



Univerza v Mariboru

Fakulteta za energetiko

Borzen

PRIHODNOST IN IZZIVI FOTONAPETOSTNIH MODULOV V SLOVENIJI

ŠTUDIJA ZA NAROČNIKA

JUNIJ 2025

Različico dokumenta v elektronski obliki prejmejo:

Datum izdaje:	Različica:	Prejmejo:
27. 06. 2025	Končna verzija	Borzen, operater trga z elektriko, d. o. o. Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko

NAROČNIK:



Borzen, operater trga z elektriko, d. o. o.

Dunajska cesta 156, 1000 Ljubljana

☎ +386 1 620 7600

✉ info@borzen.si

<http://www.borzen.si/>

Odgovoren predstavnik strank na strani naročnika:

Iztok Gornjak, iztok.gornjak@borzen.si

IZVAJALEC:



Univerza v Mariboru, Fakulteta za energetiko

Hočevarjev trg 1, 8270 Krško

☎ +386 7 620 22 10

✉ fe@um.si

<http://www.fe.um.si>

Sodelujoči pri pripravi dokumenta na strani izvajalca:

prof. dr. Sebastijan Seme sebastijan.seme@um.si;
doc. dr. Klemen Sredensek klemen.sredensek@um.si;
Manja Obreza manja.obreza@um.si
Eva Simonič eva.simonic@um.si;
Klemen Srpcič klemen.srpcic1@um.si;
Bojan Stergar bojan.stergar@um.si;
Domen Kuhar domen.kuhar@um.si;
Jernej Počivalnik jerne.j.pocivalnik@um.si;

KAZALO VSEBINE:

1	UVOD	9
1.1	POMEN RECIKLIRANJA FOTONAPETOSTNIH MODULOV	11
1.2	METODOLOGIJA IN PRISTOP K RAZISKAVI	11
1.3	PREDSTAVITEV IZVAJALCA – UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA ENERGETIKO	11
2	PRAVNI OKVIR IN REGULATIVA	12
2.1	EVROPSKA ZAKONODAJA ZA RECIKLAŽO ELEKTRIČNE IN ELEKTRONSKE OPREME	12
2.2	SLOVENSKA ZAKONODAJA ZA RECIKLAŽO ELEKTRIČNE IN ELEKTRONSKE OPREME	13
3	ANALIZA TRENUTNEGA STANJA FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV V SLOVENIJI	14
3.1	TRENUTNA INŠTALIRANA MOČ FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV	14
3.2	STRUKTURA IN LASTNOSTI OBSTOJEČIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV	17
3.2.1	VRSTE KOMERCIALNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV	18
3.2.2	SESTAVA KOMERCIALNEGA MONOKRISTALNEGA FOTONAPETOSTNEGA MODULA	19
3.3	ŽIVLJENJSKA DOBA FOTONAPETOSTNIH MODULOV IN PRIČAKOVANA KOLIČINA ODPADNIH ENOT	20
4	NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV V SLOVENIJI	24
4.1	SCENARIJI RAZVOJA FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV V PRIHODNOSTI	24
4.2	OCENA KOLIČIN ODPADNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV DO LETA 2050	25
4.2.1	NAPOVED OPADKOV PO SCENARIJU ZA OBSTOJEČE UKREPE	28
4.2.2	NAPOVED ODPADKOV PO SCENARIJU ZA DODATNE UKREPE Z VKLJUČITVIO JEDRSKE ENERGIJE	28
4.2.3	NAPOVED ODPADKOV PO SCENARIJU ZA DODATNE UKREPE ZA OBNOVLJIVE VIRE ENERGIJE	29
4.3	POTENCIALNI VPLIV NOVIH TEHNOLOGIJ NA ŽIVLJENJSKO DOBO IN RECIKLAŽO	30
5	TEHNOLOŠKI POSTOPKI RECIKLIRANJA FOTONAPETOSTNIH MODULOV	31
5.1	PREGLED RAZISKOVALNIH RECIKLAŽNIH TEHNOLOGIJ	31
5.1.1	TERMIČNI POSTOPKI	31
5.1.2	MEHANSKI POSTOPKI	33
5.1.3	KEMIČNI POSTOPKI	34
5.2	PREGLED KOMERCIALNIH RECIKLAŽNIH TEHNOLOGIJ	35
5.2.1	TRADICIONALNI POSTOPEK RECIKLAŽE FOTONAPETOSTNIH MODULOV	35
5.2.2	NAPREDNI POSTOPEK RECIKLAŽE FOTONAPETOSTNIH MODULOV	35
5.2.3	KOMERCIALNA RECIKLAŽNA PODJETJA	36
5.3	PREGLED NAPRAV ZA RECIKLAŽO FOTONAPETOSTNIH MODULOV	37
5.3.1	NAPRAVA ZA ODSTRANJEVANJE PRIKLJUČNIH ŠKATLIC	38
5.3.2	NAPRAVA ZA ODSTRANJEVANJE ALUMINIJASTEGA OKVIRJA	39
5.3.3	NAPRAVA ZA LOČITVE STEKLA OD FOTONAPETOSTNIH CELIC	39
5.3.4	NAPRAVA ZA DROBLJENJE FOTONAPETOSTNIH CELIC	40
5.3.5	ZRAČNI LOČILNIK	40
5.3.6	ELEKTROSTATIČNI LOČILNIK	40
5.4	PRIMERJAVA UČINKOVITOSTI RAZLIČNIH METOD	40
5.5	RAZVOJ NOVIH TEHNOLOGIJ ZA POVEČANJE UČINKOVITOSTI RECIKLAŽE	42
6	EKONOMSKA ANALIZA RECIKLAŽE	44
6.1	PREGLED STROŠKOVNA ANALIZA RAZLIČNIH RECIKLAŽNIH METOD	44
6.2	MOŽNOSTI ZA FINANČNO VZDRŽNOST RECIKLAŽNE INDUSTRIJE V SLOVENIJI	45
6.3	SPODBUDE, FINANČNI INSTRUMENTI IN POSLOVNI MODELI ZA RECIKLAŽO	47
7	OKOLIJSKI VPLIVI IN TRAJNOSTNI VIDIKI	49
7.1	OCENA OKOLIJSKEGA ODTISA RECIKLAŽE FOTONAPETOSTNIH MODULOV	49

7.2	POMEN RECIKLAŽE ZA KROŽNO GOSPODARSTVO IN TRAJNOSTNO RABO VIROV	49
7.3	UKREPI ZA ZMANJŠANJE OKOLIJSKEGA VPLIVA RECIKLAŽNIH POSTOPKOV	50
8	ZAKLJUČEK	51
9	VIRI IN LITERATURA	52

KAZALO SLIK:

Slika 3.1: Inštalirana moč PV sistemov na m ² v statističnih regijah Republike Slovenije [5].....	14
Slika 3.2: Prikaz inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji [2, 5].....	15
Slika 3.3: Inštalirana moč fotonapetostnih sistemov z deklaracijo [2, 5].	15
Slika 3.4: Inštalirana moč samooskrbnih fotonapetostnih sistemov [2, 5].	17
Slika 3.5: Tržni delež prvih in drugih generacij fotonapetostnih modulov [6].	18
Slika 3.6: Zgradba komercialnega monokristalnega PV modula [4].	19
Slika 3.7: Tristopenjski pristop k oceni odpadkov PV modulov [14].	20
Slika 3.8: Projekcija globalne inštalirane moči do leta 2050 [14].	21
Slika 3.9: Vrste okvar PV modulov [14].	22
Slika 3.10: Napoved količine odpadnih PV modulov do leta 2050 [14].	22
Slika 4.1: Napoved kumulativne inštalirane moči fotonapetostnih sistemov do leta 2030 [5].	24
Slika 4.2: Razvoj PV sistemov do leta 2040 po projekcijah NEPN [18].	24
Slika 4.4: Projekcija števila inštaliranih PV modulov.	25
Slika 4.5: Materialna sestava PV modula.	26
Slika 4.6: Kumulativna napoved količine pridobljenih materialov iz reciklaže PV modulov glede na kumulativno rast trenutne inštalirane moči.	27
Slika 4.7: Letna napoved količine pridobljenih materialov iz reciklaže PV modulov glede na trenutno stanje.	27
Slika 4.8: Letna napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij OU [18].	28
Slika 4.9: Napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-JE [18].	29
Slika 4.10: Napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-OVE [18].	29
Slika 5.1: Poenostavljen diagram raziskovalnih postopkov recikliranja PV modulov [2].	31
Slika 5.2: Shema tradicionalnega postopka reciklaže PV modula.	35
Slika 5.3: Shema naprednega postopka reciklaže PV modulov.	36
Slika 5.4: Evropska podjetja, ki se posredno ali neposredno ukvarjajo z reciklažo PV modulov [2].	37
Slika 5.5: Reciklažna linija PV modulov podjetja Suny Group [45].	37
Slika 5.6: Shematski prikaz odstranjevanja priključne škatlice.	38
Slika 5.7: Naprava za odstranjevanje priključnih škatlic podjetja Suny Group [46].	38
Slika 5.8: Shematski prikaz odstranjevanja aluminijastega okvirja.	39
Slika 5.9: Naprava za odstranjevanje aluminijastega okvirja podjetja Suny Group [46]	39
Slika 5.10: Shematski prikaz ločitve stekla od PV celic.	39
Slika 5.11: PV celice pred postopkom drobljenja [4].	40
Slika 5.12: Shematski prikaz različnih možnih pristopov reciklaže PV modulov.	41
Slika 6.1: Vračilna doba investicije v odvisnosti od deleža stroškov in deleža prihodkov [2].	47

KAZALO TABEL:

Tabela 3.1: Klasifikacija PV sistemov glede na moč in odkupno ceno v letu 2009 [2].	16
Tabela 3.2: Masni delež sestavnih materialov v monokristalnem PV modulu [2, 13].	20
Tabela 4.1: Sestava monokristalnega PV modula in povprečni faktor reciklaže [2].	26
Tabela 6.1: Vhodni podatki za analizo stroškov reciklaže PV modulov [70].	44
Tabela 6.2: Cena recikliranega materiala [2].	45
Tabela 6.3: Letno vzdrževanje posameznih komponent [2].	46
Tabela 6.4: Fiksni obratovalni stroški [2].	46
Tabela 7.1: Ogljični odtis posameznih materialov [73].	49

UPORABLJENE KRATICE:

CIGS	-	bakrov indij-galijev diselenid (angl.: copper indium-gallium selenide)
DFR	-	oblikovanje za recikliranje (angl.: design for recycling)
DOE	-	Oddelek za energijo (angl.: Department of Energy)
DU-JE	-	dodatni ukrepi z vključitvijo jedrske energije
DU-OVE	-	dodatni ukrepi za obnovljive vire energije
EOL	-	konec življenjske dobe (angl.: end-of-life)
EPR	-	razširjena odgovornost proizvajalca (angl.: extended producer responsibility)
EPRI	-	Raziskovalni inštitut za električno energijo (angl.: the electric power research institute)
EU	-	Evropska unija
EVA	-	etilen vinil acetat
FRELP	-	popolna obnovitev fotonapetostnih modulov ob koncu njihove življenjske dobe (angl.: full recovery end of life photovoltaic)
IEA	-	mednarodna agencija za energijo (angl.: international energy agency)
IRENA	-	mednarodna agencija za obnovljive vire energije (angl.: <i>international renewable energy agency</i>)
KETI	-	Korejski inštitut za tehnologijo elektronike (angl.: Korean electronics technology institute)
KIER	-	Korejski inštitut za energetske raziskave (angl.: Korea institute of energy research)
NEPN	-	nacionalni energetske in podnebni načrt
NREL	-	Nacionalni laboratorij za obnovljive vire (angl.: National renewable energy laboratory)
OEE0	-	odpadna električna in elektronska oprema
OU	-	obstoječi ukrepi
OVE	-	obnovljivi viri energije
PET	-	polietilen tereftalat
PV	-	fotonapetostni
PVF	-	polivinil fluorid
SEIA	-	združenje industrije sončne energije (angl.: solar energy industries association)
TCO	-	prozoren prevodni oksid (angl.: transparent conductive oxide)
TGP	-	toplogredni plini
UL RS	-	Uradni list Republike Slovenije
WEEE	-	odpadna električna in elektronska oprema (angl.: waste from electrical and electronic equipment)

1 UVOD

V okviru študije »Prihodnost in izzivi fotonapetostnih modulov v Sloveniji« so obravnavane zakonodajne smernice za reciklažo PV modulov, pregled tehnologij, stroškovna analiza reciklažnega postopka in napoved količine pridobljenih materialov v Sloveniji do leta 2050.

Fotonapetostni sistemi so v zadnjem desetletju doživeli izjemen razcvet pri razvoju kot tudi številu postavitve po vsem svetu, kar je posledica globalne ozaveščenosti o nujnosti zmanjšanja emisij toplogrednih plinov kot tudi znižanje cen modulov zaradi znižanja stroškov izdelave fotonapetostnih modulov. Glede na pričakovanja, da bo sončna energija postala eden glavnih obnovljivih virov energije (OVE), se je počasi začelo pojavljati vprašanje: »Kako ravnati z odsluženi komponentami PV sistemov (kot so na primer PV moduli) po koncu njihove življenjske dobe (EOL – angl.: *End-of-life*)?«. To predstavlja tako izziv kot tudi priložnost za izboljšanje metod reciklaže odpadnih elektronskih komponent. Po napovedih Mednarodne agencije za energijo (IEA – angl.: *international energy agency*) bo predvidena inštalirana moč PV sistemov do leta 2050 okoli 4500 GW, večina inštalirane moči fotonapetostnih sistemov pa so predvidene na Kitajskem (1731 GW), v Indiji (600 GW), v ZDA (600 GW), na Japonskem (350 GW) in v Nemčiji (110 GW). Z naraščanjem globalnega trga fotonapetostnih modulov se bo vsekakor povečala tudi količina izrabljenih fotonapetostnih modulov. Glede na povprečno življenjsko dobo modulov 25 – 30 let se pričakujejo velike količine letnih odpadkov že v zgodnjih 30-ih letih tega stoletja. Do leta 2050 je ocenjena količina odpadnih PV modulov okoli 5,5 – 6 milijonov ton in bo skoraj enaka ocenjeni masi novih inštaliranih PV modulov, ki bo znašala približno 6,7 milijonov ton.

Cilj študije je raziskati in predstaviti trenutne procese reciklaže fotonapetostnih modulov. S pregledom zakonodaje v Evropski uniji in Sloveniji bo zagotovljen vpogled v ozaveščenost o problemu primarnega odlaganja oziroma recikliranja fotonapetostnih modulov. Cilj študije je tudi celovita tehnična in stroškovna analiza reciklaže fotonapetostnih modulov. Rezultati bodo vsebovali natančne napovedi količin pridobljenih materialov v Sloveniji glede na trenutno inštalirano moč fotonapetostnih sistemov. Študija bo prispevala k razumevanju trajnostne vrednosti reciklaže fotonapetostnih modulov in njenemu vplivu na krožno gospodarstvo, ki bo v prihodnjih letih izredno pomembno.

Študija v drugem poglavju obravnava pravni okvir ravnanja z odpadnimi fotonapetostnimi moduli na ravni Evropske unije in Slovenije. Poudarek je na Direktivi 2012/19/EU, ki določa obveznosti proizvajalcev in uvoznikov glede zbiranja, obdelave, reciklaže in odstranjevanja odpadnih fotonapetostnih modulov. Slovenija sledi tej zakonodaji, pri čemer obveznosti prevzemajo uvozniki.

V tretjem poglavju študija obravnava trende inštalirane moči fotonapetostnih sistemov v Sloveniji. Predstavljeni so ključni mejniki, ki so spodbudili eksponentno rast inštalirane moči fotonapetostnih sistemov. Poglavje vključuje tudi analizo strukture in sestave komercialnih fotonapetostnih modulov, kjer so opisane razlike med monokristalnimi, polikristalnimi in tankoplastnimi tehnologijami. V nadaljevanju je predstavljena življenjska doba fotonapetostnih modulov ter projekcije količin odpadnih enot do leta 2050 s poudarkom na scenariju rednih in zgodnjih izgub.

V četrtem poglavju je predstavljena napoved rasti in količin odpadnih fotonapetostnih modulov v Sloveniji. Prikazani so trije razvojni scenariji iz osnutka posodobljenega Nacionalnega energetskega in podnebne načrta, ki se razlikujejo po količini inštalacij fotonapetostnih sistemov. Poglavje vključuje izračune prihodnjih količin odpadnih modulov in možnih izplenov materialov ob predpostavki 25-letne življenjske dobe.

V petem poglavju so predstavljeni tehnološki postopki recikliranja fotonapetostnih modulov. Predstavljene so raziskovalne in komercialne rešitve, primeri podjetij in opreme ter primerjava učinkovitosti različnih metod. Poglavje izpostavlja tudi vlogo zasnove fotonapetostnih modulov za izboljšano reciklažo ter napredne trende.

V šestem poglavju je predstavljena ekonomska analiza reciklaže fotonapetostnih modulov z izpostavljenimi ključnimi izzivi za doseg finančne vzdržnosti tovrstnih postopkov. V nadaljevanju je podrobno predstavljena analiza mehanskega reciklažnega sistema skupaj s stroški vzdrževanja, obratovanja in vračilno dobo investicije.

V sedmem poglavju je obravnavana ocena okoljskega odtisa in pomen reciklaže fotonapetostnih modulov v kontekstu trajnostne rabe virov. Ugotovljeno je, da največji delež emisij toplogrednih plinov nastane v fazi

pridobivanja fotonapetostnih modulov, predvsem zaradi energetske intenzivnih procesov pridobivanja in predelave silicija.

Zadnje, osmo poglavje, vsebuje zaključek študije s povzetkom ključnih ugotovitev, predstavljenih v prejšnjih poglavjih.

Študija »Prihodnost in izzivi fotonapetostnih modulov v Sloveniji« tako zajema vse predvidene vsebinske specifikacije naročnika, to so:

I. Uvod

- A. Opredelitev problema in pomen recikliranja fotonapetostnih modulov
- B. Cilji in namen študije
- C. Pregled dosedanjih raziskav in praks na področju recikliranja OEEO

II. Pravni okvir in zakonodaja

- A. Pregled evropske zakonodaje
- B. Nacionalna zakonodaja in regulative

III. Analiza trenutnega in prihodnjega stanja fotonapetostnih sistemov v Sloveniji

- A. Pregled trenutne inštalirane moči fotonapetostnih sistemov
- B. Napovedi rasti fotonapetostnih sistemov v prihodnosti
- C. Pričakovane količine odpadnih fotonapetostnih modulov do leta 2050

IV. Postopki recikliranja in tehnološke možnosti

- A. Pregled obstoječih reciklažnih tehnologij (mehanski, termični, kemični postopki)
- B. Možnosti za izboljšanje učinkovitosti recikliranja
- C. Primeri dobrih praks iz tujine

V. Ekonomska analiza recikliranja fotonapetostnih modulov

- A. Stroškovna analiza reciklažnih postopkov
- B. Možnosti za ekonomsko vzdržnost reciklažne industrije v Sloveniji
- C. Finančne spodbude in podporni mehanizmi

VI. Okolijski vplivi in trajnostni vidiki recikliranja

- A. Vpliv reciklaže na zmanjšanje okolijskega odtisa fotonapetostnih modulov
- B. Vloga reciklaže pri trajnostnem razvoju obnovljivih virov energije

1.1 POMEN RECIKLIRANJA FOTONAPETOSTNIH MODULOV

Recikliranje fotonapetostnih modulov ima ključen pomen za trajnostno upravljanje z viri in zmanjševanje okoljskega vpliva rastoče fotonapetostne industrije. Z obdelavo odsluženih modulov je mogoče ponovno pridobiti dragocene materiale kot so aluminij, silicij, srebro, baker itd., kar zmanjšuje potrebo po primarnih surovinah ter energijsko zahtevnih postopkih njihove pridobitve. Hkrati recikliranje preprečuje kopičenje elektronskih odpadkov in zmanjšuje tveganje za onesnaževanje okolja. Učinkoviti reciklažni sistemi so zato ključni za podporo krožnemu gospodarstvu, energetske učinkovitosti in dolgoročni vzdržnosti fotonapetostnih tehnologij.

1.2 METODOLOGIJA IN PRISTOP K RAZISKAVI

Za študijo bo ključnega pomena uporaba znanstvenih člankov. Tekom študije se bo potrebno seznaniti s pravno podlago na področju recikliranja PV modulov. S pomočjo podatkov inštalirane moči v Sloveniji bo sledila temeljita analiza, kar bo predstavljalo izhodišče za projekcijo pridobljenih materialov. Izvedli bomo tudi oceno ekonomske analize, s katero bomo določili vračilno dobo trenutno komercializiranega procesa reciklaže glede na povprečno ceno materiala na trgu. Za obdelavo podatkov in temeljito analizo pa nam bo v pomoč programsko orodje Matlab.

1.3 PREDSTAVITEV IZVAJALCA – UNIVERZA V MARIBORU, FAKULTETA ZA ENERGETIKO

Fakulteta za energetiko je članica Univerze v Mariboru. Ustanovljena je bila s sklepom državnega zbora, dne 22. junija 2007, in je edina nova tehnična fakulteta v Sloveniji v zadnjih nekaj desetletjih.

Fakulteta ima sedež v Krškem in stalno dislocirano enoto v Velenju. Lokacije izvajanja niso bile izbrane naključno; gre za največja energetska bazena v Sloveniji. Študenti imajo tako omogočen neposredni stik z velikimi energetske sistemi, kar je še dodatna prednost pri izvajanju pedagoškega in raziskovalnega dela.

Fakulteta za energetiko Univerze v Mariboru izvaja naslednje študijske programe:

- visokošolski strokovni študijski program Energetika (I. bolonjska stopnja),
- univerzitetni študijski program Energetika (I. bolonjska stopnja),
- magistrski študijski program Energetika (II. bolonjska stopnja),
- doktorski študijski program Energetika (III. bolonjska stopnja).

Vsi študijski programi Fakultete za energetiko Univerze v Mariboru so usklajeni z Bolonjskim načinom študija, ki omogoča visoko stopnjo izbirnosti. Študenti se tako lahko v sklopu študijskega programa odločajo za izbiro dela študijskih obveznosti iz področij:

- Hidroenergetike,
- Termoenergetike,
- Jedrske energetike,
- Alternativne energetike in
- Splošne energetike,

prav tako pa lahko študijske obveznosti opravljajo na drugih visokošolskih zavodih v Sloveniji in tujini. Univerza v Mariboru ima namreč sklenjene medsebojne sporazume z univerzami po vsem svetu.

2 PRAVNI OKVIR IN REGULATIVA

Pravni okvirji na področju ravnanja z odpadki zagotavljajo jasne smernice kot tudi zahteve za upravljanje proizvodov skozi celoten življenjski cikel – od proizvodnje in uporabe do končne obdelave in reciklaže. Regulativa določa obveznosti proizvajalcev, uvoznikov in drugih deležnikov ter vzpostavlja sisteme nadzora in odgovornosti za pravilno ravnanje z odpadnimi materiali. Cilj zakonodajnih okvirov je predvsem zmanjšanje okoljske obremenitve, spodbuda ponovne uporabe surovin ter prispevek k trajnostnemu razvoju in krožnemu gospodarstvu.

2.1 EVROPSKA ZAKONODAJA ZA RECIKLAŽO ELEKTRIČNE IN ELEKTRONSKE OPREME

Evropska unija (EU) igra ključno vlogo pri vzpostavljanju pravnega okvira za reciklažo odpadne električne in elektronske opreme (OEEO), kamor sodijo tudi odpadni fotonapetostni (PV - angl.: *photovoltaic*) moduli. Osnovni pravni okvir določa Direktiva o odpadni električni in elektronski opremi (WEEE – angl.: *waste from electrical and electronic equipment*), ki je prvotno stopila v veljavo februarja 2003. Kljub temu se je izkazalo, da prvotna direktiva ni zadostovala za učinkovito obvladovanje hitro rastočega toka OEEO.

Prva direktiva v EU, ki je vzpostavila pravni okvir za reciklažo PV modulov je bila Direktiva 2012/19/EU. Ta je bila večkrat posodobljena, nazadnje z Direktivo EU 2024/884. Direktiva določa ključne zahteve za zbiranje, obdelavo, reciklažo in odstranitev PV modulov ter uvaja načelo razširjene odgovornosti proizvajalcev (EPR – angl.: *extended producer responsibility*). To pomeni, da so proizvajalci in uvozniki odgovorni za financiranje in organizacijo ravnanja z odpadki svojih izdelkov po EOL. Ključni cilj direktive je zmanjšanje negativnih vplivov na okolje skozi celoten življenjski cikel PV modulov, s čimer pa prispeva ciljem krožnega gospodarstva in trajnostnega razvoja [1].

