/98/ES o odpadkih. *Uradni list Evropske Unije*, 2018, L 150/109.
- [4] Alassali A., Picuno C., Chong Z.K., Guo J., Maletz, R., Kuchta K. Towards Higher Quality of Recycled Plastics: Limitations from the Material's Perspective. *Sustainability* 2021, 13, 13266. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://doi.org/10.3390/su132313266>
- [5] Ramosa T.R., Christensen T.B., Boura A., Almroth B.C., Kristensen D.M., Selcka H., Trendsin K.S. A not so circular healthcare economy: A review of challenges with plastic associated chemicals. *Analytical Chemistry* 166 (2023) 117191
- [6] Thoden van Velzen, E.U., Chu S., Chacon F.A., Brouwer M.T., Molenveld K. The impact of impurities on the mechanical properties of recycled polyethylene. *Packag Technol Sci.* 2021;34:219–228
- [7] Matthews C., Moran F., Jaiswal A.K. A Review on European Union's Strategy for Plastics in a Circular Economy and its Impact on Food Safety. *Journal of Cleaner Production*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125263>.
- [8] Vera P., Canellas E., Sua Q.Z., Mercado D., Nerina C. Migration of volatile substances from recycled high density polyethylene to milk products. *Food Packaging and Shelf Life*, 35 (2023) 101020
- [9] Chacon F.A., Brouwer M.T., Thoden van Velzen E.U., Wageningen I.W.S. A first assessment of the impact of impurities in PP and PE recycled plastics. *Food & Biobased Research*, 2020. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://doi.org/10.18174/518299> or at [www.wur.eu/wfbr](http://www.wur.eu/wfbr)
- [10] Miliute-Plepiene J., Frane A., Almasi A.M. Overview of polyvinyl chloride (PVC) waste management practices in the Nordic countries. *Cleaner Engineering and Technology* 4 (2021)100246
- [11] Ragaert K., Delva L., Van Geemb K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* 69 (2017) 24–58
- [12] OECD. *Recyclability of products*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://www.oecd.org/innovation/green/toolkit/p2recyclabilityofproducts.htm>
- [13] Recyclclass. *Recyclability, definition*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://recyclclass.eu/recyclability/definition/>
- [14] Paramount Global. *Recyclability vs. Sustainability in Packaging*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://www.europarl.europa.eu/about-parliament/sl/in-the-past/the-parliament-and-the-treaties/sin-gleuropean-act>
- [15] Schyns Z.O.G., Shaver M.P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromol. Rapid Commun.* 2021, 42, 2000415
- [16] Ignatyev I.A., Thielemans W., Beke B.V. Recycling of Polymers: A Review. *ChemSusChem* 2014, 7, 1579–1593
- [17] Faraca G., Astrup T. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. *Waste Management* 95 (2019) 388–398
- [18] Al-Salem S.M., Lettieri P., Baeyens. The valorization of plastic solid waste by primary to quaternary routes: From re-use to energy and chemicals. *J. Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010) 103–129
- [19] Chanda M. Chemical aspects of polymer recycling. *Journal of cleaner production*, 293 (2021) 126163
- [20] Davidson M.G., Furlong R.A., Marcelle C., McManus M. Developments in the life cycle assessment of chemical recycling of plastic waste. A review. *Journal of Cleaner Production* 293 (2021) 126163

- [21] Schelte N., Hendrickx B., Severengiz S. Life-cycle based evaluation of the environmental impact of chemical recycling vs. combined waste-to-energy and carbon-capture-and-utilization for selected epoxy resins. *Procedia CIRP* 116 (2023) 660–665
- [22] Ritzéna S., Sandströma Ö.G. Barriers to the Circular Economy – integration of perspectives and domains. V: *The 9th CIRP IPSS Conference: Circular Perspectives on Product/Service-Systems*. *Procedia CIRP* 64 (2017) 7 – 12
- [23] Geueke B., Phelps D.W., Parkinson L.V. and Muncke J.. Hazardous chemicals in recycled and reusable plastic food packaging. *Cambridge Prisms (2023): Plastics, 1, e7, 1–18*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://doi.org/10.1017/plc.2023.7>
- [24] Seewoo, B.J., Goodes L.M., Mofflin L., Mulders Y.R., Wong E.V.S., Toshniwal P., Brunner M., Alex J., Johnston B., Elagali A., Gozt A., Lyle, G., Choudhury O., Solomons T., Symeonides C., Dunlop S.A. The plastic health map: A systematic evidence map of human health studies on plastic-associated chemicals. *Environment International* 181 (2023) 108225
- [25] Undas A.K., Groenen M., Peters R.J.B., van Leeuwen S.P.J. Safety of recycled plastics and textiles: Review on the detection, identification and safety assessment of contaminants. *Chemosphere* 312 (2023) 137175
- [26] Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017)
- [27] CEPI (Confederation of European Paper Industries). *Key statistics 2022*. Dostopno na svetovnem spletu: [https://www.cepi.org > uploads > 2023/07 > 2022-...](https://www.cepi.org/uploads/2023/07/2022-...)
- [28] Byrd W.T. The Effects of Repeated Recycle on Paper Strength.. *Paper Engineering Senior Theses 9 (1997)*. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://scholarworks.wmich.edu/engineer-senior-theses/9>
- [29] Nakamura S., Nakajima K., Yoshizawa Y., Matsubae-Yokoyama K., Nagasaka T. Analyzing Polyvinyl Chloride in Japan With the Waste Input–Output Material Flow Analysis Model. *Journal of Industrial Ecology* 13/5 (2009), 706 – 707
- [30] Lisiecki M., Damgaard A., Ragaert K., Astrupa T.F. Circular economy initiatives are no guarantee for increased plastic circularity: A framework for the systematic comparison of initiatives. *Resources, Conservation & Recycling* 197 (2023) 107072
- [31] Arena U. From waste-to-energy to waste-to-resources: The new role of thermal treatments of solid waste in the Recycling Society. *Waste Management* 37 (2015) 1–2
- [32] Šarc R, Seidler I, Kandlbauer L, Lorber K, Pomberger R. Design, quality and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry – Update 2019. *Waste Management & Research*. 2019; 37(9):885-897.
- [33] Pieber S., Ragossnig A., Pomberger R., Curtis A. Biogenic carbon-enriched and pollutant depleted SRF from commercial and pretreated heterogeneous waste generated by NIR sensor-based sorting. *Waste Management & Research* 30(4) 381 –391
- [34] European Commission, Directorate-General for Communication. *Circular economy action plan – For a cleaner and more competitive Europe*, Publications Office of the European Union, 2020. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2024]: <https://data.europa.eu/doi/10.2779/05068>