

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
VYTAUTO DIDŽIOJO UNIVERSITETAS
LIETUVOS ENERGETIKOS INSTITUTAS

JULIUS DENAFAS

**FOTOELEKTRINĖS ĮRANGOS GAMYBOS
POVEIKIO APLINKAI MAŽINIMAS TAIKANT SILICIO
PERDIRBIMĄ IR SAULĖS ELEMENTŲ PRAMONINĖS
GAMYBOS PROCESŲ MODIFIKAVIMĄ**

Daktaro disertacijos santrauka

Technologijos Mokslai, Aplinkos Inžinerija (T 004)

Kaunas, 2021

Disertacija buvo rengta 2016–2020 m. Kauno technologijos universiteto Aplinkos inžinerijos institute.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Jolita KRUOPIENĖ, (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004).

Redagavo: Vilija Puidienė

Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. dr. Žaneta STASIŠKIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004) – **pirmininkė**;

Prof. dr. Jolanta DVARIONIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004);

Prof. dr. Kerstin KUCHTA (Hamburgo Technologijos Universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004);

dr. Joris LIBAL (Konstanco Universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004).

Prof. dr. Egidijus ŠARAUSKIS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, aplinkos inžinerija, T 004.);

Disertacija bus ginama viešame Aplinkos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2021 m. rugpjūčio 31 d. 12 val. Kauno technologijos universiteto Disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; el. paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2021 m. liepos 30 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas).

SUTRUMPINIMAI

AL-BSF - aliumininio galinio paviršiaus laukas
c-Si – kristalinis silicis
EAL - energijos atsipirkimo laikas
ECV – elektrocheminės talpos įtampos
EDX - rentgeno spindulių energijos dispersija
EEĀA - elektros ir elektroninės įrangos atliekos
FV – fotovoltiniai
GWp – gigavatas pike
KPI – pagrindiniai veiklos rodikliai
LBIC – lazerio spindulio indukuota srovė
BCV - būvio ciklo analizė
mc-Si – multikristalinis silicis
MW – megavatas
PECVD – plazma inicijuotas cheminių garų nusodinimas
POCl₃ – fosforo oksichloridas
PSG – fosforo silikatinis stiklas
QSSPC - kvazi pastovios būsenos foto laidumas
ROHS - pavojingų medžiagų naudojimo elektros ir elektroninėje įrangoje apribojimo
SE – saulės elementas
SEA – saulės elementų atliekos
SiNx – silicio nitridas
ŠESD – šiltnamio efektą skatinančios dujos
Wp – vatas pike
XRD - rentgeno spindulių difrakcija

IVADAS

Žiedinė ekonomika saulės energetikoje pastaruoju metu tapo svarbia tyrimų tema, kuri ypatingą dėmesį skiria fotovoltinės (FV) įrangos eksploatavimo pabaigos – šalinimo etapui. Vidutinis saulės modulio tarnavimo laikas (pagal gamintojų suteikiamas garantijas) yra apie 25–30 metų. Jei per eksploatavimo laikotarpį įrenginiai nėra pažeidžiami fiziškai, tarkime, dėl audros, vandalizmo ar kitų priežasčių, jie ir toliau gali gaminti elektros energiją. Vis tik didelė dalis šiuo metu įgėgainėse sumontuotų ir veikiančių FV modulių savo gyvenimo pabaigos fazę pasiekia greičiau. To priežastys gali būti dėl gamybos defektų bei žalos, atsiradusios transportavimo ir montavimo metu esant nepalankioms oro sąlygoms ir kt.

Yra žinoma, kad jau 2016 m. Europoje buvo surinkta 1600 tonų fotovoltinių modulių, kurių eksploatacijos laikas baigėsi. Didžioji dalis šio kiekio susidarė tokiose šalyse kaip Vokietija, Italija ir Prancūzija. Tai valstybės, kurios yra vienos didžiausių saulės energetikos rinkų Europoje. 2016 m. surinktas atliekų kiekis vis dar yra labai nedidelis palyginus su ekspertų pateiktomis prognozėmis, teigiančiomis, kad visame pasaulyje sukauptas FV atliekų kiekis iki 2030 m. viršys net 1 milijoną tonų, o vien tik Europa bus atsakinga už maždaug 60% šio netinkamų eksploatuoti saulės modulių kiekio [3]. Akivaizdu, kad FV atliekų tvarkymas tampa rimtu rūpesčiu, todėl reikia rasti būdus, kaip suvaldyti būsimą saulės energetikos sugeneruojamų atliekų kiekio augimą. Daugelis mokslinius tyrimus atliekančių grupių stengiasi sukurti metodus, kaip atgauti ir perdirbti medžiagas iš saulės modulių. Deja, bet vis dar vykstantis perdirbimo technologijų kūrimas ir tobulinimas bei sąlyginai nedidelis tokio tipo atliekų kiekis lemia tai, kad perdirbimo veikla kol kas susiduria su technologiniais ir ekonominiais iššūkiais, stabdančiais jos spartesnę plėtrą ir pritaikomumą.

Eksploatacijos pabaiga nėra vienintelis etapas, į kurį reikėtų atkreipti dėmesį. Ne mažiau svarbu optimizuoti atliekų susidarymą saulės elementų ir modulių gamybos etape. Tokio tipo atliekas galima suskirstyti į kelias pagrindines grupes: gamybos broką (silicio

plokštelių, saulės elementų lūženos), nesunaudotas bei prarastas žaliavas (cheminės medžiagos, sidabras, aliuminis, stiklas) ir pavojingų medžiagų išmetimą į vandenį bei orą. Gamybos metu susidaranti atliekos lemia ne tik finansinius nuostolius dėl prarastos produkcijos ir žaliavų, bet ir tampa vienu iš veiksnių, skatinančių neigiamą saulės elementų gamybos poveikį aplinkai.

Galima pateikti paprastą, skaičiais iliustruotą pavyzdį. Standartinis vienos gamybos linijos pajėgumas fotovoltinių elementų gamybos sektoriuje yra apie 100 MW per metus. Priklausomai nuo technologijos, lemiančios saulės elemento sugeneruojamos galios kiekį, tai būtų apie 2 000 000 vnt. saulės elementų per mėnesį. Jei produkcijos nuostoliai siektų apie 2–2,5%, tada gautume, jog apie 50 000 vnt. saulės elementų kiekvieną mėnesį tampa atliekomis, kurios nėra grąžinamos atgal į gamybinius procesus. Šiandieninėmis kainomis tai reikštų ne mažiau nei 30 000 Eur nuostolį per mėnesį. Kai nėra galimybės atgauti ir pakartotinai panaudoti medžiagas gamyboje, tampa akivaizdu, jog vyrauja tipinis linijinis ekonominis modelis.

Šiame darbe daugiausia dėmesio skiriama saulės elementų gamybos etapui ir siūloma, kaip galima mažinti neigiamą poveikį aplinkai pritaikant ir išbandant pramoninės ekologijos principus:

1. Brokuotų bei lūžusių silicio plokštelių perdirbimą ir pakartotinį naudojimą gaminant multikristalinio silicio Al-BSF tipo saulės elementus.

2. Gamybos proceso modifikavimą, įgyvendinant patobulintą fosforo difuzijos procesą, kuris sumažintų medžiagų ir energijos suvartojimą bei gamybos atliekų susidarymą.

Darbo tikslas

Šio tyrimo tikslas buvo sukurti ir praktiškai išbandyti novatoriškų poveikio aplinkai mažinimo metodų taikymą pramoninėje fotovoltinių prietaisų gamyboje.

Uždaviniai

- I. Atlikti gamybos technologijų tendencijų ir poveikio aplinkai mažinimo būdų saulės energetikos pramonėje literatūros analizę.

- II. Išanalizuoti pagrindinius veiksnius, susijusius su fotovoltinių prietaisų gamybos ir viso gyvavimo ciklo poveikiu aplinkai:

- a. identifikuoti saulės elementų gamybos etapus, turinčius didžiausią neigiamą poveikį aplinkai.

b. išanalizuoti metodus, kuriais FV įranga gali būti sutvarkoma gyvavimo ciklo pabaigoje.

III. Sudaryti ir įvykdyti technologinių eksperimentų planą, pagrįstą išanalizuotais ir pasirinktais poveikio aplinkai mažinimo metodais, kuriais galima patikrinti perdirbimo bei technologinių procesų modifikavimo pritaikymo ir panaudojimo galimybes masinėje gamyboje.

IV. Pagal pasirinktą funkcinį vienetą įvertinti atliktų eksperimentų rezultatus apskaičiuojant aplinkosauginius, kokybinius bei ekonominius PVR: BCV, ŠESD emisijų kiekį, energijos atsipirkimo laiką (EAL), saulės elementų efektyvumą (%) ir gamybos kaštus (Eur / Wp).

Mokslinis naujumas

Pagrindinė mokslinė šio tyrimo naujovė yra aplinkai draugiškesnės mc-Si saulės elementų gamybos technologijos sukūrimas, apjungiant du darnios gamybos principus - perdirbimą ir proceso modifikavimą.

Netinkamų naudoti saulės elementų perdirbimas bei medžiagų, daugiausia silicio, atgavimas nėra itin didelė naujovė mokslinė prasme. Visgi išsamus, su kokybe susijusių klausimų tyrimas, kai lyginamos ir analizuojamos skirtingų rūšių saulės elementų gamybos lūženos ir jų perdirbimo įtaka naujai gaminamiems saulės elementams, dar nebuvo pristatytas.

