



ID-09

Analiza učinkovitosti procesa reciklaže komunalne odpadne plastike na zmanjšanje potrebe po njenem sežigu**Analysis of the efficiency of utilizing post-consumer plastic waste recycling methods to reduce the amount of plastic waste intended for combustion**IGOR MADON^{1,*}¹*Komunalno stanovanjska družba, Goriška 23B, 5270 Ajdovščina, Slovenija*^{*}*Corresponding e-mail: igor.madon@ksda.si***Povzetek**

Večina frakcij post-konsumne odpadne plastike (PKOP) je z ekonomskega vidika ne-reciklabilna, energetska izraba pa predstavlja edini realistični ponor, ki ga imamo na voljo za odstranjevanje tega odpadka iz okolja. S procesiranjem najreciklabilnejših subfrakcij je sicer možno pridobivati surovino za proizvodnjo novih izdelkov iz plastike, vendar se kvaliteta reciklirane surovine v povprečju ne more kosati s kvaliteto surovine proizvedene iz deviških materialov. Ob repetitivnem recikliranju se kvaliteta reciklirane surovine še dodatno poslabšuje, zato je potrebno deviško surovino nenehno in intenzivno dovajati v sistem krožnega gospodarstva. Postavlja se vprašanje racionalnosti uporabe tovrstnega pristopa. Okoljevarstveni smisel recikliranja bi bil dosežen v primeru, ko bi sumarne emisije v okolje bile manjše, kot bi le-te bile, če bi PKOP v celoti usmerili v proizvodnjo alternativnega goriva. Gospodarski smisel recikliranja pa bi bil dosežen v primeru, če bi se izkazalo, da je sistem integralnega gospodarjenja s tem odpadkom ob uporabi metode recikliranja ekonomsko učinkovitejši od sistema brez praktičiranja recikliranja, upoštevajoč pri tem vse stroške ravnanja z odpadkom na njegovi poti od zibelke do groba. V že objavljenem članku na podobno temo smo z primerjalno analizo ugotovili, da se zaradi praktičiranja reciklaže PKOP potrebe po črpanju nafte prav nič ne zmanjšajo. V tem članku bomo s ciljno zasnovano komparativno analizo skušali ugotoviti, ali se zaradi izvajanja reciklaže PKOP res v sorazmernem obsegu zmanjšajo količine PKOP, ki bi v nasprotnem končale svojo pot v napravah za sežig in sosežig odpadkov, kot trdijo zagovorniki recikliranja. Ugotovili smo, da takšna trditev ne velja, vsaj ne na dolgi rok.

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

Abstract

Large part of post consumer plastic waste (PCPW) happens to be unrecyclable in an economical way. On the other hand, energy recovery has shown to be an effective method to get rid of PCPW on a large scale without harming the environment, considering the fact that the same amount of energy would be required to be produced by using fossil fuels, anyway. Indeed, by processing the most recyclable PCPW fractions it is possible to prepare raw materials for producing plastic goods, however, the quality cannot, on average, match the quality produced from virgin raw materials. Virgin raw materials have to be abundantly in-mixed for circular economy to be workable in the long run. We can ask ourselves if such an approach is rational. Environmentally, this would be the case, if the sum of overall pollutant emissions were smaller as they would be if PCPW was completely directed into the production of customarily prepared secondary fuels. Economically, the recycling method would be advan-

Analiza učinkovitosti procesa reciklaže komunalne odpadne plastike na zmanjšanje potrebe po njenem sežigu

Analisis of the efficacy of utilizing post- consumer plastic waste recycling methods to reduce the amount of plastic waste intended for combustion

Igor MADON

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

Povzetek: Večina frakcij post-konsumne odpadne plastike (PKOP) je z ekonomskega vidika nerekiclabilna, energetska izraba pa predstavlja edini realistični ponor, ki ga imamo na voljo za odstranjevanje tega odpadka iz okolja. S procesiranjem najreciclabilnejših subfrakcij je sicer možno pridobivati surovino za proizvodnjo novih izdelkov iz plastike, vendar se kvaliteta reciklirane surovine v povprečju ne more kosati s kvaliteto surovine proizvedene iz deviških materialov. Ob repetitivnem recikliranju se kvaliteta reciklirane surovine še dodatno poslabšuje, zato je potrebno deviško surovino nenehno in intenzivno dovajati v sistem krožnega gospodarstva. Postavlja se vprašanje racionalnosti uporabe tovrstnega pristopa. Okoljevarstveni smisel recikliranja bi bil dosežen v primeru, ko bi sumarne emisije v okolje bile manjše, kot bi le- te bile, če bi PKOP v celoti usmerili v proizvodnjo alternativnega goriva. Gospodarski smisel recikliranja pa bi bil dosežen v primeru, če bi se izkazalo, da je sistem integralnega gospodarjenja s tem odpadkom ob uporabi metode recikliranja ekonomsko učinkovitejši od sistema brez prakticiranja recikliranja, upoštevajoč pri tem vse stroške ravnanja z odpadkom na njegovi poti od zibelke do groba. V že objavljenem članku na podobno temo smo z primerjalno analizo ugotovili, da se zaradi prakticiranja reciklaže PKOP potrebe po črpanju nafte prav nič ne zmanjšajo. V tem članku bomo s ciljno zasnovano komparativno analizo skušali ugotoviti, ali se zaradi izvajanja reciklaže PKOP res v sorazmernem obsegu zmanjšajo količine PKOP, ki bi v nasprotnem končale svojo pot v napravah za sežig in sosežig odpadkov, kot trdijo zagovorniki recikliranja. Ugotovili smo, da takšna trditev ne velja, vsaj ne na dolgi rok.

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

Abstract: Large part of post consumer plastic waste (PCPW) happens to be unrecyclable in an economical way. On the other hand, energy recovery has shown to be an effective method to get rid of PCPW on a large scale without harming the environment, considering the fact that the same amount of energy would be required to be produced by using fossil fuels, anyway. Indeed, by processing the most recyclable PCPW fractions it is possible to prepare raw materials for producing plastic goods, however, the quality is not en par with virgin raw materials. Virgin materials have to be abundantly inmixed for circular economy to be workable in the long run. We can ask ourselves if such an approach is rational. Environmentally, this would be the case, if the sum of overall pollutant emissions were smaller as they would be if PCPW was completely directed into the production of customarily prepared secondary fuels. Economically, the recycling method would be advantageous if the related integrative waste management system was more effective compared to the system which does not perform recycling. In the already published article contemplating simmilar thematic it was shown that the amount of extrated crude oil happens to be the same if practising PCPW recycling or not. We will try to examine the validity of one additional narrative often advertised by some environmentalists, claiming that the mass of PCPW which happens to be recycled dimminishes the mass of PCPW destined for combustion to the same degree. By performing appropriately customized comparative analysis we came to the conclusion the narrative is not valid when considered from the long term perspective.

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

1. Uvod

V enem od predhodnih člankov [1] smo izvedli primerjavo dolgoročnih masno-energetskih bilanc značilnih za sisteme gospodarjenja z odpadki z- in brez izvajanja reciklaže komunalne odpadne plastike ter dokaj prepričljivo demonstrirali, da se z reciklažo odpadne komunalne plastike čisto nič ne zmanjšajo potrebe po črpanju surove nafte in ekstrakciji zemeljskega plina. Četudi bi se reciklabilnost odpadne plastike močno povečala, se poraba primarnih surovin kljub temu ne bi zmanjšala, le dolgoročno razmerje deležev namenjenih proizvodnji goriv napram proizvodnji plastičnih mas bi se nekoliko spremenilo. Prav tako smo v zaključku navedli, da uporaba metod recikliranja ne zmanjša količine post-konsumne odpadne plastike (PKOP), ki bi jo sicer bilo potrebno divergirati v sežig, vsaj ne v sorazmernem obsegu. Teza se v osnovi glasi tako: "Da, res je, z izvedbo reciklaže materiala, ki konča svojo pot kot masa vgrajena v novih plastičnih izdelkih, se odloži potrebo po sežigu tega konkretnega materiala, vendar pa to ne spremeni dejstva, da je količina odpadne plastike, ki konča svojo pot v kurilnih napravah bolj ali manj enaka na dolgi rok, pa če PKOP recikliramo ali ne. Ultimativni razlog, da je temu tako, je videti v dejstvu, da je kvaliteta recikliranega materiala v povprečju slabša od kvalitete deviškega materiala. V času takoj po vzpostavitvi sistema krožnega gospodarstva se negativni efekti iz tega naslova še ne odražajo, saj mora preteči kar nekaj časa (veliko let), da se krožni sistem saturira z recikliranim materialom. Vendar pa se delež vmešane substance v materialih iz plastike, ki je v preteklosti že bila enkrat ali večkrat reciklirana, postopno povečuje, kar rezultira v nastanek verižnih dolgotrajnih fenomenov, kot sta skrajšanje življenjske dobe plastičnih proizvodov ter povečanje količine na novo nastajajočih odpadkov iz plastike. Nekoliko se poveča celo generacija vseh tistih kompozitnih ter kompleksno zgrajenih odpadkov, ki v svoji sestavi med drugim vsebujejo tudi reciklirano plastiko.