Države članice so dolžne zagotoviti izpolnjevanje več minimalnih ciljev reciklaže in ponovne uporabe PV modulov, ki jih določa direktiva.

1. Zahteve za obdelavo

Direktiva državam članicam nalaga obveznost zagotavljanja ustrezne obdelave vse ločeno zbrane OEEO, vključno s PV moduli. Obdelava mora zajemati odstranitev vseh tekočin ter selektivno obdelavo določenih materialov in sestavnih delov, pri čemer je poseben poudarek na nevarnih snoveh kot so živo srebro, kadmij in svinec, ki so lahko prisotni v PV modulih.

2. Reciklaža in ponovna uporaba

Proizvajalci so odgovorni za doseganje minimalnih ciljev reciklaže in ponovne uporabe PV modulov. Cilj je doseči visoko stopnjo reciklaže in učinkovito predelavo materialov, ki so sestavni del PV modula.

3. Informacije za reciklažne obrate za obdelavo in reciklažo

Proizvajalci morajo zagotoviti ustrezno dokumentacijo za reciklažne obrate, ki vključuje podrobnejše podatke o sestavi PV modulov. Prav tako morajo posredovati informacije o lokaciji nevarnih snovi ali zmesi v PV modulih, da se lahko omogoči varna in učinkovita obdelava.

4. Ločeno zbiranje PV modulov

Države članice morajo sprejeti ukrepe za organizacijo ločenega zbiranja PV modulov in preprečevanje njihovega odstranjevanja kot nesortiranih komunalnih odpadkov. To vključuje vzpostavitev dostopnih zbirnih sistemov, kjer lahko končni uporabniki brezplačno oddajo odpadne PV module. Zbiralnice morajo biti ustrezno razporejene glede na gostoto prebivalstva.

5. Financiranje

Proizvajalci nosijo finančno odgovornost za celoten postopek ravnanja z odpadnimi PV moduli, vključno s stroški zbiranja, obdelave, reciklaže in odstranjevanja. Ob vstopu PV modulov na trg morajo proizvajalci zagotoviti finančno jamstvo, ki omogoča pokrivanje stroškov ravnanja z odpadnimi PV moduli. To lahko vključuje sodelovanje v posebnih programih za financiranje.

6. Pošiljanje in izvoz odpadnih PV modulov

Obdelava OEEO, vključno s PV moduli, je mogoča zunaj držav članic ali EU, vendar le pod določenimi pogoji. Pošiljke morajo biti v skladu z Uredbo Evropskega sveta št. 1013/2006 in Uredbo Evropske komisije št. 1418/2007. OEEO obdelana zunaj EU, se šteje kot prispevek k izpolnjevanju obveznosti le, če izvoznik dokaže, da je bila obdelava izvedena skladno z enakovrednimi standardi določenimi z direktivo.

7. Spodbuda reciklaže in razvoja novih tehnologij

Države članice morajo podpirati razvoj naprednih tehnologij za reciklažo in obdelavo PV modulov. Proizvajalci so dolžni sodelovati s podjetji, ki se ukvarjajo z reciklažo, pri razvoju učinkovitih postopkov za obdelavo in ponovno uporabo materialov.

8. Kazni in nadzor nad kršitvami

Države članice so odgovorne za določitev kazni za kršitve nacionalnih predpisov, sprejetih na podlagi te direktive. Prav tako morajo izvajati nadzor in spremljanje izvajanja direktive ter zagotoviti, da so kazni učinkovite, sorazmerne in odvračilne. Povzeto po [2].

2.2 SLOVENSKA ZAKONODAJA ZA RECIKLAŽO ELEKTRIČNE IN ELEKTRONSKE OPREME

Slovenija je kot članica EU zavezana k izvajanju Direktive EU o OEEO, ki določa pravni okvir za zbiranje, obdelavo, reciklažo in odstranjevanje OEEO, ki je povzeta v Uradnem listu Republike Slovenije (UL RS) št. 55/15, 47/16, 72/18, 84/18, 108/20 in 44/22. Povzeto po [3].

Ker Slovenija nima lastnih proizvajalcev PV modulov, vendar ima podjetja, ki jih uvažajo, podaja direktiva WEEE odgovornost za uvoznike.

V skladu z Direktivo WEEE se izraz *proizvajalec* ne nanaša izključno na subjekte, ki izdelujejo PV module, temveč tudi na tiste, ki jih tržijo pod lastno blagovno znamko ali jih uvažajo in distribuirajo na trg EU. Posledično so uvozniki PV modulov v Sloveniji pravno opredeljeni kot proizvajalci ter so dolžni izpolnjevati vse obveznosti skladno z direktivo, ki pa so podrobneje opisane v poglavju 2.1

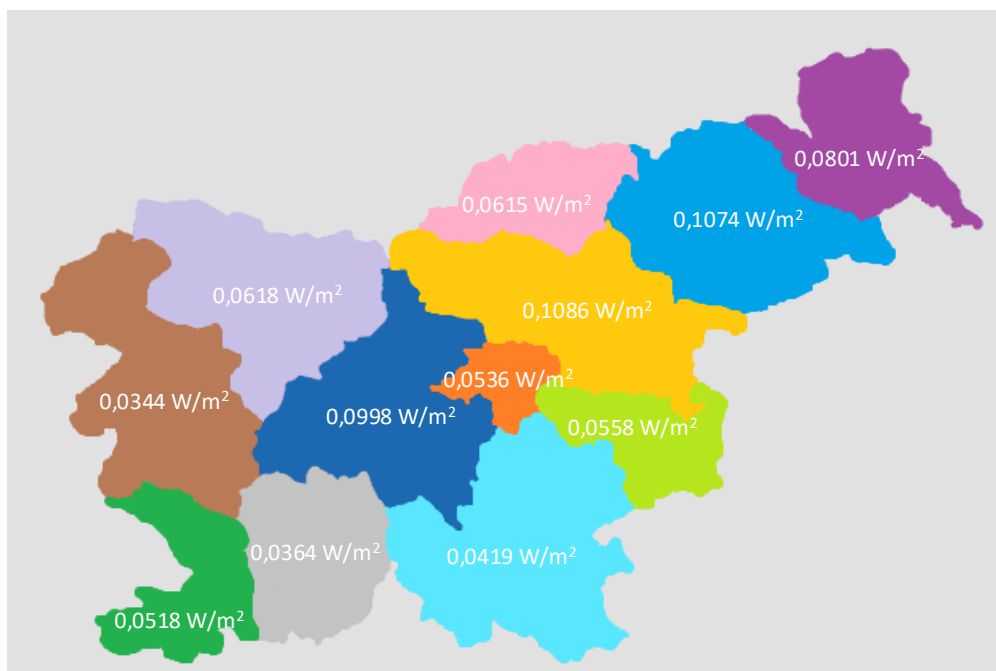
Znotraj Direktive o OEEO pa je opredeljena tudi obveznost proizvajalca, da ob dobavi novih PV modulov prevzame odpadne PV module v enaki količini, kot jih je dostavil. Stroške odstranitve odpadnih PV modulov določita stranka in proizvajalec s sporazumnim dogovorom. Pri uvozu novih PV modulov so podjetja v skladu z veljavnim sistemom in zakonodajo zavezana plačati prispevek za prevzem in reciklažo modulov. Plačnik stroškov zbiranja, recikliranja ter odstranjevanja so proizvajalci, ki so vpisani v skupni načrt za ravnanje z OEEO.

Obstaja pa tudi globalna neprofitna organizacija PV Cycle, ki zagotavlja kolektivno zbiranje in upravljanje z odpadnimi komponentami PV sistemov, vključno z odpadnimi PV moduli, razsmerniki in konstrukcijskimi elementi. Njihov osnovni cilj je podpora trajnostnega razvoja PV industrije s celovitim upravljanjem življenjskega cikla PV modulov. Zagotavljajo pa tudi skladnost podjetij in imetnikov PV sistemov z veljavno zakonodajo ter vzpostavljeno mrežo za zbiranje, transport in ponovno uporabo PV modulov. Po javno dostopnih podatkih se v Sloveniji s tovrstnim zbiranjem ukvarjajo podjetja kot npr. Plan-net Solar, Bisol d.o.o. in ZEOS d.o.o., za reciklažo in obdelavo PV modulov pa poskrbijo tuji partnerji, saj trenutno v Sloveniji reciklažnega centra ni. Povzeto po [4].

3 ANALIZA TRENUTNEGA STANJA FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV V SLOVENIJI

3.1 TRENUTNA INŠTALIRANA MOČ FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV

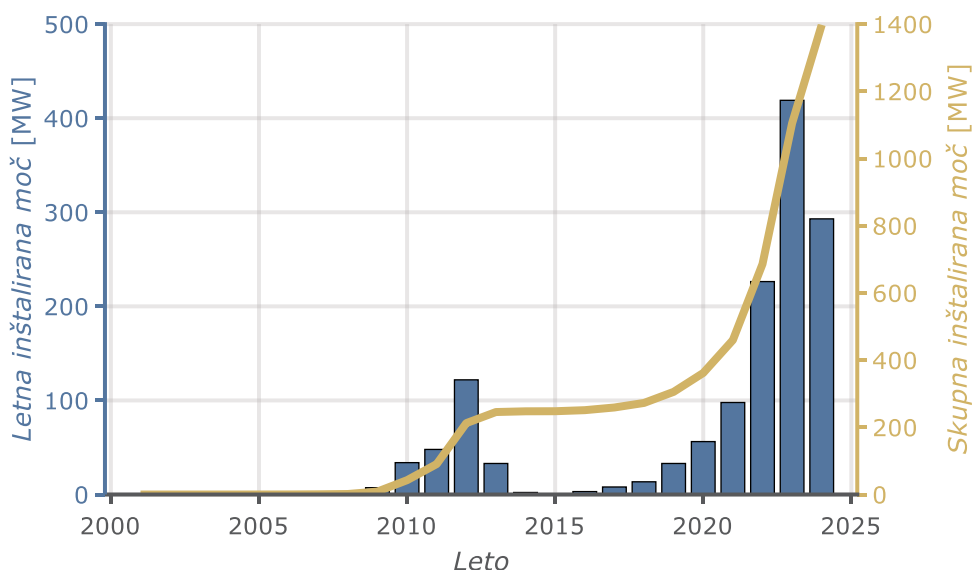
Po podatkih ELES-a in Borzena je inštalirana moč PV sistemov v Sloveniji v letu 2024 dosegla 1.397 MW. Slika 3.1 prikazuje inštalirano moč PV sistemov na kvadratni meter glede na statistične regije [5].



Slika 3.1: Inštalirana moč PV sistemov na m² v statističnih regijah Republike Slovenije [5].

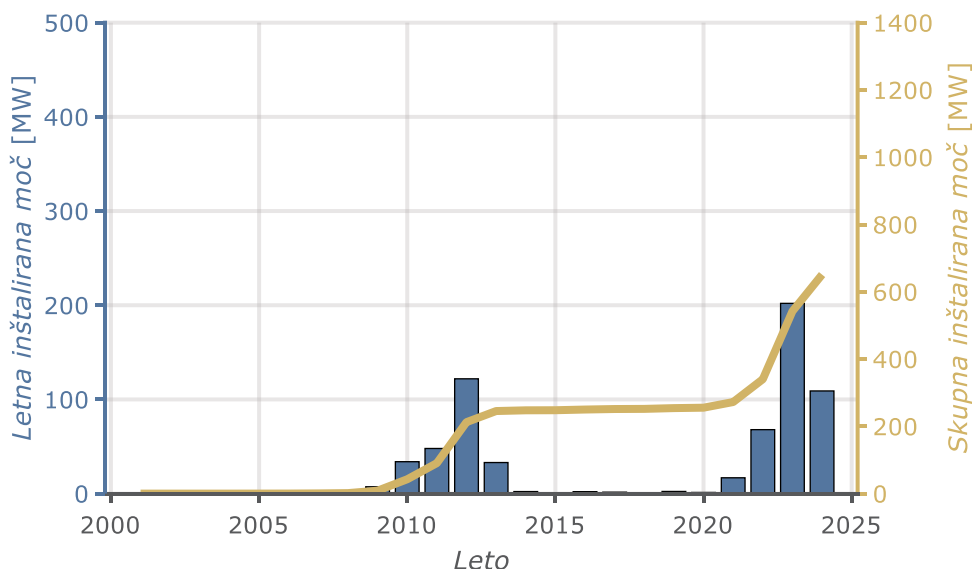
Iz slike 3.1 je razvidno, da je največji delež inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji glede na kvadraturu, v Savinjski regiji, kjer ta delež znaša 0,1086 W/m². Najmanjši delež inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji glede na kvadraturu regije pa je v Goriški regiji, kjer delež znaša 0,0344 W/m².

Slika 3.2 prikazuje eksponentno rast letne ter kumulativne inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji.



Slika 3.2: Prikaz inštalirane moči PV sistemov v Sloveniji [2, 5].

Iz slike 3.2 je razvidno, da inštalirana moč PV sistemov narašča eksponentno, kar je rezultat finančnih spodbud kot tudi strateških energetskega ciljev države. Sprva je bil razvoj precej počasen, od leta 2020 pa je razviden izrazit porast inštalirane moči. Posledično se je tudi kumulativna inštalirana moč začela hitro pospeševati, kar nakazuje na pospešen prehod k večji uporabi sončne energije v Sloveniji. Inštalirani PV sistemi se delijo na PV sisteme z deklaracijo, prikazani na sliki 3.3 in samooskrbne PV sisteme, prikazani na sliki 3.4.



Slika 3.3: Inštalirana moč fotonapetostnih sistemov z deklaracijo [2, 5].

Iz slike 3.3 je razvidno obdobje med letoma 2009 in 2013, kjer je razvidno povečanje inštaliranih PV sistemov z deklaracijo. Omenjeni sistemi omogočajo podjetjem ali fizičnim osebam oddajanja proizvedene električne energije v omrežje. V deklaraciji pa so opredeljeni podatki o proizvajalcu, proizvodni napravi, uporabljenem vhodnem energentu, merilnih mestih ter o veljavnosti pogodbe, ki je običajno veljala do 15 let.

Pomemben zagon rasti inštalirane moči v omenjenem obdobju je predstavljala odločitev Vlade Republike Slovenije iz leta 2009, ko je ob visoki odkupni ceni električne energije omogočila razmah sistemov z deklaracijo.

Subvencijski sistem je temeljil na razvrstitvi PV sistemov glede na njihovo moč in odkupno ceno, kar prikazuje tabela 3.1.

Tabela 3.1: Klasifikacija PV sistemov glede na moč in odkupno ceno v letu 2009 [2].

Delitev PV sistema	Moč PV sistema [MW]	Odkupna cena [€/MWh]
Mikro PV sistem	0,05	415,46
Mali PV sistem	1,00	380,02
Srednji PV sistem	5,00	315,36

Zagon naložb v PV sisteme je v veliki meri spodbudila državna podpora, ki je ustvarila ugodne pogoje za investitorje. Med ključnimi spodbudami sta bila višja odkupna cena električne energije ter podaljšanje zajamčene dobe z 10-ih na 15 let. Zaradi pričakovanega padca cen PV modulov, ocenjenega na približno 7 % letno, je država ustrezno prilagodila tudi nabavne pogoje. V istem obdobju je bila sprejeta prva Uredba o podporah električni energiji iz OVE, ki je med drugim uvedla klasifikacijo PV sistemov in določila pravila za odkup električne energije.

Leta 2011 je bila v UL RS št. 105/2011 objavljena sprememba Uredbe o podporah električni energiji iz OVE, s katero so predlagali 20-odstotno znižanje referenčnih stroškov proizvodnih naprav. Stroški so bili razdeljeni na nespremenljivi in spremenljivi del – prvi je temeljil na investicijskih in obratovalnih stroških ter je ostal fiksiran celotno obdobje prejetanja podpore, medtem ko je bil drugi vezan na ceno vhodnih energentov in referenčno tržno ceno električne energije, ki jo določa Agencija za energije.

Leto pozneje, novembra 2012, je Vlada RS izdala posodobljeno Uredbo o podporah električni energiji iz OVE, ki je bistveno znižala višino podpor za nove PV sisteme, priključene po decembru 2012. V primerjavi z referenčnimi stroški iz leta 2009 so bile podpore zmanjšane za kar 63,89 %. V istem letu je bil objavljen tudi dokument o določitvi višine podpor za električno energijo iz OVE in SPTE (soproizvodnja toplotne in električne energije), ki je za leto 2013 določil tržno referenčno ceno električne energije v višini 50,66 €/MWh.

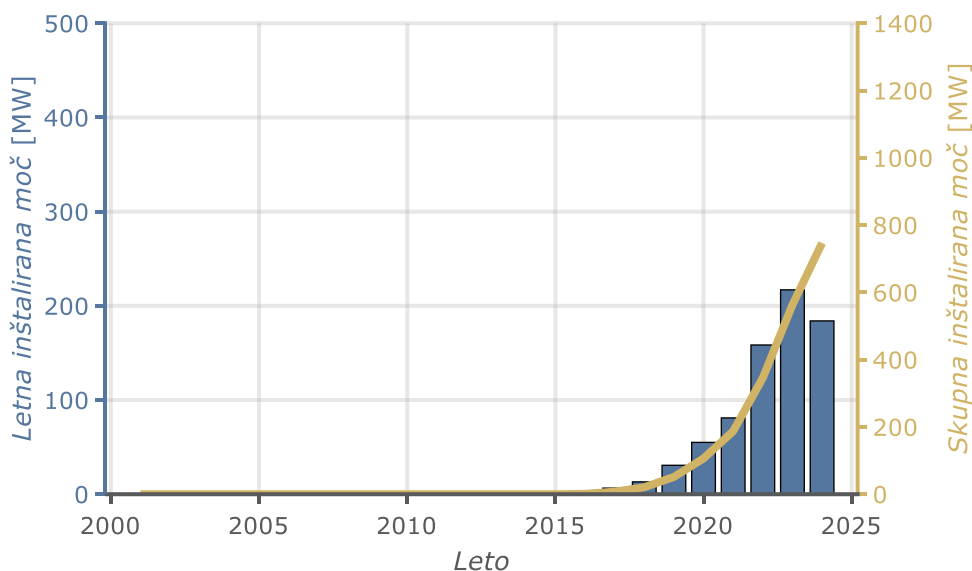
Čeprav je bilo v letu 2012 še vedno nameščenih 121,09 MW novih PV sistemov, se je že leto pozneje opazno zmanjšalo zanimanje za naložbe – predvsem kot posledica drastičnega znižanja odkupne cene električne energije iz sončnih virov.

Marca 2014 je bil sprejet nov Energetski zakon (UL RS, št. 17/2014), ki je uvedel razpisni sistem za spodbujanje projektov na področju OVE. Ta je predvideval vsakoletni razpis v oktobru za projekte, ki naj bi bili izvedeni v naslednjem koledarskem letu. Vendar zaradi pomanjkanja sredstev, razpisa v letu 2014 ni bilo. V istem letu so se pojavile tudi nepredvidene težave – upokojenci, ki so bili lastniki PV sistemov, so se soočili z zahtevo po vračilu pokojnine za čas delovanja njihove naprave. Zaradi tega je javnost izrazila potrebo po bolj pravičnem sistemu, kar je spodbudilo pobude za uvedbo neto obračuna električne energije (angl.: Net-metering), s ciljem okrepitev manjših zasebnih investicij v PV sisteme.

Glede na odziv na nove potrebe trga je vlada konec leta 2015 sprejela novo uredbo o samooskrbi s PV sistemi, ki je začela veljati 15. januarja 2016 (UL RS, št. 97/2015). Uredba je določala ključne elemente delovanja sistema samooskrbe, vključno s pogoji za priklop naprav na omrežje, načinom obračuna proizvedene in porabljene energije, letnimi omejitvami moči naprav, načinom poročanja o izvajanju ukrepov ter metodologijo izračuna proizvedene električne energije.

Nova uredba je uvedla poseben način obračuna električne energije, po katerem se uporabniku prizna razlika med prevzeto in oddano delovno električno energijo, izmerjeno na istem merilnem mestu ob zaključku obračunskega obdobja, ki sovпада s koncem koledarskega leta. Viški proizvedene električne energije se

uporabniku ne izplačajo. Uvedba tega sistema neto obračuna je po letu 2016 spodbudila razvoj in širitev samooskrbnih PV sistemov, prikazano na sliki 3.4.



Slika 3.4: Inštalirana moč samooskrbnih fotonapetostnih sistemov [2, 5].

Leta 2016 je bilo v Sloveniji postavljenih približno 3 MW novih PV sistemov, kjer je kar tretjina teh naprav bila namenjena delovanju v okviru samooskrbe. V istem letu je Vlada RS sprejela Uredbo o energetske infrastrukturi (UL RS, št. 22/2016), ki je določila, da za izdajo soglasij za vpis ali izbris iz evidence infrastrukture ni več potrebno pridobiti soglasja Vlade RS.

Kot prikazuje slika 3.4, se je trend rasti samooskrbnih PV sistemov izrazito nadaljeval tudi v letu 2019. V takrat sprejeti Uredbi o samooskrbi z električno energijo iz OVE (UL RS, št. 17/2019) je bila prvič uvedena možnost skupnostne samooskrbe, ki omogoča vključevanje večstanovanjskih stavb in skupnosti OVE v sistem samooskrbe. Uredba je opredelila tudi količinski delež proizvodnje, tj. delež neto proizvedene električne energije, ki pripada posameznemu merilnemu mestu v okviru skupnosti. Na tej osnovi lahko odjemalci, ki porabljajo električno energijo prek dveh ali več merilnih mest v isti večstanovanjski stavbi povežejo ta merilna mesta v sistem skupnostne samooskrbe.

Rast inštalirane moči majhnih PV sistemov za samooskrbo se je nadaljevala tudi v letu 2020. Pomemben mejnik na področju samooskrbne skupnosti je predstavljala vas Luče v Savinjski dolini, ki je postala prva samooskrbna skupnost v Sloveniji. Leto kasneje je zaznamovala občutna podražitev električne energije, ki je dodatno spodbudila naložbe v PV sisteme, katerih skupna inštalirana moč je v tem letu dosegla 56 MW.

Glede na dosedanje trende je bila nadaljnja rast pričakovana tudi v letu 2022, ko je bilo skupno nameščenih kar 164 MW PV sistemov. Na območju nekdanjega odlagališča elektrofiltrskega pepela in žlindre Termoelektrarne Trbovlje je bil postavljen takrat največji PV sistem v Sloveniji do tedaj, z inštalirano močjo 3 MW. Marca istega leta je Vlada RS sprejela novo Uredbo o samooskrbi z električno energijo iz OVE (UL RS, št. 43/2022), ki je prinesla več pomembnih sprememb. Med glavnimi novostmi sta bila nov način obračuna omrežnine in dajatev in ukinitev koncepta net-meteringa za naprave priključene po letu 2024.

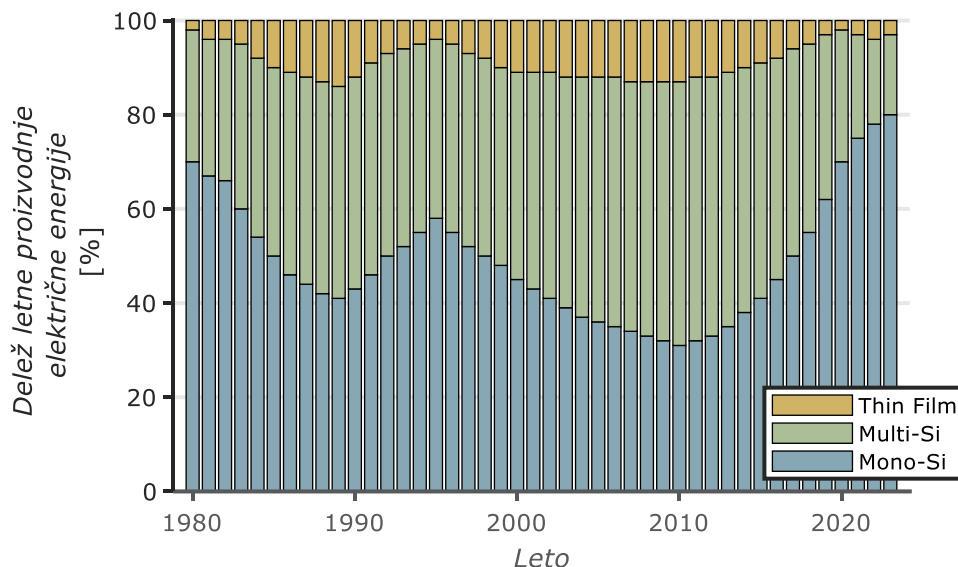
Leta 2023 pa je bila nameščen trenutno največji PV sistem na hidroelektrarni Brežice, ki deluje kot dodaten generator hidroelektrarne, z inštalirano močjo 6 MW. Povzeto po [2].