Antroji inovacija, susijusi su difuzijos proceso modifikavimu, kuris leidžia ženkliai sumažinti medžiagų suvartojimą bei atsisakyti vieno iš gamybos procesų, buvo pirmą kartą pademonstruota pramoninėje multikristalinių Al-BSF tipo saulės elementų gamyboje.

Ginami teiginiai

Taikant specifinius pramoninės ekologijos metodus (silicio perdirbimą ir procesų modifikavimą) yra įmanoma sumažinti c-Si saulės elementų gamybos neigiamą poveikį aplinkai išlaikant reikiamus kokybės ir gamybos kaštų rodiklius. Tokia modifikuota gamybos technologija gali būti pritaikyta naudojimui pramoniniu lygmeniu.

Kiekvienam šiame darbe ištirtam metodui galima skirti po atskirą pagrindinę tezę:

a. įvairiuose gamybos proceso etapuose surenkamos saulės elementų gamybos lūzenos gali būti perdirbtos, o atgautas silicis yra tinkamas pakartotiniam naudojimui c-Si saulės elementų pramoninėje gamyboje.

b. taikant fosforo difuzijos proceso recepto modifikaciją, galima sutrumpinti c-Si saulės elementų gamybos grandinę ir pašalinti PSG valymo bei sutrumpinti PECVD proceso etapus. Tokiu būdu galima užtikrinti mažesnes medžiagų ir elektros energijos sąnaudas.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro keli pagrindiniai skyriai: įvadas, literatūros apžvalga, technologinių eksperimentų metodikos aprašymas, rezultatai ir išvados.

Literatūros apžvalgos skyriuje dėmesys buvo sutelktas į FV įrangos veikimo principų, technologinės ir rinkos plėtros tendencijų bei poveikio aplinkai mažinimo metodų įgyvendinimo saulės energetikoje analizę.

Metodiniame skyriuje buvo išanalizuoti pagrindiniai saulės elementų kokybę bloginančių veiksnių (nuostolių) mechanizmai, apibūdinti ir įvertinti metodai, kurie buvo taikomi eksperimentinėje šio darbo dalyje. Be to, šiame skyriuje paaiškinami visos veiklos, susijusios su perdirbimo ir proceso modifikavimo metodais, taikomais gaminant mc-Si saulės elementus, tikslai ir įgyvendinimas.

Rezultatų skyriuje pateikiamas įvertinimas, kaip šiame darbe atlikti technologiniai eksperimentai paveikė tris KPI grupes: poveikį aplinkai, elektrinius parametrus ir gamybos kaštus.

Rezultatų išvados pateiktos ir aptartos disertacijos 5-ajame skyriuje.

Disertacijos tekstas pateikiamas 116-oje puslapių kartu su 77-iomis grafinėmis iliustracijomis ir 13 lentelių. Disertacijoje nurodomi 75 literatūros šaltiniai.

PRAKTINĖ VERTĖ

Itin aukštos švarumo klasės silicio, tinkamo naudoti saulės elementams, gamyba yra labiausiai energijai reiklus gamybos etapas visoje saulės energetikos vertės grandinėje. Todėl tai rodo tvarios gamybos ir ekologinio projektavimo principų įgyvendinimo svarbą ir praktinę vertę.

Šiame darbe pademonstruota silicio perdirbimo technologija suteikia galimybę saulės elementų gamintojui gražinti didelę dalį savo gamybos broko pakartotiniam naudojimui ir tokiu būdu mažinti neigiamą poveikį aplinkai bei finansinius nuostolius dėl prarastų brangių žaliavų ir išvaistytų energijos išteklių..

Antroji naujovė – technologinio proceso modifikavimas – turi geras praktinio pritaikymo galimybes, nes šis metodas leidžia sutrumpinti gamybos procesą eliminuojant PSG valymo žingsnį, kadangi difuzijos metu suformuoto papildomo SiOx sluoksnio nebereikia pašalinti, kaip yra daroma standartinio gamybos proceso metu. Tokiu būdu tampa įmanoma taupyti žaliavų, elektros energijos išteklius bei sumažinti susidarantį gamybos atliekų (nuotekų) kiekį.

Iš ekonominės pusės svarbu paminėti, kad saulės elementų ir modulių gamybos sektorius pasižymi tuo, kad tai yra sąlyginai mažo pelningumo verslo sritis. Saulės energetikoje didžiausi pelnai ir pajamos gaunamos ne gamybos, o jau veikiančios jėgainės (sistemos) lygmenyje, kai elektrinės savininkai gali uždirbti iš parduodamos elektros energijos. Todėl kiekviena procentinė dalis, kurią galima sutaupyti gamybos etape, yra labai svarbi šių produktų gamintojams, norintiems išgyventi nuožmioje konkurencinėje kovoje.

Apibendrinant galima pasakyti, kad technologinės naujovės, iširtos ir pritaikytos pramonei, gali padidinti Europos fotovoltinės įrangos gamintojų konkurencinį pranašumą ir suteikia galimybę rinkai pasiūlyti produktus, pasižyminčius mažesniu neigiamu poveikiu aplinkai, tačiau išlaikančiais tą patį aukštą kokybės lygį, kaip ir naudojant standartinius gamybos procesus.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Rengiant literatūros apžvalgą iš viso buvo išanalizuota septyniasdešimt penki literatūros šaltinių, įskaitant mokslinius straipsnius, konferencijų medžiagą, rinkos ataskaitas ir internetinius tinklapius.

Paskutiniajame dešimtmetyje saulės energijos rinka greitai plėtėsi ir 2019 metais pasiekė didesnę nei 600 GWp bendros instaliuotų jėgainių galios ribą, kurioje 90-čia procentų dominuoja kristalinio silicio technologija. Sparti plėtra lėmė tai, jog saulėtose mūsų planetos vietose (pvz. Artimųjų rytų regione) fotovoltinių technologijų dėka gaminama energija jau tapo pigiausiu elektros energijos šaltiniu lyginant su tokiomis gamybos technologijomis kaip branduolinė energetika, anglies ar dujų deginimas, vėjo jėgainės ir pan.

Vertindami aplinkosauginiu požiūriu, tris sritis galime įvardyti kaip svarbiausias kovojant su aplinkos iššūkiais. Pirma – žaliavų ir energijos vartojimo mažinimas, antra – efektyvus atliekų apdorojimas fotovoltinės įrangos gyvavimo ciklo pabaigoje siekiant atgauti ir pakartotinai panaudoti tokias žaliavas kaip puslaidininkiai, metalai ar stiklas, trečia – žiedinės ekonomikos principais paremtų produktų kūrimas siekiant juos padaryti tinkamus perdirbimui ir medžiagų atgavimui, sugedusių komponentų pakeitimui ar pritaikymui naudoti kitose pramonės šakose.

Apžvelgus literatūros šaltinius buvo konstatuota, kad didžioji dalis mokslo ir pramonės atstovų, siekdami sumažinti fotovoltinės įrangos neigiamą poveikį aplinkai, nukreipia dėmesį į gyvavimo ciklo pabaigą. Pradedamos taikyti grąžinimo (angl. *take back*) schemas, įvesta EEJA direktyva bei RoHs reikalavimai ir einama žemyn vertės grandine link technologinės plėtros, nukreiptos į fotoelektrinių modulių perdirbimo ir medžiagų atgavimo būdus. Deja, bet pakankamai mažai iki šiol buvo nuveikta ankstyvuosiuose fotovoltinės įrangos vertės grandinės etapuose – silicio žaliavos ir saulės elementų gamyboje, kurie yra labiausiai imlūs energijos ir medžiagų vartojimui. Tai gali būti bent jau iš dalies paaiškinta pažvelgus į fotovoltinių prietaisų gamybos rinkos situaciją. Visos didžiausios pramonės kompanijos (silicio, saulės elementų ir modulių gamintojai) daugiausia yra Azijoje, todėl tai sukelia didelių iššūkių atliekant technologinius tyrimus ir jų pritaikymą pramonėje Europos tyrėjams.

Į energijos ir medžiagų sąnaudų mažinimą saulės elementų gamyboje nukreiptų eksperimentinių ir tiriamųjų darbų trūkumas suteikė galimybę atlikti tos srities tyrimus ir juos pristatyti šioje disertacijoje.

2. MEDŽIAGOS IR METODAI

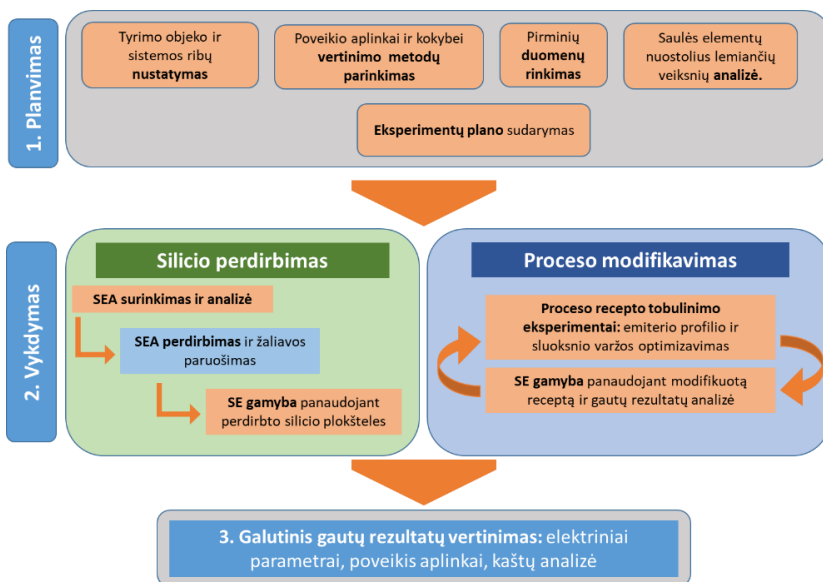
Tiriamuosius darbus sudarė šie trys pagrindiniai etapai:

- **planavimas** buvo skirtas teorinėms studijoms ir pasiruošimui eksperimentiniam darbui. Šiame etape daugiausia dėmesio skirta tyrimų objektui ir sistemos riboms išgryninti, saulės elementų elektrinių pagrindinių kokybinių parametrų ir juos bloginančių veiksnių mechanizmo sampratai, duomenų rinkimui, rezultatų vertinimo metodų parinkimui ir eksperimentinio plano kūrimui.