Omenjena teza v predhodnih člankih [1,2] ni bila zadovoljivo obdelana. To bomo poskušali izpeljati tukaj tako, da bomo izpostavili razlike v intenzivnosti pretakanja materialov na vhodni in izhodni strani sistema primerjajoč učinkovitost obratovanja linearnega in krožnega gospodarstva. Teza bi načeloma bila dokazana, če bi lahko nazorno demonstrirali, da je masni tok PKOP usmerjen v sežig bolj ali manj enak za oba antagonistično zasnovana sistema upravljanja s tem odpadkom. To bi pomenilo, da sistem krožnega gospodarstva deluje zgolj kot zavora v sistemu, znotraj katerega se na dinamičen način akumulira ogromna količina plastične mase, predvsem iz naslova skrajšanja življenjske dobe plastičnih proizvodov in s tem povezane potrebe po povečani proizvodnji novih izdelkov, a tudi v obliki vidne akumulacije PKOP in iz njih nastalih subfrakcij in reciklatov, kakršne vidimo nakopičene po raznih zbirnih centrih ter odprtih ter pokritih skladiščih reciklažnih podjetij.

2. Konstrukcija primerjalnega modela

Če sledimo usodi neke konkretne šarže recikliranega, iz PKOP pridelanega materiala (lahko si npr. zamislimo celotno količino materiala iz reciklirane plastike, ki se ga je vgradilo v plastične izdelke v neki državi v določenem letu), lahko ugotovimo, da se je t.i. nezaželeni sežig zgolj prestavilo na kasnejši čas. Konkretna šarža proizvodov se bo ponovno prelevila v odpadke in po delčkih končevala svojo pot bodisi kot drugič reciklirana, bodisi kot divergirana v odstranitev (v današnji EU večinoma v smislu energetske valorizacije odpadka). Na dolgi rok bo originalna šarža materiala skoraj v celoti izginila iz krožnega sistema tako, da bo končala svojo pot v takšnih ali drugačnih kurilnih napravah. Več desetletij lahko traja, da se ta transfer izvrši, čeprav nikoli ne povsem. S to obrazložitvijo seveda še nismo dali odgovora na bazično vprašanje, ki se glasi: "Ali se zaradi prakticiranja metod recikliranja PKOP zmanjša količina PKOP divergirana v sežig na dolgi rok ali ne, in če se, v kolikšnem obsegu?" Da bi se lahko pridobilo odgovor na tovrstno vprašanje je najprej potrebno kvantitativno opredeliti učinke recikliranja PKOP na skrajšanje življenjske dobe plastičnih proizvodov ter s tem povezanih fenomenov povečane intenzitete generiranja novih PKOP ter povečanega povpraševanja po novih plastičnih izdelkih, kar se ne more končati drugače kot tako, da se hkrati poveča tudi intenziteta proizvodnje novih izdelkov iz plastike.

Za potrebe komparacije moramo teoretične modele linearnega gospodarstva ter mladega in zrelega krožnega gospodarstva precej nedvoumno definirati, saj so razmere v praksi glede teh poimenovanj lahko precej zamegljene in fluidne. Npr., infrastrukturo za izvajanje dejavnosti recikliranja se izgrajuje in nadgrajuje postopoma, gospodarstvo se le zlagoma transformira iz staromodno linearnega v nominalno krožnega. V tem času, ki lahko traja tudi desetletje in več, je kapaciteta naprav za recikliranje raznih frakcij PKOP manjša od reciklažnega potenciala, ki ga ti odpadki imajo. To vsaj velja za tiste države, ki so preko regulatornih, finančnih in drugih mehanizmov uspele reciklažni potencial teh odpadkov na umetni način in z velikimi težavami do neke mere povečati, istočasno pa okoljevarstveni in ekonomski potencial, ki ga ti odpadki

dejansko imajo na področju možnosti proizvodnje tipskih, kvalitetnih goriv za cementarne in termoelektrarne/ toplarne, na umetni način drastično zmanjšati. Mi bomo teoretični model mlade krožne ekonomije definirali kot sistem, ki od samega začetka razpolaga z vso potrebno infrastrukturo, da lahko v celoti izkoristi razpoložljivi reciklabilni potencial svojih odpadkov in hkrati zadovolji potrebam trga po izdelkih iz plastike, saj bosta tudi sistema linearnega gospodarstva ali zrelega krožnega gospodarstva definirana na ta način. Le tako lahko pričakujemo, da se bodo razlike v materialnih tokovih primerjajoč različne sisteme gospodarjenja s PKOP dovolj jasno izkristalizirale.

Dodatno, preden se antagonistične modele integralnega gospodarjenja z odpadki prične analizirati in primerjati njihovo učinkovitost, jih je potrebno, kjer je le mogoče, poenostaviti z namenom, da se izognemo nepotrebnim šumom, ki lahko zameglijo razlike med njimi. Npr., če teoretično predpostavimo, da je v določeni družbi povpraševanje po plastičnih izdelkih (v smislu količine plastike, ki je vgrajena v te izdelke) konstantno skozi čas, komparacijski sistem močno poenostavimo, saj je posledično tudi masa plastike v vsakodnevni uporabi znotraj te družbe bolj ali manj konstantna. Za zadovoljitev tovrstnega pogoja pa mora biti sistem v ravnotežju: količina plastike vgrajena v nove izdelke na enoto časa mora ves čas biti konstantna ter enaka količini generirane odpadne plastike na enoto časa. Za komparacijske potrebe je smiselno, da se pretoke materiala skozi sistem kvantificira kot 100 masnih enot plastike na dolžino časa, ki mora preteči da se zaključi en cikel zamenjave plastične mase v sistemu, ki se nahaja v vsakodnevni uporabi znotraj določene družbe in njenega gospodarstva. Čas potreben za izpolnitev enega ciklusa je enak času, ki ga plastična masa v povprečju prevede vgrajena v izdelkih tekom njihove življenjske dobe ($t_{\text{ciklus zamenjave plastične mase, povprečje}} = t_{\text{LS, povprečje}}$). To bi bil konceptualno najboljši možni časovni okvir s katerim bi operirali za potrebe detektiranja razlik v intenziteti materialnih tokov primerjajoč različne sisteme gospodarjenja z odpadno plastiko med seboj.

Povprečno življenjsko dobo plastične mase vgrajene v plastičnih izdelkih se lahko na grobo oceni z izračunom, kakršen je prikazan v Tabeli 1.

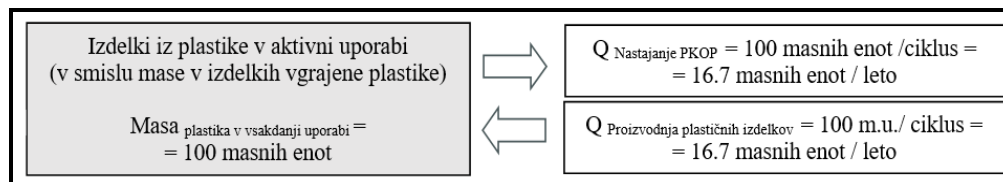
Tabela 1: Karakteristična povprečna življenjska doba plastičnih dobrin glede na gospodarsko branžo s pripadajočo porazdelitvijo masnih deležev odpadkov po posameznih frakcijah v okviru PKOP.