3.2 STRUKTURA IN LASTNOSTI OBSTOJEČIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV

Sicilij je ena izmed ključnih surovin za proizvodnjo PV modulov, saj kot polprevodnik omogoča pretvorbo sončne energije v električno. Glede na uporabljeno tehnologijo ločimo med kristalno silicijevimi (mono- in

polikristalnimi) moduli, tankoplastnimi moduli ter nekaterimi novimi, še razvijajočimi se tehnologijami kot npr. organski, napredni kristalni silicijevi itd.

Na sliki 3.5 je prikazan tržni delež prvih in drugih generacij PV modulov v obdobju od leta 1980 do 2023. Razvidno je, da sta v preteklosti prevladovala predvsem mono- in polikristalna tehnologija. Sredi 90. let se je počasi začel povečevati tudi delež tankoplastnih modulov, ki je svoj vrh dosegel leta 2010, nato pa se je njihov delež postopoma zmanjšal [6].



Slika 3.5: Tržni delež prvih in drugih generacij fotonapetostnih modulov [6].

3.2.1 VRSTE KOMERCIALNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV

Monokristalni moduli so izdelani iz silicija visoke čistosti, oblikovanega v en sam kristal. To jim omogoča boljšo kristalno strukturo in s tem tudi večjo učinkovitost pretvorbe sončne energije. Proizvodnja se začne z ekstrakcijo silicija iz kremenčevega peska, pri čemer nastane silicij metalurške kakovosti, ki vsebuje nečistoče. Sledi kemijska predelava, kjer se silicij pretvori v hlapno spojino, ponavadi triklorosilan (SiHCl_3), in se z večstopenjsko destilacijo očisti. Po redukciji z vodikom nastane polisilicij visoke čistosti, iz katerega se z Czochralskim postopkom proizvede monokristalni ingot, ki se ga razreže v tanke rezine (angl.: *wafers*), ki služijo kot osnova za PV celice [7-8].

Polikristalni moduli so prav tako izdelani iz silicija, vendar ne iz enega samega kristala temveč kristalnih zrn. Omenjena struktura precej zmanjšuje mobilnost elektronov, kar posledično pomeni nekoliko nižjo učinkovitost v primerjavi z monokristalnimi moduli. Poleg samega silicija PV modul sestavljajo še drugi materiali. Okoli 76 % teže predstavlja natrijevo apneno steklo z nizko vsebnostjo železa, ki omogoča visoko prepustnost svetlobe. Okoli 10 % prispevajo polimeri, kot sta etilen vinil acetat (EVA) in polietilen tereftalat (PET), do 8 % aluminijasti okvir, PV celice pa sestavljajo približno 3 % teže. Prisotni so tudi manjši deleži bakra, srebra ter drugih elementov, vključno s potencialno nevarnimi snovmi kot so svinec in kositer [9].

Tankoplastni moduli predstavljajo alternativo tradicionalnim kristalno silicijevim tehnologijam, njihova glavna značilnost je nižja teža in tanjša plast aktivnih materialov. Postopek proizvodnje je podoben izdelavi integriranih vezij, kjer se najprej steklen, kovinski ali plastični substrat temeljito očisti, nato se pa nanese spodnja kontaktna plast. V nadaljevanju se v vakuumu, pod vplivom visokofrekvenčnega električnega polja, na podlago nanesejo plasti polprevodnikov, vključno z amorfnim silicijem. Površina je predhodno razdeljena na trakove, kar omogoča oblikovanje posameznih celic. Amorfnе PV celice lahko vsebujejo različne materiale kot so kadmijev telurid, bakrov indij-galijev diselenid (CIGS – angl.: *copper indium-gallium selenide*) ter galijev arzenid. Amorfnі silicij, ki se nanaša v zelo tankih slojih, omogoča dobro absorpcijo širokega spektra svetlobe, kar mu omogoča učinkovitost tudi pri šibki osvetlitvi.

PV moduli na osnovi kadmijevega telurida so med tankoplastnimi tehnologijami najbolj uveljavljeni in komercialno prisotni že od leta 2002. Značilno jih sestavljajo plast prevodnega oksida (TCO – angl.: *Transparent Conductive Oxide*), kadmijev sulfid kot prehodna plast ter glavna fotoaktivna plast kadmijevega telurida. V konfiguraciji supersubstrata je ta plast obrnjena proti zunanji strani stekla, zadnjo kontaktno plast pa sestavljajo kovine kot so molibden, baker, zlato, nikelj-aluminij ali grafit, dopiran z bakrom. Za zaščito modulov se uporablja EVA plast. Kljub temu, da kadmij velja za strupeno snov, se ob običajni uporabi celic ne sprošča v okolje.

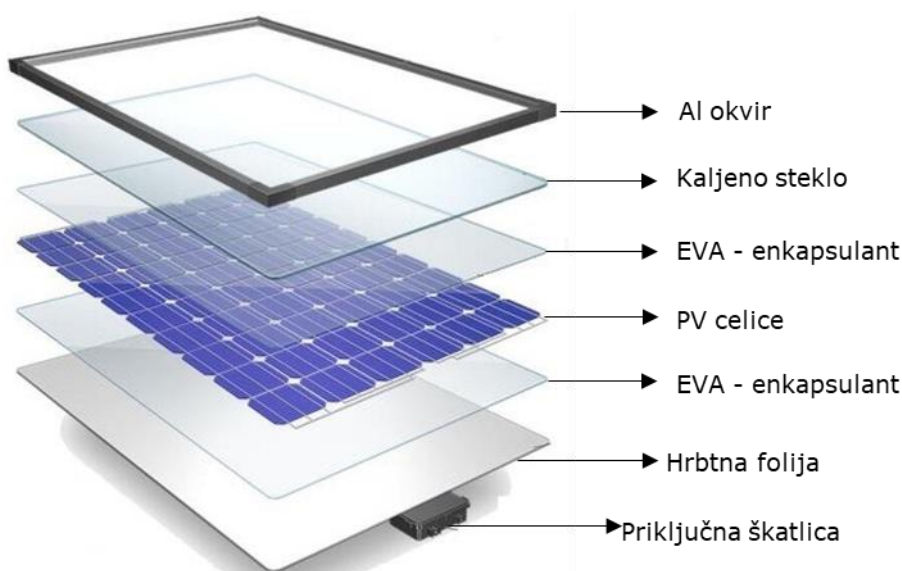
Moduli iz CIGS vsebujejo aktivno plast z visokim absorpcijskim koeficientom, ki je sestavljena iz približno 10 % bakra, 28 % indija, 10 % galija in 52 % selena. Ta plast je nanescena na molibdensko elektrodo, ki se nahaja na stekleni podlagi. Kot vmesna plast se uporablja kadmijev sulfid, medtem ko prosojni sprednji stik tvori cinkov oksid (ZnO). V nekaterih primerih se kot sprednji prevodnik uporablja mreža iz nikelj-aluminija. Sloji so laminirani z EVA plastjo in zaščiteni s steklom.

PV moduli na osnovi galijevega arzenida so strukturno podobni silicijevim celicam, vendar zaradi drugačne atomske sestave omogočajo višjo absorpcijo sončnega sevanja, zato se pogosto uporabljajo v sistemih s koncentradorji sončne energije, kjer je cilj maksimalna izraba sončnega spektra. Povzeto po [2, 10-11].

3.2.2 SESTAVA KOMERCIALNEGA MONOKRISTALNEGA FOTONAPETOSTNEGA MODULA

Zgradba komercialnega monokristalnega PV modula je prikazana na sliki 3.6. Iz slike 3.6 je razvidno, da si komponente sledijo po naslednjem vrstnem redu:

- aluminijasti okvir, ki zagotavlja robustnost in kompaktnost modula;
- kaljeno steklo, ki ščiti PV modul pred zunanjimi vplivi;
- dva sloja (EVA) enkapulanta, ki spojita celice na steklo;
- PV celice, ki omogočajo pretvorbo sončnega sevanja v električno energijo;
- hrbtna folija, ki ščiti PV celice pred vremenskimi vplivi in vlago, ter jih električno izolira;
- priključna škatlica, ki povezuje PV module v t. i. stringe [4].



Slika 3.6: Zgradba komercialnega monokristalnega PV modula [4].

Večina današnjih PV modulov temelji na monokristalnih silicijevih celicah, kot je to razvidno tudi iz slike 3.5. Debelina PV celic je nekje med 150 in 180 mikrometri, sestavljene pa so iz silicijeve rezine, antirefleksijskega sloja iz silicijevega nitrida, sprednje kontaktne elektrode iz srebra ter zadnje elektrode iz aluminija. Povzeto po [2, 12].

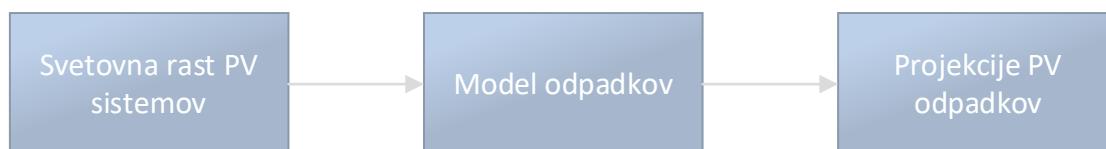
V tabeli 3.2 so prikazani sestavni materiali komercialnega PV modula ter njihovi masni deleži. Povzeto po [13].

Tabela 3.2: Masni delež sestavnih materialov v monokristalnem PV modulu [2, 13].

Del modula	Material	Masni delež [%]
Sprednje steklo	steklo	71,57
Okvir	aluminij	8,29
PV celica	aluminij	2,01
	silicij	3,48
	kositer	0,12
	svinec	0,07
	srebro	0,01
	baker	0,57
Priključna omarica in kabli	baker	1,20
	plastika	2,55
Folija	EVA	6,53
Zadnja plošča	polivinil fluorid (PVF)	3,60

3.3 ŽIVLJENJSKA DOBA FOTONAPETOSTNIH MODULOV IN PRIČAKOVANA KOLIČINA ODPADNIH ENOT

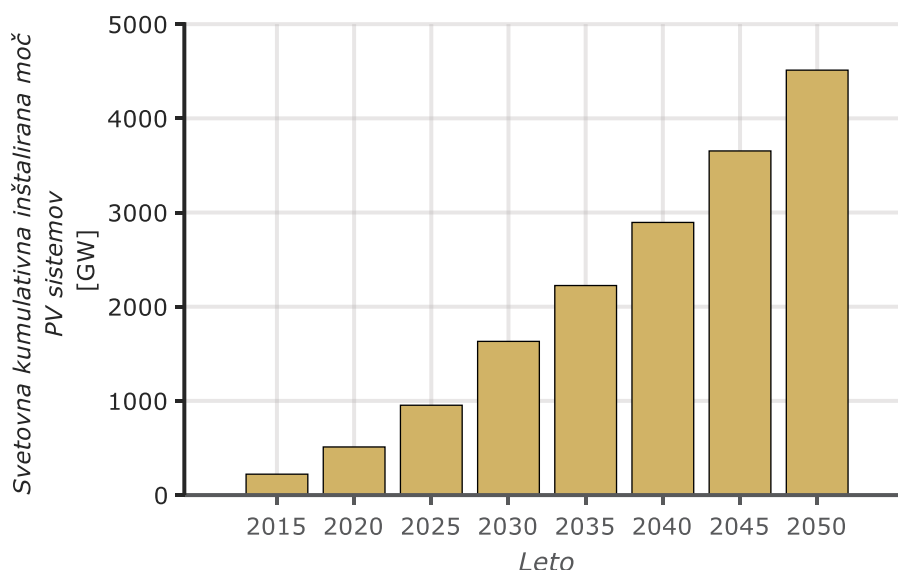
Količina odpadnih PV modulov bo v prihodnjih desetletjih naraščala sorazmerno z vse večjo integracijo PV sistemov v elektroenergetska omrežja. Po navedbah avtorja [4, 14] je za zanesljivo oceno prihodnjih količin odpadkov potreben tristopenjski pristop kot prikazuje slika 3.7 [14].



Slika 3.7: Tristopenjski pristop k oceni odpadkov PV modulov [14].

Do konca leta 2023 je skupna nameščena moč PV sistemov po svetu presegla 1,4 TW [15]. V tem letu so na Kitajskem implementirali za približno 235 GW inštalirane moči PV modulov, sledile so Združene države Amerike z 33,2 GW, Indija z 16,6 GW in Nemčija z 14,3 GW [16]. PV moduli se uvrščajo med najcenejše tehnologije proizvodnje električne energije, po podatkih [17] naj bi cene v Evropi v letu 2025 v povprečju znašale nekje okoli 0,11 \$/W.

Na sliki 3.8 je prikazana projekcija globalne inštalirane moči do leta 2050, ki temelji na raziskavah združenja IRENA (angl.: *International Renewable Energy Agency*) in IEA (angl.: *International Energy Agency*). Kot nakazujejo tudi trenutni trendi, bo inštalirana moč PV sistemov še vedno naraščala eksponentno, do leta 2050 pa naj bi po napovedih dosegli do 4.215 GW skupne inštalirane moči. Povzeto po [14].



Slika 3.8: Projekcija globalne inštalirane moči do leta 2050 [14].

Največ odpadkov naj bi po podatkih [14] nastalo med naslednjimi štirimi primarnimi fazami življenjskega cikla PV modulov:

- 1) izdelava PV modula,
- 2) transport PV modula,
- 3) montaža PV modula in
- 4) odlaganje PV modula.

Projekcijo odpadkov iz PV modulov so določili skladno z modelom, kjer so v prvem koraku pretvorili inštalirano moč v maso in upoštevali verjetnost delovanja PV modula, v drugem koraku pa so modelirali po dveh scenarijih. Prvi scenarij je zajemal redne izgube, ki so posledica iztrošenosti modula, drugi scenarij pa je zajemal zgodnje izgube, ki so posledica nenadne odpovedi v zgodnji fazi obratovanja.

Okvare PV modulov se v osnovi delijo na:

- okvare v zgodnjem obdobju: okvare, ki se pojavijo do 4. leta po namestitvi PV modula,
- okvare sredi življenjske dobe: okvare, ki se pojavijo med 5. in 11. letom po namestitvi PV modula in
- okvare zaradi iztrošenosti modula: okvare, ki se pojavijo 12 let po namestitvi do predvidenega konca življenjske dobe.

Glavni vzroki za okvaro PV modulov v zgodnjem obdobju njihovega delovanja so:

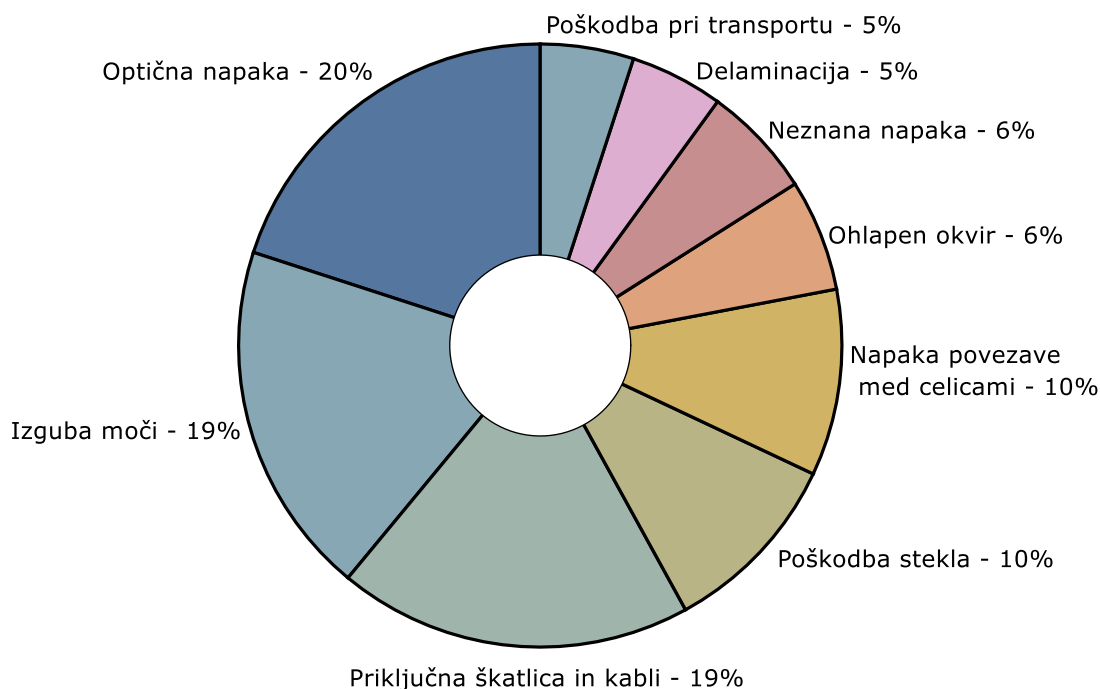
- svetlobna degradacija (0,5 -5 % primerov),
- pomanjkljivo načrtovanje,
- neustrezna montaža ter
- nezadostna nosilnost konstrukcije.

Pomemben delež okvar, ki se pojavijo v srednjem obdobju življenjske dobe, lahko pripišemo okvaram električnih komponent, kot so priključne škatlice, kabli ter ozemljitveni elementi. Pogosto so vzroki okvar povezani z degradacijo protiodsevne prevleke stekla, spremembo barve EVA plasti ali delaminacijo in pokanjem izolacijskih plasti celic.

Okvare, ki se pojavijo v prvih 12 letih delovanja so pogosto posledica izpostavljenosti mehanskim (npr. veter, sneg, toča) in temperaturnim obremenitvam. Med najpogostejše okvare sodijo degradacija, poškodba kontaktov v priključni škatli, poškodbe stekla ali aluminijastih okvirjev, napake v povezavi PV celic, mikro razpoke in napake na diodah.

V kasnejši fazi življenjskega cikla pa je pri približno 40 % modulov možno zaznati mikro razpoke, ki pa so pogostejše pri novejših moduli, zaradi uporabe tanjših celic.

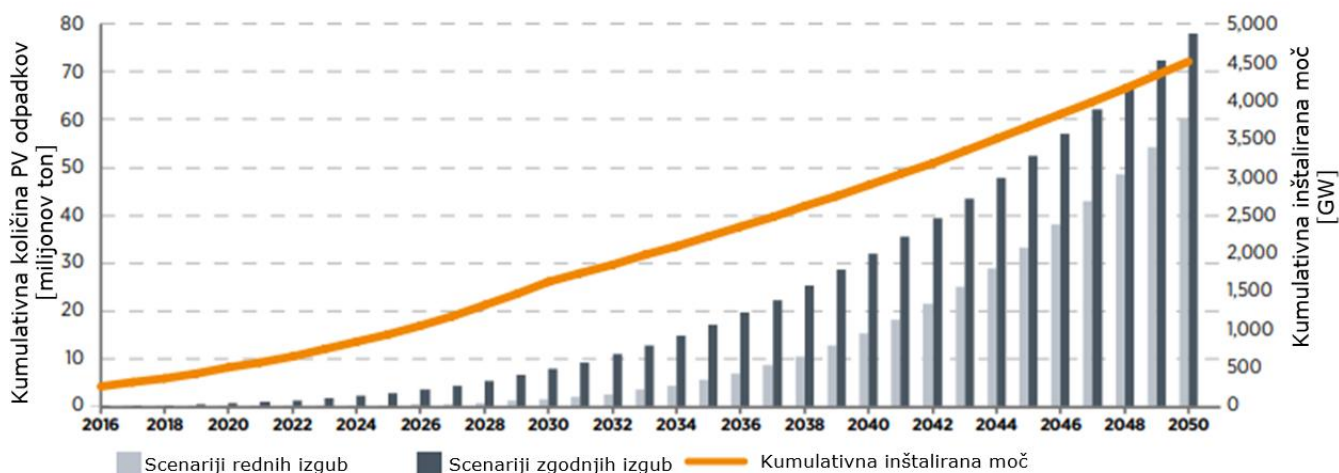
Slika 3.9 prikazuje najpogostejše okvare [14].



Slika 3.9: Vrste okvar PV modulov [14].

Pričakovana življenjska doba PV modulov je med 25 in 30 let po sami inštalaciji, vendar pa lahko moduli zaradi raznoraznih okvar postanejo odpadki tudi prej. Povprečna letna stopnja degradacije PV modulov znaša približno 0,55 %.

Na sliki 3.10 je prikazana napoved pričakovane količine odpadnih PV modulov do leta 2050 [14].



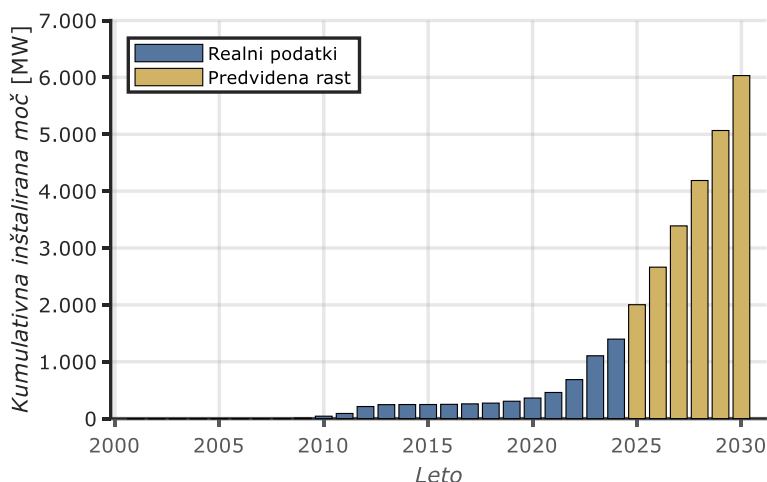
Slika 3.10: Napoved količine odpadnih PV modulov do leta 2050 [14].

Iz slike 3.10 je razvidno, da bo v scenariju rednih izgub skupna količina odpadnih PV modulov do leta 2030 dosegla približno 1,7 milijonov ton, pričakuje pa se da bo ta vrednost do leta 2050 drastično povečala na okoli 60 milijonov ton. Napoved za scenarij zgodnjih izgub predvideva bistveno večje količine odpadkov, do leta

2030 naj bi ti znašali že 8 milijonov ton, do leta 2050 pa kar 78 milijonov ton. Takšne razlike izhajajo predvsem iz predpostavke, da scenarij zgodnjih izgub vključuje večji delež zgodnjih odpovedi PV modulov v primerjavi z rednim scenarijem. Čeprav napoved temelji na stanju iz leta 2016 pa lahko z aktualnimi podatki ugotovimo, da je bila projekcija dosežene skupne inštalirane moči 1 TW sprva predvidena za leto 2026, a smo to vrednost presegli že leta 2022. To pa pomeni, da se bodo tudi količine odpadkov verjetno povečevale hitreje, kot je bilo sprva predvideno.

4 NAPOVED RASTI IN KOLIČIN ODPADNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV V SLOVENIJI

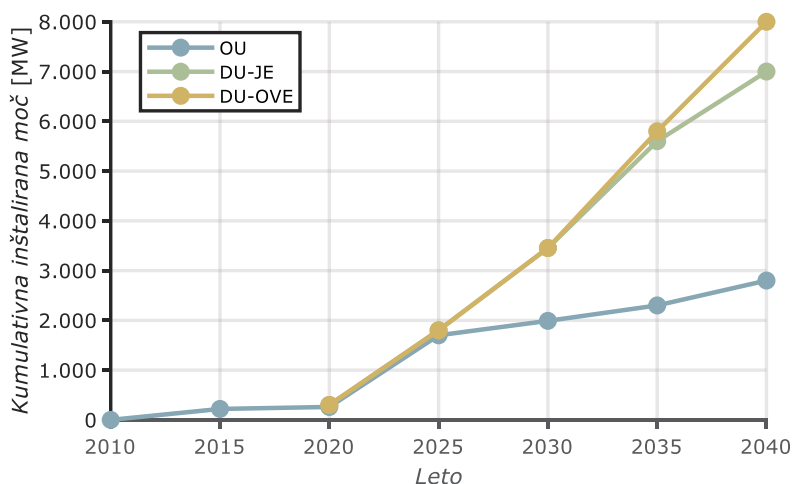
V Sloveniji se je množična integracija PV modulov začela leta 2010. Pomemben preskok je bil zabeležen leta 2023, ko se je skupna inštalirana moč povečala z 632 MW na 1.123 MW. V kolikor se bo trenutni trend rasti nadaljeval, napovedi kažejo, da bi lahko kumulativna inštalirana moč v Sloveniji do leta 2030 dosegla približno 6.000 MW, kot prikazuje slika 4.1.