- visų eksperimentinių darbų ir su jais susijusių veiklų **vykdymas** buvo padalintas į dvi atskiras eksperimentines veiklas: silicio perdirbimą ir difuzijos proceso modifikavimą. Didžioji dalis eksperimentinės dalies infrastruktūros buvo vykdyta UAB „Solitek R&D“, kur buvo atlikta 80% eksperimentinio darbo. Likę darbai (saulės elementų atliekų (SEA) perdirbimas) buvo atlikti SINTEF institute Norvegijoje ir Kauno technologijos universitete (SEA elementinės sudėties analizė) bei Prancūzijos saulės energetikos tyrimų centre CEA-INES (matavimai QSSPC ir LBIC metodais).

- paskutiniame **apibūdinimo ir vertinimo** etape buvo surinkti gauti rezultatai ir įvertinti būtini pagrindiniai veiksmingumo rodikliai (PVR). Silicio perdirbimo ir modifikavimo proceso poveikio aplinkai vertinimas buvo atliktas lyginant medžiagų ir elektros energijos suvartojimą bei CO₂ pėdsaką gretinant standartinį ir eksperimentų metu ištirtus atvejus. Elektriniai saulės celių kokybės parametrai buvo įvertinti matuojant celių efektyvumą, minimalią krūvininkų gyvavimo trukmę (QSSPC metodu) ir krūvininkų difuzijos ilgio reikšmę (LBIC metodu). Kaštų įvertinimas buvo palygintas tarp silicio perdirbimo ir modifikuoto gamybos proceso atvejų, apskaičiuojant ir lyginant Eur/Wp rodiklio pokytį procentine išraiška. Aplinkosauginę analizę sudarė būvio ciklo vertinimas, energijos atsipirkimo laikotarpio ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetamo kiekio apskaičiavimas pasirinktam funkciniam vienetai – 1 kWp saulės elementų. Būvio ciklo analizė buvo atlikta taikant ILCD 2011 Midpoint + V1.11 bei ReCiPe

2016 Endpoint H metodus. Skaičiavimai atlikti naudojant „SimaPro“ programinės įrangos versiją 9.1.0.8 su „Ecoinvent 3.6“ duomenų baze.



Pav. 1. Teorinės ir eksperimentinės disertacijos tyrimų dalies schema

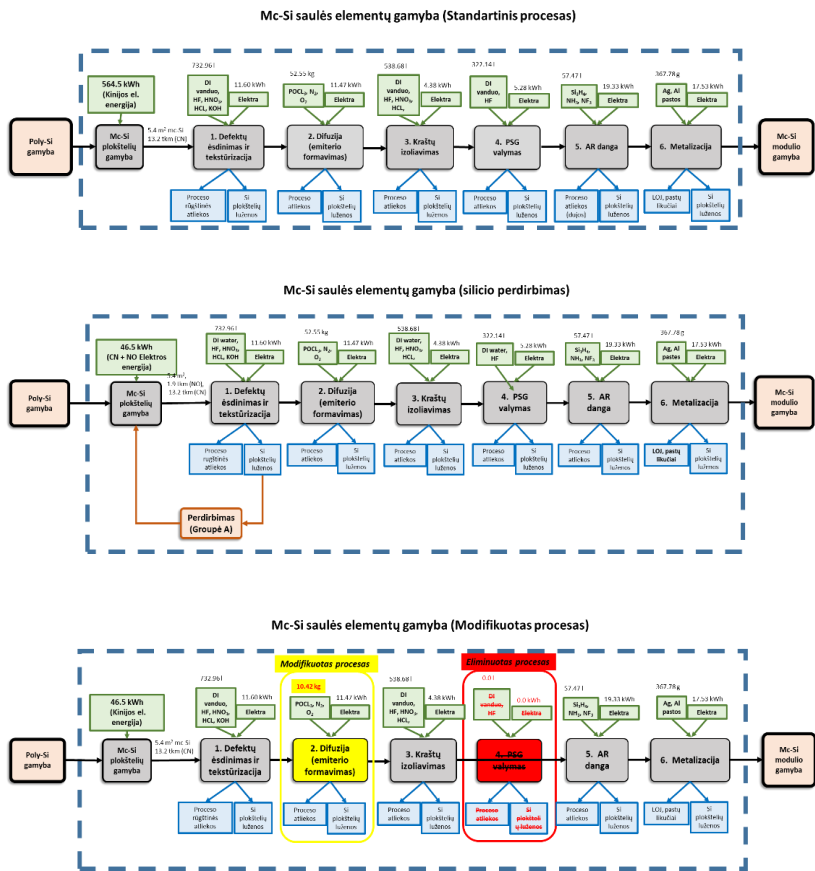
Funkcinis vienetas

Šiame tyrime funkciniu vienetu pasirinkta 1 kWp mc-Si AL-BSF technologijos saulės elementas. 1 kWp yra didžiausios galios matas, kurį gali pagaminti standartinėmis bandymo sąlygomis, o tai reiškia, kad matavimų atlikimo metu saulės elemento temperatūra turi būti 25 °C, apšvita 1000 W/m² ir šviesos masės spektras - AM1.5.

Sistemos ribos

Sistemos ribos, kurios buvo naudojamos šiame darbe, detaliam pateiktos Pav. 2. Kaip matome, tyrimų ribos prasideda ties silicio plokštelės gamyba ir baigiasi pagamintu saulės elementu. Jos neapima pagamintų saulės elementų gabenimo klientui bei jų surinkimo į

modulius laiko. Būvio ciklo, ekonominio ir kokybinio rezultatų vertinimo metu buvo išanalizuoti trys atvejai: a) standartinė gamyba, kuri buvo reikalinga kaip atskaitos taškas rezultatų vertinimui, b) silicio perdirbimas bei pakartotinis panaudojimas gamyboje, c) modifikuotas difuzijos procesas.



Pav. 2. Sistemos ribų paaiškinimas trims skirtingiems atvejams, analizuojamiems šiame darbe. Nuo viršaus: standartinis gamybos procesas, naudojant perdirtą silicį ir modifikuoto difuzijos proceso atvejais

Tyrimų metu naudota infrastruktūra

Saulės elementų gamybos eksperimentai ir bandomųjų partijų gamyba buvo atlikti su žemiau išvardintais įrenginiais:

Lentelė 1. Saulės elementų gamybos linijos pagrindinių įrenginių sąrašas

| Paskirtis | Įrangos pavadinimas | Gamintojas |
|---|------------------------------|--------------------------|
| Silicio plokštelių patikra | WHQ 3000 | Jonas & Redmann |
| Defektų ėsdinimas ir tekstūrizacija | Silex Isotex 3000 | Singulus / Stangl |
| Fosforo difuzija | Lydop 6200 DF, | Semc |
| Cheminis kraštų izoliavimas | LINEA SSE & ISOTEX 400 PILOT | Singulus / Stangl |
| PSG valymas | Silex PSG 3000 | Singulus / Stangl |
| Antirefleksinės dangos nusodinimas | Singular 1500 | Singulus |
| Kontaktų spausdinimas | JRT Metallization line | JRT Photovoltaics |
| Kontaktų įdeginimas | RFS 500D | Rehm Thermalsystems GMBH |
| Optinių ir elektrinių parametrų matavimai, rūšiavimas | Tester & Sorter | Jonas & Redmann |

Pagamintų saulės elementų charakterizavimui ir kokybės tyrimams buvo naudota ši matavimų įranga:

- LBIC : Semilab WT-2000PVN – krūvininkų difuzijos ilgiui matuoti
- QSSPC: Sinton Instruments WCT-120 – krūvininkų gyvavimo trukmei matuoti
- Elipsometras Sentech SE400advanced – SiN_x ir SiO_x sluoksnių savybėms matuoti
- ECV: wafer profiler CVP21 – difuzijos profilio optimizavimui matuojant fosforo koncentraciją silicio plokštelės paviršiuje
- EDX bei XRD metodai saulės elementų atliekų morfologiniams tyrimams

3. TYRIMŲ REZULTATAI

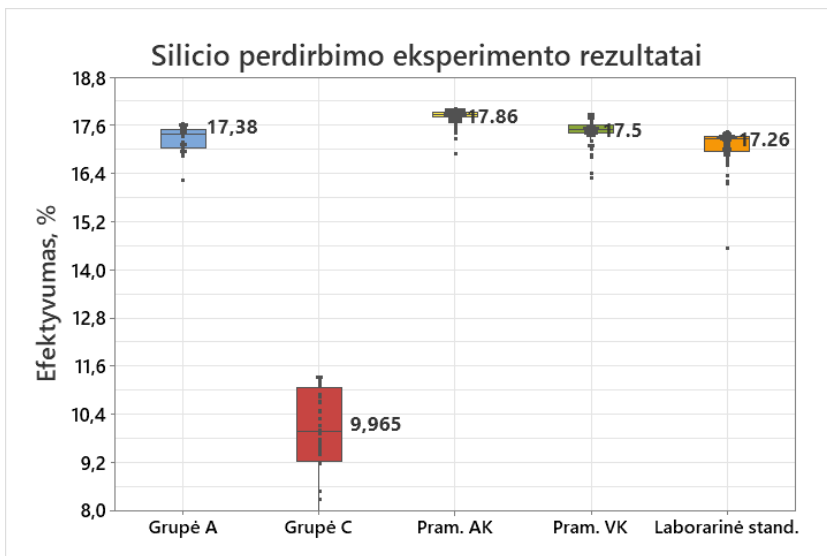
SE kokybės parametrų vertinimas – silicio perdirbimo eksperimentas

Silicio perdirbimo eksperimento metu buvo ištirtos ir palygintos 5 multikristalinio silicio plokštelių medžiagos grupės ir jų įtaka saulės elemento elektriniams parametrams. Naudojant Al-BSF gamybos technologiją buvo iš viso pagaminti 360 vnt. saulės elementų, o gautų rezultatų santrauka pateikiama Lentelėje 2.