Industrijska branža	*Relativni deleži generirane odp. plastike po frakcijah [%]	**Povprečna življenjska doba $t_{\text{LS, povprečje}}$ [leta]
Embalaža	58.7	1
Gradbeništvo	10.1	35
OEEO	6.1	8
Vozila	3.7	15
Drugo	21.4	4
Skupaj	100.0	~ 6

*Podatki za Nemčijo za leto 2021 [3]; ** Podatki za Italijo za leto 2017 [4]

Na podlagi podatkov iz Tabele 1 smo z izračunom pridobili okvirno oceno časa trajanja enega tržnega recikla potrebnega za zamenjavo plastične mase v količini, ki se vsakem trenutku nahaja v obtoku zadovoljujoč potrebe družbe in gospodarstva: 6 let. Povprečni čas takega cikla je enak povprečni življenjski dobi plastičnih proizvodov oz. plastične mase, ki se nahaja v teh proizvodih (t.j., $t_{\text{tržni recikel plastike v obtoku, povprečje}} = t_{\text{LS, povprečje}} = 6$ let). Na tej podlagi se lahko definira intenziteto pretakanja materiala skozi sistem, kot je prikazano spodaj, grafično pa na sliki 1:

$$Q_{\text{PKOP nastajanje}} = Q_{\text{Proizvodnja plastičnih izdelkov}} = 100 \text{ masnih enot/ciklus} = 100 \text{ m. e. /6 let} = 16,6 \text{ m.e./leto}$$



Slika 1: Kvantifikacija pretoka plastične mase za zadovoljevanje potreb po plastičnih izdelkih na prostem trgu, sloneč na predpostavki, da znaša masa plastike v vsakdanji uporabi 100 masnih enot in je celoten sistem v ravnotežju.

Čas trajanja enega tržno pogojenega recikla ni enak času trajanja enega proizvodno pogojenega snovnega recikla. Slednji namreč sestoji iz dveh sumandov, t.j.:

- 1) iz povprečne življenjske dobe plastičnega proizvoda ($t_{LS, \text{povprečje}}$), ter
- 2) iz povprečno pretečenega časa, ko se plastični material nahaja v raznih pojavnih oblikah PKOP ter iz njih pridelanih surovin namenjenih proizvodnji novih izdelkov ($t_{PKOP, \text{povprečje}}$); poraba tega časa je neizbežna pri prakticiranju metode recikliranja (za potrebe ločenega zbiranja, sortiranja, procesiranja, itd.), kar podaljša potreben čas za kompletiranje snovnega recikla; nasprotno, to ne velja za deviške surovine, saj one niso sestavni del snovnega recikla (t.j., $t_{PKOP} = 0$ za nericikliran del plastične substance vgrajene v reciklirane izdelke; če bi bili izdelki 100% izdelani iz deviških surovin, bi imeli opravka z linearnim gospodarstvom – z drugim sumandom v takšnem primeru sploh ne bi imeli opravka)

Red velikosti povprečno pretečenega časa, ko se plastični material nahaja v raznih pojavnih oblikah PKOP in pripadajočih reciklatov znaša ocenjeno okoli 6 mesecev, torej znaša povprečni čas za izpeljavo enega snovnega recikla okvimo $(6 + 0,5)$ let = 6,5 let. Čas potrošen za ravnanje s PKOP eksistira tudi v linearni ekonomiji, vendar ne za potrebe snovne reciklaže in je lahko bistveno krajši od 6 mesecev. Kakorkoli že, drugi sumand nima vpliva na povprečni čas, ki je potreben, da se plastična masa, ki se nahaja dinamično akumulirana v proizvodih v obtoku, zamenja. Odnosi med količinami so prikazani spodaj:

$$t_{\text{snovni proizvodni recikel, povprečje}} = t_{LS, \text{povprečje}} + t_{PKOP, \text{povprečje}} = t_{\text{tržni recikel plastike v obtoku, povprečje}} + t_{PKOP, \text{povprečje}}$$

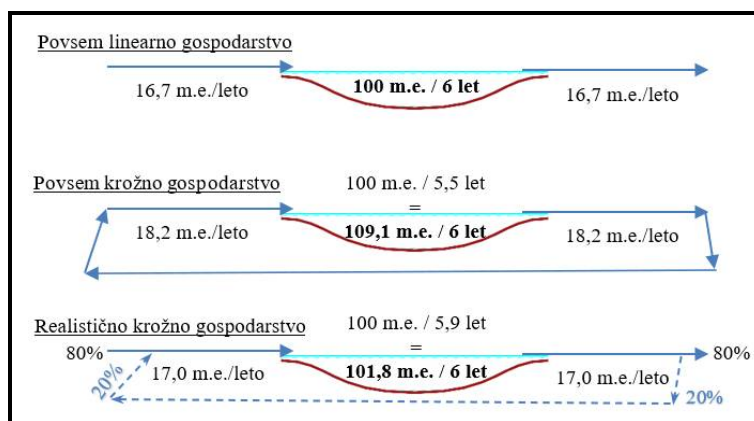
V predhodnem članku [1] je bilo nazorno obrazloženo, da je povprečna življenjska doba recikliranih plastičnih proizvodov lahko samo krajša v primerjavi z istovetnimi proizvodi izdelanimi iz deviških surovin, kot sledi:

$$t_{LS, \text{povprečje, krožno gospodarstvo}} < t_{LS, \text{povprečje, linearno gospodarstvo}}$$

Podatki o povprečnih življenjskih dobah plastičnih proizvodov različnih kategorij so prikazani v Tabeli 2, nanašajo pa se na razmere v Italiji leta 2017. V Tabeli 2 izračunano povprečje življenjske dobe plastičnih proizvodov, ki znaša 6 let, je bilo pridobljeno na osnovi obdelave podatkov, ki so bili značilni za proizvode izdelane veliko pred letom 2017. Torej je smiselno, da se pridobljeno vrednost prevzame kot merodajno za linearno gospodarstvo. A tudi če bi se odločili drugače, do večjih razlik v izračunih ne bi prišlo, saj so vrednosti relativnih parametrov primerjajoč reciklabilnosti materialov karakterističnih za linearno in krožno gospodarstvo tiste, ki bistveno vplivajo na vrednosti končnih rezultatov. Metode teh izračunov so bile predstavljene v predhodnem članku [1], koristno jih bomo uporabili tudi v aktualnem članku. A najprej moramo ugotoviti, kako bi se izračunane razlike v življenjskih dobah proizvodov značilnih za različne gospodarske sisteme odražale na intenziteto materialnih tokov, ki se pretakajo skozi te sisteme.

Predpostavimo torej da povprečna življenjska doba plastičnih dobrin proizvedenih v okviru linearne ekonomije ($t_{LS, \text{povprečje, linearno gospodarstvo}}$) znaša 6 let ter npr. 5,5 let v okviru idealnega krožnega gospodarstva ($t_{LS, \text{povprečje, krožno gospodarstvo}}$). Želimo ugotoviti, kaj se zgodi z vrednostmi materialnih tokov, če se gospodarstvo transformira iz čisto linearne v (teoretično) popolnoma krožnega pri pogoju, da je povpraševanje po plastičnih proizvodih ves čas konstantno, t.j. 100 m.e. na cikel. Zavedati se moramo tudi dejstva, da se v praksi le majhen del surovine za proizvodnjo novih plastičnih izdelkov sestoji iz PKOP izvirajočih recikliranih materialov. Z računskega stališča moramo torej razlikovati med pojmi "čisto linearno gospodarstvo" (0% PKOP se reciklira), "čisto krožno gospodarstvo" (100 % se reciklira) in "realistično krožno gospodarstvo" (optimistično privzamimo, da se 20% da zreciklirati). Na sliki 2 je masa plastike, ki se nahaja v vsakdanjem obtoku v družbi in gospodarstvu ilustrativno predstavljena kot voda v jezeru v stanju ravnotežja (konstantni pretok plastične mase v- in ven iz območja njene uporabe).