Slika 4.1: Napoved kumulativne inštalirane moči fotonapetostnih sistemov do leta 2030 [5].

4.1 SCENARIJI RAZVOJA FOTONAPETOSTNIH SISTEMOV V PRIHODNOSTI

Iz osnutka posodobitve Nacionalnega energetskega in podnebne načrta (NEPN) iz decembra 2024 je razvidno, da so bile projekcije kumulativne inštalirane moči PV sistemov, prikazane na sliki 4.2 izdelane za tri različne scenarije [18].



Slika 4.2: Razvoj PV sistemov do leta 2040 po projekcijah NEPN [18].

Prvi scenarij (OU – obstoječi ukrepi) predpostavlja, da se zakonodaja in izvedbeni ukrepi ne bodo bistveno spreminjali, torej bodo veljali vsi ukrepi sprejeti do 1. 6. 2021. Predvideva se zmeren razvoj PV sistemov, do leta 2040 pa naj bi kumulativna inštalirana moč znašala okoli 3000 MW.

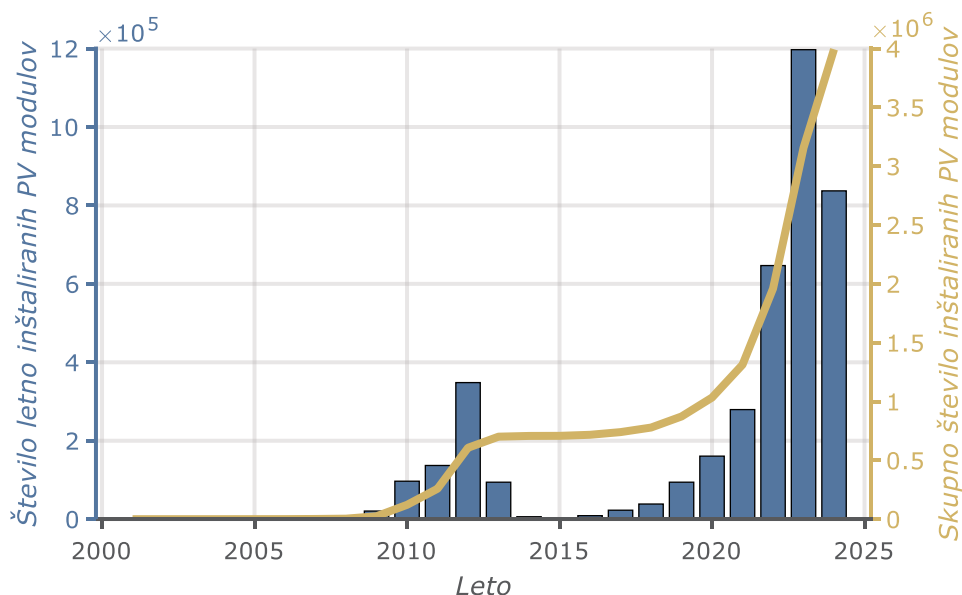
Drugi scenarij (DU-JE – dodatni ukrepi z vključitvijo jedrske energije) predvideva dopolnitev obstoječih ukrepov z dodatnimi ukrepi na vseh področjih za doseganje ciljev NEPN, vključno z izgradnjo nove jedrske elektrarne v

Krškem. V tem scenariju je predviden manjši obseg dodatne rasti PV sistemov, zlasti po letu 2035 oz. 2040, zaradi večjega deleža jedrske energije v mešanici virov.

Tretji scenarij (DU-OVE – dodatni ukrepi za obnovljive vire energije) temelji na predpostavki, da bodo zakonodajni in regulativni okviri najbolj naklonjeni pospešeni rasti PV sistemov. V tem scenariju se pričakuje najhitrejši in največji obseg dodatnih inštalacij teh sistemov.

4.2 OCENA KOLIČIN ODPADNIH FOTONAPETOSTNIH MODULOV DO LETA 2050

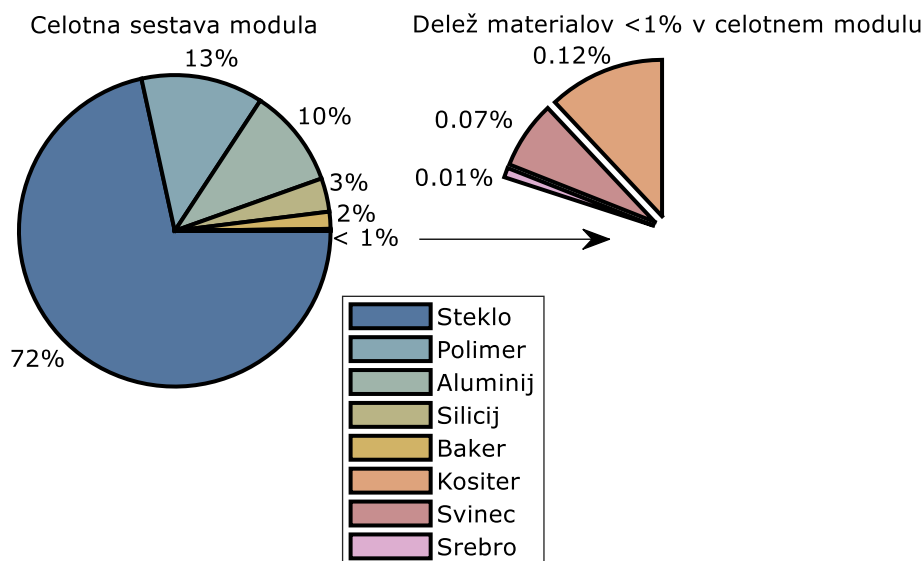
Reciklaža odpadnih PV modulov predstavlja pomembno priložnost za ponovno pridobivanje ključnih surovin kot so aluminij, silicij, baker in srebro. Na osnovi trenutne analize kumulativne inštalirane moči PV sistemov prikazane na sliki 3.2 smo ob predpostavki, da znaša povprečna moč posameznega PV modula 350 W, izračunali število inštaliranih modulov po posameznih letih, ki je prikazana na sliki 4.3. Omenjeni podatki so služili kot osnova za nadaljnjo projekcijo količin pridobljenih materialov skozi čas, ob upoštevanju 25- letne življenjske dobe PV modula.



Slika 4.3: Projekcija števila inštaliranih PV modulov.

Prikaz na sliki 4.3 ima ključno vlogo pri ponazoritvi pričakovane kapacitete odpadnih PV modulov v prihodnjih letih. Z naraščajočo kumulativno inštalirano močjo PV sistemov se sorazmerno povečuje tudi število vgrajenih modulov. Ker se je od začetkov uporabe do danes bistveno spremenila nazivna moč posameznih modulov, smo v analizi upoštevali povprečno vrednost, kar je omogočilo realnejšo oceno skupnega števila modulov.

V nadaljnji analizi imata pomembno vlogo tako materialna sestava PV modulov prikazana na sliki 4.4 kot tudi povprečni faktor reciklaže posameznih surovin. Povprečni faktor reciklaže predstavlja delež določenega materiala, ki ga lahko po preteku življenjske dobe PV modula pridobimo s trenutnimi postopki reciklaže.



Slika 4.4: Materialna sestava PV modula.

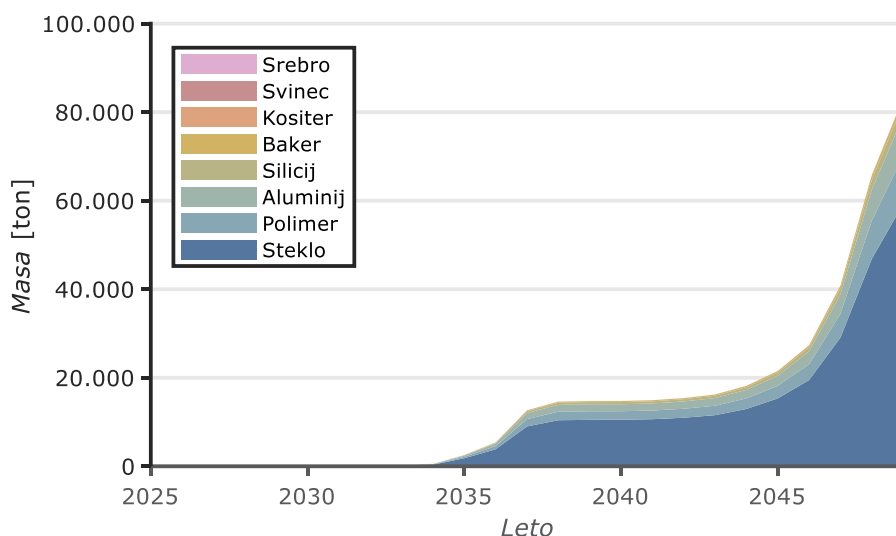
Ključni podatki, ki so bistveni za oceno potenciala pridobitve materiala, so podani v tabeli 4.1 [13].

Tabela 4.1: Sestava monokristalnega PV modula in povprečni faktor reciklaže [2].

Material	Masni delež	Faktor reciklaže materiala
Steklo	71,57	0,96
Aluminij (Al)	10,30	1,00
Silicij (Si)	3,48	0,91
Baker (Cu)	1,77	0,85
Kositer (Sn)	0,12	0,32
Svinec (Pb)	0,07	0,96
Srebro (Ag)	0,01	0,95

Iz tabele 4.1 je razvidno, da največji del modula predstavljata steklo in aluminij. Dragocene kovine kot so srebro, baker in silicij pa zavzemajo razmeroma majhen delež skupne mase modula. Kljub temu imajo slednje zaradi svoje visoke tržne vrednosti pomembno vlogo v postopkih reciklaže. Med vsemi materiali ima aluminij najvišji faktor reciklaže, saj ga je zaradi konstrukcijskih značilnosti relativno enostavno mehansko ločiti od preostalega modula. Faktor reciklaže silicija je relativno visok, vendar je pri trenutnih postopkih še vedno problem pridobiti visoko čistost silicija, ki bi se lahko uporabil za ponovno izdelavo PV modulov.

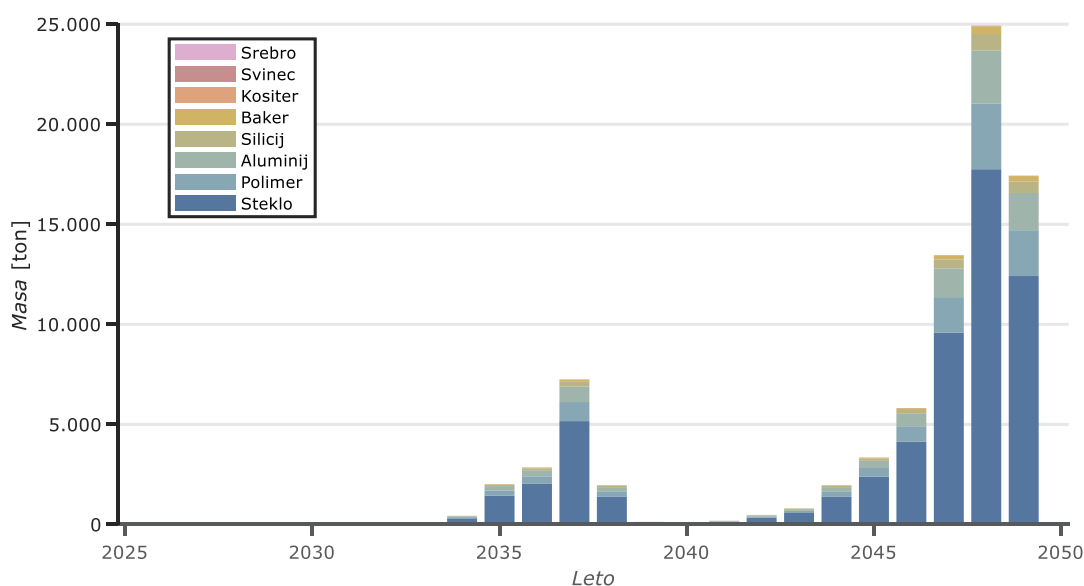
Na sliki 4.5 je prikazana kumulativna napoved pridobljenih materialov za PV sisteme v Sloveniji, ki so bili postavljeni od leta 2001 do 2024.



Slika 4.5: Kumulativna napoved količine pridobljenih materialov iz reciklaže PV modulov glede na kumulativno rast trenutne inštalirane moči.

Na podlagi analize slike 4.5 lahko ugotovimo, da bodo največje količine materialov v procesu reciklaže predstavljali steklo, polimeri in aluminij, saj ti materiali tvorijo največji delež mase PV modulov. Ob predpostavki 25-letne življenjske dobe PV modulov ter upoštevanju dejstva, da prve inštalacije v Sloveniji segajo v leto 2001, bodo prvi moduli dosegli konec življenjske dobe in postali na voljo za reciklažo že leta 2026. Na podlagi kumulativne inštalirane moči 1.397 MW, bi lahko do leta 2049 pridobili približno 262.540 ton stekla, 48.452 ton polimerov, 39.357 ton aluminija, 12.101 ton silicija, 5.748 ton bakra in 36 ton srebra. Kljub ugodnemu potencialu pa trenutni postopki reciklaže še niso optimalni. Čistost komercialno pridobljenih sekundarnih surovin pogosto ne dosega industrijskih standardov, poleg tega pa se pri ekstrakciji silicija, bakra in srebra pogosto uporabljajo okolju škodljive in agresivne kemikalije. V prihodnje bo ključno vlaganje v razvoj okolju prijaznejših in tehnično izboljšanih reciklažnih procesov.

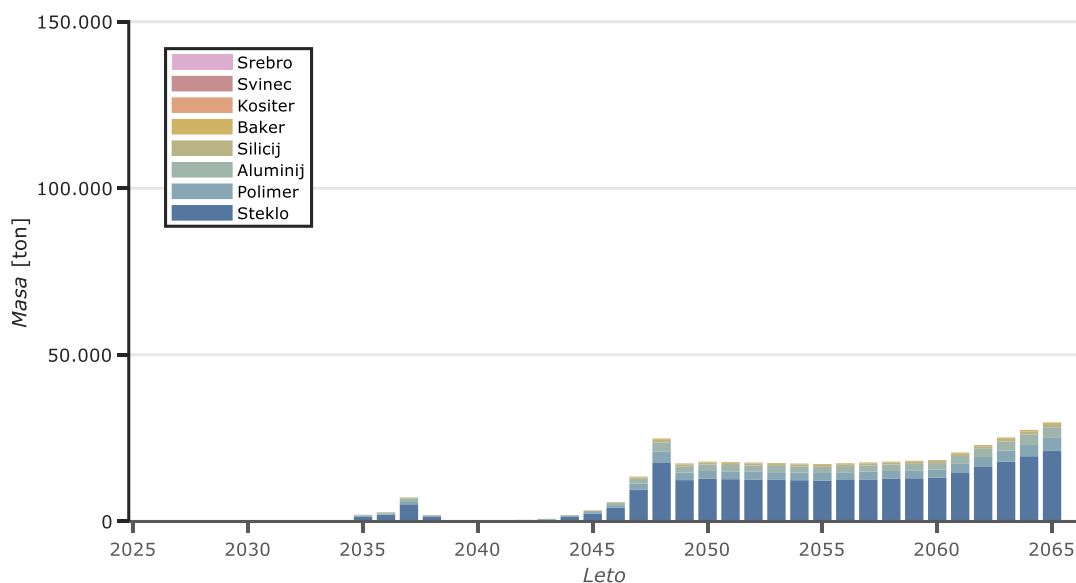
Na sliki 4.6 je prikazana letna napoved pridobljenih materialov za PV sisteme v Sloveniji, ki so bili postavljeni od leta 2001 do 2024 ob predpostavljani 25-letni življenjski dobi.



Slika 4.6: Letna napoved količine pridobljenih materialov iz reciklaže PV modulov glede na trenutno stanje.

4.2.1 NAPOVED OPADKOV PO SCENARIJU ZA OBSTOJEČE UKREPE

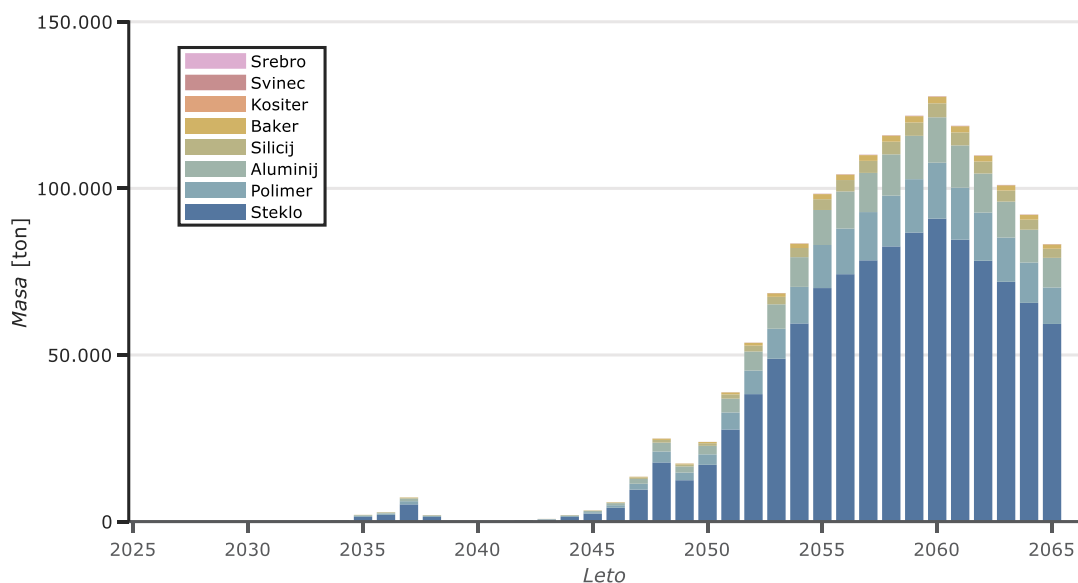
Iz podatkov NEPN (slika 4.2) smo po scenariju OU preračunali količino PV odpadkov za obdobje med letom 2026 in 2065. Pri tem smo upoštevali realni letni prirast inštalirane moči PV sistemov od leta 2001 do leta 2024, napovedani letni prirast inštalirane moči PV sistemov od leta 2025 do leta 2040, ter predpostavljeno življenjsko dobo PV modula 25 let. Predvidevali smo, da vsak PV modul po izteku življenjske dobe preneha delovati in se vsak ustrezno usmeri v reciklažo, s čimer postane del tokov PV odpadkov. Slika 4.7 prikazuje letno napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij OU.



Slika 4.7: Letna napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij OU [18].

4.2.2 NAPOVED ODPADKOV PO SCENARIJU ZA DODATNE UKREPE Z VKLJUČITVIJO JEDRSKE ENERGIJE

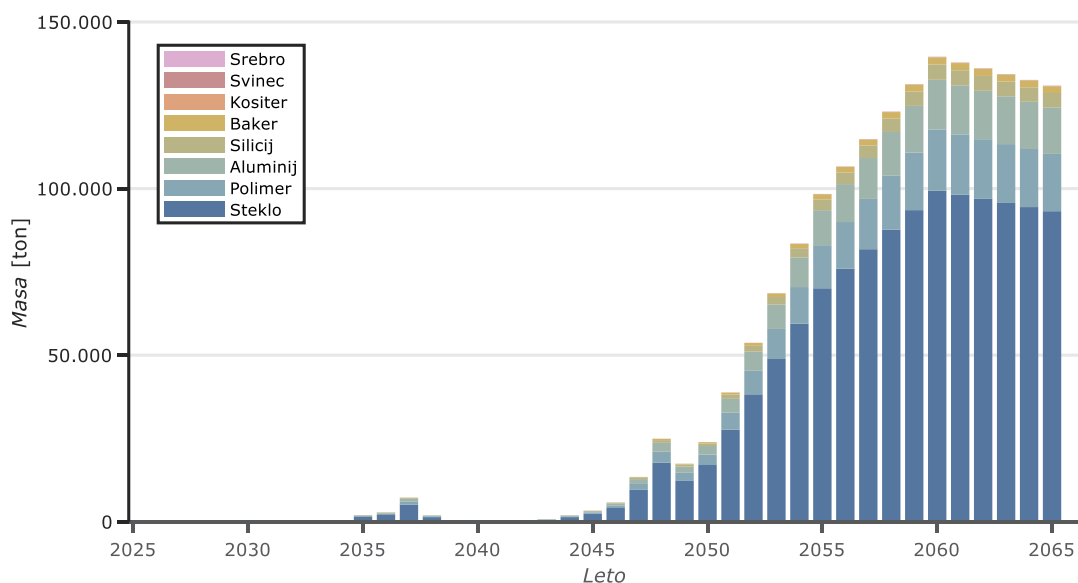
Iz podatkov NEPN (slika 4.2) smo po scenariju DU-JE preračunali količino PV odpadkov za obdobje med letom 2026 in 2065. Pri tem smo upoštevali realni letni prirast inštalirane moči PV sistemov od leta 2001 do leta 2024, napovedani letni prirast inštalirane moči PV sistemov od leta 2025 do leta 2040, ter predpostavljeno življenjsko dobo PV modula 25 let. Predvidevali smo, da vsak PV modul po izteku življenjske dobe preneha delovati in se vsak ustrezno usmeri v reciklažo, s čimer postane del tokov PV odpadkov. Slika 4.8 prikazuje letno napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-JE.



Slika 4.8: Napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-JE [18].

4.2.3 NAPOVED ODPADKOV PO SCENARIJU ZA DODATNE UKREPE ZA OBNOVLJIVE VIRE ENERGIJE

Iz podatkov NEPN (slika 4.2) smo po scenariju DU-OVE preračunali količino PV odpadkov za obdobje med letom 2026 in 2065. Pri tem smo upoštevali realni letni prirast inštalirane moči PV sistemov od leta 2001 do leta 2024, napovedani letni prirast inštalirane moči PV sistemov od leta 2025 do leta 2040, ter predpostavljeno življenjsko dobo PV modula 25 let. Predvidevali smo, da vsak PV modul po izteku življenjske dobe preneha delovati in se vsak ustrezno usmeri v reciklažo, s čimer postane del tokov PV odpadkov. Slika 4.9 prikazuje letno napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-OVE.



Slika 4.9: Napoved odpadne količine materialov PV modulov po postopku reciklaže za scenarij DU-OVE [18].

4.3 POTENCIALNI VPLIV NOVIH TEHNOLOGIJ NA ŽIVLJENJSKO DOBO IN RECIKLAŽO

Napredek na področju PV tehnologij pomembno vpliva tako na podaljševanje pričakovane življenjske dobe PV modulov kot tudi na izboljšanje možnosti njihove reciklaže. Po ocenah ameriškega Ministrstva za energijo (DOE – angl.: Department of Energy) bi že zgolj podaljšanje povprečne življenjske dobe modulov za 2 do 3 leta do leta 2050 lahko zmanjšalo količino odpadnih PV modulov za 2 do 3 milijone ton [19].

Perovskitne PV celice predstavljajo eno izmed najbolj perspektivnih tehnologij, saj dosegajo visoko učinkovitost ter omogočajo nižje proizvodne stroške. Vendar pa te celice pogosto vsebujejo svinec, kar predstavlja okolijsko tveganje. Za obvladovanje teh vplivov raziskovalci razvijajo postopke reciklaže kot je uporaba ionskih izmenjevalnih smol za vezavo svinca in zmanjšanje njegovega sproščanja v okolje.

Tandemske PV celice kombinirajo različne plasti materialov (npr. silicij in perovskit) omogočajo povečanje izkoristka in zmanjšanje termične degradacije, kar posledično podaljšuje življenjsko dobo. Kompleksnost struktur pa predstavlja izziv za reciklažo, saj zahteva natančno ločevanje več slojev z različnimi fizikalnimi kot tudi kemijskimi lastnostmi [20].