Lentelė 2. Silicio perdirbimo eksperimento rezultatai – saulės elementų elektrinių parametrų santrauka

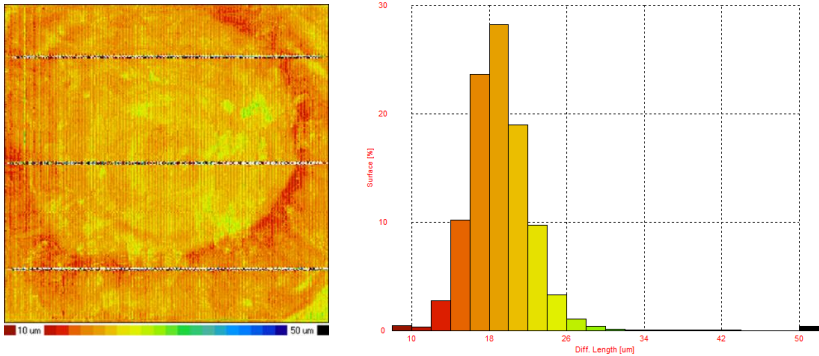
| Nr. | Pavadinimas | Kiekis, vnt. | Eta, % | V _{oc} , mV | J _{sc} , mA/cm ² | FF, % |
|-----|-----------------------------|--------------|--------|----------------------|--------------------------------------|-------|
| 1 | Laboratorinė standartinė | 80 | 17.26 | 627.36 | 34.69 | 79.22 |
| 2 | Grupė A | 37 | 17.38 | 627.06 | 35.43 | 78.20 |
| 3 | Grupė C | 43 | 9.97 | 571.56 | 22.81 | 76.87 |
| 4 | Pramoninė Aukštos Kokybės | 100 | 17.86 | 631.32 | 35.88 | 78.87 |
| 5 | Pramoninė Vidutinės Kokybės | 100 | 17.50 | 623.21 | 35.80 | 78.47 |

Gauti rezultatai rodo, kad A grupės (žaliava iš nedaug užterštų, gamybos proceso pradžioje surinktų SEA) saulės elementų efektyvumas (mediana 17.38%) viršija minimalią reikalautą ribą 17.0% o tai leidžia daryti išvadą, kad tokios rūšies gamybos atliekos gali būti pakartotinai panaudojamos gamyboje ir neturi didelės neigiamos įtakos kokybei lyginant tiek su aukštos, tiek ir su vidutinės kokybės pramonine silicio žaliava.



Pav. 3. Saulės elementų efektyvumo palyginimas skirtingoms silicio perdirbimo eksperimento grupėms

Siekiant geriau suprasti efektyvumo praradimą, buvo atlikta išsamesnė C grupės (užterštų, gamybos proceso pabaigoje surinktų SEA) mėginių analizė, kadangi šios grupės efektyvumo rezultatai itin žemi ir matavimo taškų mediana nesiekia net 10%. Norint nustatyti, ar tai galėtų būti susiję su prasta medžiagos kokybe, buvo atlikti krūvininkų difuzijos ilgio matavimai LBIC metodu.



Pav. 4. Grupės C LBIC matavimų rezultatai

Kaip pateikta Pav. 4, išmatuotas krūvininkų difuzijos ilgis tesiekia vos 10-30 μm, kai įprastai šis parametras turėtų siekti apie 400 – 600 μm geros kokybės silicio plokštelėms.

Atlikus silicio perdirbimo eksperimentą, buvo prieita išvados, jog tik dalis SEA yra tinkamų panaudoti antrą kartą neatliekant jokio papildomo medžiagos valymo nuo priemaišų proceso. Užterštos C grupės SEA nėra tinkamos būti panaudojamos pakartotinai saulės elementų gamyboje, todėl tokio tipo atliekas reikėtų arba papildomai gryninti iki 9N švarumo lygmens, arba ieškoti būdų, kaip panaudoti kitose pramonės šakose, kur medžiagos grynumui keliami reikalavimai nėra tokie aukšti.

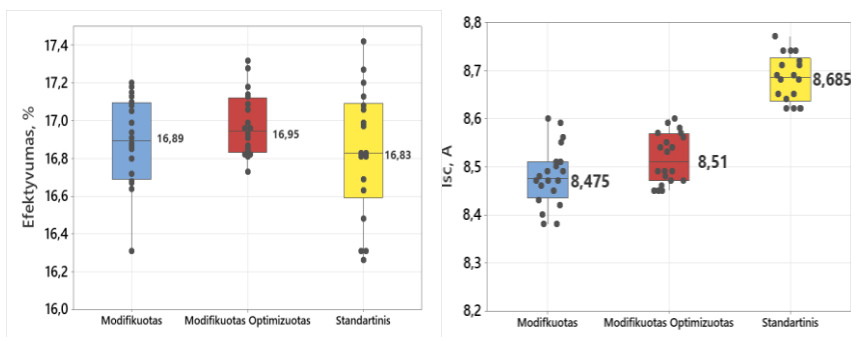
SE kokybės parametrų vertinimas – proceso modifikavimo eksperimentas

Antrasis eksperimentas – proceso modifikavimas buvo įgyvendintas atliekant tris pagrindinius difuzijos proceso recepto pakeitimus:

- Mažinant POCl_3 (medžiagos, kuri yra fosforo šaltinis) srautą padavimo į kamerą proceso metu
- Pakeliant išsodrinimo etapo temperatūrą maždaug 100 °C, o nusodinimo etapo temperatūrą mažinant maždaug iki 50 °C

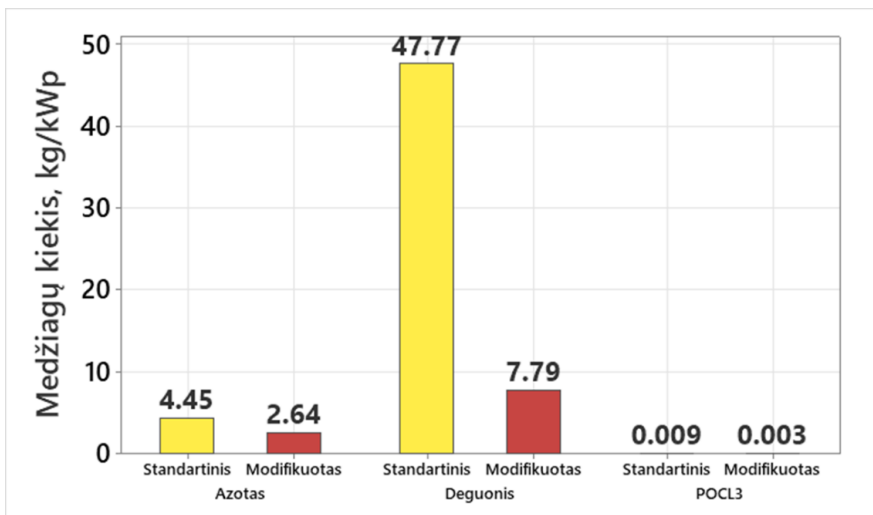
- Reguluojant deguonies ir azoto dujų srautus tam, kad būtų užtikrintas emiterio formavimo tolygumas per visą silicio plokštelės paviršių
- Optimizuojant SiNx antirefleksinės dangos storį tam, kad būtų sumažintas saulės šviesos atspindys nuo plokštelės paviršiaus

Tuo tikslu buvo pagamintos ir ištestuotos keturios eksperimentinės saulės elementų grupės. Gauti rezultatai pateikti Pav. 5.



Pav. 5. Proceso modifikavimo eksperimento ir jo metu pagamintų saulės elementų rezultatų palyginimas: standartinė, modifikuotas procesas ir modifikuotas su optimizuotu antirefleksiniu (AR) sluoksniu)

Kaip matome iš pateiktų rezultatų, modifikuoto difuzijos proceso grupės po papildomo antirefleksinio sluoksnio storio optimizavimo pasiekė apie 0.12% geresnę efektyvumą lyginant su standartine grupe. Nors tai ir nėra technologiškai labai reikšmingas skirtumas, rezultatai galima vertinti teigiamai, kadangi pagrindinis tikslas buvo parodyti, jog difuzijos proceso modifikavimas, kur yra eliminuojamas PSG proceso etapas, nepablogina saulės elemento kokybės.