Iz slike 2 lahko razberemo, da povišanje stopnje reciklaže PKOP sproži fenomen povečanja masnih pretokov skozi sistem. Če pa časovno obdobje 6-ih let določimo kot skupni imenovalec za primerjanje učinkovitosti delovanja različnih gospodarskih sistemov, lahko taisti fenomen interpretiramo kot povečanje plastične mase v obtoku (dinamično skladiščenje). Omenjene pojave je pri nizkih stopnjah reciklaže v vsakdanjem življenju skorajda nemogoče zaznati, saj so skriti zaradi učinkov delovanja drugih, veliko zaznavnejših pojavov, ki smo jih pri konstruiranju komparacijskega modela namenoma eliminirali kot šume. Npr., v realni družbi se povpraševanje po plastičnih izdelkih različnih kategorij na trgu nenehno spreminja, ravnotežje v materialnih tokovih na vstopni in izstopni strani ni nikoli vzpostavljeno.

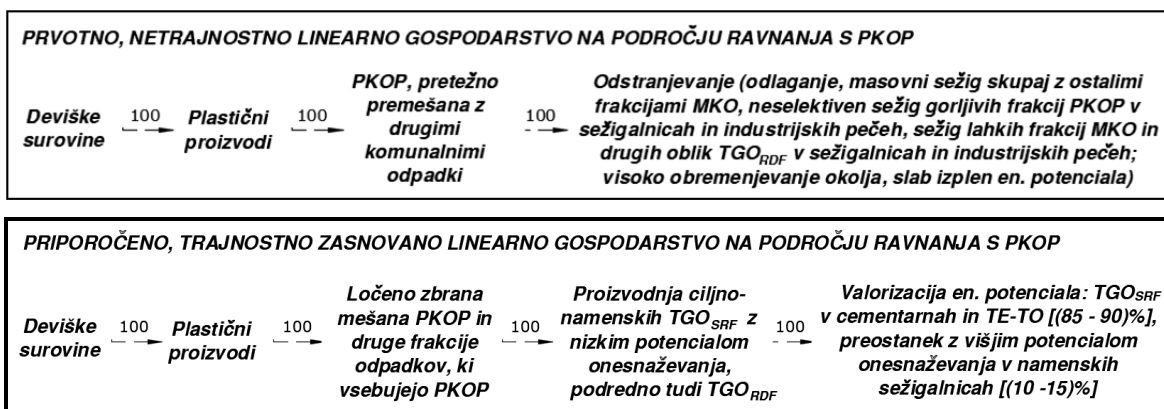


Slika 2: Ilustrativni prikaz materialnih tokov primerjajoč značilnosti namišljenih gospodarstev, ki prakticirajo različne stopnje PKOP reciklaže (t.j., 0%, 100% in 20%).

Tolmač k sliki 2:

Vsaj 100 masnih enot plastičnih dobrin mora biti proizvedeno v 6 letih, da bi se lahko nadomestilo izgubljeno količino plastične mase, ki se je v tem času transformirala v PKOP. Namreč, 6 let znaša vrednost povprečne življenjske dobe plastičnih proizvodov, ki se nahajajo v uporabi v družbi in gospodarstvu, če se metod recikliranja PKOP ne bi prakticiralo (= linearno gospodarstvo). Torej, 16,7 masnih enot izdelkov iz plastike mora biti proizvedeno na leto. Za povsem krožno ekonomijo je povprečna življenjska doba lahko samo krajša. Tu smo zaradi nazornosti ilustracije predpostavili le malo skrajšanje življenjske dobe, na 5,5 let. Takšno gospodarstvo bi moralo proizvesti 18,2 masnih enot plastike na leto, da bi zadovoljilo potrebe družbe in gospodarstva, ki bi v tem slučaju znašalo 109,1 m.e. na 6 let. To dodatno količino velikosti 9,1 m.e. bi lahko poimenovali "dinamično skladiščenje plastičnega materiala, ki se nahaja v obtoku". Vendar pa čista krožna ekonomija na področju ravnanja z odpadno plastiko sploh ne obstaja in tudi ne more obstajati, saj je veliko vrst odpadne plastike nereciklabilnih, reciklabilnost preostalih pa se ob izvajanju repetitivnega recikliranja hitro zmanjšuje do stopnje neuporabnosti. Realistična krožna gospodarstva so prisiljena masovno dovajati deviške surovine v reciklirajoči sistem, da bi lahko kontinuirno deloval. Tovrstna krožna gospodarstva so z računskega stališča linearno- cirkularni hibridi, kjer je linearna komponenta tista, ki je neizbežna za delovanje celotnega sistema in s stališča materialnih tokov tudi močno prevladuje, čeprav je percepcija večine ljudi ter zakonodajne srenje zaradi idejno-moralističnih in pragmatičnih nagibov verjetno povsem drugačna.

Zgodovinsko gledano je gospodarstvo na področju ravnanja s plastičnimi materiali spocetka delovalo kot linearni sistem. PKOP je končevala svojo pot na odlagališčih in/ali v rudimentarno zasnovanih, okoljsko nesprejemljivo delujočih sežigalnicah, naključno premešana z drugimi gorljivimi- ali celo negorljivimi frakcijami odpadkov. Vendar pa je linearna ekonomija na področju gospodarjenja z PKOP lahko ciljno zasnovana tudi tako, da deluje kot okoljevarstveno in ekonomsko učinkovit sinergijski sistem za odstranjevanje gorljivih odpadkov iz okolja in za izrabo njihovega energijskega potenciala. Materialni tok plastike skozi sistem linearnega gospodarstva je prikazan na sliki 3.



Slika 3: Materialni pretok plastike izražen kot 100 masnih enot za čas trajanja enega povprečnega cikla zamenjave plastičnega materiala v obtoku – koncept linearnega gospodarstva.

Zaradi uspehov doseženih pri recikliranju odpadnega papirja in stekla, zlasti pa kovin, ter zaradi neprimernosti ravnanja s PKOP v preteklosti (glej sliko 3), se je ideja o potrebi po uvedbi recikliranja že pred desetletji prenesla tudi na odpadno plastiko, čeprav je ta material bistveno težje reciklirati. Z obdelavo statističnih podatkov na to temo zbranih v Nemčiji in na Japonskem [3] bomo poskušali ugotoviti, kolikšna stopnja recikliranja PKOP je danes dosežena v tehnološko najrazvitejših državah, v katerih je že desetletja v veljavi zakonodaja, ki preko raznih mehanizmov favorizira uporabo metode reciklaže (tabela 2).

Tabela 2: Proizvodnja plastike, generacija odpadne plastike in stopnja reciklaže v Nemčiji, 2021 [3]

[1] Proizvodnja plastične mase [mil. t]	[2] Generacija odpadne plastike (industrijska + PKOP) [mil. t]	[3] Generacija odpadne plastike (industrijska + PKOP) [%]	[4] Stopnje recikliranja za plastiko v celoti [%]	[5] Povprečna stopnja recikliranja za plastiko v celoti [%]	[6] Stopnja recikliranja industrijske odpadne plastike [%]	[7] Stopnja recikliranja PKOP [%]
14,0	(~) 0,9 + 4,8 = 5,7	15,8 + 84,2 = 100	*35,4 **16,3	25,9	~90,0	11,7

* podano kot relativni delež nastale odpadne plastike, ki konča svojo pot vgrajena v novih proizvodih

** podano kot relativni delež reciklirane surovine, kot se jo uporablja v proizvodnji plastične mase

Stolpec [5]: Vrednost je izračunana na podlagi podatkov iz stolpca [4], t.j. $(35,4+16,3)/2 = 25,9$

Stolpec [7]: Vrednost je izračunana na podlagi podatkov iz stolpcev [5], [3] in [6], t.j. $25,9\% - 15,8\% \cdot 90\% = 11,7\%$