Trenutno postaja vse bolj pomemben celovit pristop k načrtovanju življenjskega cikla PV modulov, kar vključuje ne le izboljšanje robustnosti in podaljšanje življenjske dobe, temveč tudi razvoj tehnologij, ki omogočajo lažje razstavljanje ter mehansko in kemijsko ločevanje posameznih materialov. Pri tem je ključna vloga industrijskih standardov in zakonodajnih spodbud za krožno gospodarstvo.

5 TEHNOLOŠKI POSTOPKI RECIKLIRANJA FOTONAPETOSTNIH MODULOV

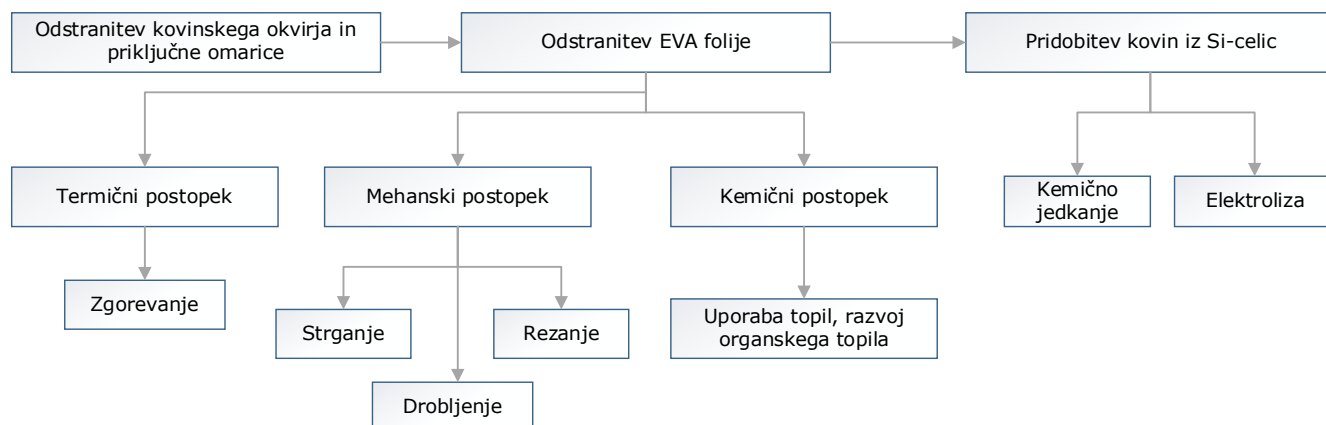
Zaradi vse večje rasti PV sistemov po svetu in pričakovanega vala iztrošenih PV modulov v prihodnjih desetletjih postaja učinkovito ravnanje z odpadnimi moduli ključen izziv za trajnostni razvoj sektorja. Medtem ko so klasični PV moduli, zlasti na osnovi kristalnega silicija, v uporabi že več desetletij, se z vstopom novih tehnologij (perovskitni, tandemski itd.) povečuje tudi kompleksnost in raznolikost materialnih sestav, kar dodatno otežuje postopke recikliranja.

Cilj postopkov recikliranja je čim večja stopnja ločevanja in ponovne uporabe ključnih komponent kot npr. aluminijasti okvirji, steklo, silicij, srebro, baker itd. Najpogostejše uporabljene tehnologije vključujejo mehanske, termične in kemične postopke, vsaka pa ima svoje prednosti in slabosti. Mehanske metode so enostavne in cenovno dostopne, a manj učinkovite pri pridobivanju redkih kovin. Kemične in termične metode pa dosegajo višji izkoristek pridobitve dragocenih surovin, ampak pogosto vključujejo uporabo nevarnih reaktantov ali energijsko intenzivne postopke.

5.1 PREGLED RAZISKOVALNIH RECIKLAŽNIH TEHNOLOGIJ

Raziskovalni razvoj reciklažnih tehnologij se osredotoča na metode, ki omogočajo čim višjo stopnjo pridobitve materiala, ob hkratnem zmanjševanju energetske zahtevnosti in vplivov na okolje. Učinkoviti postopki morajo biti skladni z zakonodajnimi smernicami, omogočati višjo stopnjo predelave in zmanjšati tveganja povezana z nevarnimi snovmi, ki so lahko prisotna v PV moduli.

Slika 5.1 prikazuje poenostavljen shematski prikaz glavnih raziskovalnih usmeritev na področju reciklaže PV modulov.



Slika 5.1: Poenostavljen diagram raziskovalnih postopkov recikliranja PV modulov [2].

Odstranjevanje EVA folije iz laminirane strukture predstavlja enega najzahtevnejših korakov v postopku recikliranja odpadnih PV modulov. Poleg izboljšanih termičnih in kemičnih metod, so raziskovalci razvili tudi mehanske pristope, ki omogočajo delno ali celovito ločevanje folije od preostalih slojev modula.

5.1.1 TERMIČNI POSTOPKI

Potencial termičnega postopka recikliranja PV modulov je bil potrjen že v zgodnjih fazah razvoja. Temeljni namen termične obdelave je selektivna ločitev komponent iz strukture modula, pri čemer je glavni cilj minimalni vpliv na PV celice ter ohranjanje njihove funkcionalnosti. Čeprav gre za energetsko intenziven proces, omogoča ponovno uporabo do 85 % pridobljenih PV celic, kar lahko prispeva do 70 % k nižji porabi energije v primerjavi z izdelavo novih PV celic iz primarnih surovin. Zaradi sorazmerno preprostega izvajanja postopka in visoke učinkovitosti veljajo termični postopki za ustrezen rešitev tudi na industrijski ravni. Ključno pomanjkanje postopka je sproščanje nevarnih plinov kot npr. vodikov fluorid (HF), ki nastaja pri razgradnji EVA plasti med termično obdelavo [2,21].

Japonska organizacija Kitakyushu je v okviru prizadevanj za spodbujanje industrijskega razvoja in tehnološkega napredka razvila celovit postopek za reciklažo PV modulov, ki poleg termične razgradnje EVA folije vključuje tudi mehanski postopek – odstranitev aluminijastega okvirja in zadnje zaščitne plošče. Celoten postopek temelji na avtomatizirani obdelavi PV modulov, kjer procesni stroji vključujejo naprave za nalaganje in razkladanje, sinhronizirane s centralnim sistemskim krmilnikom. Prvi korak v postopku je odstranitev aluminijastega okvirja z uporabo zračnega aktuatorja. Sledi ločevanje zadnje plošče s pomočjo rezalnega stroja, katerega natančnost preprečuje nastanek toplotnih razpok v steklu med nadaljnjo obdelavo. PV moduli so nato podvrženi termični obdelavi v peči, kjer poteka razgradnja EVA plasti. Peč se predgreje na 350 °C, nato pa segreje na delovno temperaturo 500 °C, ki je primerna za reciklažo kristalnih PV modulov. Po termični fazi se peč ohladi na 250 °C. Plini, ki nastajajo med zgorevanjem EVA folije se sproti vsesavajo in dodatno sežigajo, kar zagotavlja nadzor emisij. Toplota, ki se sprošča med zgorevanjem, se delno vrača nazaj v sistem in služi kot vir za ogrevanje peči, kar prispeva k energetske učinkovitosti procesa. Po zaključenem postopku lahko iz modula izločimo ključne komponente kot so steklo, silicijeve celice in elektrode. Pridobljeno steklo je primerno za nadaljnjo predelavo v t.i. *float* steklo, ki nastane z ulivanjem stekla na plast staljene kovine, s čimer se doseže gladka in polirana površina. Tehnologija je primerna za obdelavo komercialno dostopnih kristalnih PV modulov, pretočnost takšnega postopka je približno 12 MW/leto. Celotna učinkovitost postopka reciklaže dosega do 95 %. Vendar pa ta tehnologija ne omogoča ločenega pridobivanja kovin iz silicijevih celic, kar ostaja ena njenih pomembnih omejitev [2, 22].

Korejski inštitut za energetske raziskave (KIER) je razvil nizkocenovni postopek za pridobivanje nepoškodovanih silicijevih celic iz izrabljenih PV modulov [2, 23]. Proces vključuje več faz in sicer:

- termično odstranjevanje EVA folije,
- ločevanje silicijevih celic,
- reciklažo kovin,
- ponovno predelavo celic v uporabne silicijeve rezine.

V okviru raziskave so PV module sežigali pri temperaturi 550 °C v prisotnosti kisika, kar je omogočilo razgradnjo polimernih plasti. Kot ključen korak se je izkazala predhodna mehanska razdrobitev stekla, ki je bistveno pripomogla k ohranitvi celovitosti silicijevih celic in s tem k večjemu izkoristku reciklaže. Eksperimentalno so potrdili, da je mogoče izločene celice nadalje predelati v silicijeve rezine s pomočjo kemijskega jedkanja z dušikovo kislino, kar omogoča odstranjevanje površinskih plasti [2, 24]. Tako očiščene rezine je mogoče predelati v silicijeve celice, ki izpolnjujejo zahteve visoke čistosti za uporabo v proizvodnji novih PV modulov.

Korejski inštitut za tehnologijo elektronike (KETI) je razvil integriran postopek za reciklažo PV modulov, ki združuje termično obdelavo, kemično jedkanje in mehansko odstranjevanje plasti [2, 23]. V okviru procesa so PV module segreli na temperaturo 480 °C s kontrolirano hitrostjo segrevanja 15 °C/minuto. Z opisanim postopkom so odstranili EVA folijo in ohranili celovitost silicijevih celic. Po uspešni termični obdelavi je sledil postopek kemičnega jedkanja z dušikovo kislino, s katero so učinkovito izločili srebro iz zgornjih kontaktov celice. Nadaljnja obdelava je vključevala mehansko brušenje, s katerim so odstranili antirefleksijsko plast in p-n spoj, kar je ključen korak pri pripravi celic za predelavo v nove. Elektrode na zadnji strani celice so odstranili z uporabo raztopine kalijevega hidroksida. Rezultati raziskave so pokazali, da so reciklirane silicijeve PV celice dosegale učinkovitost, ki je primerljiva s komercialno proizvedenimi celicami. Tehnologija se je izkazala primerna za reciklažo PV celic z debelino do 0,2 mm.

Kitajska raziskovalna akademija za okoljsko znanost je v sodelovanju s Kitajskim inštitutom za elektrotehniko razvila nov pristop termične obdelave PV modulov, ki temelji na zgorevanju v cevni peči [2, 25]. Postopek vključuje dvostopenjsko segrevanje. Prva faza poteka pri temperaturi med 250 °C in 300 °C, medtem ko končna temperatura doseže med 500 °C in 550 °C. Zgorevanje poteka v prisotnosti dušika in kisika, kar omogoča popolno razgradnjo polimernih komponent, predvsem EVA folije. Po termični obdelavi se iz modulov loči stekleno ploščo in silicijeve PV celice. Celice so nadalje vključili v večstopenjski kemični postopek, ki je vključeval obdelavo z raztopinami natrijevega hidroksida, dušikove kisline in fluorovodikove kisline. Rezultat kemijske obdelave pa je bila učinkovita ločitev in pridobitev osnovnih surovin silicija, srebra in aluminija. Med razvojem postopka so ugotovili, da je metoda učinkovita, vendar energetske prezahtevna. To je spodbudilo nadaljnjo optimizacijo procesa, katerega rezultat je bila zasnova visokotemperaturne sežigalnice, prilagojene

za obdelavo komercialnih PV modulov. Nova tehnologija vključuje sistem za rekuperacijo toplote in interno reciklažo izpušnih plinov.

5.1.2 MEHANSKI POSTOPKI

Mehanski postopki predstavljajo pomembno fazo pri obdelavi iztrošenih PV modulov, saj omogočajo začetno ločevanje ključnih komponent brez uporabe kemikalij ali visokih temperatur. Ti postopki kot je razvidno iz slike 5.1 vključujejo drobljenje, rezanje in strganje steklenih ali polimernih plasti, kar omogoča ločitev plasti laminirane strukture modula in pripravo materialov na nadaljnjo obdelavo. Aluminijasti okvirji PV modulov se lahko mehansko odstranijo in enostavno reciklirajo z razmeroma nizko energetske porabo, ki znaša približno 8 MJ/kg [2, 26] medtem ko je poraba energije v primarni proizvodnji aluminija tudi do 200 MJ/kg [2, 27].

Po drobljenju je možno zrnate frakcije ločiti z elektrostatično ločitvijo. Gre za postopek, kjer se material razvršča na podlagi električne prevodnosti materiala s pomočjo elektrostatičnega separatorja. Ta postopek se uvršča med nizkoenergijske, saj ne zahteva dodatne uporabe reaktantov ter ne ustvarja odpadkov [2, 28]. Učinkovitost postopka elektrostatične ločitve je odvisna od številnih parametrov kot npr. temperature, napetosti, relativne zračne vlage in fizikalno-kemijskih lastnosti vhodnega materiala. Za zanesljivo delovanje je nujna natančna kalibracija električnega pola in prilagoditev napajalnih nastavitev sistema. Uporablja se tudi ločevanje z vrtinčnimi tokovi, ki temelji na razlikah v električni prevodnosti in geometriji delcev [2, 29].

Drobljenje PV modulov in nadaljnja uporaba pridobljenega stekla kot sekundarne surovine v proizvodnji *float* stekla predstavljata trenutno najpogostejše uporabljeni strategiji v industriji. Mešano steklo se po potrebi dodatno obdeluje s postopki sejanja in flotacije, ki so podobni tistim v rudarski industriji. Pri sejanju se delci razvrstijo glede na velikost, obliko in debelino, kar omogoča ločevanje silicijevih zrn s stopnjo učinkovitosti do 85 % [2, 30].

Japonsko podjetje Toho Kasei je razvilo mehanski postopek za odstranjevanje ne steklenih plasti iz izrabljenih PV modulov [2, 31]. V prvih dveh fazah procesa se mehansko odstrani zadnja zaščitna plošča ter EVA plast skupaj s silicijevimi celicami in elektrodami. Nadaljnja obdelava odstranjenega materiala poteka s pomočjo posebnega topila, ki omogoča ločitev komponent in pridobivanje posameznih surovin, vključno s silicijem, kovinami in polimernimi materiali.

Italijansko podjetje Tialpi je razvilo alternativni pristop, ki temelji na kombinaciji infrardečih grelnikov in vibracijskega noža za natančno mehansko ločevanje modulov [32]. Tehnologija omogoča visoko stopnjo reciklaže, saj je mogoče iz modula pridobiti do 98 % stekla, medtem ko se preostale plasti, ki jih ni mogoče mehansko ločiti, odstranijo s sežigom [2, 33].

Podjetje Mitsubishi je razvilo specializiran mehanski postopek za odstranjevanje stekla iz PV modulov, kjer je glavni cilj preprečiti kontaminacijo stekla z ostanki EVA folije. Proces vključuje natančno mehansko strganje steklene plasti, kar omogoča ohranitev kakovosti pridobljenega materiala. Tako pridobljeno steklo se nato filtrira in uporabi kot sekundarna surovina. Ostanek laminirane strukture, ki vsebuje manjšo količino stekla, se dodatno obdelava za pridobitev dragocenih kovin [2, 34].

V sodelovanju sta podjetji Hamada Co. in NPC Inc. razvili postopek za selektivno ločevanje EVA plasti z uporabo segretega rezalnega orodja [2, 35]. Postopek se prične z mehansko odstranitvijo aluminijastega okvirja s specializirano napravo, sledi pa strganje zadnje zaščitne plošče. V naslednji fazi se z vročim rezalnikom zareže v vezno ravnino med steklom in EVA plastjo znotraj laminirane strukture modula. Takšna tehnika omogoča natančno ločitev brez poškodb stekla in silicijevih celic ter predstavlja osnovo za nadaljnje postopke reciklaže posameznih komponent.

Podjetje Sasil S.P.A. je v okviru evropskega projekta Full Recovery End of Life Photovoltaic (FRELPE) razvilo celovit in tehnološko napreden postopek reciklaže PV modulov [2, 36]. Postopek se prične z mehansko odstranitvijo aluminijastega okvirja in priključnih omaric s pomočjo specializiranega stroja, kar omogoča pripravo modulov na nadaljnje faze razgradnje. Laminirana struktura PV modula se najprej segreje na temperaturo med 90 °C in 120 °C z uporabo infrardečega grelnika. Po segrevanju se modul vnese v kombinirano valjasto in vibracijsko rezalno napravo, ki omogoča ločitev stekla brez mehanskih poškodb. Preostali del PV modula se nato termično obdelava, sprva se segreje na 500 °C, nato pa sledi sežig pri 850 °C.

Odpadni plini, ki nastanejo pri termični razgradnji EVA folije, se vpeljejo v sistem rekuperacije toplote, kar izboljšuje energetska učinkovitost sistema. Po termični fazi sledi kemična obdelava ločenih kovin. Za pridobivanje silicija se uporablja postopek jedkanja z dušikovo kislino, medtem ko se za ekstrakcijo srebra in bakra uporabljata elektroliza in obdelava z raztopino kalcijevega hidroksida.

V okviru projekta Photolife je Univerza Sapienza iz Rima razvila avtomatiziran postopek mehanskega drobljenja PV modulov [2, 37]. Postopek vključuje ročno odstranitev aluminijastega okvirja, sledi samodejno drobljenje laminirane strukture ter ločevanje stekla in kovin. Preizkusili so dve drobilni metodi – osnovno dvorotorsko drobljenje ter kombinacija dvorotorskega drobljenja z nadaljnjim klavirnim mletjem, pri čemer se je slednja izkazala za učinkovitejšo. Nastali delci se nadalje obdelujejo glede na velikost:

- $d > 1$ mm: termična obdelava pri 650 °C za ločevanje polimerov,
- $1 \text{ mm} > d > 0,08$ mm: neposredno ločevanje stekla,
- $d < 0,08$ mm: hidro metalurška ekstrakcija kovin.

Podjetje La Mia Energia je v okviru projekta Photovoltaic Panels Mobile Recycling Devices (PV MOREDE) razvilo mobilni sistem za reciklažo PV modulov [2, 38]. Namen sistema je zmanjšanje volumna odpadnega materiala ter učinkovita ločitev stekla, polimerov in PV celic, kjer se vsa oprema lahko shrani v univerzalni zabojnik. Proces se začne z mehansko odstranitvijo aluminijastega okvirja in priključne omarice, sledi pa rezanje modulov na kose velikosti 100 x 100 mm. V prvi fazi mletja se fragmenti zdrobijo v zrna s premerom manjšim od 6 mm, ki se nato presejejo. Nato se v drugem klavirnem mlinu zmeljejo v delce manjše od 2 mm in razvrstijo v naslednje velikostne frakcije:

- $2 \text{ mm} > d > 0,5$ mm: groba frakcija bogata s polimeri in bakrom, katerega se odstrani z rotirajočim magnetnim poljem;
- $0,5 \text{ mm} > d > 0,315$ mm: steklo z nizko vsebnostjo silicija;
- $d < 0,315$ mm: steklo z visoko vsebnostjo silicija.

5.1.3 KEMIČNI POSTOPKI

Kemični postopki za reciklažo PV modulov so se razvijali že v zgodnjih fazah raziskave, vendar so se v praksi izkazali kot okoljsko obremenjujoči. Pogosto uporabljena topila kot so kalijev hidroksid, natrijev hidroksid, dušikova in klorovodikova kislina zahtevajo poseben nadzor nad ravnanjem z odpadno tekočino, organska topila pa imajo predolg reakcijski čas. Zaradi visoke cene reagentov ter kompleksnosti odstranjevanja odpadnih topil, se ti postopki v industrijskem merilu trenutno še ne morejo primerjati z mehanskimi ali termičnimi postopki.

Japonsko podjetje Yokohama Oils & Fats Industry je razvilo postopek kemične obdelave, ki se začne z mehansko odstranitvijo aluminijastega okvirja in priključne omarice [2, 39]. PV moduli se nato potopijo v nevtralno topilo, pri čemer se loči steklo, EVA folija, silicijeve celice in elektrodi. Pridobljeno steklo je nepoškodovano in je primerno bodisi za reciklažo bodisi za ponovno uporabo. Preostanek laminirane strukture se zdrobi in potopi v alkalno topilo za dodatno ločevanje materialov. Za izločanje srebra s površine silicija je potreben dodatni korak, postopek pa v celoti traja skoraj en dan. Čeprav je časovno zamuden, je postopek okoljsko sprejemljivejši zaradi uporabe manj agresivnih topil. Učinkovitost procesa bi se lahko dodatno izboljšala z vključitvijo mehanskih faz ločevanja kovin in stekla.

Korejski inštitut za kemijsko tehnologijo je v sodelovanju z Nacionalno univerzo Kangwon razvil alternativno metodo raztapljanja EVA folije, ki združuje uporabo organskega topila in tehnologijo ultrazvočnega obsevanja [2, 40]. Glavni namen metode je bil skrajšanje trajanja kemičnega postopka. Raztapljanje EVA folije je bilo izvedeno pri 70 °C z močjo ultrazvoka 900 W, kar je omogočilo ločitev nepoškodovanih silicijevih celic. Kljub temu pa je pri tem postopku za pridobitev kovin iz celic potrebna dodatna obdelava.

Nemško podjetje Loser Chemie je razvilo kemijsko metodo, ki vključuje uporabo polialuminijevega klorida in vode za pridobivanje aluminijevih elektrod s površine celic [2, 41]. Srebro se dodatno izloči z uporabo dušikove kisline. Polialuminijev klorid je pogosto porabljen v postopkih čiščenja odpadnih vod. Preostalo srebro pa se lahko raztopi z dušikovo kislino.

5.2 PREGLED KOMERCIALNIH RECIKLAŽNIH TEHNOLOGIJ

Danes se v Evropi uveljavlja predvsem mehanski postopek, zlasti za ločevanje in recikliranje stekla in dragocenih kovin iz kristalno silicijevih modulov. Komercialno razvita tehnologija trenutno ne vključuje ponovne predelave silicijevih celic v uporabo rezine, ker je neekonomsko. Večina pridobljenega stekla se reciklira kot nizkocenovno gradbeno steklo.

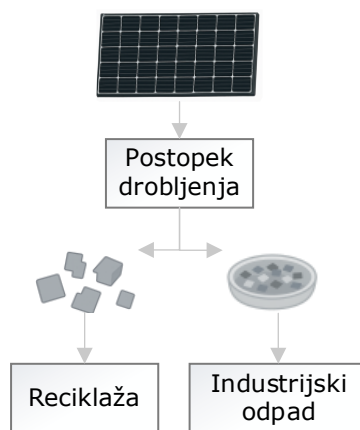
Še vedno pa potekajo nadaljnje raziskave in razvoj postopkov, ki bi omogočali:

- višjo stopnjo predelave,
- izboljšano kakovost izločenih materialov,
- krajši čas obdelave,
- večjo ekonomičnost.

5.2.1 TRADICIONALNI POSTOPEK RECIKLAŽE FOTONAPETOSTNIH MODULOV

V zadnjih letih potekajo intenzivne raziskave in razvoj na področju tehnologij za reciklažo PV modulov. Med uveljavljenimi pristopi prevladuje tradicionalni postopek reciklaže, kjer se PV moduli po zbiranju na določenih zbirnih mestih odpošljejo v specializirane obrate za obdelavo. V tovrstnih obratih se moduli najprej mehansko obdelajo, običajno s stroji za drobljenje, kjer se struktura razbije na delce z dimenzijami manjšimi od 3 cm. V nadaljnjih korakih ločevanja se izloči aluminij, ki ga je relativno enostavno reciklirati. Ta material se nato pošlje v obrate za reciklažo aluminija, kjer se segreje do vrelišča, odstranijo se primesi, nato pa je primeren za ponovno uporabo v industriji. Podoben postopek velja tudi za steklo, ki predstavlja velik masni delež PV modula. Odpadno steklo se transportira v steklarno, kjer se ponovno stali, odstranijo se nečistoče in se na ta način omogoči njegova uporaba v sekundarnih proizvodih.

Na sliki 5.2 je prikazana shema tradicionalnega postopka reciklaže PV modula.



Slika 5.2: Shema tradicionalnega postopka reciklaže PV modula.