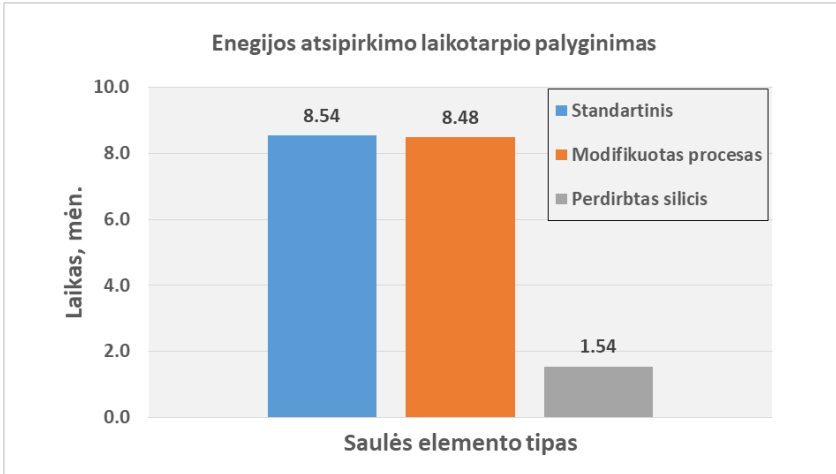


Pav. 6. Pagrindinių difuzijos procese naudojamų žaliavų kiekio palyginimas standartiniu ir modifikuoto (po optimizavimo) proceso atveju

Dar vienas teigiamas šio eksperimento rezultatas yra ženkliai sumažėję difuzijos procese naudojamų žaliavų kiekiai: azoto, deguonies bei $POCL_3$. Pagal duomenis, pateiktus Pav. 6., šių medžiagų suvartojimas sumažėjo atitinkamai 41%, 84% ir 71% skaičiuojant masės vienetais (kg) vienam funkciniam tyrimo vienetui – kWp.

Saulės elementų poveikio aplinkai vertinimas

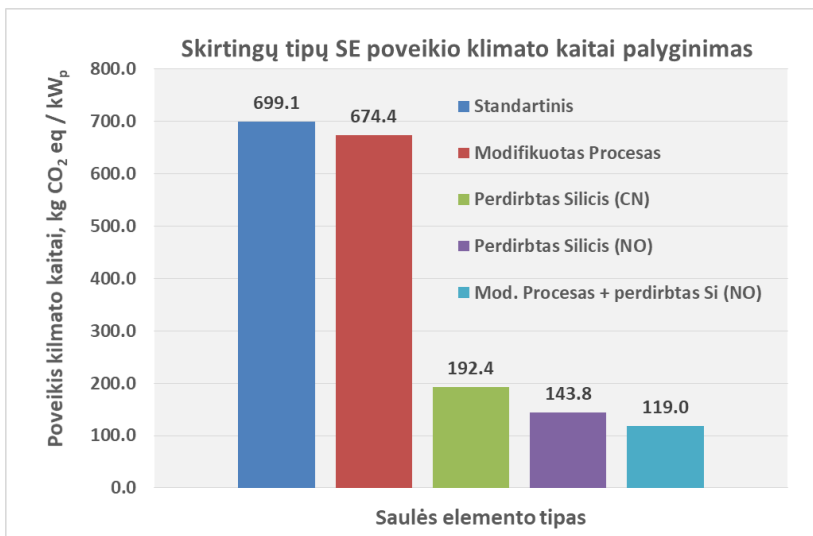
Kaip jau buvo minėta, poveikio aplinkai vertinimas buvo atliekamas lyginant du pagrindinius parametrus tam pačiam funkciniam vienetai – energijos atsipirkimo laikotarpį bei šiltnamio efektą sukeliančių išmetamųjų dujų kiekį.



Pav. 7. Energijos atsipirkimo laiko palyginimas skirtingiems 1 kWp galios saulės elementų tipams: standartinis procesas, modifikuotas difuzijos procesas ir perdirbtas silicis

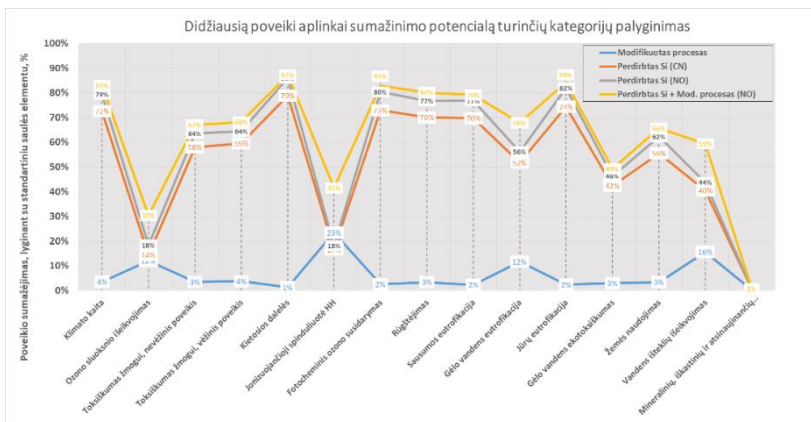
Iš Pav. 7. pateiktų rezultatų matome, jog naudojant perdirbtą silicį kaip žaliavą silicio plokštelių gamybai energijos atsipirkimo laikotarpį galima sutrumpinti net 82% (nuo 8.54 mėn. iki 1.54 mėn.) palyginus su standartiniu atveju - lyginant standartinio ir modifikuoto proceso saulės elementus pasiektas tik 1% trumpesnis atsipirkimo laikotarpis skaičiuojamas tam pačiam funkciniam vienetai.

ILCD 2011 Midpoint+ metodu buvo įvertintas tyrimo metu pagamintų skirtingų saulės elementų grupių CO₂ pėdsakas bei poveikis aplinkai pagal kitas kategorijas.



Pav. 8. Skirtingų saulės elementų gamybos procesų poveikio klimato kaitai palyginimas: standartinis, modifikuotas procesas, perdirbtas silicis (įtraukiant Norvegijos (NO) ir Kinijos (CN) elektros energijos balansus)

Pagal Pav. 8. pateiktus rezultatus matome, jog modifikuoto proceso anglies dvideginio pėdsakas yra apie 4% mažesnis palyginus su standartiniu atveju – 674.4 prieš 699.1 kg CO₂ eq / kWp. Tačiau kai silicio plokštelėms gaminti yra naudojamos perdirbtos saulės elementų gamybos atliekos, CO₂ pėdsakas sumažėja net 72% (Kinijos energijos balanso atveju) ir 79% (kai naudojama Norvegijos elektros energija) lyginant su standartiniu proceso receptu. Tai yra 192.4 ir 143.8 kg CO₂ ekv. / kWp atitinkamai. Teoriškai įmanomas yra ir kombinuotas atvejis, apjungiantis silicio perdirbimą ir proceso modifikavimą. Skaičiavimai parodė, jog tuomet įmanoma pasiekti ir 119 kg CO₂ ekv. / kWp ribą.



Pav. 9. Veiksnių, turinčių didžiausią poveikio aplinkai mažinimo potencialą, įvertinimas kiekvienam iš tyrime naudotų saulės elementų tipų: standartiniam, modifikuoto proceso ir perdirbtos silicio.

Seikant mėlynos linijos Pav. 9. vertes, kurios vaizduoja saulės elementą su modifikuotu difuzijos procesu, galima pastebėti, kad didžiausias neigiamo poveikio sumažėjimas pasiektas jonizuojančiosios spinduliuotės (23%), vandens išteklių (16%), gėlo vandens eutrofikacijos ir ozono sluoksnio (12%) kategorijose.

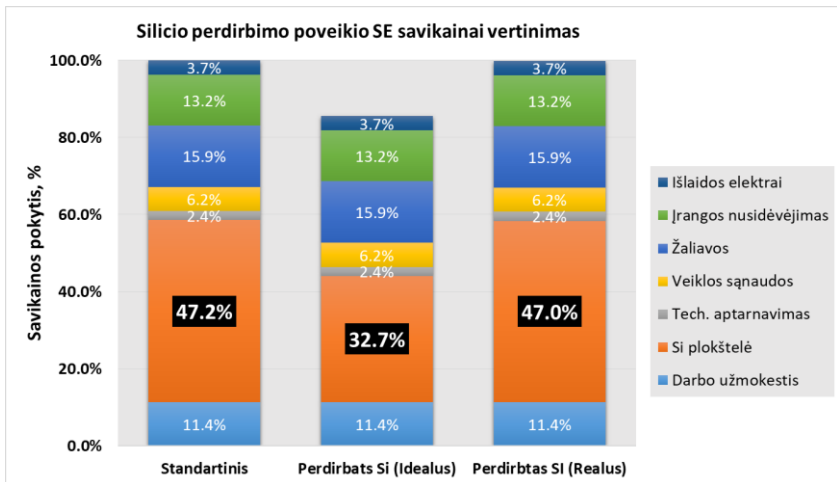
Saulės elementų grupei su perdirbtu siliciu poveikis aplinkai sumažėjo daugiau nei 70% net keliose kategorijose įskaitant klimato pokyčius, kietąsias daleles, fotocheminį ozono susidarymą, jūrų eutrofikaciją ir keletą kitų. Akivaizdu, kad silicio perdirbimas ir pakartotinis naudojimas turi didžiausią potencialą mažinant neigiamą poveikį aplinkai visose kategorijose. Įdomu pastebėti, kad net darant prielaidą, jog silicis yra perdirbamas Kinijoje, rezultatai yra tik šiek tiek prastesni lyginant su atveju, kai visa perdirbimo veikla yra atliekama Norvegijoje, kurios energijos gamybos balanse išskirtinai dominuoja hidroenergija.