Obrazložitev načina izvedbe izračuna stopnje recikliranja za PKOP v tabeli 2:

Za veliko izvozno orientiranih držav, kot je Nemčija, je značilno, da količina proizvedene plastične mase močno presega količino odpadne plastike, ki se generira znotraj države. Posledično, veliko višjo vrednost za doseženo stopnjo reciklaže dobimo, ko jo obravnavamo z aspekta deleža nastale odpadne plastike, ki gre v reciklažo, kot pa če jo izrazimo kot delež reciklirane surovine porabljene za proizvodnjo plastične mase. Obratno velja za države, ki so neto uvozniki izdelkov iz plastike. Še dodatno se izračun lahko zakomplicira, če upoštevamo, da se lahko izvažata ali uvažata tudi odpadke, ne samo izdelke. Vsekakor je daleč najbolj merodajna povprečna vrednost, zato smo jo v tabeli z izračunom tudi podali (stolpec 5)

Odpadna plastika sestoji iz industrijske (mali delež) in PKOP (velik delež). Statistični podatki o deležih industrijske in post-konzumne odpadne plastike so bili podani, medtem ko so vrednosti dosežene stopnje reciklaže nanašajo na odpadno plastiko kot celoto, vendar smo v tem članku fokusirani na PKOP. Znano dejstvo je, da je industrijska plastika bistveno bolj reciklabilna kot PKOP (okoli 90% v Nemčiji). Na podlagi teh podatkov smo lahko izračunali stopnjo reciklaže, ki se nanaša samo na PKOP (stolpec 7).

Glede na izvedeno obdelavo podatkov iz tabele 2 lahko razberemo, da je reciklažni potencial PKOP zelo nizek (samo okoli 12% znaša povprečna reciklažna stopnja PKOP značilna za Nemčijo v 2021). Vendar ambicije na tem področju v Nemčiji niso zamrle. Planirano je, da se reciklažno stopnjo za odpadno plastiko kot celoto poviša vse do 63% (čeprav je v 2021 ta vrednost znašala le 26% - glej tabelo 2). Pri tem računajo tudi na drastično povišanje proizvodnje bioplastike [3]. Jasno je, da se pristop z uvedbo bioplastike v logističnem in okoljevarstvenem okviru sistema celovitega ravnanja z odpadki ne bo obnesel, poleg tega pa veliko okoljevarstvenikov kompostiranja plastike ne vidi kot formo recikliranja, temveč raje odstranjevanja.

Metodo za izračun relativne povprečne življenjske dobe proizvodov iz reciklirane plastike v razmeju do proizvodov izdelanih iz deviških surovin smo predstavili v predhodnem članku [1]. Najprej moramo ugotoviti, kolikšen je reciklabilnostni potencial PKOP. Razmerje deležev med polimeri v proizvodnji plastičnih mas v Nemčiji v 2021 [3] je prikazana v tabeli 3 (sestava na odpadkovni strani ni bila podana).

Tabela 3: Razmerje deležev v proizv. plastičnih mas v Nemčiji, 2021 [3] in ocena reciklabilnosti PKOP

Polimer	PE	PP	PET	PS	PVC	Drugo	Plastika
Delež [%]	30,8	18,8	7,5	5,7	7,0	30,2	100,0
*Povprečna reciklabilnost za industr. odp. plastiko	3	1	6	0,1	0,5	0,1	1,63
*Povprečna reciklabilnost za PKOP	0,7	0,15	1	0,05	0,1	0,05	0,34

* reciklabilnost podana kot povprečno število uspešno izvedenih reciklov v zaprtem sistemu (" $n_{izvedljivo}$ "); ocenjene vrednosti bazirajo na informacijah iz mnogo virov [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]

Statistični reciklabilnostni potencial za PKOP za Nemčijo (izražen s parametrom " $n_{izvedljivo}$ ") je torej ocenjen z vrednostjo 0,34 (kot da bi PKOP kot celota imela potencial biti zreciklirana enkrat v deležu 34% brez dodajanja deviških surovin in nič-krat v deležu 66%).

3) Izračun povprečne življenjske dobe recikliranih proizvodov

Potrebni koraki za izračun življenjske dobe recikliranih proizvodov so podani spodaj. Teoretična izpeljava celotnega koncepta je podana v članku [1] in deloma [2].

1. korak

Izračunati je potrebno vrednost faktorja hitrosti upadanja življenjske dobe recikliranih proizvodov iz naslova ponavljajočega recikliranja brez dodajanja primarne surovine v sistem " f_{rc} " na podlagi poznavanja vrednosti uspešno izvedljivega števila reciklov " $n_{izvedljivo}$ ". Osnovna formula se glasi:

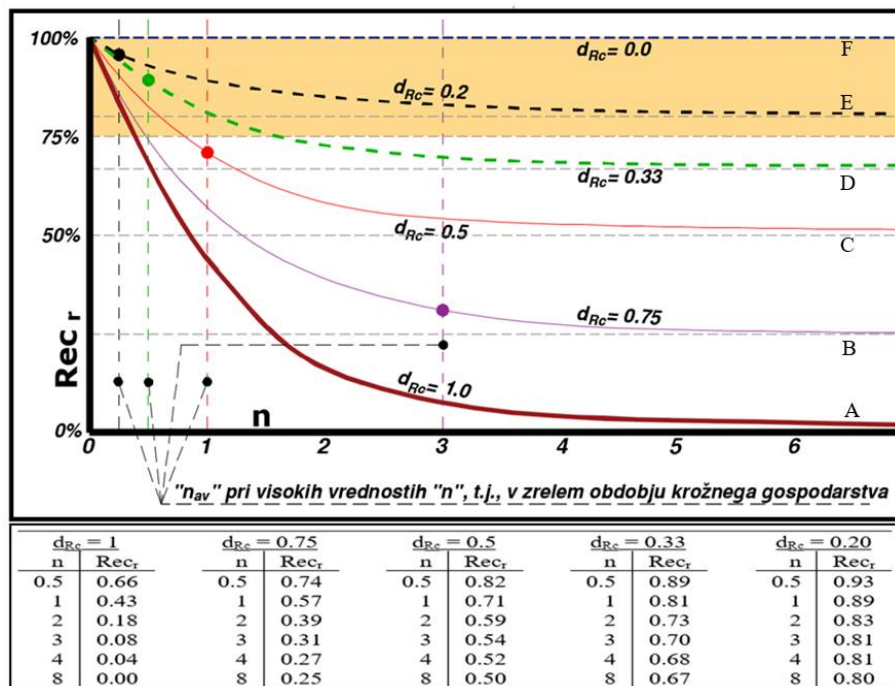
$Rec_r = 1 - d_{Rc} + d_{Rc} \cdot f_{Rc}^{-n}$. Če je " $d_{Rc} = 1$ " (deviške surovine se ne dovaja v krožni sistem) $\rightarrow Rec_r = f_{Rc}^{-n}$.

Torej: $n_{izvedljivo} = 0,34 \rightarrow f_{Rc}^{-0,34} = 0,75 \rightarrow f_{Rc}^{0,34} = 1,33 \rightarrow f_{Rc} = 2,31$

2. korak

Vrednosti parametra " Rec_r " (relativna reciklabilnost materiala) je treba izračunati kot funkcijo izvedenega števila reciklov " n " v odvisnosti od deleža reciklirane mase v surovini za proizvodno novih izdelkov " d_{Rc} " (npr. 20%, 33%, 50%, 75% in 100%) v skladu z izrazom $Rec_r = 1 - d_{Rc} + d_{Rc} \cdot 2,31^{-n}$. Pojem "relativna reciklabilnost materiala" je istoveten pojmu "relativna kvaliteta materiala za proizvodnjo novih izdelkov", a se izraza uporabljata vsak v svojem kontekstu.

Izračunane vrednosti se lahko poda tudi grafično v obliki krivulj rel. reciklabilnosti, ki nazorno ilustrirajo hitrost upadanja kvalitete materiala kot posledice repetitivnega recikliranja iste šarže tega materiala (slika 4).



Slika 4: Relativna reciklabilnost PKOP v odvisnosti od števila ponovljenih reciklov iste šarže materiala.

Obrazložitev:

PKOP sestoji iz mešanice materialov različne reciklabilnosti, zato je pojem "relativna reciklabilnost materiala" v tem primeru treba razumeti v statističnem pomenu besede. Vrednosti relativne kvalitete materiala znotraj obarvanega območja nad linijo 75% se smatra za še sprejemljivo s stališča uporabnikov.

Krivulja "A" ponazarja relativno reciklabilnost PKOP brez dodajanja deviške surovine v sistem (t.j., $d_{Rc}=1$). Meja sprejemljivosti materiala pri vrednosti $Rec_r = 75\%$ je prekoračena že po $n = 0,34$ izvedenih recikliranj. Nizka reciklabilnost PKOP kot celote je posledica dejstva, da obstaja le malo subfrakcij PKOP, ki bi zares bile reciklabilne in tudi reciklabilnost le-teh se hitro zmanjšuje kot posledica repetitivnih recikliranj.

Povprečna relativna kvaliteta surovine za proizvodnjo plastike, proizvedene iz deviških materialov (t.j., $d_{Rc}=0$), je prezentirana z linijo "F". Vrednosti " Rec_r " so enake vrednosti "1" oz. 100% že po definiciji.

Reciklabilnost surovine, ki je sestavljena tako iz recikliranih kot iz deviških sestavin je prikazana s preostalimi štirimi krivuljami. Razvidno je, da bi ob konstantnem dodajanju deviških materialov v sistem v deležu 80% (t.j., $d_{Rc}=0,2$), kvaliteta surovine za proizvodnjo novih izdelkov ostala zadovoljiva tudi po velikem številu repetitivnih recikliranj. Pri vrednosti $d_{Rc}=0,33$ pa bi se kvaliteta poslabšala pod mejno vrednost 75% že po dveh recikliranjih.

3. korak (za teoretično obrazložitev problematike, ki se nanaša na izvedbo koraka 3. glej poglavje 4)

Tretji korak je namenjen izračunu povprečne vrednosti dosedaj že izvedenega števila recikliranj " $n_{povprečna}$ ", oz. " n_{av} ", ki je karakteristika konkretnega materiala, ki se ga eventualno namerava reciklirati še naprej. Izpeljava splošne formule za izračun parametra " n_{av} " kot funkcije dveh odvisnih spremenljivk (t.j., dosedaj izvedenega števila recikliranj " n " in deleža recikliranega materiala " d_{Rc} ", ki se ga uporablja v proizvodnji novih izdelkov) je predstavljena v poglavju 4. Splošna formula za izračun se glasi $n_{av} = \sum_{n=1}^n d_{Rc}^n$.

Za mlado krožno gospodarstvo je značilno, da je vrednost v preteklosti že izvedenega števila reciklov relativno nizka, recimo $n=1$. Za zrelo krožno gospodarstvo pa velja, da je število dosedaj izvedenih reciklov relativno visoko, recimo $n>5$. Rezultati izračunov so prikazani v Tabeli 4.

Tabela 4: Povprečno število reciklov " n_{av} " v odvisnosti od števila izvedenih recikliranj " n " za rec. material

$d_{Rc} = 1$		$d_{Rc} = 0.75$		$d_{Rc} = 0.5$		$d_{Rc} = 0.33$		$d_{Rc} = 0.20$	
n	n_{av}	n	n_{av}	n	n_{av}	n	n_{av}	n	n_{av}
1	1	1	0.75	1	0.50	1	0.33	1	0.20
3	3	3	1.73	3	0.86	3	0.48	3	0.25
∞	∞	∞	3.00	∞	1.00	∞	0.50	∞	0.25

Izračunane vrednosti " n_{av} ", karakteristične za zrelo krožno gospodarstvo, so prikazane tudi grafično na sliki 3 (kot vertikalne linije, ki sekajo pripadajoče krivulje E, D, C in B v označenih presečiščih). Presečišča, ki ležijo izpod mejne vrednosti 75% razkrivajo dejstvo, da krožna gospodarstva s stopnjo reciklaže 50% PKOP in več sploh ne morejo eksistirati (krivulji B in C). Gospodarstvi reprezentirani s krivuljama E in D (20% in 33% stopnja reciklaže) pa bi izgleda s tehnološkega stališča lahko preživeli na dolgi rok (presečišči ležita iznad mejne vrednosti $Rec_r = 0,75$), kar pa še ne pomeni, da ima reciklaža tolikšnih ali kakršnih-koli količin PKOP tudi ekonomski ali okoljevarstveni smisel.

4. korak

Izračunati je potrebno povprečne relativne življenjske dobe plastičnih izdelkov " t_{Rc} ", značilnih za mlado in zrelo krožno ekonomijo pri različnih deležih recikliranega materiala, ki je vsebovan v telesih teh izdelkov. Formula za izračun se glasi: $t_{Rc} = 1 - d_{Rc} + d_{Rc} \cdot f_{Rc}^{-n_{av}} \cdot F_{wei}$. Na tej podlagi je treba izračunati še relativne vrednosti materialnih tokov " F_r ", ki se pretakajo skozi te sisteme: $F_r = t_{Rc}^{-1}$.

F_{wei} Faktor vpliva šibkejših komponent v sestavi kompleksno sestavljenih proizvodov na življenjsko dobo teh proizvodov (upoštevanje vpliva deleža vsebovane reciklirane plastike na skrajšanje življenjske dobe sestavljenih proizvodov); v izračunu se je uporabilo vrednost $F_{wei} = 0,67$.

Rezultati so prikazani v tabeli 5. Karakteristične vrednosti za relativno mlado krožno gospodarstvo so prikazane v prvi vrstici, za zrelo krožno gospodarstvo pa v tretji (zadnji) vrstici. Lepo se vidi trend zmanjševanja relativne življenjske dobe proizvodov s staranjem krožnega gospodarstva, čeprav je očitno, da je v primerih, ko je delež recikliranega materiala veliko manjši od 50%, npr. $d_{Rc} = 0,2$, ta vpliv zanemarljiv. Kar se tiče parametra " F_r " lahko npr. razberemo, da letna količina generirane PKOP naraste za kar okoli 10% če delež recikliranega materiala, ki se ga uporablja v proizvodnji, naraste z 0% na 20%. Pričakovano so količine nastajajočih odpadkov dramatično visoke pri visokih vrednostih " d_{Rc} ", zlasti v primeru, da gre za zrelo krožno gospodarstvo.

Tabela 5: Relativna življenjska doba povprečnega izdelka iz plastike " t_{Rc} " kot funkcija parametrov " n_{av} " in " d_{Rc} " ter rezultirajoče rel. vrednosti intenzitete nastajanja odpadkov oz. pretoka materiala skozi sistem " F_r ".

$d_{Rc} = 1$			$d_{Rc} = 0.75$			$d_{Rc} = 0.5$			$d_{Rc} = 0.33$			$d_{Rc} = 0.20$		
n_{av}	t_{Rc}	F_r	n_{av}	t_{Rc}	F_r	n_{av}	t_{Rc}	F_r	n_{av}	t_{Rc}	F_r	n_{av}	t_{Rc}	F_r
1	0.29	3.45	0.75	0.52	1.92	0.50	0.72	1.39	0.33	0.84	1.19	0.20	0.91	1.1
3	0.05	20.0	1.73	0.37	2.70	0.86	0.66	1.52	0.48	0.82	1.22	0.25	0.91	1.1
∞	0.00	∞	3.00	0.29	3.45	1.00	0.65	1.54	0.50	0.82	1.22	0.25	0.91	1.1

5. korak

Izračunane vrednosti relativnih parametrov za povprečno življenjsko dobo plastike vgrajene v izdelke " t_{Rc} " ter za pretok materiala " F_r " je treba transformirati v količine izražene v absolutnih enotah (leta, m.e./leto) v skladu s kvantitativnimi vrednostmi in konceptom kot je bil formuliran na sliki 2. Torej se uporabi sledeče formule:

$$t_{LS,av} = t_{Rc} \cdot 6 \text{ let, in}$$

$$Q_{PKOP \text{ nastajanje}} = Q_{Proizvodnja \text{ plastičnih izdelkov}} = Q_{sistem} = F_r \cdot 100 \text{ m.e.} / 6 \text{ let}$$