Ena izmed ključnih pomanjkljivosti tradicionalnega postopka reciklaže PV modulov je njegov večji vpliv na okolje, saj ne omogoča celovite reciklaže vseh komponent. Medtem ko je reciklaža aluminija in stekla razmeroma preprosta, je bistveno težje učinkovito izločiti in predelati kovine. Dodatna omejitev procesa je tudi razgradnja polimernih komponent. V okviru tradicionalnega postopka se EVA folija in preostale kovine, ki jih ni mogoče ločiti, obravnavajo kot industrijski odpad. Ker za te materiale niso vzpostavljeni nadaljnji postopki reciklaže, se posledično odlagajo na odlagališčih, kar prispeva k obremenjevanju okolja [4, 42].

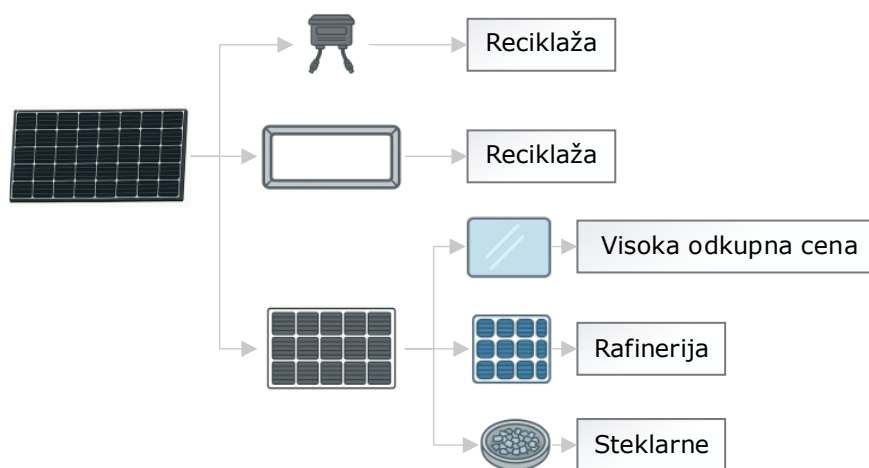
5.2.2 NAPREDNI POSTOPEK RECIKLAŽE FOTONAPETOSTNIH MODULOV

Sodobnejši postopek reciklaže PV modulov, ki je prikazan na sliki 5.3, se prične z mehansko odstranitvijo aluminijastega okvirja in priključne omarice z uporabo specializiranih naprav. Aluminijast okvir se preusmeri v

reciklažne obrate aluminija, medtem ko se priključne omarice obdelajo ločeno, saj so sestavljene iz umetne mase in bakra.

V primeru nepoškodovanih PV modulov, pri katerih je zaščitno steklo ohranjeno v enem kosu, se moduli obdelajo s posebno napravo imenovano vroči nož (angl.: *Hot knife*). Ta omogoča ločevanje stekla od PV celic tako, da ne poškoduje nobene od komponent. Ohranitev nepoškodovanega stekla je smiselna, saj ima takšno steklo na sekundarnem trgu višjo odkupno ceno. PV celice pridobljene po ločitvi se nato posredujejo v specializirane rafinerije, kjer se lahko iz njih izločijo dragocene surovine kot npr. srebro in silicij.

V primeru, da so PV moduli poškodovani zaradi toče, nepravilnega transporta, neustrezne demontaže ali drugih zunanjih vplivov, se steklo in PV celice obdelajo z postopkom drobljenja, podobno kot pri tradicionalnem postopku reciklaže PV modulov. Pridobljeno zdrobljeno steklo se posreduje v steklarne, kjer ima zaradi zmanjšane kakovosti tudi nižjo odkupno ceno [4, 42].



Slika 5.3: Shema naprednega postopka reciklaže PV modulov.

Prikazan postopek na sliki 5.3 je v primerjavi s tradicionalnim postopkom učinkovitejši, saj ima manjši vpliv na okolje, ker lahko recikliramo večji delež materialov PV modula.

5.2.3 KOMERCIJALNA RECIKLAŽNA PODJETJA

Leta 2017 sta Raziskovalni inštitut za električno energijo (EPRI) in Nacionalni laboratorij za obnovljive vire energije (NREL) objavila skupno poročilo o obstoječih postopkih reciklaže PV modulov v Evropi [2, 43]. Poročilo temelji na anketni analizi izvedeni med petimi evropskimi podjetji, ki se ukvarjajo z reciklažo PV modulov. Zaradi zahteve po anonimnosti podjetij podatki niso vključevali natančnih specifikacij uporabljenih tehnologij, vendar so kljub temu zagotovili dragocen vpogled v trenutno prakso.

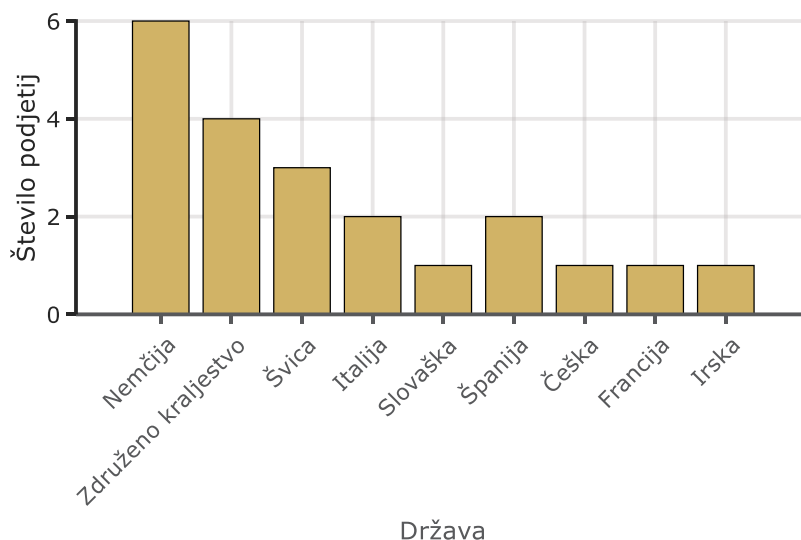
Od petih sodelujočih podjetij so štiri uporabljala mehanske metode ločevanja, medtem ko je eno podjetje implementiralo kombinirano metodo, ki združuje mehanske, kemične in termične postopke.

Ker so postopki prvih štirih podjetij med seboj precej podobni, je v samem poročilu podrobneje predstavljen postopek le enega od njih. Podjetje 1 najprej mehansko odstrani kable, priključno omarico in aluminijasti okvir. Pridobljen material, ki vključuje steklo, baker, polimere in aluminij se proda predelovalcem kovin po odstranitvi polimerov. Steklo in EVA folija pa se še dodatno ločijo od polimernega ostanka s pomočjo energije stisnjenega zraka.

Podjetje 5 pa uporablja integriran postopek reciklaže in dosega višje stopnje izkoristka in boljšo kakovost izločenih materialov. Po odstranitvi aluminijastih okvirjev in priključnih omaric PV modul segrejejo, da zmehčajo polimerne plasti. Nato s pomočjo vibracijskega noža ločijo steklo, ki se kasneje proda za nadaljnjo industrijsko uporabo. Preostanek, ki vključuje kovine in silicijeve PV celice se mehansko zdrobi, nato pa preseje. Nato sledi kemična obdelava z dušikovo kislino, ki omogoča popolno raztapljanje kovinskih komponent. Sicilij

se nato loči iz raztopine s filtracijo, medtem ko se srebro in baker izločita z elektrolitsko metodo. Preostanek raztopine, ki ni primeren za nadaljnjo obdelavo, se ustrezno odloži na odlagališče.

Na sliki 5.4 je prikazano število podjetij, ki se v posamezni državi znotraj Evropske Unije ukvarja z neposredno reciklažo PV modulov, zagotavljanjem opreme ali trgovanjem s pridobljenim materialom [44].



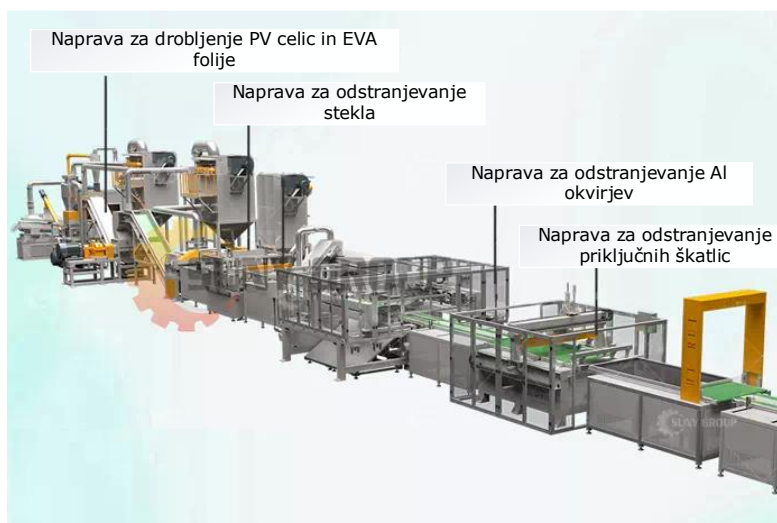
Slika 5.4: Evropska podjetja, ki se posredno ali neposredno ukvarjajo z reciklažo PV modulov [2].

5.3 PREGLED NAPRAV ZA RECIKLAŽO FOTONAPETOSTNIH MODULOV

V nadaljevanju sta predstavljena avtomatizirana postopka reciklaže PV modulov ter naprave, ki sodelujejo v procesu. Ker tehnologije reciklaže PV modulov še niso v celoti uveljavljene in so številni sistemi še v fazi razvoja, večina proizvajalcev tehničnih podrobnosti reciklažne opreme ne razkriva.

Med redkimi proizvajalci, ki javno objavljajo informacije o svojih tehnologijah, izstopata podjetji Suny Group in NPC Incorporated. Njuna avtomatizirana sistema dosegata visoko učinkovitost, saj omogočata reciklažo do 95 % materialov iz PV modulov, kar pomeni, da v postopku nastane le 5 % industrijskega odpadka.

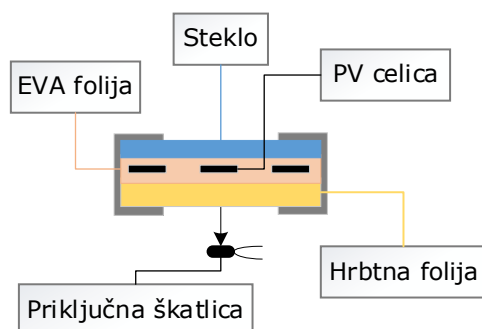
Slika 5.5 prikazuje primer reciklažne linije PV modulov podjetja Suny Group. Prikazana reciklažna linija omogoča reciklažo 40-80 PV modulov/uro [4, 45].



Slika 5.5: Reciklažna linija PV modulov podjetja Suny Group [45].

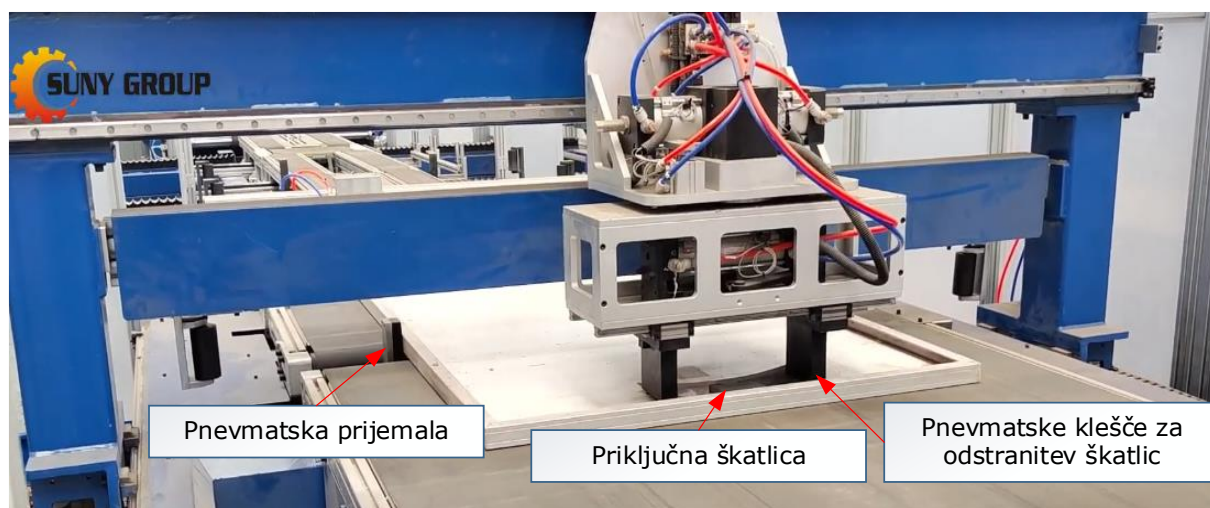
5.3.1 NAPRAVA ZA ODSTRANJEVANJE PRIKLJUČNIH ŠKATLIC

Kot je razvidno iz slike 5.5 je prva faza v postopku reciklaže PV modula odstranitev priključnih škatlic, kar je prikazano na sliki 5.6.



Slika 5.6: Shematski prikaz odstranjevanja priključne škatlice.

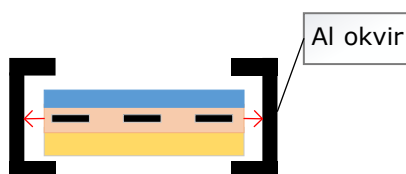
Priključne škatlice so ponavadi nameščene na zadnji strani modula in so nanj trajno pritrjene z lepilom. Odstranitev priključnih škatlic pa poteka v namenski avtomatizirani napravi. Operater najprej namesti PV modul na tekoči trak, ki PV modul transportira do pnevmatskih prijemal, ki so prikazana na sliki 5.7. Pnevmatika prijemala poravnajo PV modul in ga pripravijo na mehansko odstranitev priključne omarice. V zadnji fazi s pomočjo pnevmatskih klešč natančno ločijo priključno škatlico od PV modula in jo odložijo v za to predviden zbirni prostor. PV modul, ki mu je bila odstranjena priključna škatlica, se nato nadalje premika po tekočem traku proti naslednji fazi procesa, kjer se izvede odstranitev aluminijastega okvirja [4, 42, 46].



Slika 5.7: Naprava za odstranjevanje priključnih škatlic podjetja Suny Group [46].

5.3.2 NAPRAVA ZA ODSTRANJEVANJE ALUMINIJASTEGA OKVIRJA

Ko je iz PV modula odstranjena priključna omarica, se ta po tekočem traku premakne do naprave za odstranjevanje aluminijastega okvirja, kar je shematsko prikazano na sliki 5.8. Podobno kot pri predhodni fazi se tukaj PV modul s pomočjo pnevmatskega prijemala najprej postavi v pravilen položaj. Modul se nato dvigne do višine klešč s pomočjo hidravlične mize. Ob doseženi ustrezni višini se klešče približajo modulu, objamejo aluminijast okvir in ga mehansko iztrgajo z ene strani. Hidravlična miza modul rotira za 180° ter postopek ponovi še za preostali del okvirja. Po uspešni odstranitvi se aluminijast okvir odloži v namenski zbirni zaboj. PV modul brez okvirja pa nadaljuje pot po tekočem traku proti fazi, kjer se izvede ločitev stekla z uporabo vročega noža [4, 46].



Slika 5.8: Shematski prikaz odstranjevanja aluminijastega okvirja.

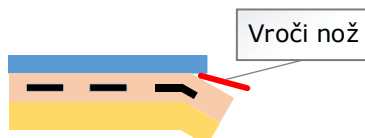
Slika 5.9 prikazuje napravo za odstranjevanje aluminijastega okvirja.



Slika 5.9: Naprava za odstranjevanje aluminijastega okvirja podjetja Suny Group [46]

5.3.3 NAPRAVA ZA LOČITEV STEKLA OD FOTONAPETOSTNIH CELIC

Po odstranitvi priključne škatlice in aluminijastega okvirja se PV modul po tekočem traku premakne do naprave za ločevanje stekla od PV celic. Ker ima nepoškodovano steklo višjo odkupno tržno ceno kot drobljeno, podjetja stremijo k uporabi tehnologij, ki to omogočajo. Ena takšnih metod je uporaba vročega noža, ki odstrani steklo brez mehanskih poškodb in je shematsko prikazana na sliki 5.10.



Slika 5.10: Shematski prikaz ločitve stekla od PV celic.

Naprava za ločevanje stekla uporablja rezilo, ki je segreto na približno 300 °C in prodre med stekleno ploščo in PV celice. V tem postopku termično razgradi EVA folijo, na ta način pa pridobimo nepoškodovano steklo, ki se lahko pošlje v nadaljnjo predelavo v steklarne in PV celice, ki se usmerijo v nadaljnje faze reciklaže in ekstrakcije materialov [4, 46].

5.3.4 NAPRAVA ZA DROBLJENJE FOTONAPETOSTNIH CELIC

Po uspešni ločitvi stekla se PV celice transportirajo v napravo za mehansko drobljenje, kar prikazuje slika 5.11. V tej fazi se s pomočjo specializiranih drobilcev in rezalnikov celice razrežejo na manjše fragmente velikosti približno 5-6 cm. Ti delci nato potujejo v fini drobilec, ki deluje v podtlaku. Konfiguracija finega drobilca omogoča razvrščanje delcev po velikosti. V primeru, da posamezni delec ne dosega ustreznih dimenzij, se ta vrne nazaj v sistem za dodatno obdelavo. Ko so delci ustrezno razvrščeni po velikostnih frakcijah, so pripravljeni za nadaljnji korak – obdelavo v zračnem ločilniku [4, 46].



Slika 5.11: PV celice pred postopkom drobljenja [4].

5.3.5 ZRAČNI LOČILNIK

V tej fazi postopka se uporablja zračni tok za ločitev materialov glede na njihovo gostoto in velikost delcev. Zmleti material se dovede v zračni separator, kjer ventilatorji in usmerjeni zračni tokovi delce razvrstijo po fizikalnih lastnostih. V separatorju se delci lažjih materialov (npr. plastika, lahka kovina) ločijo tako, da se odlagajo na eni strani, medtem ko težji delci (npr. steklo, silicij, težke kovine), zaradi večje mase padejo na dno ali se usmerijo v drugo smer.

Vsaka frakcija se nato zbira v ločenem zbirnem zabojniku za vsak material posebej, kar omogoča njihovo nadaljnjo obdelavo v ustreznih rafinerijskih ali predelovalnih obratih [4, 46].

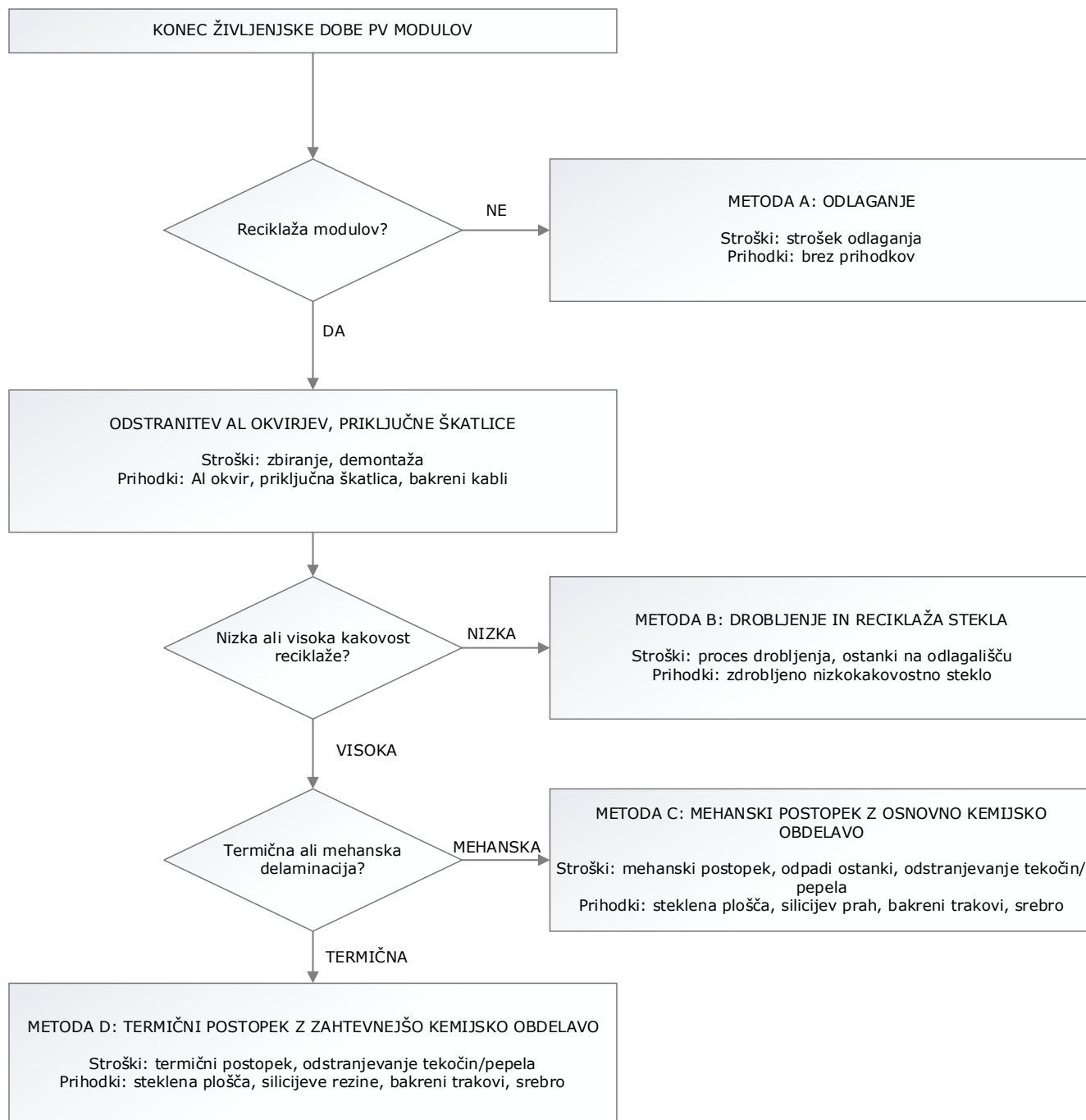
5.3.6 ELEKTROSTATIČNI LOČILNIK

Zaključna faza razgradnje PV modula poteka v elektrostatičnem ločilniku, kjer se ločujejo še zadnje zmesi kovin in polimernih materialov. Postopek temelji na uporabi elektrod, ki delce električno nabijajo. Glede na električne lastnosti materialov delci prejmejo različno električno nabitost. Nabiti delci nato prehajajo skozi električno polje, kjer se zaradi svojega naboja ločujejo glede na smer gibanja. Prevodni materiali (kovine) se na ta način lahko učinkovito ločijo od neprevodnih snovi (steklo, EVA folija) [4, 46].

5.4 PRIMERJAVA UČINKOVITOSTI RAZLIČNIH METOD

Reciklaža odpadnih PV modulov predstavlja ključen korak v smeri trajnostnega upravljanja virov in krožnega gospodarstva. Avtorji [47] so obravnavali naslednje metode obdelave, ki so shematsko prikazane na sliki 5.12:

- odlaganje na odlagališču (metoda A);
- reciklaža stekla (metoda B);
- mehanska reciklaža z osnovno kemijsko obdelavo (metoda C) ter
- termična reciklaža z napredno ločitvijo materialov (metoda D).



Slika 5.12: Shematski prikaz različnih možnih pristopov reciklaže PV modulov.

Metoda A ali odlaganje na odlagališče predstavlja osnovni scenarij, ki ne vključuje reciklaže. Gre za okoljsko najbolj sporno rešitev, ki ne omogoča krožnega gospodarstva dragocenih materialov. Prednost te metode je nizka cena, v primeru da ni zakonskih omejitev ali pa davčnih spodbud.

Metoda B ali reciklaža stekla je preprosta in v določenih pogojih ekonomsko upravičena alternativa. Omogoča ločevanje in nadaljnjo uporabo aluminijastih okvirjev ter pridobitev večinskega dela stekla. Vendar pa pri tem postopku ostanejo ključne komponente kot npr. silicij, baker itd. brez možnosti pridobitve. Metoda je primerna tam, kjer je cilj osnovna reciklaža PV modulov z minimalnim vložkom.

Metoda C ali mehanska reciklaža z osnovno kemijsko obdelavo predstavlja nadgradnjo osnovne reciklaže, saj vključuje tudi ločevanje z drobljenjem in dodatno selektivno kemično obdelavo. Ta metoda omogoča višji izplen

dragocenih komponent, vendar gre za kompromis med tehnično zahtevnostjo in ekonomičnostjo. Metoda je energetskega manj potratna kot termična reciklaža, vendar ne omogoča popolne regeneracije silicijevih rezin. Ta metoda predstavlja najbolj realističen pristop za industrijsko uporabo.

Metoda D ali termična reciklaža z napredno ločitvijo materialov pa omogoča pridobitev največjega deleža materialov z visoko čistostjo. Proces vključuje segrevanje modulov, odstranjevanje EVA folije ter nadaljnjo kemično ekstrakcijo. Gre za tehnološko najučinkovitejši, vendar stroškovno najzahtevnejši proces. Po ocenah postane ta metoda ekonomsko smiselna šele pri tržni vrednosti recikliranega silicija, višji od 350 \$/t ali pa v primeru, da se stroški postopka znižajo pod 800 \$/t. Dodaten izziv pa predstavljajo emisije, ki nastajajo kot stranski produkt termične obdelave, kar bi se dalo rešiti z uporabo napredne filtracijske opreme.

Z vidika okoljske učinkovitosti so mehanske in termične metode zmanjšale vpliv na globalno segrevanje za 40% - 70 % v primerjavi z reciklažo stekla, ker omogočajo bistveno večji povratek surovin v krožno gospodarstvo. Kemična metoda, ki se pogosto kombinira s termično, ima visok faktor pridobitve materialov, vendar pa hkrati najbolj obremenjuje okolje zaradi uporabe agresivnih reagentov in ima predolg procesni čas.

5.5 RAZVOJ NOVIH TEHNOLOGIJ ZA POVEČANJE UČINKOVITOSTI RECIKLAŽE

Za izboljšanje postopkov reciklaže PV modulov je bilo izvedenih več razvojno-raziskovalnih projektov. Tehnologije reciklaže za različne tehnologije modulov vključujejo različne vidike zaradi razlik v strukturi modulov in vsebnosti kovin, zato je potreben različen pristop za posamezne vrste tehnologije.

Pri kristalno silicijevih PV moduli se v Evropi trenutno komercialno uporablja mehanski postopek, ki vključuje drobljenje in sortiranje. Kovine se nato pridobijo iz preostalih ločenih materialov z dodatnimi postopki. Kljub temu je zmogljivost obdelave odpadnih PV modulov razmeroma majhna. Zmogljivost obdelave teh odpadnih modulov je še vedno omejena, zato razvojno-raziskovalni projekti stremijo k vzpostavitvi ekonomsko učinkovitih postopkov z višjo stopnjo izkoristka pridobljenih materialov ter izboljšano kakovost recikliranih surovin.

Eden najzahtevnejših korakov v reciklažnem procesu je odstranjevanje EVA plasti, ki predstavlja enkapsulant PV celic. Ključni izziv je razvoj metode, ki omogoča ločevanje celic brez mehanskih poškodb. Testirani so bili različni kemijski postopki, kot je uporaba dušikove kisline, ki pa ima dolg reakcijski čas (približno 24 ur) in povzroča poškodbe elektrod [49]. Uporaba organskih topil (toluen, benzen, trikloroeten) se je izkazala za še manj učinkovito zaradi izjemno dolgega časa obdelave [50]. Alternativa je ultrazvočna obdelava, ki pa je energetskega neučinkovita [51]. Termična razgradnja EVA ostaja najpogostejše uporabljena metoda, vendar pogosto povzroča toplotne poškodbe celic [52-54]. V primeru, da je mogoče iz reciklažne linije pridobiti nepoškodovane celice, jih je mogoče predelati v nove rezine. Vendar pa je predhodno potrebna odstranitev elektrod, antirefleksivnega sloja in drugih slojev. Za te postopke se uporabljajo kemikalije, kot so vodikov fluorid, dušikova kislina, kalijev hidroksid in fosforjeva kislina [55-56].

Pomembno vlogo pri izboljšanju učinkovitosti reciklaže ima tudi zasnova PV modulov. Zlasti zadnja plast vpliva na stroškovno učinkovitost in okoljsko sprejemljivost. Pogosta uporaba fluoro-polimera PVF v kristalnih silicijevih moduli povzroča emisije nevarnih fluoriranih plinov med termično obdelavo, kar povečuje stroške in omejuje razpoložljive metode reciklaže [57]. Zmanjševanje vsebnosti fluora je zato prednostno, saj zmanjša potrebo po reagentih za nevtralizacijo, zmanjša korozivnost izpušnih plinov ter omogoči višjo vrednost izhodnih materialov. Razvoj alternativnih materialov je že v teku, ključen trend pa je nadomestitev zadnje plasti s steklom. Pri tem pa je pomembno tudi vprašanje delne odstranitve fluorirane plasti. Nedavne raziskave [58-59] in pretekli pilotni projekt [60] predlagajo brušenje zgornjega sloja zadnje plasti kot izvedljivo strategijo za odstranitev 50 µm debeline, kjer se večina fluora nahaja [61]. Ta pristop omogoča nižje stroške in hitrejši pretok v primerjavi z mehansko odstranitvijo celotne plasti. V Nemčiji trenutno poteka pilotni projekt, ki dokazuje, da je piroliza fluoriranih zadnjih plasti PV modula izvedljiva na industrijskem nivoju. Z dodatkom zgorevalne enote pirolizno olje, ki vsebuje fluor, dodatno zgori, kar omogoča boljši energetski izkoristek in kontrolirano obdelavo izpušnih plinov [62].

Tudi za reciklažo tankoplastnih modulov, kot sta CdTe in CIGS, je potreben prilagojen pristop. Ti moduli vsebujejo okoljsko problematične elemente, kot so kadmij, telur in indij. Zaradi toksičnosti kadmija je uporaba kombiniranih mehansko-kemičnih metod nujna. Podjetje First Solar je primer dobre prakse, saj v istem objektu integrira proizvodnjo in reciklažo. Njihov postopek vključuje drobljenje, kemično raztapljanje, separacijo stekla in EVA ter obarjanje kovin z natrijevim hidroksidom. Učinkovitost znaša 90 % za steklo in 95 % za polprevodniške materiale [63].

Nazadnje je vredno omeniti tudi povezane trende v industriji rafiniranja bakra. Zaradi povečane prisotnosti bizmuta v rudah se industrija usmerja v razvoj postopkov za pridobivanje Bi kot tržno zanimivega stranskega produkta. Ker se Bi pojavlja kot nadomestek za svinec v PV spojih, lahko napredki v tem sektorju pozitivno vplivajo na reciklažne tokove in ekonomsko učinkovitost [64-66].

6 EKONOMSKA ANALIZA RECIKLAŽE

Več avtorjev je na podlagi analiz procesov reciklaže PV modulov ugotovilo, da ti postopki še vedno niso ekonomsko upravičeni [2, 67]. V praksi se številna podjetja osredotočajo predvsem na reciklažo tankoplastnih PV modulov, saj ti vsebujejo večjo koncentracijo dragocenih materialov in tako omogočajo višjo donosnost. Nasprotno pa kristalno silicijevi PV moduli vsebujejo razmeroma malo dragocenih surovin [2, 67], ob tem pa so stroški njihove reciklaže bistveno višji.

Ekonomska vzdržnost obrata, ki se ukvarja izključno z reciklažo odpadnih PV modulov je v veliki meri odvisna od obsega predelave. Analize so pokazale, da se dobičkonosnost praviloma doseže šele pri obratih, ki letno obdelujejo najmanj 20.000 ton PV modulov [2, 68].

6.1 PREGLED STROŠKOVNA ANALIZA RAZLIČNIH RECIKLAŽNIH METOD

Avtorji [2, 67-70] poudarjajo, da je ekonomska uspešnost reciklaže PV modulov odvisna od obsega predelave. Analize kažejo, da obdelava manjših količin kot npr. 3.000 t/leto ne ustvarja zadostnih prihodkov za pokritje obratovalnih stroškov. Nasprotno pa povečanje kapacitete na 30.000 t/leto izboljša ključne ekonomske kazalnike. Avtorji so uporabili različne modele za stroškovno analizo, pri čemer je najpogostejše uporabljena metoda analize denarnih tokov. Čeprav aluminij predstavlja zgolj 10,3 % masnega deleža modula [13], njegova visoka tržna vrednost prispeva približno dve tretjini skupnih prihodkov iz reciklaže. Poleg aluminija pomemben delež prihodkov izhaja tudi iz recikliranega stekla, medtem ko baker prispeva približno 9 % celotnega prihodka. Ugotovimo lahko, da je ekonomska upravičenost reciklažnega obrata tesno povezana s tržno vrednostjo posameznih sekundarnih surovin in učinkovitostjo pridobitve posameznih materialov v postopku reciklaže.

Analiza, ki so jo izvedli avtorji [70] prikazuje primer reciklažnega centra s kapaciteto 2000 t/leto, kar ustreza približno 26,7 MW inštalirane moči PV sistemov. V oceni so bile podrobno analizirane različne komponente stroškov in prihodkov, s posebnim poudarkom na mehanski obdelavi in pridobivanju sekundarnih surovin kot sta aluminij, steklo, baker in silicij, kar prikazuje tabela 6.1.

Tabela 6.1: Vhodni podatki za analizo stroškov reciklaže PV modulov [70].

Spremenljivka	Vrednost
Strošek zbiranja na enoto	210 €/t
Strošek predaje materiala na enoto	90 €/t
Investicijski strošek na enoto	270 €/t
Procesni strošek na enoto	320 €/t
Davčni strošek na enoto	36 %
Letna inflacija	2 %
Tržna cena recikliranega aluminija	1,6 €/kg
Tržna cena recikliranega bakra	4,9 €/kg
Tržna cena recikliranega silicija	1,4 €/kg
Tržna cena recikliranega stekla	0,1 €/kg

Na podlagi navedenih vhodnih podatkov so avtorji izvedli ekonomsko oceno s pomočjo metode diskontiranega denarnega toka (angl.: *Discounted Cash Flow*), kjer so upoštevali 10-letno življenjsko dobo obrata ter letno inflacijo. V izračunih so vključili vse glavne stroškovne postopke kot npr. zbiranje, mehanska obdelava, predaja materiala, investicija, davki. Prihodki pa so temeljili na prodaji recikliranih surovin (aluminij, baker, silicij in steklo) po tržnih cenah.

Rezultati osnovnega ekonomskega scenarija kažejo na negativno neto sedanjo vrednost (NSV) v višini -1.688.00 €, kar pomeni -0,84 €/kg odpadnih PV modulov. Tudi v primeru rasti cen sekundarnih surovin ali zmanjšanja stroškov procesov, NSV ni dosegla pozitivne vrednosti. Pri najugodnejšem scenariju je bila vrednost NSV v višini -0,50 €/kg, medtem ko se je v pesimističnem scenariju poglobila na -1,19 €/kg. Vračilo investicije presega 10 let, kar pomeni, da se naložba v življenjski dobi obrata (10 let) ne povrne. Struktura stroškov je pokazala, da največji delež stroškov predstavljajo postopki mehanske obdelave (56 %) in zbiranje odpadnih modulov (37 %). Glavni rezultat avtorjev je razkril, da bi za doseganje ekonomske upravičenosti procesa bila nujna obravnava večjega obsega obdelave. Po njihovih ocenah naj bi bila minimalna donosna kapaciteta > 20.000 ton/leto. Predlagali so tudi, da bi bilo smiselno za izboljšanje rezultatov vključiti tudi druge tipe PV modulov z višjo vsebnostjo dragocenih kovin, izboljšati mehanske postopke za doseg višje čistosti recikliranih materialov ter optimizirati logistične stroške (zbiranje PV modulov in transport).

6.2 MOŽNOSTI ZA FINANČNO VZDRŽNOST RECIKLAŽNE INDUSTRIJE V SLOVENIJI

Vzpostavitev celovitega sistema za reciklažo PV modulov v Sloveniji predstavlja pomemben izziv, a hkrati tudi priložnost za dolgoročno krožno gospodarstvo. Eden ključnih korakov k temu cilju je ocena stroškovne učinkovitosti že obstoječih in komercialno dostopnih tehnoloških rešitev.

V nadaljevanju je predstavljena analiza naprave, ki temelji na mehanskem postopku reciklaže. Sistem omogoča delno avtomatizirano obdelavo PV modulov, pri čemer začetni korak zajema odstranitev aluminijastega okvirja in priključne škatlice s pomočjo šestih hidravličnih prijemal. Kljub avtomatizaciji mora operater okvir in omarico ročno odstraniti. Čas obdelave posameznega modula v tem koraku znaša približno 60 sekund. Sledi vzdolžni rez PV modula ter večstopenjski proces razslojevanja stekla z zobatimi valji, ki omogočajo postopno drobljenje v delce velikosti med 0,1 mm in 4 mm. Sistem vključuje tudi računalniški vmesnik, ki shranjuje ključne podatke o vsakem modulu (znamko, debelino, serijsko številko). Preostali del modula se nato razreže na manjše kose približno 10 mm in se mehansko ločujejo v tristopenjskem separatorju. Na izhodu naprava omogoča ločeno pridobitev plastike (6-10 mm), mešanice bakra in aluminija (1,5-3 mm) in silicijeve nanodelce (0,01 mm). Za pridobitev silicija bi bilo potrebno nadaljevanje s kemijskimi postopki, kar pa naša ocena ne vključuje.

Ekonomski potencial naprave temelji na tržnih vrednostih pridobljenih materialov, ki ga prikazuje tabela 6.2.

Tabela 6.2: Cena recikliranega materiala [2].

Ime materiala	Povprečna cena [€/tono]
Steklo	60,00
Aluminij	2.500,00
Baker	8.500,00

Iz tabele 6.2 je razvidno, da ima med recikliranimi materiali najvišjo povprečno tržno vrednost baker, sledita pa mu aluminij in steklo. V kolikor bi bila v proces vključena še dodatna separacija in predelava preostalih dragocenih komponent (srebro, silicij itd.), bi bil potencialni prihodek reciklažnega postopka bistveno višji. Na realizirani prihodek iz materialov, navedenih v tabeli 6.2 se je pri stroškovni analizi upošteval 22 % davek.

Obravnavana naprava omogoča obdelavo približno 45 PV modulov na uro. Ob predpostavki dvoizmenskega obratovanja 240 dni v letu to pomeni letno zmogljivost približno 86.400 PV modulov. Naprava ima nazivno priključno moč 135 kW, začetna investicija v sistem pa znaša 1.000.000 €.

Tabela 6.3 prikazuje seznam komponent, ki jih je treba redno vzdrževati, skupaj s predvideno frekvenco menjave in ocenjenimi letnimi stroški.

Tabela 6.3: Letno vzdrževanje posameznih komponent [2].

Komponenta	Frekvenca menjave	Perioda menjave	Letni strošek [€]
Glavni valj za delaminacijo	2	letno	4.800,00
Strgalo za valj (4 enote)	6	letno	5.040,00
Okvir strgala (4 enote)	1	letno	1.120,00
Plošče drobilnika	3	letno	6.300,00
Lopatice turbine	4	letno	5.600,00
Ohišje turbine	2	letno	3.800,00
Rezilo	1	letno	450,00
Zobniki	1	3 leta	2.490,00

Tabela 6.4 prikazuje fiksne obratovalne stroške, ki so bili upoštevani pri nadaljnji stroškovni analizi.

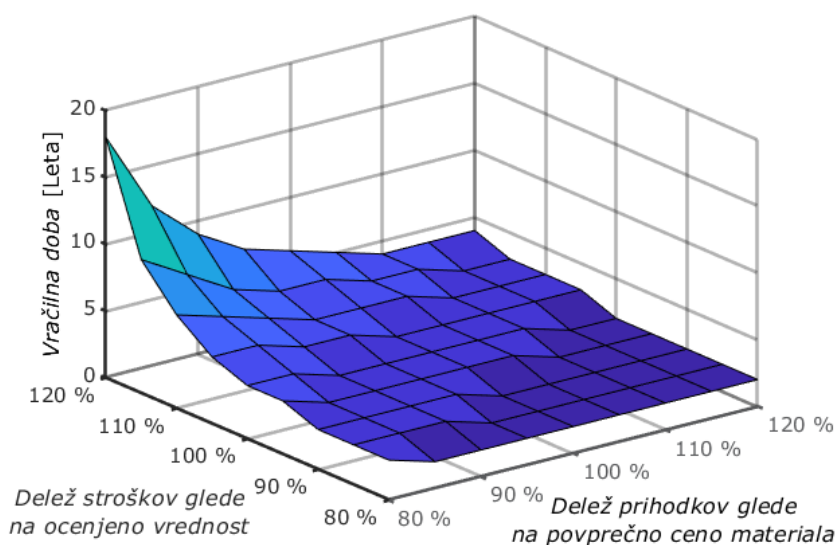
Tabela 6.4: Fiksni obratovalni stroški [2].

Storitev	Cena [€/leto]
Vzdrževanje naprave (delo in komponente)	74.000,00
Povprečna plača za 10 oseb	360.000,00
Vodenje podjetja	40.000,00
Elektrika	122.000,00
Preostali stroški	254.000,00
Skupaj	850.000,00

Vrednosti prikazane v tabeli 6.4 temeljijo na predpostavki dvoizmenskega delovanja naprave, torej 16 ur dnevnega obratovanja. Za zagotavljanje nemotenega delovanja v tem režimu je bila ocenjena potreba po skupno desetih zaposlenih, razporejenih po naslednjih delovnih nalogah:

- trije operaterji za upravljanje naprave,
- štiri osebe za zbiranje in transport PV modulov,
- ena oseba za nadzor in koordinacijo delovnega procesa,
- ena oseba za izvajanje finančnih in kadrovskih nalog,
- ena oseba za upravljanje skladišča PV modulov.

Na sliki 6.1 je prikazana vračilna doba investicije v odvisnosti od deleža stroškov in deleža prihodkov.



Slika 6.1: Vračilna doba investicije v odvisnosti od deleža stroškov in deleža prihodkov [2].

Pri načrtovanju in ocenjevanju investicije v tehnologijo za reciklažo PV modulov je eden izmed ključnih parametrov vračilna doba investicije, ki neposredno odraža čas potreben za povrnitev vloženih sredstev. Iz slike 6.1 je razvidno, da se vračilna doba investicije znižuje v primeru, ko stroški padejo pod 100 % ocenjene vrednosti, medtem ko prihodki presežejo povprečne tržne vrednosti recikliranih surovin. V optimalnem primeru, ko stroški znašajo 80 % ocene, prihodki pa dosežejo 120 %, se vračilna doba investicije skrajša na približno 1 do 2 leti. Nasprotno pa kombinacija višjih stroškov in nižjih prihodkov povzroči podaljšanje vračilne dobe. Ob 120 % stroškov in 80 % prihodkov se vračilna doba investicije lahko povzpne nad 15 let, kar investicijo postavlja pod vprašaj z vidika njene ekonomske učinkovitosti. Tudi manjši porast stroškov poslabša kazalnik vračilnosti, enakovreden padec prihodkov pa ne povzroči tako drastičnega vpliva. Za zagotavljanje pozitivnega ekonomskega izida je bistveno, da se stroški obratovanja in vzdrževanja strogo nadzirajo, saj predstavljajo glavni vir finančnega tveganja.

6.3 SPODBUDE, FINANČNI INSTRUMENTI IN POSLOVNI MODELI ZA RECIKLAŽO

S hitro rastjo inštalirane moči PV sistemov narašča tudi količina odpadnih PV modulov, ki jih bo potrebno ustrezno obdelati ob izteku njihove življenjske dobe. Zaradi tega postaja vzpostavitev trajnostno naravnanih sistemov reciklaže eden ključnih izzivov prihodnjih desetletij. Za zagotovitev dolgoročne izvedljivosti in ekonomske vzdržnosti tovrstnih sistemov je nujna podpora z ustreznimi regulativnimi in finančnimi mehanizmi.

Eden osrednjih regulativnih instrumentov je EPR, ki nalaga proizvajalcem pravno obveznost, da zagotovijo fizično in/ali finančno prevzemanje odgovornosti za ravnanje z njihovimi izdelki tudi po izteku njihove življenjske dobe. Cilj EPR je spodbujanje trajnostno naravnane ekodizajna ter učinkovitejšega zbiranja, predelave in reciklaže. Proizvajalci morajo v okviru EPR izpolnjevati vrsto zahtev, vključno z registracijo, označevanjem izdelkov, organizacijo logističnih tokov odpadkov ter obveščanjem končnih uporabnikov.

Poleg regulativnih pristopov so za pospeševanje razvoja reciklažne infrastrukture ključnega pomena tudi neposredne finančne spodbude. Mednje sodijo subvencije, nepovratna sredstva in davčne olajšave, ki zmanjšujejo tveganje zasebnih naložb v reciklažne tehnologije ter spodbujajo tehnološke inovacije. Poseben pomen imajo davčne olajšave, ki podjetjem omogočajo zmanjšanje investicijskih stroškov za vzpostavitev trajnostnih proizvodnih in reciklažnih zmogljivosti. Na drugi strani pa lahko finančne sankcije za odlaganje neobdelanih PV modulov delujejo kot posredni ukrep za povečanje deleža recikliranih komponent.

Dobri primeri tovrstne prakse so razvidni iz ZDA, kjer podjetja, kot sta Cleanlites Recycling in Dynamic LifeCycle Innovations, širijo svoje dejavnosti na področje reciklaže PV modulov in s tem ustvarjajo nove vire prihodkov s prodajo recikliranih surovin. Poslovni modeli vključujejo tudi interno kroženje lastnih proizvodnih odpadkov (npr. iz garancijskih vračil), s čimer se znižujejo proizvodni stroški in izboljšuje tržna konkurenčnost ob hkratnem spoštovanju okoljskih standardov.

K dodatnemu razvoju industrije prispevajo tudi pomožne pobude, kot je nacionalni program reciklaže PV modulov pod okriljem SEIA (angl.: *Solar Energy Industries Association*), ki promovira vzpostavljanje infrastrukture za reciklažo in spodbuja uporabo prostovoljnih certifikacijskih shem, kot je standard NSF/ANSI 457. Takšni mehanizmi so še posebej dragoceni za manjše proizvajalce, saj jim omogočajo dostop do strukturiranih reciklažnih tokov ter s tem večjo okoljsko odgovornost. Povzeto po [71].

7 OKOLJSKI VPLIVI IN TRAJNOSTNI VIDIKI

Ocena okoljske obremenitve PV modulov ne more biti izvedena brez upoštevanja ravnanja s PV moduli ob koncu njihove življenjske dobe. PV moduli imajo velik reciklažni potencial tako v sistemih reciklaže zaprte zanke (angl.: *Closed-loop*), kjer se materiali iz izrabljenih PV modulov ponovno uporabijo za nove PV module, kot tudi v sistemih odprto-zaprte zanke (angl.: *Open closed-loop*), kjer se reciklirani materiali uporabijo v drugih proizvodih. Povzeto po [72].

7.1 OCENA OKOLJSKEGA ODTISA RECIKLAŽE FOTONAPETOSTNIH MODULOV

Ocena okoljskega odtisa PV modulov se začne z analizo vplivov, ki nastajajo v fazi proizvodnje. Ogljični odtis predstavlja skupno količino toplogrednih plinov (TGP), ki se neposredno ali posredno sprostijo v ozračje skozi celoten življenjski cikel izdelka. Običajno se izraža v tonah ekvivalenta ogljikovega dioksida (tCO_2eq) in zajema vse faze: od pridobivanja surovin, prek proizvodnje in uporabe, do odstranitve oziroma reciklaže produkta.

Pri PV moduli največji delež ogljičnega odtisa izhaja iz faze proizvodnje, predvsem zaradi energetske zahtevnih postopkov kot so proizvodnja polisilicija, rezanje rezin, izdelava PV celic ter sestava modulov.

Proizvodnja zahteva zelo visoke temperature, ki so pogosto dosežene z uporabo fosilnih goriv. Natančen ogljični odtis je odvisen od uporabljene tehnologije in lokacije proizvodnje, vendar študije ocenjujejo, da znaša med 40 in 100 gramov CO_2 na proizvedeno kilovatno uro električne energije ($g CO_2/kWh$). Povzeto po [73].

V tabeli 7.1 je prikazan ogljični odtis posameznih materialov uporabljenih pri proizvodnji PV modulov iz primarnih snovi.

Tabela 7.1: Ogljični odtis posameznih materialov [73].

Material	$CO_2 eq/kg$	Povprečna masa v modulu [kg]	Emisije CO_2 na modul [kg]
Steklo	0,75	15-18	11-13,5
Aluminij	2,60	2-2,5	5,2-6,5
Polimer	0,70	1,3-1,5	0,9-1,1
Proizvodnja silicija	2,00	0,6-0,7	1,2-1,4
Čiščenje silicija	30,00-35,00	0,6-0,7	18-25,5

Skupni ogljični odtis reciklažnega procesa za tipični 60-celični kristalni modul znaša nekje med 2 in 5 $CO_2eq/modul$, odvisno od razmerja med mehanskim in termičnim postopkom ter uporabljene energije v obratu.

7.2 POMEN RECIKLAŽE ZA KROŽNO GOSPODARSTVO IN TRAJNOSTNO RABO VIROV

Reciklaža PV modulov predstavlja enega ključnih dejavnikov pri prehodu iz linearnega modela v krožno gospodarstvo, kjer se dragoceni materiali sistematično vračajo v osnovni cikel. S tem se bistveno zmanjša pritisk na naravne vire, emisije TGP ter energetska intenzivnost proizvodnih procesov. Hkrati predstavlja učinkovito strategijo za zmanjšanje energetske porabe, ki je sicer visoka pri proizvodnji osnovnih surovin. Med temi izstopa silicij, katerega proizvodnja velja za eno izmed najbolj energetske in okoljsko obremenjujočih v celotni verigi PV tehnologije. Povzeto po [2, 8, 27, 74].

Primarna proizvodnja aluminija, ki se uporablja za okvirje PV modulov, zahteva približno 200 MJ energije na kilogram, medtem ko je poraba energije pri reciklaži aluminija zgolj 8 MJ/kg, kar predstavlja več kot 50 % prihranek [2, 27]. Recikliranje stekla pa omogoča približno 40 % zmanjšanje porabe energije v primerjavi s proizvodnjo iz primarnih surovin [26].

Kljub pozitivnim vplivom se industrija PV sooča s številnimi izzivi pri pridobivanju ključnih surovin kot so silicij, srebro, aluminij in baker. Po podatkih ameriškega ministrstva za energijo (DOE – angl.: *Department of Energy*) se le približno 12 % svetovno proizvedenega silicija metalurške kakovosti pretvori v polisilicij, ki je osnovni material za proizvodnjo PV celic. Pri tem ima Kitajska prevladujočo vlogo, saj proizvede približno 70 % svetovnega metalurškega silicija in kar 77 % vsega polisilicija. Pretvorba v polisilicij visoke čistosti poteka pri ekstremno visokih temperaturah, kar pomeni tudi izjemno visoko porabo energije.

Baker se sooča s primerljivimi težavami, po ocenah IEA naj bi se njegovo povpraševanje po scenariju popolnega prehoda na OVE potrojilo.

Dodatno omejitev predstavlja časovna zakasnitev pri vračanju materialov, saj je povprečna življenjska doba PV modulov približno 25 let, kar pomeni, da bo kroženje materialov mogoče šele čez več desetletij. Zato je poleg učinkovite reciklaže nujno tudi zmanjševanje absolutne porabe materialov, če želimo zagotoviti zadostne količine za dolgoročno naraščajoče potrebe po PV tehnologijah. Povzeto po [2, 75].

Podobno velja za srebro, ki se ga v PV industriji porabi približno 10 % svetovne letne proizvodnje. Če se bo nadaljeval razvoj v skladu z obstoječo tehnologijo in trenutnimi stopnjami recikliranja, bi lahko že do leta 2050 sektor PV tehnologije porabil več kot 50 % trenutno znanih svetovnih zalog srebra. Leta 2020 je povprečen PV modul z učinkovitostjo 21 % vseboval med 90 in 100 mg srebra na celico, kar je ob letni proizvodnji PV modulov pomenilo skupno porabo približno 2860 ton srebra, oziroma 10,3 % svetovne oskrbe s srebrom v tem letu [2, 75]. Novejše študije [2, 76] napovedujejo, da bi se poraba srebra lahko znižala pod 5 mg/W, vendar bi že pri letni proizvodnji 3 TW to predstavljalo več kot 50 % trenutnih svetovnih zalog srebra. Glavni dejavnik zmanjševanja količine uporabljenega srebra v PV celicah je cena srebra. Ko se je med letoma 2009 in 2011 cena več kot podvojila, se je količina srebra v povprečni PV celici prepolovila, s 4 g na 2,5 g. Med letoma 2012 in 2017 se je tempo tega zmanjševanja prepolovil, saj je cena srebra padla. Pomembno je, da zmanjševanje količine materialov in njihova nadomestitev nista edinstvena značilnost srebra, temveč predstavljata širši trend na trgu surovin. Končni proizvajalci si namreč povsod prizadevajo za zniževanje stroškov surovin, naj bo to z zamenjavo bakra z aluminijem ali zmanjševanjem srebra.

7.3 UKREPI ZA ZMANJŠANJE OKOLJSKEGA VPLIVA RECIKLAŽNIH POSTOPKOV

Glede na to, da je predvidena eksponentna rast inštalirane moči PV sistemov po celotnem svetu, se pojavljajo vse bolj pereča vprašanja v zvezi z ravnanjem z izrabljenimi PV moduli. Zlasti faza reciklaže, ki ima lahko velik okoljski vpliv, če ni ustrezno vodena. Ravno zato so ukrepi za zmanjšanje okoljskega vpliva reciklažnih postopkov ključnega pomena tako z vidika varovanja okolja kot tudi trajnostnega gospodarjenja z naravnimi viri.

Eden izmed najbolj učinkovitih ukrepov za zmanjšanje okoljskega odtisa reciklaže PV modulov se začne že v fazi načrtovanja. Koncept DfR (angl.: *Design for Recycling*) spodbuja zasnovo PV modulov, ki omogoča lažje ločevanje materialov, zmanjšuje število kompozitnih materialov in uvaja standardizirane materiale, ki jih je mogoče preprosto obdelati. Pri tem se daje prednost materialom z nižjim okoljskim vplivom in večjo možnostjo ponovne uporabe. Vodilne mednarodne smernice priporočajo zamenjavo fluoriranih polimerov, zmanjševanje števila plasti v laminatu in uporabo ne toksičnih spajk kot so kositer-baker zlitine namesto svinca. Povzeto po [77].

Podaljšanje življenjske dobe PV modulov neposredno zmanjšuje potrebo po reciklaži in z njo povezanih emisijah. S tem ko moduli dalj časa ostanejo funkcionalni, se zmanjša pogostost ciklov reciklaže, kar pomeni manjšo porabo energije, manj izpustov in manj odpadkov. Tehnološki napredek na področju premazov, izboljšanih spojev ter stabilnejših materialov je omogočil, da se povprečna življenjska doba PV modulov povečuje s 25 na 30 let. Kot poudarja DOE so inovacije na področju trajnosti materialov ključne za podaljševanje delovanja brez prevelike degradacije. Povzeto po [19].

Izboljšanje učinkovitosti reciklažnih tehnologij je tudi nujen ukrep. Pri mehanskih postopkih je nujno fizično drobljenje in ločevanje komponent z minimalnim vplivom na okolje, pri kemičnih postopkih mora selektivno raztapljanje kovin biti z uporabo manj agresivnih reagentov in pri termičnih postopkih uporaba nizkotemperaturnih postopkov za ločevanje EVA folije in preostalih materialov. Avtorji [78] so ugotovili, da

reciklaža, ki vsebuje mehanske in kemične postopke, lahko omogoči več kot 90 % okrevanja ključnih materialov, pri čemer je poraba energije lahko do 60 % nižja kot pri tradicionalnih postopkih.

Zmanjšanje okoljskega vpliva reciklažnih postopkov PV modulov zahteva celovit in interdisciplinarni pristop. Od inženirjev, ki razvijajo module, ki se lažje reciklirajo, do politike, kjer se s pomočjo zakonov uveljavljajo odgovornosti in raziskovalcev ter industrije, ki uvajajo nove reciklažne tehnologije. Vsi deležniki imajo vlogo pri ustvarjanju trajnostnega sistema ravnanja z izrabljenimi PV moduli. Prihodnost PV industrije ne bo trajnostna zgolj zaradi proizvodnje čiste energije, temveč tudi zaradi odgovornega ravnanja z njenimi materiali.

8 ZAKLJUČEK

PV moduli tako kot vsaka električna ali elektronska naprava sčasoma dosežejo konec svoje življenjske dobe, kar zahteva ustrezno obravnavo. Čeprav imajo PV moduli v primerjavo z ostalimi električnimi in elektronskimi napravami relativno dolgo življenjsko dobo, med 25 in 30 let, se ob naraščajoči rabi teh sistemov pojavlja potreba po razvoju učinkovitih metod za ravnanje z odpadnimi moduli. Zaradi povečevanja inštalirane moči PV sistemov postaja vzpostavitev trajnostnih postopkov reciklaže ključnega pomena predvsem za obvladovanje prihodnjih količin odpadkov ter za varovanje okolja.

V okviru analize različnih postopkov reciklaže so bile prepoznane prednosti in slabosti posameznih pristopov. Termični postopki omogočajo učinkovito odstranjevanje plasti, vendar so energijsko potratni, med procesom pa nastajajo tudi škodljive emisije. Kemični postopki omogočajo selektivno ločevanje materialov, vendar zahtevajo uporabo nevarnih reagentov in imajo predolg reakcijski čas. Mehanski postopki pa so se izkazali kot najbolj perspektivni in uporabljeni v komercialnih postopkih reciklaže, saj omogočajo učinkovito ločevanje materialov z relativno nizko porabo energije in manjšim vplivom na okolje, vendar omogočajo samo reciklažo glavnih komponent.

Napredne rešitve reciklaže ne prispevajo zgolj k doseganju ciljev trajnostnega razvoja, vendar predstavljajo tudi priložnost za industrijo, ker omogočajo pridobivanje surovin ter spodbujajo razvoj krožnega gospodarstva.

Študija potrjuje, da reciklaža PV modulov ni zgolj tehnični izziv, vendar kompleksna naloga, kjer se prepletajo okoljski, ekonomski in družbeni dejavniki. Zgolj celovit in usklajen pristop, ki upošteva vse vidike tega procesa, lahko vodi do resnično trajnostnih rešitev.

Z analizo rasti inštalirane moči PV sistemov v obdobju od leta 2001 do leta 2024 smo pridobili napoved pridobljenih materialov po procesu reciklaže do leta 2050. Tehnična analiza je razkrila, da največji delež PV modula predstavljajo predvsem steklo, aluminij in polimeri. Poleg tega pa smo izvedli napoved pridobljenih materialov po procesu reciklaže ob upoštevanju scenarijev NEPN, kjer so predvideni OU, DU-JE in DU-OVE. Ugotovili smo, da bo največja količina PV odpadkov nastala v scenariju DU-OVE, saj ta predvideva najvišjo kumulativno inštalirano moč PV sistemov. Nasprotno pa bo v scenariju OU količina odpadkov najmanjša, kar je posledica nižje predvidene kumulativne moči PV sistemov.

S stroškovno analizo pa smo ugotovili, da je finančna vzdržnost reciklaže PV modulov še vedno izziv, predvsem zaradi visokih stroškov postopkov in razmeroma nizke vsebnosti dragocenih materialov. Donosnost reciklažnih obratov je odvisna od obdelanih količin. Vračilna doba investicije se razlikuje glede na razmerje med prihodki in stroški. V primeru ko so prihodki visoki in stroški nizki, imamo kratko vračilno dobo. Prihodki pa so v večinski meri odvisni od tržne cene materialov, ki je volativna.

9 VIRI IN LITERATURA

- [1] EUR-Lex, „Directive 2012/19/EU of the European parliament and of the council of 4th July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)“. [Elektronski]. Dostopno na: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02012L0019-20240408>. (datum dostopa: 5. 5. 2025)
- [2] M. Obreza, „Prihodnost in izzivi reciklaže odpadnih fotonapetostnih modulov v Sloveniji“, Fakulteta za energetiko Univerze v Mariboru, 2024.
- [3] Ustava Republike Slovenije, „Uradni list RS, št. 55/15, 47/16, 72/18, 84/18, 108/20 in 44/22, Uredba o odpadni električni in elektronski opremi“, 2015.
- [4] M. Krošelj, „Recikliranje fotonapetostnih sistemov: Projekcije do leta 2050 na osnovi NEPN“, Fakulteta za energetiko Univerze v Mariboru, 2024.
- [5] PV Portal, „Slovenski portal za fotovoltaike“. Dostopno na: <http://pv.fe.uni-lj.si/sl/>. [datum dostopa: 2. 6. 2025]
- [6] S. Philipps, Fraunhofer ISE, „Photovoltaics Report“, 2024.
- [7] S. A. Kalogirou, „Solar Energy Engineering“, Academic Press, 2009.
- [8] IEA PVPS, „Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems“, 2020.
- [9] CSA Group, „Photovoltaic (PV) Recycling, Reusing and Decommissioning – Current Landscape and Opportunities for Standardization“, 2020.
- [10] NREL, „Polycrystalline Thin-Film Materials and Devices R&D“, 2023.
- [11] M. Budler, „Fotovoltaični materiali“, diplomsko delo, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2011.
- [12] VDMA, „International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)“, VDMA Frankfurt, 2019.
- [13] A. Mulazzani, P. Eleftheriadis, S. Leva, „Recycling c-Si PV modules: A Review, a Proposed Energy Model and a Manufacturing Comparison“, *Energies*, 2022.
- [14] IRENA, „End-of-life management: Solar Photovoltaic Panels“, 2016.
- [15] IRENA, „Renewable Capacity Statistics“, 2024.
- [16] Statista, „Leading countries based on new solar PV capacity additions worldwide in 2023“, 2023.

- [17] PV Magazine, „*Global module prices trend upward in Q2*“. Dostopno na: <https://www.pv-magazine.com/2025/03/14/global-module-prices-trend-upward-in-q2/>. [datum dostopa: 18. 5. 2025].
- [18] Ministrstvo za okolje, podnebje in prostor, „*Celoviti nacionalni energetske in podnebne načrte Republike Slovenije (osnutek predloga posodobitve 2024)*“, december 2024.
- [19] U.S. Department of energy, „*Beyond Recycling: Reducing Waste From Solar Modules Before They're Even Made*“. Dostopno na: <https://www.energy.gov/eere/solar/articles/beyond-recycling-reducing-waste-solar-modules-theyre-even-made>. [datum dostopa: 18. 5. 2025].
- [20] A. W. Y. Ho-Baillie, J. Zheng, M. A. Mahmud, F. J. Ma, D. R. McKenzie, M. A. Green, „*Recent progress and future prospects of perovskite tandem solar cells*“, Applied Physics Reviews, Volume 8, Issue 4, 2024.
- [21] M. Tao, V. Fthenakis, B. Ebin, et al., „Major challenges and opportunities in silicon solar module recycling“, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2020.
- [22] M. Noda, K. Kushiya, H. Komoto, et al., „Development of the PV Recycling System for Various Kinds of PV modules“, *6th WCPEC*, 2014.
- [23] SEIA, „PV Recycling Group: National PV Recycling Program“, *Solar Power International 2016*, 2016.
- [24] K. J. Lee, S. J. Lee, et al., „Low-cost Recovery process of unbroken solar cell from PV module“, *25th PVSEC*, 2015.
- [25] J. Liu, „Experimental Study on Recycling Waste Crystal Silicon PV modules Technology“, *PV Environmental Health and Safety Workshop*, 2014.
- [26] D. Strachala, J. Hylský, J. Vaněk, et al., „Methods for recycling photovoltaic modules and their impact on environment and raw material extraction“, *Acta Montanistica Slovaca*, 2017.
- [27] E. Balomenos, D. Papias, I. Paspaliraris, et al., „Carbothermic reduction of alumina: A review of developed processes and novel concepts“, *EMC-2011*, 2011.
- [28] P. Dias, L. Schmidt, L. B. Gomes, et al., „Recycling Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electrostatic Separation“, 2018.
- [29] J. R. Nagel, D. Cohrs, J. Salgado, et al., „Electrodynamic Sorting of industrial Scrap Metal“, 2020.
- [30] J. Tan, S. Jia, S. Ramakrishna, „End-of-life Photovoltaic Modules“, *Energies*, 2022.

- [31] Toho Kasei Co., Ltd., „Development of high-performance recycling technology using wet-method for crystalline Si PV modules“, *FY2015 NEDO debriefing session*, 2016.
- [32] M. Peplow, „Solar Panels Face Recycling Challenge“, *ACS Publications*, 2022.
- [33] R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, „A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling“, *Renewable and Sustainable Energy*, 2019.
- [34] Mitsubishi Materials Corporation, „Development of recycling technology for crystalline Si PV modules“, *FY2015 NEDO debriefing session*, 2016.
- [35] Hamada Corporation and NPC Incorporated, „Development of recycling technology using by heated knife for separation“, *FY2015 NEDO debriefing session*, 2016.
- [36] P. Ercole, „FRELP 2 Project – Full Recovery End of Life Photovoltaic“, *32nd EU-PVSEC*, 2016.
- [37] G. Granata, „Recycling od Photovoltaic Panels by Physical Operations“, *Solar Energy Materials & Solar Cells 123*, str. 239–248, 2014.
- [38] PV MOREDE, „Vehicle Homologation“, 2014.
- [39] Yokohama Oils & Fats Industry, „Development of an Advanced Recycling Treatment System for Photovoltaic Modules with Novel EVA Stripper“, *Fiscal year 2011–2012 NEDO contract report*, 2012.
- [40] S. Kang, et al., „Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules“, *Renewable Energy 47*, 2012.
- [41] W. Palitzsch, U. Loser, „Economic PV Waste Recycling Solutions – Results from R&D and Practice“, *38th IEEE-PVSC*, 2012.
- [42] Ž. Miklič, M. Topić, „Življenjska doba in recikliranje fotonapetostnih modulov“, 2023.
- [43] EPRI, NREL, „Program on Technology Innovation: Insights on PV Recycling Processes in Europe“, 2017.
- [44] ENF Solar, „Solar Recycling Companies“. [Elektronski]. Dostopno na: <https://www.ensolar.com/directory/service/manufacturers-recycling>. [datum dostopa: 18. 5. 2025].
- [45] SunyGroup, „Solar Panel Recycling Plant“. Dostopno na: https://www.sunygroup.cn/products/Recycling_equipment/Solar-Panel-Recycling-Plant.html. [datum dostopa: 18. 5. 2025]
- [46] SunyGroup, „Solar Panel Disassembly Machine: Easy Way to Remove J-Boxes, Frames and Glass “. Dostopno na: <https://www.youtube.com/watch?v=ZHSF-0wM20g>. [datum dostopa 18. 5. 2025].

- [47] R. Deng, N. L. Chang, Z. Ouyang, C. M. Chong, „ *A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling*“, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019.
- [48] Renew., „Recycling solar“. [Elektronski]. Dostopno na: <https://renew.org.au/renew-magazine/sustainable-tech/recycling-solar/>. [datum dostopa: 5. 5. 2025].
- [49] T. Bruton, R. Scott, J. Nagle, M. Man and A. Fackeral, „*Recycling of High Value, High Energy Content Components of Silicon PV-Modules*“, 12th European Photovoltaics Conference, Amsterdam, 1994.
- [50] T. Doi, I. Tsuda, H. Unagida, A. Murata, K. Sakuta and K. Kurokawa, „Experimental Study on PV Module Recycling with Organic Solvent Method“, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 67, 2001.
- [51] Y. Kim and J. Lee, „Dissolution of Ethylene Vinyl Acetate in Crystalline Silicon PV Modules Using Ultrasonic Irradiation and Organic Solvent“, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 98, 2012.
- [52] J. Bohland and I. Anisimov, „Possibility of Recycling Silicon PV Modules“, Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 1997.
- [53] M. Born and K. Wambach, „Pyrolysis of EVA and Its Application in Recycling of Photovoltaic Modules“, Journal of Environmental Sciences, vol. 16, 2004.
- [54] P. Dias, S. Javimczik, M. Benevit, H. Veit and A. M. Bernardes, „Recycling WEEE: Extraction and Concentration of Silver from Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules“, Waste Management, vol. 57.
- [55] E. Klugmann-Radziemska, P. Ostrowski, K. Drabczyk, P. Panek and M. Szkodo, „Experimental Validation of Crystalline Silicon Solar Cells Recycling by Thermal and Chemical Methods“, Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 94, 2010.
- [56] J. Park and N. Park, „Wet Etching Processes for Recycling Crystalline Silicon Solar Cells from End-of-Life Photovoltaic Modules“, RSC Advances, vol. 4, 2014.
- [57] F. Ardente, C. Latunussa and G. A. Blengini, „Resource Efficient Recovery of Critical and Precious Metals from Waste Silicon PV Panel Recycling“, Waste Management, vol. 91, 2019.
- [58] J. Duflou, J. Peeters, D. Altamirano, E. Bracquene and W. Dewulf, „Demanufacturing Photovoltaic Panels: Comparison of End-of-Life Treatment Strategies for Improved Resource Recovery“, CIRP Annals, vol. 67, 2018.
- [59] V. Fiandra, L. Sannino, C. Andreozzi, F. Corcelli and G. Graditi, „Silicon Photovoltaic Modules at End-of-Life: Removal of Polymeric Layers and Separation of Materials“, Waste Management, vol. 87, 2019.

- [60] K. Komoto, „ Approaches to PV Waste Management in Japan“, in Workshop on PV End-of-Life management: Challenges and Opportunities, EU-PVSEC Munich, 2016.
- [61] G. M. Wallner and J. Fischer, „Structure and Basic Properties of Photovoltaic Module Backsheet Films“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 144, 2016.
- [62] M. Hutchins, „EU Funds Pilot Plant for PV Module Recycling“, *PV Magazine International*, 2018.
- [63] S. Weckend, A. Wade and G. Heath, „End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels“, IEA Photovoltaic Power Systems Programme and International Renewable Energy Agency, Paris, 2016.
- [64] C. Risopatron, „Impurities in Copper Raw Materials and Regulatory Advances in 2018: A Global Overview“, 2018.
- [65] A. Artzer, M. Moats and J. Bender, „Removal of Antimony and Bismuth from Copper Electrorefining Electrolyte: Part I - A Review“, *JOM*, vol. 70, 2018.
- [66] D. Dreisinger, „The Economic Implications of Impurities and Contaminants in Semi-finished Mining Products“, The First International Seminar on Mining and Impurities: Regulation Trends, Markets and Technologies, Santiago, Chile, 2017.
- [67] J. Tao, S. Yu, „Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules“, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2015.
- [68] J. K. Choi, V. Fthenakis, „Crystalline silicon photovoltaic recycling planning: macro and micro perspectives“, *Journal of Cleaner Production*, 2014.
- [69] A. Rubino, G. Granata, et al., „Development and Techno-Economic Analysis of an Advanced Recycling Process for Photovoltaic Panels Enabling Polymer Separation and Recovery of Ag and Si“, 2020.
- [70] I. D'Adamo, P. Rosa, M. Miliacca, „Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules“, *International Journal of Photoenergy*, 2017.
- [71] National Renewable Energy Laboratory, Electric Power Research Institute, „*Solar Photovoltaic Module Recycling: A Survey of U. S. Policies and Initiatives*“, 2021.
- [72] A. Z. Stolarska, M. Pietrzak, et al., „*Effect of Recycling on the Environmental Impact of a High-Efficiency Photovoltaic Module Combining Space-Grade Solar Cells and Optical Micro-Tracking*“, 2023.
- [73] S. Fichtner, „*Understanding the Carbon Footprint of Solar Panel Manufacturing*“, 2023.

- [74] E. A. Alsema, M. de Wild-Scholten, „The real environmental impacts of crystalline silicon PV modules: an analysis based on up-to-date manufactures data“, *ResearchGate*, 2005.
- [75] Y. Zhang, M. Kim, L. Wang, et al., „Design consideration for multi-terawatt scale manufacturing of existing and future photovoltaic technologies: challenges and opportunities related to silver, indium and bismuth consumption“, *The Royal Society of chemistry*, 2021.
- [76] The Equation, „Mining Raw Materials for Solar Panels: Problems and Solutions“. [Elektronski]. Dostopno na: <https://blog.ucsusa.org/charlie-hoffs/mining-raw-materials-for-solar-panels-problems-and-solutions/>. [datum dostopa: 27. 5. 2024].
- [77] IEA-PVPS, „Design for Recycling Guidelines“, 2021.
- [78] M. Akhter, A. A. Mansur, et al., „Sustainable Strategies for Crystalline Solar Cell Recycling: A Review on Recycling Techniques, Companies and Environmental Impact Analysis“, 2024.