Rezultatų ekonominis vertinimas

Remiantis pasiektais gamybinių tyrimų rezultatais bei papildoma proceso kaštų informacija, gauta iš SoliTek įmonės, buvo

atliktas silicio perdirbimo eksperimento ekonominis vertinimas šioms atvejams:

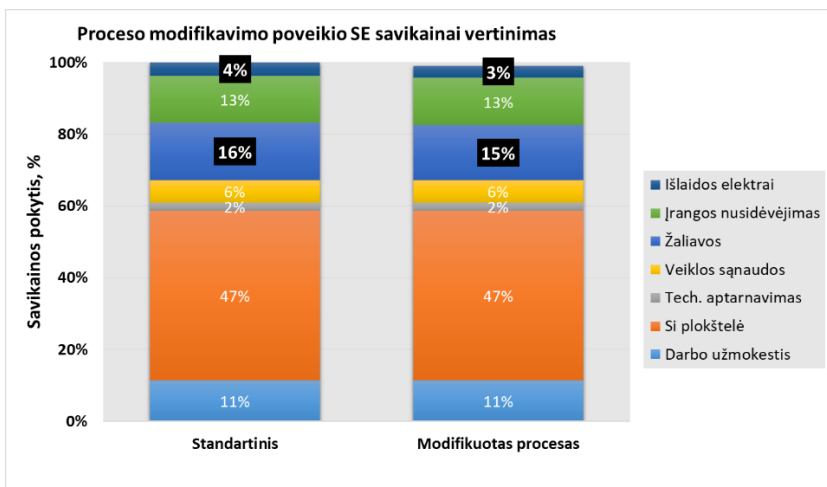
- „standartinis“ – įprastos gamybos atvejis, kai yra naudojama įprasta, neperdirbta silicio žaliava
- „idealus“ - kai saulės elementų gamybai būtų naudojamos 100% perdirbtos ir potencialiai apie 30% pigesnės silicio plokštelės
- „realus“ atvejis, kai tik maža dalis plokštelių (apie 1,4%), pagamintų iš A grupės tipo gamybos lūženu, yra naudojama saulės elementų gamybai, o likusiai daliai yra ir toliau naudojama standartinė silicio žaliava



Pav. 10. Saulės elementų gamybos sąnaudų įvertinimas atsižvelgiant į tris skirtingus metodus: standartinį, perdirbto silicio (idealų) ir perdirbto silicio (realų)

Kaip matome iš Pav. 10., idealiu atveju saulės elemento savikaina galėtų sumažėti apie 14.5%, o realiame scenarijuje gamybos kaštų sumažėjimas būtų labiau simbolinis ir siektų apie 0.2%.

Modifikuoto proceso atveju saulės elemento savikainos palyginimas su standartiniu procesu yra pateiktas Pav. 11.



Pav. 11. Saulės elementų gamybos sąnaudų pokyčio palyginimas tarp standartinio ir modifikuoto proceso atvejų

Iš pateiktų duomenų galima matyti, jog 2% savikainos sumažėjimas atsiranda iš žaliavų taupymo naudojant modifikuotą difuzijos procesą bei iš mažesnių elektros energijos sąnaudų dėka eliminuoto PSG plovimo proceso.

Lentelė 3. Teorinis saulės elementų gamybos palyginimas standartiniam, perdirbto silicio ir modifikuoto difuzijos proceso atvejams

| Proceso tipas | A. Savikaina, Eur/Wp | B. Metinis gamybos pajėgumas, MW | C. Marža, Eur/Wp. (0.25-A) | D. Pelnas, Eur. (C*B) | E. Pelno skirtumas, % |
|-------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Standartinis | 0.245 | 80 | 0.005 | 368 000.0 € | - |
| Silicio perdirbimas (Idealus) | 0.210 | 80 | 0.040 | 3 200 000.0 € | 770% |
| Silicio perdirbimas (Realus) | 0.245 | 80 | 0.005 | 408 000.0 € | 11% |
| Modifikuotas procesas | 0.243 | 80 | 0.007 | 560 000.0 € | 52% |

Kaip pateikta Lentelė 3., šiame darbe pritaikytos ir pademonstruotos saulės elementų gamybos inovacijos esant palankioms rinkos sąlygoms ir pilnam gamybinės linijos apkrovimui gali padidinti įmonių pelną iki 11%, o dalį gamyboje naudojamo silicio pakeičiant perdirbta medžiaga (realus atvejis) - ir iki 52% taikant modifikuotos difuzijos proceso gamybos receptą. Nepaisant to, savikainos pokyčiai procentine išraiška nėra itin dideli, šie skaičiavimai rodo, kad abu pasirinkti metodai galėtų būti patrauklūs saulės elementų gamybos įmonėms tiek aplinkos apsaugos, tiek ir komerciniu požiūriu.

4. IŠVADOS

1. Atlikus literatūros analizę buvo nustatyta, jog net 90% visos saulės energetikos rinkos, kuri 2019 m. viršijo 600 GWp ribą, sudaro kristalinio silicio technologija paremti sprendimai, o saulėtuose regionuose (pvz.: Artimuosiuose Rytuose) elektros energiją pagaminti iš saulės tapo pačiu pigiausiu elektros šaltiniu. Sparti fotovoltinės pramonės plėtra lemia ir tai, jog jau pradėdame susidurti su aplinkosauginėmis problemomis dėl susidaranciu atliekų, kurių kiekis iki 2030 m. pasieks daugiau nei 1 milijoną tonų. Atliekų susidarymo problemai spręsti yra galimi trys būdai: žaliavų ir energijos vartojimo mažinimas, efektyvus atliekų apdorojimas siekiant atgauti ir pakartotinai panaudoti žaliavas bei žiedinės ekonomikos principais paremtų produktų kūrimas.

2. Nustatyta, kad silicio plokštelių gamyba yra pagrindinis šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimo šaltinis.

- a) Net 70% viso išmetamo kiekio susidaro saulės elementų ir modulių gamybos etape. Išanalizavus literatūros šaltinius buvo išsiaiškinta, jog tokį išmetamųjų šiltnamio dujų kiekį lemia didelis energijos poreikis polysilicio gamybos etape, kuris siekia apie 212 kWh vienam kilogramui šios medžiagos.
- b) Buvo nustatyta, jog šiuo metu yra labiausiai paplitę trys pagrindiniai būdai, skirti silicio pagrindu pagamintų saulės modulių perdirbimui: terminis (deginimas įskaitant pirolizę),

mechaninis (polimerinių sluoksnių, laminavimo plėvelių atskirimas nuo stiklo, stiklo smulkinimas bei šlifavimas) ir cheminis (apdorojimas tirpikliais įskaitant ultragarsą).

3. Saulės elementų gamybos neigiamo poveikio aplinkai sumažinimui pasiekti buvo pasirinkti du metodai – silicio perdirbimas ir proceso modifikavimas.

- Eksperimentiniai rezultatai parodė, kad neužterštos SEA gali būti pakartotinai naudojamos kaip žaliava silicio plokštelėms gaminti. Neigiamos įtakos saulės elementų kokybiniams parametrams pastebėta nebuvo. Tokio tipo saulės elementų efektyvumo vidurkis buvo didesnis nei 17.0 %, o mediana siekė 17.38 %. Tačiau SEA, surinktos gamybos proceso pabaigoje, reikalauja papildomo valymo žingsnių, kadangi iš jų pagaminti saulės elementai pasižymėjo žemu energijos konvertavimo efektyvumu, nesiekiančiu net 10.0 %. Elektros krūvininkų gyvavimo trukmės ir difuzijos ilgio eksperimentiniai matavimai parodė tokio žemo efektyvumo priežastį: šios grupės saulės elementams gaminti naudotas silicis pasižymėjo itin žemu medžiagos grynumu.

- Proceso modifikavimas leido sumažinti medžiagų (azoto, deguonies ir POCl_3) sunaudojimą saulės elementų gamyboje ir sutrumpinti visą gamybos procesą eliminuojant vieną iš etapų – PSG valymą

4. Įrodyta, kad siūlomi metodai (silicio perdirbimas iš SEA bei difuzijos proceso modifikavimas) turi didelį potencialą sumažinti mc-Si saulės elementų gamybos poveikį aplinkai ir gamybos sąnaudas neprarandant medžiagos kokybės. Šiuos metodus taip pat galima pritaikyti pramonėje ir dėl atnešamos ekonominės naudos.

- Silicio, atgauto iš SEA, perdirbimas ir pakartotinis naudojimas mc-Si saulės elementų gamybos grandinėje gali sumažinti šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą (matuojamą CO_2 ekv. kg / kWp) iki 79% palyginus su standartiniu mc-Si saulės elementų gamybos procesu.

- Difuzijos proceso modifikavimo metodas gali sumažinti ŠESD išmetimą (matuojant CO_2 ekv. kg / kWp) 4% palyginus su standartiniais mc-Si saulės elementais, kurie apdorojami naudojant standartinį difuzijos procesą.

- Saulės elementų, pagamintų iš perdirbto silicio, EAL gali būti sumažintas net 82%, o naudojant modifikuotą difuzinį procesą - 1% palyginus su standartiniais mc-Si saulės elementais.

- Bandomojoje gamyboje naudojant perdirbtą silicį buvo įrodytas nedidelis saulės elementų efektyvumo padidėjimas ($\approx 0.12\%$ abs lyginant SE pagamintus iš perdirbtų, nedaug užterštų bei gamybos proceso pradžioje surinktų SEA ir pagamintų naudojant įprastos kokybės silicio, pagaminto laboratoriniu būdu). Šios grupės saulės elementų efektyvumo rodiklio mediana buvo mažesnė palyginus su saulės elementais, pagamintais naudojant įprastą, pramoninę aukštos arba vidutinės kokybės medžiagą. Tai parodo, kad dar yra nemažai galimybių toliau tobulinti silicio perdirbimo ir pakartotinio panaudojimo gamyboje procesą.