Rezultati so prikazani v tabeli 6. Razvidno je, da bi se življenjska doba plastike v obtoku z reducirala do nesmiselno nizkih vrednosti, če bi delež recikliranega materiala v proizvodnji bil večji od 50% (tako slaba bi bila kvaliteta proizvodov iz plastike). Temu primerno bi morala proizvodnja narasti do nesmiselno visokih vrednosti, da bi zadovoljila povpraševanju po izdelkih iz plastike. Tovrstne številke nam sporočajo, da takšna

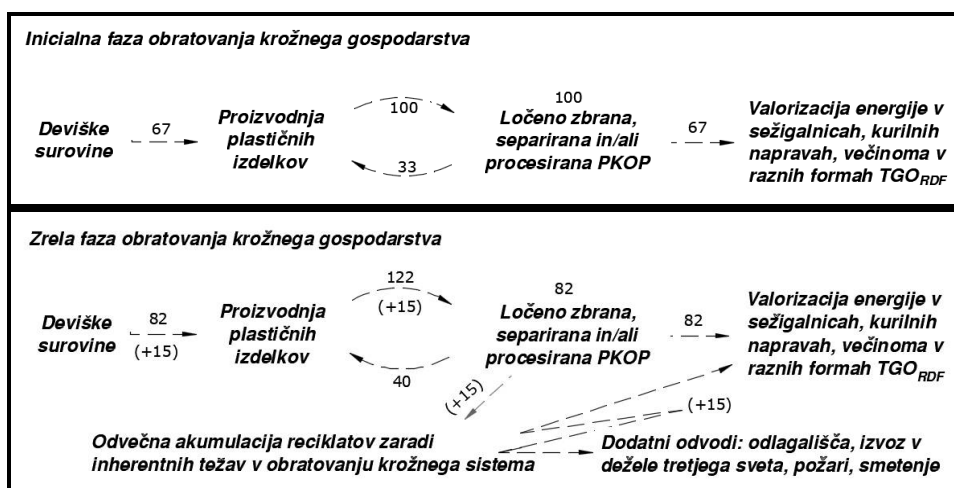
krožna gospodarstva ne bi mogla obstajati. Če pa bi delež recikliranega materiala v proizvodnji znašal npr. 33%, bi tako gospodarstvo lahko eksistiralo, vendar bi življenjska doba plastike v sistemu padla s šestih na okoli 5 let.

Tabela 6: Povprečna življenjska doba plastike v obtoku " $t_{LS,av}$ " in intenziteta materialnega toka plastike skozi sistem " Q_{sistem} " značilen za krožno gospodarstvo.

Dosežena stopnja v evoluciji staranja krožnega gospodarstva	$d_{Rc} = 1$		$d_{Rc} = 0,75$		$d_{Rc} = 0,5$		$d_{Rc} = 0,33$		$d_{Rc} = 0,20$	
	$t_{LS, av}$ [leta]	Q_{sistem} [m.e./6 let]	$t_{LS, av}$ [leta]	Q_{sistem} [m.e./6 let]	$t_{LS, av}$ [leta]	Q_{sistem} [m.e./6 let]	$t_{LS, av}$ [leta]	Q_{sistem} [m.e./6 let]	$t_{LS, av}$ [leta]	Q_{sistem} [m.e./6 let]
Mlado	1,74	345	3,12	192	4,32	139	5,04	119	5,46	110
Tranzicija	0,30	2000	2,22	270	3,96	152	4,92	122	5,46	110
Zrelo	0,00	∞	1,74	345	3,90	154	4,92	122	5,46	110

6. korak

Masni pretok plastike skozi sistem mladega in zrelega krožnega gospodarstva bomo predstavili grafično v istem formatu, kot je bil predstavljen za linearno gospodarstvo na sliki 5. Suponirali bomo zelo visoko stopnjo recikliranja PKOP ($d_{Rc} = 33\%$), v skladu z ambicijami, ki jih imajo na tem področju npr. v Nemčiji. Mlado krožno gospodarstvo bomo predstavili v inicialni fazi njegovega razvoja, ko se učinki krajšanja življenjske dobe proizvodov sploh še niso pričeli pojavljati.



Slika 5: Materialni tokovi plastike značilni za koncept krožnega gospodarstva, če upoštevamo, da bi pri enakem povpraševanju po plastičnih proizvodih masni pretok v linearnem gospod. znašal 100 m.e./6 let.

Iz slike 5 lahko razberemo, da se v zreli dobi krožnega gospodarstva materialni tok plastike skozi sistem poveča z začetnih 67 m.e. na končnih 97 m.e. Pri tem sta igrala vlogo dva fenomena:

- 1.) Dinamična akumulacija plastike v sistemu zaradi skrajšanja povprečne življenjske dobe proizvodov v obtoku in posledičnega povečanja pretokov v sistemu (skok s 67 m.e./6 let na 82 m.e./6 let). Ta fenomen je bil ilustrativno prikazan na sliki 2 in se ne odraža kot kopičenje reciklatov po skladiščih.
- 2.) Dodatna (vidna) akumulacija PKOP in reciklatov po raznih centrih in skladiščih zaradi inherentno slabega delovanja kontradiktorno zasnovanega, z regulativo forsiranega sistema, kar je splošen fenomen poznan tudi v visoko razvitih, okoljevarstveno osveščenih deželah. Večina dodatno nakopičene plastike ultimativno konča svojo pot v raznih kurilnih napravah, pa tudi na odlagališčih, itd. Težko je oceniti, kolikšen je ta tok. O tem se da špekulirati na razne posredne načine. Npr., Nemčija ima že dolgo ambicijo zreciklirati 30% PKOP in več, a jo danes zreciklira kvečjemu 15%. Lahko rečemo, da gre za razkol med idealom in stvarnostjo. Če bi krožno gospodarstvo res bilo prisiljeno kontinuirno reciklirati 33% PKOP, bi prišlo do velikega povečanja kopičenja reciklatov in ostalih nezaželenih pojavov s tendenco, da se na ta način premosti omenjeno diskrepanco med idealom in stvarnostjo reda velikosti 15% masnega toka, kot je prikazana na sliki 5. Če primerjamo masne tokove na sliki 5 (krožno gospodarstvo) s tistimi na sliki 3 (linearno gospodarstvo), vidimo, da so količine odpadne plastike odvedene na sežig (ali v drugačno odstranitev) enakega reda velikosti, isto velja za količino porabljenih deviških surovin.

4) Metoda za pridobitev ocene povprečnega števila reciklov v krožnem gospodarstvu

Isto šaržo se repetitivno reciklira samo za potrebe izvajanja testov reciklabilnosti za posamezne vrste materialov. Koncept je uporaben tudi za ugotavljanje statistične reciklabilnosti, ko gre za tehnološko nekompatibilne mešanice materialov, kakršna je PKOP, na kateri seveda ni mogoče izvajati direktnih testov reciklabilnosti. Vendar pa reciklažna podjetja v praksi ne reciklirajo sukcesivno ene in taiste šarže materiala, temveč imajo opravka z reciklirnim materialom, ki je mešanica snovi z različnim pedigreejem. Del vsebujoče snovi je v preteklosti že bil bodisi en-krat-, dva-krat ali n-krat uporabljen za proizvodnjo novih izdelkov. Želimo ugotoviti, kolikšna je povprečna vrednost izvedenega števila reciklov, značilnega za nek material, ki se ga repetitivno reciklira.

Suponirajmo, da imamo opravka s krožnim sistemom, kjer se surovina za proizvodnjo novih izdelkov vedno znova pripravlja z mešanjem deviških in recikliranih materialov v enakem razmerju: $d_{Rc} : (1 - d_{Rc}) = konst.$ Najmlajši možni krožni sistem je tisti, ki za svojo proizvodnjo prvič uporabi reciklirano surovino. V tej inicialni fazi je povprečno število izvedenih reciklov seveda enako kar vrednosti d_{Rc} :

$$n_{1,av} = d_{Rc} \cdot 1 + (1 - d_{Rc}) \cdot 0 = d_{Rc} \quad 1)$$

Ko je material recikliran drugič, se formula nadgradi v -

$$n_{2,av} = d_{Rc} \cdot [d_{Rc} \cdot 2 + (1 - d_{Rc}) \cdot 1] + (1 - d_{Rc}) \cdot 0 = d_{Rc}^2 + d_{Rc} \quad 2)$$

Po tretji stopnji recikliranja, dobimo sledeči rezultat:

$$n_{3,av} = d_{Rc} \cdot \{d_{Rc} \cdot [d_{Rc} \cdot 3 + (1 - d_{Rc}) \cdot 2] + (1 - d_{Rc}) \cdot 1\} + (1 - d_{Rc}) \cdot 0 = d_{Rc}^3 + d_{Rc}^2 + d_{Rc} \quad 3)$$

Pri katerikoli stopnji recikliranja torej velja

$$\bar{n}_n = \sum_{i=1}^n d_{Rc}^i \quad 4)$$

Primeri:

$d_{Rc} = 1/4 \rightarrow$ razmerje med recikliranim in deviškimi materialom znaša $d_{Rc} : (1 - d_{Rc}) = 1/4 : 3/4 = 1:3$

pri $n = 2 \dots\dots\dots n_{2,av} = (1/4)^2 + (1/4) = 1/16 + 1/4 = 5/16 = 0,313$

pri $n = 5 \dots\dots\dots n_{5,av} = (1/4)^5 + (1/4)^4 + (1/4)^3 + (1/4)^2 + (1/4) = 85/256 = 0,332$

pri $n = \infty \dots\dots\dots n_{\infty,av} = 1/3 = 0,33333\dots$

$d_{Rc} = 1/2 \rightarrow$ razmerje med recikliranim in deviškimi materialom znaša $d_{Rc} : (1 - d_{Rc}) = 1/2 : 1/2 = 1:1$

pri $n = 2 \dots\dots\dots n_{2,av} = (1/2)^2 + 1/2 = 1/4 + 1/2 = 3/4 = 0,75$

pri $n = 5 \dots\dots\dots n_{5,av} = (1/2)^5 + (1/2)^4 + (1/2)^3 + (1/2)^2 + (1/2) = 31/32 = 0,969$

pri $n = \infty \dots\dots\dots n_{\infty,av} = 1$

$d_{Rc} = 3/4 \rightarrow$ razmerje med recikliranim in deviškimi materialom znaša $d_{Rc} : (1 - d_{Rc}) = 3/4 : 1/4 = 3:1$

pri $n = 2 \dots\dots\dots n_{2,av} = (3/4)^2 + 3/4 = 21/16 = 1,313$

pri $n = 5 \dots\dots\dots n_{5,av} = (3/4)^5 + (3/4)^4 + (3/4)^3 + (3/4)^2 + 3/4 = 2,288$

pri $n = \infty \dots\dots\dots n_{\infty,av} = 3$

$d_{Rc} = 9/10 \rightarrow$ razmerje med recikliranim in deviškimi materialom znaša $d_{Rc} : (1 - d_{Rc}) = 9 : 1$

pri $n = 2 \dots\dots\dots n_{2,av} = (9/10)^2 + 9/10 = 81/100 + 9/10 = 1,71$

pri $n = 5 \dots\dots\dots n_{5,av} = (9/10)^5 + (9/10)^4 + (9/10)^3 + (9/10)^2 + 9/10 = 3,686$

pri $n = \infty \dots\dots\dots n_{\infty,av} = 9$

$d_{Rc} = 1 \rightarrow$ nič deviškega materiala se uporablja, torej $d_{Rc} : (1 - d_{Rc}) = 1 : 0$

pri $n = 2 \dots\dots\dots n_{2,av} = (1)^2 + 1 = 1 + 1 = 2$

pri $n = 5 \dots\dots\dots n_{5,av} = (1)^5 + (1)^4 + (1)^3 + (1)^2 + 1 = 5$

pri $n = \infty \dots\dots\dots n_{\infty,av} = \infty$

Razvidno je, da ima pri velikem številu izvedenih reciklov "n" povprečno število izvedenih reciklov "n_{av}" tendenco približevanja vrednosti uporabljenega razmerja med recikliranim in deviškimi materialom, katerega se uporablja v proizvodnji.

5) Zaključek

Okoljevarstveniki, ki favorizirajo recikliranje PKOP, so prepričani, da vsaka tona odpadne plastike, ki se jo divergira v reciklažo, pomeni eno tono odpadne plastike manj, ki bi jo sicer morali odstraniti s sežigom. Poskusili smo ugotoviti, ali ta teza drži. V ta namen smo skonstruirali ustrezen komparacijski model primerjajoč materialne tokove značilne za linearno, mlado- in zrelo krožno gospodarstvo ter izvedli izračune na podlagi realnih vhodnih podatkov iz strokovne literature. Ugotovili smo, da teza drži le za zelo mlado krožno gospodarstvo, ne pa tudi na dolgi rok. Zaradi nekaterih neznank dopuščamo možnost, da je krožno gospodarstvo tudi na dolgi rok sposobno zmanjšati količino PKOP za nekaj odstotkov, v najboljšem primeru morda tudi do deset odstotkov, zlasti pri nizkih stopnjah reciklaže. A tudi če bi res nekaj odstotkov PKOP manj končalo na sežigu, to še vedno ne spremeni dejstva, da bi to taisto energijo morali proizvesti iz primarnih goriv, kar smo z masno- energetske bilanco primerjave dveh sistemov dokaj prepričljivo demonstrirali v predhodnem članku. Lahko samo zaključimo, da integralni sistem upravljanja z odpadki, v katerem se forsira reciklažo odpadne plastike, lahko generira samo dodatne emisije v okolje, dodatna okoljevarstvena tveganja in dodatne stroške, ki jih sistem, ki favorizira energetske izrabo trdnega goriva iz odpadkov, ne pozna.

6) Reference

- [1] Madon I. Eligibility of Post- Consumer Plastic Waste Recycling. *J Waste Manag Disposal* 2024; 7: 102
- [2] Madon I. Analiza upravičenosti reciklaže odpadne komunalne plastike. Neobjavljen članek. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2025]: <https://www.ksda.si/dejavnosti/odpadki>
- [3] ECOS GmbH. Plastic Waste Recycling in Germany and Japan. Report prepared as part of the project within the framework of the German-Japanese Environment and Energy Dialogue Forum" (FKZ UM18 18 40 40), 2024. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2025]: <https://www.ecos.eu/en/publications/factsheets.html>
- [4] Dalberg Advisors. Stop the Flood of Plastic. A guide for policy makers in Italy. WWF Report, 2019. Dostopno na svetovnem spletu [citirano marec 2025]: https://wwfeu.awsassets.panda.org/downloads/06062019_wwf_italy_guidebook.pdf
- [5] 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>
- [6] 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
- [7] 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
- [8] 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>.
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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

- [12] Ragaert K., Delva L., Van Geemb K. Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management* 69 (2017) 24–58
- [13] Schyns Z.O.G., Shaver M.P. Mechanical Recycling of Packaging Plastics: A Review. *Macromol. Rapid Commun.* 2021, 42, 2000415
- [14] Ignatyev I.A., Thielemans W., Beke B.V. Recycling of Polymers: A Review. *ChemSusChem* 2014, 7, 1579–1593
- [15] Faraca G., Astrup T. Plastic waste from recycling centres: Characterisation and evaluation of plastic recyclability. *Waste Management* 95 (2019) 388–398
- [16] 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
- [17] Chanda M. Chemical aspects of polymer recycling. *Journal of cleaner production*, 293 (2021) 126163
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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>
- [21] 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
- [22] 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
- [23] Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. Production, use and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3, e1700782 (2017)
- [24] 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
- [25] 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