- Proceso modifikavimo atveju taip pat buvo pademonstruotas nedidelis efektyvumo padidėjimas (0.12%), o tai rodo, kad naujas receptas su *in-situ* būdu užaugintu silicio oksidu nepablogina saulės elemento kokybės net ir ženkliai sumažinant medžiagų sunaudojimą.

- Saulės elementų gamybos savikaina gali būti sumažinta iki 14.5%, jei saulės elementų gamyboje taikomas idealus silicio perdirbimo būdas (100% perdirbtas ir todėl 30% pigesnės silicio plokštelės). Tuo tarpu skaičiavimai parodė, jog proceso modifikavimo metodo taikymo atveju saulės elemento savikaina gali sumažėti apie 2% lyginant su standartiniu gamybos procesu.

5. LITERATŪRA

- [1] H. Wirth, “Recent Facts about Photovoltaics in Germany,” 2021.
- [2] M. J. (Mariska) de Wild-Scholten, “Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 119, no. December 2013, pp. 296–305, 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2013.08.037.
- [3] IRENA and IEA-PVPS, “End of Life Management Solar Photovoltaic Panels,” 2016.
- [4] Vasilis Fthenakis, H. C. Kim, R. Frischknecht, M. Raugei, P. Sinha, and M. Stuck, “Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessment of Photovoltaic Systems, International Energy Agency (IEA) PVPS Task 12, Report T12-04:2015.,” 2011.
- [5] L. McEvoy, A. J., Markvart, Tom, Castaner and T. M. Augustin McEvoy, L. Castaner, *Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation*. Academic Press, 2013.
- [6] M. a Green, “Third generation photovoltaics: comparative evaluation of advanced solar conversion options,” in *Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002, pp. 1330–1334, doi: 10.1109/PVSC.2002.1190855.
- [7] Fraunhofer-ISE, “Photovoltaics report,” Freiburg, 2020.
- [8] B. S. Xakalashé and M. Tangstad, “Silicon processing : from quartz to crystalline silicon solar cells,” *Chem. Technol.*, no. April, pp. 83–100, 2012.
- [9] M. A. Green, “Silicon solar cells : state of the art Subject Areas : Author for correspondence :,” *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 371, no. 1996, 2013, doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0413>.
- [10] G. Bye and B. Ceccaroli, “Solar grade silicon: Technology status and industrial trends,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 130, pp. 634–646, 2014, doi: 10.1016/j.solmat.2014.06.019.

- [11] VDMA, “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 7th Edition,” 2016.
- [12] VDMA, “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 11th edition,” 2020.
- [13] H. Seigneur et al., “Manufacturing metrology for c-Si photovoltaic module reliability and durability , Part I : Feedstock , crystallization and wafering,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 84–106, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.343.
- [14] Z. Zhang, Z. Xiong, H. Ye, S. Fu, Z. Feng, and P. J. Verlinden, “Two Methods for High Performance Mc-Si Ingot Growth,” in *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2015, pp. 304–306, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-2BO.2.3.
- [15] “Eco-Solar Factory: 40%plus Eco-Efficiency Gains in the Photovoltaic Value Chain with Minimised Resource and Energy Consumption by Closed Loop Systems.” [Online]. Available: <http://ecosolar.eu.com/>.
- [16] VDMA, “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 8th Edition,” 2017.
- [17] H. Wu, “Wire sawing technology : A state-of-the-art review,” *Precis. Eng.*, vol. 43, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1016/j.precisioneng.2015.08.008.
- [18] A. Kumar and S. N. Melkote, “Diamond Wire Sawing of Solar Silicon Wafers: A Sustainable Manufacturing Alternative to Loose Abrasive Slurry Sawing,” *Procedia Manuf.*, vol. 21, no. 2017, pp. 549–566, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.02.156.
- [19] M. De Sousa, A. Vardelle, G. Mariaux, M. Vardelle, U. Michon, and V. Beudin, “Use of a thermal plasma process to recycle silicon kerf loss to solar-grade silicon feedstock,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 161, pp. 187–192, 2016, doi: 10.1016/j.seppur.2016.02.005.
- [20] N. P. Wagner, A. Tron, J. R. Tolchard, G. Noia, and M. P. Bellmann, “Silicon anodes for lithium-ion batteries produced from recovered kerf powders,” *J. Power Sources*, vol. 414, no.

- September 2018, pp. 486–494, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.01.035.
- [21] “NexWafe GmbH - Growing Power.” [Online]. Available: <https://www.nexwafe.com/#about-us>.
- [22] M. A. Green, “Forty Years of Photovoltaic Research at UNSW,” *J. Proc. R. Soc. New South Wales*, vol. 148, pp. 2–14, 2015.
- [23] J. Denafas et al., “Implementation and Optimization of an Industrial Mc-Si PERC Process for Mass Production,” in *31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2015*, doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-2DO.16.2.
- [24] MicroChemicals GmbH, “Wet-Chemical Etching of Silicon and SiO₂,” 2013. [Online]. Available: www.microchemicals.com/downloads/application_notes.html%0Ahttps://www.microchemicals.eu/technical_information/silicon_etching.pdf.
- [25] K. O. Davis et al., “Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part II: Cell manufacturing,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 225–252, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.217.
- [26] “www.pveducation.org.” [Online]. Available: <https://www.pveducation.org/>.
- [27] E. J. Schneller et al., “Manufacturing metrology for c-Si module reliability and durability Part III: Module manufacturing,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 992–1016, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.215.
- [28] E. Bellini, “World now has 583.5 GW of operational PV,” 2020. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2020/04/06/world-now-has-583-5-gw-of-operational-pv/>.
- [29] W. Hemetsberger, M. Schmela, and G. Chianetta, “Global Market Outlook For Solar Power / 2020 - 2024,” 2020.
- [30] Europos Komisija, “Komisijos komunikatas Europos Parlamentui, Tarybai, Europos Ekonomikos ir Socialinių Reikalų Komitetui ir Regionų Komitetui. 2030 m. klimato politikos tikslo įgyvendinimo planas.” 2020.

- [31] “PV Cycle.” [Online]. Available: <http://www.pvcycle.org/homepage/>.
- [32] “The RoHS Directive.” [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/index_en.htm.
- [33] E.A. Alsema and M. J. de Wild-Scholten, “Reduction of the environmental impacts in crystalline silicon module manufacturing,” in 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2007.
- [34] M. P. Bellmann, G. Stokkan, A. Ciftja, J. Denafas, and T. Kaden, “Crystallization of multicrystalline silicon from reusable silicon nitride crucibles: Material properties and solar cell efficiency,” *J. Cryst. Growth*, vol. 504, no. July, pp. 51–55, 2018, doi: 10.1016/j.jcryspro.2018.09.026.
- [35] W. Nam, Y. Hahn, and S. Baik, “Local optimization of graphite heater to save a power consumption of Czochralski Si ingot grower for PV application,” *Energy Procedia*, vol. 124, pp. 767–776, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.083.
- [36] “Soli Tek - Leadership Through Innovation.” [Online]. Available: <https://www.solitek.eu/en/company>.
- [37] V. C. and B. D. F. Madon, O. Nichiporuk, R. Einhaus, L. Crampette, B. Semmache, L. Valette, “NICE Module Technology Using Industrial n-Type Solar Cells without Front and Rear Busbars,” in 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2013, pp. 3149–3153, doi: 10.4229/28thEUPVSEC2013-4AV.4.43.
- [38] European Parliament, “Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) (recast),” *Off. J. Eur. Union*, no. June, pp. 1009–1017, 2012.
- [39] A. T. Vekony, “The Opportunities of Solar Panel Recycling.” [Online]. Available: <https://www.greenmatch.co.uk/blog/2017/10/the-opportunities-of-solar-panel-recycling>.

- [40] “NPC incorporated | Global leader of solar module manufacturing equipment.” [Online]. Available: <https://www.npcgroup.net/eng/>.
- [41] “h.a.l.m. elektronik gmbh.” [Online]. Available: <http://www.halm.de/>.
- [42] K. Komoto and J. S. Lee, “End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies,” 2018.
- [43] J. Tao and S. Yu, “Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photovoltaic modules,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 141, pp. 108–124, 2015, doi: 10.1016/j.solmat.2015.05.005.
- [44] C. Latunussa, L. Mancini, G. Blengini, F. Ardente, and D. Pennington, *Analysis of Material Recovery from Silicon Photovoltaic Panels*, no. March. 2016.
- [45] W. Palitzsch, A. Killenberg, P. Schonherr, and U. Loser, “Photovoltaic Recycling with the help of Water and Light - It does not get greener,” 2018 IEEE 7th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC 2018 - A Jt. Conf. 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC 34th EU PVSEC, pp. 2465–2466, 2018, doi: 10.1109/PVSC.2018.8548095.
- [46] E. W. K. Wambach, S. Schlenker, A. Müller, M. Klenk, S. Wallat, R. Kopecek, “The second life of a 300 kW PV generator manufactured with recycled wafers from the oldest german pv power plant,” in *21st European Photovoltaic Solar Energy Conference.*, 2006.
- [47] R. Bendikiene et al., “Utilization of Industrial Solar Cells’ Scrap as the Base Material to Form Coatings,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, no. 5, pp. 2757–2767, 2020, doi: 10.1007/s12649-020-01153-8.
- [48] G. A. Heath et al., “Research and development priorities for silicon photovoltaic module recycling to support a circular economy,” *Nat. Energy*, vol. 5, no. 5, pp. 502–510, 2020.
- [49] S. Yousef, M. Tatariants, J. Denafas, V. Makarevicius, S. I. Lukošiušė, and J. Kruopienė, “Sustainable industrial technology

for recovery of Al nanocrystals, Si micro-particles and Ag from solar cell wafer production waste,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 191, no. December 2018, pp. 493–501, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2018.12.008.

- [50] K. Medkova and B. Fifield, “Circular Design - Design for Circular Economy,” *Lahti Cleantech Annu. Rev.* 2016, no. February, pp. 32–47, 2016.
- [51] “CIRCUSOL - Circular business models for the solar power industry.” [Online]. Available: <https://www.circusol.eu/en>.
- [52] “Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) Photovoltaic modules used in photovoltaic power systems for electricity generation,” no. December. European Commission, 2020.
- [53] M. Syvertsen, M. Juel, and M. P. Bellmann, “Effect of Better Insulation in a CRYSTALOX DS 250 Furnace During Melting and Solidification on the Furnace Operation,” in *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 2010, pp. 1543–1545, doi: 10.4229/25thEUPVSEC2010-2CV.1.21.
- [54] F. Buchholz et al., “Low Recombination Emitter Profile with In-Situ Oxide Passivation for Multi-Crystalline Solar Cells,” in *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2017, pp. 963–966, doi: 10.4229/EUPVSEC20172017-2CV.2.77.
- [55] S. Werner, S. Mourad, W. Hasan, and A. Wolf, “Structure and composition of phosphosilicate glass systems formed by POCl₃ diffusion,” *Energy Procedia*, vol. 124, pp. 455–463, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.280.
- [56] A. Dastgheib-Shirazi, M. Steyer, G. Micard, H. Wagner, P. P. Altermatt, and G. Hahn, “Relationships between diffusion parameters and phosphorus precipitation during the POCl₃ diffusion process,” *Energy Procedia*, vol. 38, pp. 254–262, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.07.275.
- [57] S. Werner, E. Lohmüller, S. Maier, S. Mourad, and Andreas Wolf, “Challenges for lowly-doped phosphorus emitters in

- silicon solar cells with screen-printed silver contacts,” *Energy Procedia*, vol. 124, pp. 936–946, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.274.
- [58] G. Sulyok and J. Summhammer, “Extraction of a photovoltaic cell ’ s double- - diode model parameters from data sheet values,” *Energy Sci. Eng.*, vol. 6, no. 5, pp. 424–436, 2018, doi: 10.1002/ese3.216.
- [59] S. W. Glunz and F. Feldmann, “SiO₂ surface passivation layers – a key technology for silicon solar cells,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 185, no. April, pp. 260–269, 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2018.04.029.
- [60] R. A. Sinton, A. Cuevas, and M. Stuckings, “Quasi-steady-state photoconductance, a new method for solar cell material and device characterization,” in *25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1996, pp. 457–460, doi: 10.1109/PVSC.1996.564042.
- [61] A. Kaminski, O. Breitenstein, J. P. Boyeaux, P. Rakotoniaina, and A. Laugier, “Light beam induced current and infrared thermography studies of multicrystalline silicon solar cells,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 2, 2004, doi: 10.1088/0953-8984/16/2/002.
- [62] S. Bowden, V. Yelundur, and A. Rohatgi, “Implied-Voc and Suns-Voc measurements in multicrystalline solar cells,” *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 3, pp. 371–374, 2002, doi: 10.1109/pvsc.2002.1190536.
- [63] “Semilab products - Light Beam Induced current.” [Online]. Available: <https://semilab.com/category/products/light-beam-induced-current>.
- [64] V. D. Mihailetchi, H. Chu, J. Lossen, and R. Kopecek, “Surface Passivation of Boron-Diffused Junctions by a Borosilicate Glass and in Situ Grown Silicon Dioxide Interface Layer,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 435–440, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2792422.

- [65] “Solar resource maps and GIS data for 200+ countries | Solargis.” [Online]. Available: <https://solargis.com/maps-and-gis-data/download>.
- [66] E. C.-J. R. C.-I. for E. and Sustainability, The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook. 2012.
- [67] “LCIA: the ReCiPe model.” [Online]. Available: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/recipe>.
- [68] F. Chigondo, “From Metallurgical-Grade to Solar-Grade Silicon: An Overview,” *Silicon*, vol. 10, no. 3, pp. 789–798, 2018, doi: 10.1007/s12633-016-9532-7.
- [69] S. McLeod, “StatisticsBox and Whisker Plot,” 2019. [Online]. Available: <https://www.simplypsychology.org/boxplots.html>.
- [70] “Interpret all statistics for a probability plot with normal fit,” 2020. [Online]. Available: <https://support.minitab.com/en-us/minitab-express/1/help-and-how-to/graphs/probability-plot/interpret-the-results/all-statistics/probability-plot-with-normal-fit/>.
- [71] B. Michl et al., “Excellent average diffusion lengths of 600 μm of N-type multicrystalline silicon wafers after the full solar cell process including boron diffusion,” *Energy Procedia*, vol. 33, no. 0, pp. 41–49, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.038.
- [72] “PV Insights.” [Online]. Available: <http://pvinsights.com/>.
- [73] “SENTECH: Home of thin film measurement.” [Online]. Available: https://www.sentech.com/en/Home__2235/.
- [74] “WCT-120 - the standard offline wafer-lifetime tool.” [Online]. Available: <https://www.sintoninstruments.com/products/wct-120/>.
- [75] W. Favre et al., “Coil-to-Sample Distance Influence on Contactless QSSPC Effective Lifetime Measurements: Application to Silicon Wafers Passivated with Thin Amorphous Silicon Layers,” 26th Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf. Exhib., no. March 2015, pp. 1563–1568, 2011, doi: 10.4229/26thEUPVSEC2011-2BV.2.49.

6. MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Disertacijos tyrimų rezultatai ir su jais susijusi papildoma veikla žiedinės ekonomikos tematika saulės energetikos sektoriuje buvo pateikti penkiuose leidiniuose, keturi iš jų - recenzuojamuose žurnaluose, nurodytuose duomenų bazėje „Clarivative Analytics-Web of Science“. Taip pat dviejose konferencijose kaip žodinis pranešimas ir plakatas.

Straipsniai, esantys Web of Science duomenų bazėje:

1. Sleiniute Agne, Urbelyte Liucija, **Denafas Julius**, Kosheleva Arina, Denafas Gintaras. Feasibilities for silicon recovery from solar cells waste by treatment with nitric acid. CHEMIJA. 2020. Vol. 31. No. 3. P. 137–145, ISSN 0235-7216, DOI: 10.6001/chemija.v31i3.4287 (2019 JIF 0.305, 5-metų JIF 0.428).

2. M.P. Bellmann, G. Stokkan, A. Ciftja, **J. Denafas**, T. Kaden. Crystallization of multicrystalline silicon from reusable silicon nitride crucibles: Material properties and solar cell efficiency. Journal of Crystal Growth, Volume 504, 2018, Pages 51-55, ISSN 0022-0248, DOI: 10.1016/j.jcrysro.2018.09.026. (JIF 1.797)

3. John A. Tsanakas, Arvid van der Heide, Tadas Radavičius, **Julius Denafas**, Elisabeth Lemaire, Ke Wang, Jef Poortmans, Eszter Voroshazi. Towards a circular supply chain for PV modules: Review of today's challenges in PV recycling, refurbishment and re-certification. Progress in Photovoltaics, Volume 28, Issue 6, Special Issue: EU PVSEC, June 2020, Pages 454-464. DOI: 10.1002/pip.3193. (JIF 7.690)

4. Bendikiene, Regita; Baltusnikas, Arunas; Ciuplys, Antanas; Lukošiuūtė, Irena; Juzenas, Kazimieras; Kalpokaite-Dickuviene, Regina; Sertvytis, Rolandas; **Denafas, Julius**. Utilization of industrial solar cells' scrap as the base material to form coatings // Waste and biomass valorization. Dordrecht : Springer. ISSN 1877-2641. eISSN

1877-265X. 2021, vol. 12, iss. 5, p. 2757-2767. DOI: 10.1007/s12649-020-01153-8 (JIF 2.851)

5. Samy Yousef, Maksym Tatariants, Julius Denafas, Vidas Makarevicius, Stasė-Irena Lukošiuūtė, Jolita Kruopienė. Sustainable industrial technology for recovery of Al nanocrystals, Si micro-particles and Ag from solar cell wafer production waste. Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 191, 2019, Pages 493-501, ISSN 0927-0248, DOI: 10.1016/j.solmat.2018.12.008 (JIF 7.267)

7. TRUMPOS ŽINIOS APIE AUTORIŲ

Julius Denafas gimė 1986 m. rugpjūčio 1 d.

2005 m. baigė Kauno Technologijos Universiteto gimnaziją.

2005–2009 m. mokėsi ir baigė Kompiuterinės Fizikos bakalauro studijas Vilniaus Universiteto Fizikos fakultete.

2009–2011 m. mokėsi ir baigė Medžiagų ir Gamybos inžinerijos magistro studijas Danijos Technikos Universitete.

2016–2020 m. mokėsi doktorantūros studijų programoje „Aplinkos inžinerija“ Kauno technologijos universitete, Aplinkos Inžinerijos Institute.

UDK 621.383.51:502.174.1+621.311.243](043.3)

SL344. 2021-*-* , * leidyb. apsk. l. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas