



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Fotovoltinių saulės modulių gamybos inovacijų lyginamasis poveikio aplinkai vertinimas

Baigiamasis magistro projektas

Aistis Rapolas Zubas

Projekto autorius

Lekt. dr. Inga Gurauskienė

Vadovė

Kaunas 2019



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Fotovoltinių saulės modulių gamybos inovacijų lyginamasis poveikio aplinkai vertinimas

Baigiamasis magistro projektas
Darnus valdymas ir gamyba (6213EX001)

Aistis Rapolas Zubas

Projekto autorius

Lekt. dr. Inga Gurauskienė

Vadovė

Prof. dr. Jolita Kruopienė

Recenzentė

Kaunas 2019



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Aistis Rapolas Zubas

(Studento vardas, pavardė)

Darnus valdymas ir gamyba (6213EX001)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Fotovoltinių saulės modulių gamybos inovacijų lyginamasis poveikio aplinkai vertinimas

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 19 m. birželio 4 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Aiščio Rapolo Zubo**, baigiamasis projektas tema „Fotovoltinių saulės modulių gamybos inovacijų lyginamasis poveikio aplinkai vertinimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas
Aplinkos inžinerijos institutas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Magistro projekto užduotis

Projekto tema Fotovoltinių saulės modulių gamybos inovacijų lyginamasis poveikio aplinkai vertinimas

Reikalavimai ir sąlygos
(tikslinti pavadinimą pagal
poreikį)

Atlikti fotovoltinių elementų inovacijų poveikio aplinkai vertinimą, ir pagrįsti būvio ciklo vertinimo metodikos svarbą siekiant, kad gamyboje taikomos inovacijos būtų darnios visuose būvio ciklo etapuose. Tyrimas atliekamas FvE gaminančioje įmonėje, lyginant du skirtingus FvE modulius ir jų poveikį aplinkai. Remiantis vertinimo rezultatais teikti siūlymus mažinančius FvE poveikį aplinkai gamyboje ir kituose BC etapuose.

Vadovė

dr. Inga Gurauskienė
(vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)

2019 02 01
(data)

Zubas, Aistis Rapolas. Fotovoltinių saulės modulių gamybos inovacijų lyginamasis poveikio aplinkai vertinimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovė lekt. dr. Inga Gurauskienė; Kauno technologijos universitetas, Aplinkos inžinerijos institutas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Aplinkos inžinerija (E03) – pagrindinė, Gamybos inžinerija (E10), Verslas (L01), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: fotovoltinis elementas, gamybos inovacijos, būvio ciklo vertinimas, silicis.

Kaunas, 2019. 75 p.

SANTRAUKA

Remiantis mokslinė literatūra nustatyta jog atsinaujinančių energijos išteklių reikšmė ateityje didės. Saulės energetikos sistemos jau dabar yra sparčiausiai vystomas elektrinių tipas, o ateityje prognozuojami dar didesni augimo tempai. Fotovoltinių saulės modulių naudojimas prisideda prie klimato kaitos ir aplinkos taršos mažinimo, vis tik norint dar geresnių rezultatų svarbu atkreipti dėmesį ne tik į jų veikimo fazę, bet ir į gamybos aspektus. Darbe nagrinėti fotovoltinių saulės modulių gamybos poveikiai aplinkai, apžvelgtos juos sukeliančios priežastys. Nustatyta, jog pagrindiniai veiksniai įtakojantis modulių poveikį aplinkai, jų efektyvumą yra su silicio gavyba bei apdorojimu susiję procesai. Įtaka aplinkai daugiausia įtakojama didelių šiluminės ir elektros energijos poreikių polikristalinio silicio plokštelių gamybos etapuose. Visų pirma tą nulemia Kinijos energetinė sistema, kurioje vyrauja iškastinis kuras, ypač anglis.

Norint įvertinti kaip gamybos inovacijų taikymas gali įtakoti poveikį aplinkai, remiantis būvio ciklo metodu ir naudojantis programine įranga SimaPro atliekamas fotovoltinių saulės modulių „Solid PRO P.60” gamybos inovacijų poveikio aplinkai vertinimas. Vertinant ILCD Midpoint+ metodu normalizavus iš pirminių žaliavų gaminamo modulio rezultatus bendras poveikis aplinkai yra – 13,07, iš kurių 57 % nulemti silicio plokštelių. Reikšmingiausios įtakos kuriamos toksiškumo žmogui vėžinės ir ne-vėžinės rizikos kategorijose. Įgyvendinus gamybos inovacijas: naudojant perdirbtą silicio plokšteles bei patobulinus saulės elementų difuzijos procesą, visose poveikio kategorijose neigiama įtaka aplinkai sumažėja, o bendras rezultatas 33 % mažesnis. Dvigubai sumažėja energijos poreikis gamyboje bei įtaka klimato kaitai. Išvesti santykiniai rodikliai, kuriais apskaičiuojamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis 1 kWh elektros energijos pagaminti, bei energijos atgavimo laikas, nes būtent šie dydžiai dažniausiai aptariami mokslinėje literatūroje.

Atsižvelgiant į rinkoje tiriamus ir vystomus projektus pasiūlyti sprendimai tolesniam produktų tobulinimui atsisakant enkapsuliantų, saulės elementus dengiant pasyvavimo danga ar ieškant alternatyvių silicio naudojimo būdų.

Zubas, Aistis Rapolas. Environmental Assessment of the Innovations of Solar Panels Production. Master's Final Degree Project / supervisor dr. Inga Gurauskienė; Institute of Environmental Engineering and Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Environmental Engineering (E03) – main study field, Production and Manufacturing Engineering (E10), Business (L01), Engineering Sciences.

Keywords: photovoltaic, manufacturing innovations, life cycle assessment, Silicon.

Kaunas, 2019. 75 pages.

SUMMARY

According to scientific literature, the importance of renewable energy sources will increase in the future. Solar energy systems are already the fastest growing type of power plants, and even higher growth rates are predicted in the future. The use of photovoltaics contributes to the mitigation of climate change and environmental pollution, however both the maintenance and the manufacture of PVs are significant for environmental efficiency. The paper examines the environmental impact of photovoltaic solar module production and reviews the causes. Processes of Silicon extraction and processing are the main factors influencing the environmental impact. It is mainly influenced by the production stages of polycrystalline Silicon wafers with high thermal and electrical needs. This is primarily due to the China energy system which is dominated by fossil fuels especially coal.

Life cycling assessment performed using the SimaPro software to evaluate the environmental impact of PV Solid PRO P.60 production innovations. Counting the ILCD Midpoint+ method results for primary raw materials PV, the overall environmental impact is 13.07, 57% of which are based on Silicon wafers. The most significant influence are the human toxicity cancer and non-cancer risk categories. Implementing production innovations: using recycled Silicon and improving the process of diffusion of PV, the negative impact on the environment is reduced in all exposure categories. The overall result is 33% lower. PV production energy need and the impact on climate change are reduced double. Greenhouse gas emissions for 1 kWh of electricity and energy payback time have been calculated, as these indicators are commonly discussed in literature.

Solutions have been proposed for further product development by eliminating encapsulants, coating of PERC and alternative use of Silicon.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	9
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS	10
ĮVADAS	11
1. FOTOVOLTINIŲ SAULĖS MODULIŲ NAUDOJIMAS IR JŲ POVEIKIO APLINKAI ANALIZĖ	13
1.1 Saulės energetika	13
1.2 Fotovoltiniai saulės moduliai	19
1.2.1 Modulių gamyba ir rinka.....	20
1.2.2 Fotovoltinių modulių atliekos.....	21
1.3 Fotovoltinių saulės modulių poveikio aplinkai vertinimo metodai	26
1.3.1 Fotovoltinių modulių poveikio aplinkai vertinimas būvio ciklo metodu.....	26
1.3.2 Energijos atgavimo laikas.....	30
1.3.3 Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos.....	33
1.3.4 Ekotoksiškumas.....	36
1.3.5 Kiti poveikiai aplinkai.....	37
1.4 Analizės apibendrinimas	38
2. FOTOVOLTINIŲ SAULĖS MODULIŲ POVEIKIO APLINKAI VERTINIMO METODIKA	39
3. FOTOVOLTINIŲ SAULĖS MODULIŲ POVEIKIO APLINKAI VERTINIMO REZULTATAI	43
3.1 Fotovoltinis modulis „Solid PRO P.60“	43
3.1.1 Silicio perdirbimas.....	46
3.1.2 Modulio konstrukcijos ir sandaros pakeitimai.....	48
3.1.3 Saulės elementų gamyba.....	49
3.1.4 Modulių gamyba.....	52
3.2 Fotovoltinio modulio gamybos energijos poreikis	53
3.3 Poveikis aplinkai vertinant ILCD Midpoint+ metodu	57
3.4 Fotovoltinio modulio poveikis aplinkai pasaulinio klimato šiltėjimo kategorijoje	60
3.5 Fotovoltinio modulio poveikis ReCiPe Endpoint (E) metodika	63
3.6 Gaminių poveikio aplinkai rezultatų analizė	64
3.7 Ekonominis vertinimas	64
3.8 Rekomendacijos dėl fotovoltinių modulių poveikio aplinkai mažinimo ir darnių inovacijų kūrimo	65
3.8.1 Rekomendacijos produkto tobulinimui.....	66
3.8.2 Priemonės skatinančios fotovoltinių saulės elementų poveikio aplinkai mažinimą.....	68
IŠVADOS	70
LITERATŪROS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS	72

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Moduluose naudojamos medžiagos, jų perdirbimo procentas, kaina.....	24
2 lentelė. ES šalyse susidaręs fotoelementų atliekų kiekis ir FvE instaliuota galia	25
3 lentelė. Energijos atgavimo laikas įvairių tipų moduliams	33
4 lentelė. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos	35
5 lentelė. Techniniai modulio „Solid PRO P.60“ duomenys	44
6 lentelė. Saulės elemento gamybos įvediniai	51
7 lentelė. Saulės elemento gamybos išvediniai	52
8 lentelė. Modulių gamybos procesuose naudojamos medžiagos.....	53
9 lentelė. Sunaudotos energijos kiekis pagal energijos šaltinį	54
10 lentelė. FvE gamybos ŠESD emisijų kiekis.....	61
11 lentelė. Žaliavų kaina ir sutaupymai gaminant 1 kWp.....	65

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Pasaulinė elektros gamybos prognozė 2040 metams	14
2 pav. Prognozuojama rinkos struktūra pagal suvartotą elektros energijos, pagamintos iš atsinaujinančių energijos išteklių, kiekį, proc. ir GWh.....	15
3 pav. Į pastatus integruoti saulės moduliai	18
4 pav. Fotoelementų paplitimas pasaulyje pagal tipą.....	19
5 pav. Gamybos etapų kaštai.....	21
6 pav. FvE modulių gamyba	27
7 pav. Gamybos energijos poreikiai iš atsinaujinančių ir neatsinaujinančių šaltinių, MJ/kWh.....	27
8 pav. FvE gamybos ŠESD emisijos, kg CO ₂ ekvivalentu/kWh	28
9 pav. Energijos atgavimo laikas Pietų Europos sąlygomis (1700 kWh/m ²).....	31
10 pav. Plokštelės storis ir silicio naudojimas moduluose.....	32
11 pav. Saulės fotoelementų efektyvumo kitimas.....	32
12 pav. Šiltnamio efektą sukeliančių emisijų pasiskirstymas per gyvavimo etapus.....	34
13 pav. Būvio ciklo vertinimo struktūra	40
14 pav. Elektros generavimo iš saulės energijos sistema.....	40
15 pav. Modulis „Solid PRO P.60“.....	44
16 pav. Efektyvumo kitimas per modulio tarnavimo laiką	45
17 pav. FvE modulių gamyba	45
18 pav. Silicio plokštelių gamyba	46
19 pav. Saulės elementų gamyba	49
20 pav. Saulės elementų gamyba	50
21 pav. Modulių gamyba	52
22 pav. Procesų energijos sąnaudos.....	54
23 pav. Gaminių energijos poreikio pasikeitimas pagal įvairius energijos šaltinius.....	55
24 pav. Gaminių energijos poreikio proporcingas pasikeitimas pagal įvairius energijos šaltinius.....	56
25 pav. Normalizuotų pirminio modulio ILCD Midpoint+ metodikos rezultatų pasiskirstymas poveikio aplinkai kategorijose.....	57
26 pav. Normalizuotas pirminio gaminio poveikis vertinant ILCD Midpoint+ metodu	58
27 pav. Gaminių poveikių aplinkai pasikeitimai vertinant ILCD Midpoint+ metodu.....	59
28 pav. Gaminių poveikiai aplinkai ILCD Midpoint+ metodu normalizavus rezultatus.....	59
29 pav. Silicio plokštelių poveikiai aplinkai ILCD Midpoint+ metodu.....	60
30 pav. Antrojo modulio ŠESD emisijos.....	62
31 pav. Pirminio modulio įtaka žalos kategorijoms vertinant ReCiPe Endpoint (E) metodika.....	63
32 pav. Pasikeitimas žalos kategorijose vertinant ReCiPe Endpoint (E) metodika	63

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

FvE – fotovoltinis elementas

c-Si – kristalinis silicis

mono-Si – monokristalinis silicis

poly-Si – polikristalinis (multikristalinis) silicis

a-Si – amorfinis silicis

CdTe – kadmio telūridas

CIS – vario indžio diselenidas

CIGS – vario indžio galio selenidas

JTO – Jungtinių Tautų Organizacija

DVT – darnaus vystymosi tikslai

EPBT – energijos atgavimo laikas

ES – Europos Sąjunga

EEIÅ – elektros ir elektroninės įrangos atliekos

BCV – būvio ciklo vertinimas

ISO – tarptautinė standartizacijos organizacija

ŠESD – šiltnamio efektą sukeliančios dujos

PKŠ – pasaulinis klimato šiltėjimas

ACAC – acetilacetonas

HF – vandenilio fluoridas

DI vanduo – dejonizuotas vanduo

SE – saulės elementas (celė)

EVA – etilen vinil acetatas

POE – poliolefinas

ĮVADAS

Nuolat augantis gyventojų skaičius, ekonominė plėtra, technologinis vystymasis reikalauja vis didesnių energijos kiekių. Mažėjant iškastinio kuro atsargoms bei didėjant aplinkos taršai itin svarbu kreipti dėmesį į būdus, kuriais būtų galima generuoti energiją minimizuojant poveikį aplinkai. Vienas iš būdų to siekti – didinti saulės energijos panaudojimą. Pastaruosius porą dešimtmečių itin išaugo elektros energijos gamybai naudojamų fotovoltinių saulės elementų (FvE) paklausa. Numatomos tendencijos jog šių įrenginių naudojimas tik didės, ypač besivystančiose šalyse, kuriose saulės intensyvumas aukštas, o energijos poreikiai kyla. Todėl tiek dėl ekonominių, tiek dėl aplinkosauginių priežasčių saulės modulių naudojimas auga. Taip prisidedama prie poveikio aplinkai mažinimo, palyginti su energetika paremta iškastinio kuro deginimu. Vis tik norint dar labiau mažinti įtaką aplinkai reikia atkreipti dėmesį į sprendimus, kuriais siekiama tobulinti šių įrenginių gamybą.

Kadangi fotovoltinius modulius sudaro įvairios žaliavos, iš kurių dalis ir kritinės bei pavojingos žaliavos, jų atsisakymas, pakeitimas mažiau taršiomis ar perdirbimas gali reikšmingai prisidėti prie poveikio aplinkai mažinimo. Šiuo atveju, galima išskirti silicį, kuris yra svarbi medžiaga saulės energiją generuojant į elektros energiją. Įvertinant numatomas FvE rinkos augimo tendencijas, taip pat bendrą elektros įrenginių gamybos didėjimą, silicio poreikis ateityje augs. Silicis yra viena iš kritinių žaliavų, tiek dėl intensyvaus naudojimo atsinaujinančioje energetikoje, tiek ir dėl išteklių mažėjimo, bei rizikos pristigti jos gamybos sektoriuje. Saulės elementus gaminančios įmonės vertindamos silicio kritiškumą, kaip reikšmingą ekonominį ir aplinkosauginį iššūkį, imasi priemonių diegiant inovacijas, kurios leistų valdyti šią riziką.

Gamybos tobulinimo sprendimų identifikavimas įmonėse sąlygojamas įvairių veiksnių, todėl svarbu atlikti įvairių gaminio modifikacijų bei inovacijų sisteminių poveikio aplinkai vertinimą, identifikuoti palankiausias aplinkai alternatyvas per visą gaminio būvio ciklą, siekiant išvengti priešingo inovacijos efekto per visą būvio ciklą. Vystant ekologinį gaminių projektavimą, didinant efektyvumą, racionaliai naudojant perdirbtas medžiagas prisidedama prie aplinkosauginio veiksmingumo didinimo bei žiedinės ekonomikos vystymo FvE rinkoje.

Temos aktualumas – vystant fotovoltines technologijas, įvairūs suinteresuotieji siekia savų tikslų, tarp kurių svarbiausi yra aplinkosauginiai ir ekonominiai aspektai. Tačiau vien tik šiek tiek sumažinus pagrindinių žaliavų kieki ir padidinus modulių efektyvumą tuose pačiuose moduluose gali būti nepasiektas toks ryškus pokytis poveikio aplinkai srityje. Vertinant modulius dėmesys daugiausia kreipiamas į jų naudojimo fazę, kuomet generuojama elektros energija. Taip pat ir vertinant poveikio aplinkai rodiklius pagrindiniai parametrai siejami su naudojimo etapu. Vis tik kreipiant didesnę dėmesį į fotovoltinių elementų gamybą, pasirenkant įvairias technologijas, didinant žaliavų efektyvumą bei priimant sprendimus atsižvelgiant į visą gaminio būvio ciklą galima reikšmingiau prisidėti prie poveikio aplinkai mažinimo.

Mokslinis naujumas – fotovoltinių elementų naudojimas įvardinamas kaip priemonė mažinant įtaką klimato kaitai, oro taršai. Literatūroje pabrėžiamas FvE anglies pėdsakas, gamybos energijos poreikis, bet rečiau nagrinėjamas įvairiapusis poveikio aplinkai vertinimas. Net ir identifikavus probleminius etapus, neieškoma kompleksinių žingsnių jų sprendimui, neanalizuojamas galimų inovacijų poveikis. Tačiau remiantis būvio ciklo metodika ir naudojantis programine įranga galima ankstyvoje stadijoje numatyti su projektuojamu gaminiu susijusius poveikius ir ieškoti sprendimų jų mažinimui.

Problematika – fotovoltiniai saulės moduliai susideda iš įvairių medžiagų. Dalį jų sudaro ir kritinės bei pavojingos žaliavos. Gamybos procesams reikalingi ir dideli energijos kiekiai. Ekologinis gaminių projektavimas, gaminių efektyvumo didinimas, racionalus perdirbtų medžiagų naudojimas prisideda prie neigiamos įtakos aplinkai mažinimo bei žiedinės ekonomikos vystymo šioje rinkoje. Todėl svarbu atlikti skirtingų gaminių modifikacijų bei inovacijų sisteminių poveikio aplinkai vertinimą, siekiant identifikuoti palankiausias aplinkai alternatyvas per visą gaminių būvio ciklą.

Darbo objektas – fotovoltiniai saulės moduliai ir jų gamybos tobulinimo procesai: vienas modulis pagamintas iš pirminių žaliavų, tuo tarpu kito gamyboje dėl patobulintų procesų sumažinami žaliavų kiekiai, o saulės elementų gamybai naudojamas perdirbtas silicis.

Tikslas – atlikti lyginamąjį fotovoltinių saulės modulių poveikio aplinkai vertinimą identifikuojant reikšmingus aspektus, į kuriuos svarbu atsižvelgti gamybos įmonėms, kuriant ar tobulinant gaminius.

Uždaviniai:

1. atlikti mokslinės literatūros, teisės aktų, susijusių su saulės moduliais, jų projektavimu, gamyba, naudojimu bei šalinimu analizę;
2. išanalizuoti fotovoltinių saulės elementų gamybos tendencijas, taikomas inovacijas ir ateities perspektyvas, atsižvelgiant į globalius iššūkius;
3. išanalizuoti metodus, taikomus saulės modulių aplinkosauginiam veiksmingumui vertinti;
4. atlikti „Solid PRO P.60“ fotovoltinių saulės modulių poveikio aplinkai vertinimą;
5. remiantis būvio ciklo analizės rezultatais atlikti fotovoltinių elementų palyginamąją analizę, papildomai vertinant ir ekonominius gamybos aspektus;
6. pateikti siūlymus tolimesniam gaminių tobulinimui, verslo vystymui.

1. FOTOVOLTINIŲ SAULĖS MODULIŲ NAUDOJIMAS IR JŲ POVEIKIO APLINKAI ANALIZĖ

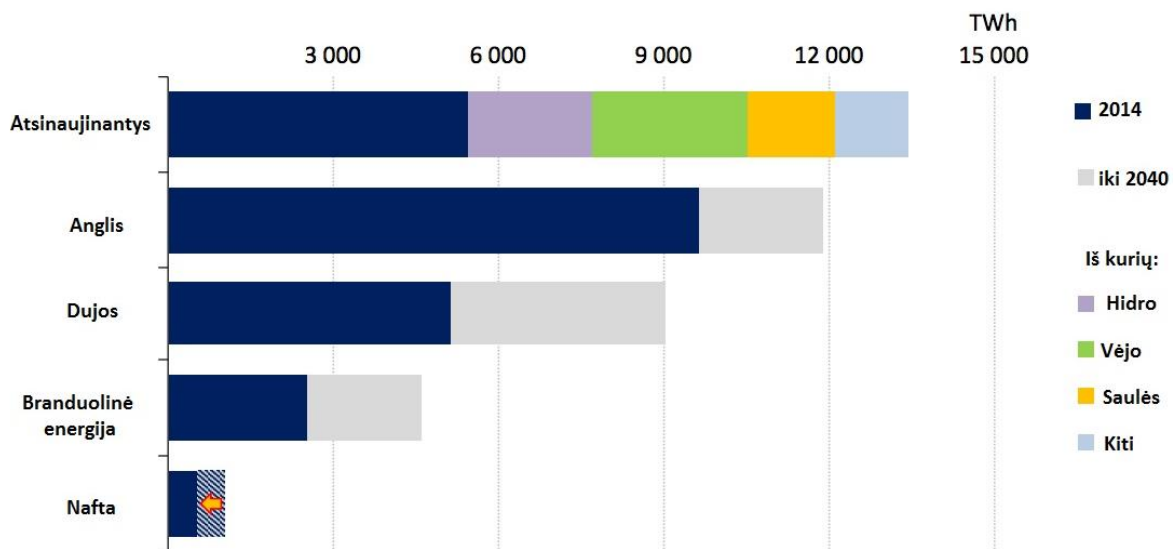
1.1 Saulės energetika

Siekiant užtikrinti augančius energijos poreikius vis daugiau energijos gaminama naudojant atsinaujinančius energijos išteklius (saulės, vandens, vėjo, biomasės, geoterminius). 2012 m. pasaulyje iš saulės energijos buvo pagaminta 96 TWh elektros energijos (0,44 % nuo bendro pagaminto elektros energijos kiekio – 21000 TWh). Ir tai buvo ketvirtas pagal dydį atsinaujinančios energijos šaltinis elektros gamybai po hidroenergijos (3646 TWh), vėjo (520 TWh) ir biomasės (384 TWh) (Energy Information Administration, Energy Department 2015).

Bendra elektros energijos gamyba 2017 m. pasaulyje jau buvo šiek tiek didesnė ir siekė 24000 TWh. Vis tik pokytis fotovoltiniais saulės moduliais pagamintai energijai dar didesnis, ir 2017 m. taip pagaminta jau 531 TWh elektros energijos, o tai sudarė 2,2 % nuo bendro šios energijos kiekio (Masson, Izumi 2018). Saulės energetikos reikšmė dažnai nuvertinama dėl neva nepakankamo saulės spinduliavimo Lietuvos klimatinėmis sąlygomis. Vis tik statistika rodo, kad panašioje klimatinėje zonoje esančioje Vokietijoje saulės energetika jau užima reikšmingą dalį. Paskaičiuota, jog esant tinkamoms sąlygoms vidurdienio valandomis, 2013 liepos 7 dieną, net 48 % elektros energijos buvo pagaminta FvE įrenginiais, o bendrame tos dienos kiekyje, taip pagaminta energija sudarė 23 % (Zheng, Kammen 2014). Lietuvoje 2016 metais saulės elektrinių pagalba pagaminta 66 GWh elektros energijos, ir tai sudarė 1,7 % nuo visos Lietuvoje pagamintos elektros energijos kiekio (IEA, 2018). Europoje šis santykis svyruoja tarp 2 ir 9 % priklausomai nuo šalies. Vokietijoje, turinčioje galingiausią saulės elektrines ES šis santykis yra apie 7 %. Maltoje, jis didžiausias iš Europos šalių, ir yra apie 9 %. Panašaus spinduliavimo sąlygomis kaip Lietuva, esančios Čekija, Danija fotovoltiniais saulės moduliais pagamina 3–4 % bendro elektros energijos kiekio.

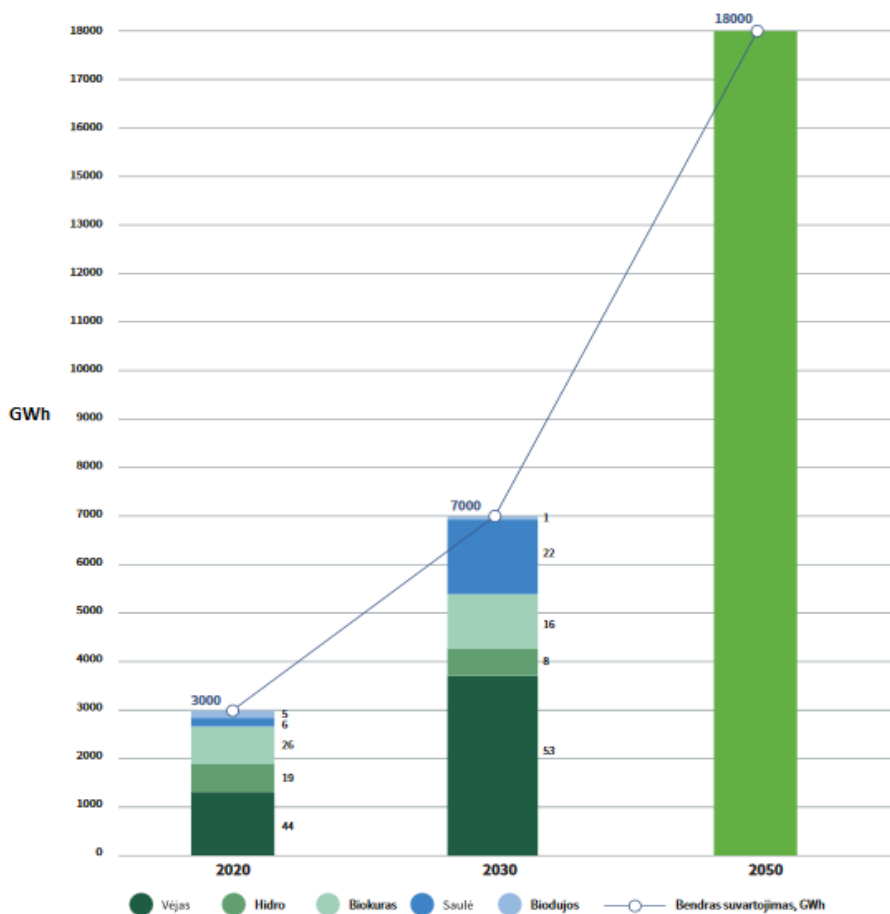
Pastaraisiais metais intensyvi šių technologijų plėtra aiškiai matoma. 2017 m. iš visų pasaulyje naujai įrengtų elektrinių (178,8 GW) net 99 GW buvo saulės elektrinės. Europoje nuo 2000 m. iki 2019 m. viso įrengta 107 GW naujų fotoelementų ir pagal naujai įrengiamų elektrinių galią nusileido tik vėjo energetikos plėtrai (158 GW), lenkiant tiek dujomis, tiek kitais neatsinaujinančiais energijos ištekliais veikiančias elektrines. Vis tik sparčiausias FvE diegimas vyksta Kinijoje, čia vien 2017 m. įrengta 53 GW galios saulės elektrinių, kas leido šiai šaliai tapti lyderiaujančia pasaulyje pagal įrengtą FvE galią.

Prognozuojama, kad 2040 m. pasaulinė elektros energijos gamyba bus 39000 TWh (1 pav.). Numatoma, kad atsinaujinančių energijos išteklių pagalba tuomet bus pagaminama apie 14000 TWh (35 %) visos pasaulio elektros energijos (Energy Information Administration, Energy Department 2015).



1 pav. Pasaulinė elektros gamybos prognozė 2040 metams (IEA, 2015)

Atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas yra vienas pagrindinių tikslų 2018 birželį atnaujintoje Lietuvos Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijoje, joje numatomos gairės Lietuvos energetikos sektoriui atsižvelgiant į aplinkosauginius, visuomeninius, ekonominius, politinius tikslus. Strategijoje numatytos keturios pagrindinės Lietuvos energetikos politikos kryptys – energetinis saugumas, žaliosios energetikos plėtra, tausūs energijos vartojimas bei konkurencingumas ir inovacijos. Strategijoje numatoma, kad iki 2030 m. 45 % suvartojamos elektros ir net 90 % šilumos energijos bus pagaminama iš atsinaujinančių energijos išteklių. O 2050 m. visa Lietuvoje sunaudojama elektros ir šilumos energija bus gaminama iš atsinaujinančių bei kitų netaršių šaltinių. Atsinaujinantys energijos ištekliai sudarys net 80 % visos Lietuvoje suvartojamos energijos (Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija 2019). Planuojant tokius tikslus prognozuojama ir rinkos struktūra pagal išteklių rūšį, kiekį, procentus (2 pav.).



2 pav. Prognozuojama rinkos struktūra pagal suvartotą elektros energijos, pagamintos iš atsinaujinančių energijos išteklių, kiekį, proc. ir GWh (Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija 2019)

Pasak Strategijos atsinaujinančių energijos išteklių plėtra Lietuvoje turi būti vykdoma vadovaujantis šiais principais:

Palaiptinio atsinaujinančių energijos išteklių integravimo į rinką – turi būti plėtojamos ekonomiškai efektyviausios technologijos, atsižvelgiama į technologijų brandumą, įvertinant ir jų netolimos ateities pažangos tendencijas;

Įperkamo ir skaidrumo – atsinaujinančių energijos išteklių skatinimo schemas modelis turi būti pagrįstas rinkos principu, kuo mažiau ją iškraipyti ir užtikrinti mažiausią finansinę naštą energijos vartotojams, aiškumą ir nediskriminacinę konkurencinę aplinką;

Aktyvaus energijos vartotojų dalyvavimo – didėjant atsinaujinančių energijos išteklių daliai, palyginti su visu energijos išteklių balansu, turi būti skatinama decentralizuota elektros energijos gamyba, vartotojams suteikiama galimybė iš atsinaujinančių energijos išteklių pasigamintą energiją vartoti savo reikmėms, o už perteklinę energiją, patiektą į tinklą, gauti rinkos sąlygas atitinkantį atlygį, taip pat turi būti įdiegti vartotojų elgsenos ir energijos paklausos ir pasiūlos valdymo sprendimai. (Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija 2019)

FvE naudojimas nurodomas kaip vienas iš būdų mažinant įtaką klimato kaitai, oro taršai, diegiant inovacijas, didinant konkurenciją. Skatinant šias priemones bei atsižvelgiant į Europos Komisijos priimtas 2014–2020 metų Valstybės pagalbos aplinkos apsaugai ir energetikai gaires vykdoma parama FvE įrengimui. Šiuo metu programa vykdoma pagal 2014–2020 metų Europos Sąjungos fondų investicijų veiksmų programos 4 prioriteto „Energijos efektyvumo ir atsinaujinančių išteklių energijos gamybos ir naudojimo skatinimas“ 04.1.1-LVPA-V-114 priemonės „Elektros energijos iš atsinaujinančių išteklių gamybos įrenginių įrengimas namų ūkiuose“ projektų finansavimo sąlygų aprašą (Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija 2019). Juo Lietuvoje teikiama parama fiziniams asmenims, norintiems savo valdose įsirengti saulės elektrines iki 10 kWp galios, tokiu atveju už 1 kWp finansuojant 323 eurus.

Darnaus vystymosi tikslų įgyvendinimas

Saulės energijos technologijų naudojimas prisideda prie 2015 metais suformuotų darnaus vystymosi tikslų (DVT), jais siekiama aplinkosauginės, ekonominės bei socialinės raidos (JTO 2015). Labiausiai atliepiama į šiuos tikslus ir uždavinius:

DVT 7. Atsinaujanti ir prieinama energija: Užtikrinti įperkamos, patikimos, tvarios ir modernios energijos šaltinių prieigą visiems:

- Iki 2030 metų užtikrinti visuotinę galimybę gauti prieinamas, patikimas ir modernias energetikos paslaugas.
- Iki 2030 metų labai padidinti atsinaujinančiosios energijos dalį pasaulinės energijos rūšių derinyje.
- Iki 2030 metų padvigubinti pasaulinį energijos vartojimo efektyvumo padidinimo rodiklį.

DVT 8. Geros darbo vietos ir ekonomika: Skatinti tvarią, visapusę ir darnią ekonomikos raidą, užtikrinti pilnutinį ir produktyvų aprūpinimą darbu ir tinkamą darbą kiekvienam:

- 2030 metais palapsniui gerinti veiksmingą pasaulinių išteklių naudojimą vartojimo srityje ir gamyboje ir stengtis atskirti ekonomikos augimą nuo aplinkos būklės blogėjimo laikantis dešimties metų trukmės darnaus vartojimo ir gamybos programų sistemos, vadovaujant išsivysčiusioms šalims.

DVT 9. Inovacijos ir gera infrastruktūra. Sukurti lanksčią infrastruktūrą, skatinti visapusę ir tvarią pramonės plėtrą bei puoselėti naujoviškumą:

- Iki 2030 metų modernizuoti infrastruktūrą ir aprūpinti naujais įrenginiais pramonės sektorius, kad jie taptų tvaresni, padėtų pagerinti išteklių naudojimo veiksmingumą ir taikytų daugiau švarių ir aplinkai nekenksmingų technologijų.

DVT 11. Tvarūs miestai ir bendrijos: Miestus ir gyvenvietes padaryti patogius, saugius, lanksčiai prisitaikančius prie aplinkybių ir tvarius:

- Iki 2030 metų sumažinti vienam gyventojui tenkantį neigiamą miestų poveikį aplinkai, ypatingą dėmesį skiriant oro kokybei bei komunalinių ir kitų atliekų tvarkymui.

DVT 12. Atsakingas išteklių naudojimas: Užtikrinti tvarius naudojimo ir gamybos modelius:

- Iki 2030 metų pasiekti darnų gamtos išteklių valdymą ir veiksmingą jų naudojimą.
- Iki 2020 metų užtikrinti aplinkai nekenksmingą chemikalų ir visų atliekų tvarkymą per jų gyvavimo ciklą, laikantis suderintų tarptautinių programų, ir labai sumažinti jų išmetimą į orą, vandenį ir dirvožemį, kad kuo labiau sumažėtų neigiamas jų poveikis žmogaus sveikatai ir aplinkai.
- Iki 2030 metų labai sumažinti atliekų susidarymą, taikant prevenciją, mažinimą, perdirbimą ir pakartotinį panaudojimą.

DVT 13. Klimato apsaugos veiksmai: Neatidėliojant imtis veiksmų klimato kaitai stabdyti ir jos padariniams šalinti:

- Įtraukti klimato kaitos priemones į nacionalinę politiką, strategijas ir planavimą.

Darnios statybos vystymas

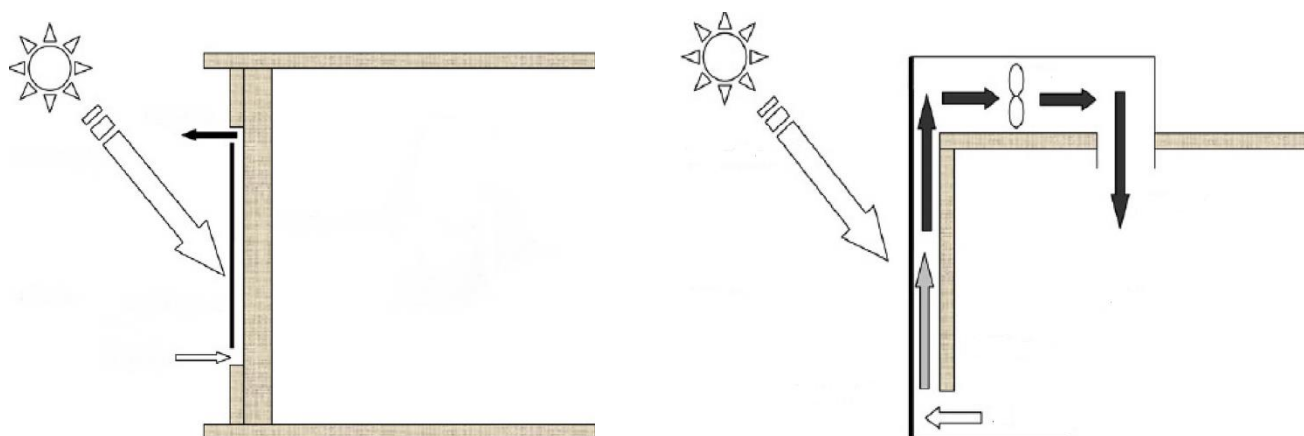
Svarbu išskirti FvE reikšmę siekiant darnesnio statybų sektoriaus, tvarių miestų vystymo. Šiuo atveju reikia paminėti į pastatus integruojamus fotovoltinius saulės modulius. Šie moduliai ne tik tiekia energiją pastatui, bet ir tampa pastato konstrukcijos dalimi. Užuot tiesiog montuojami ant statinių, FvE moduliai gali pakeisti stogus, stoglangius, fasadus, parkavimo stogelius ar kitas statinių dalis (Temby ir kt. 2014). Integruotų fotovoltinių modulių naudojimas siūlo net keletą pranašumų, lyginant su tradicinėmis statybinėmis medžiagomis ir tradiciniais ant stogo montuojamais moduliais. Skirtingai nuo standartinių elementų, papildomos išlaidos, susijusios su į pastatus integruojamais įrenginiais, iš dalies kompensuojamos tuo, kad sumažėja reikalingų statybinių medžiagų kiekis, nes jų funkcija iš dalies pakeičiama šia technologija. Daugeliu atvejų šie elementai viršija tradicinius statybinių medžiagų techninius parametrus. Pavyzdžiui, šios sistemos yra sukurtos ilgesniam kaip 25 metų naudojimui, tuo tarpu kai kurios stogo dangos skirtos tik 15–20 metų (Lamnatou ir kt. 2019).

Integruojami moduliai gali būti naudojami ne tik elektros energijos, bet ir šilumos gamybai. Šilumos surinkimo funkcija integruojama į FvE plokštes, tokiu būdu 6–18 % patekusios saulės energijos konvertuojama į elektros energiją, o likusi saulės energija yra naudojama kaip naudinga šiluma. Už panelės cirkuliuoja šilumnešis (vanduo ar oras) pernešdamas šilumą ir vėsindamas plokštę. Tai didina ir plokštės naudingumą, nes jos efektyvumas mažėja, didėjant temperatūrai. Taip galima gauti atviro arba uždaro ciklo konfigūracijas (3 pav.). Sugeneruota šiluma gali būti naudojama patalpų šildymui, vėdinamo oro pašildymui arba karšto vandens ruošimui – tiesioginiu būdu arba per šilumos siurblių (Debbarma ir kt. 2017). Tokie sprendimai turi įvairių privalumų, svarbiausi iš jų:

- inovatyvus dizainas;
- apsauga nuo saulės ir energijos gamyba;

- sumažinamas pastato CO₂ pėdsakas;
- šilumos izoliacija;
- garso izoliacija, komforto didinimas;
- didinama pastato vertė.

Kaip ir bendrai vertinant saulės modulių naudą taip ir šiuo atveju reikia priimti daugiau faktorių efektyvumui įvertinti. Šių sistemų veikimas priklauso nuo projektavimo ir vietos klimato sąlygų. Modulio, kaip šilumos izoliacijos naudojimas turi būti numatomas pastato statybos ar restauravimo plane. Maksimalus į pastatus integruotos sistemos šiluminis efektyvumas šiuo metu yra apie 55 %.



3 pav. Į pastatus integruoti saulės moduliai (Debbarma ir kt. 2017)

Lietuvoje atlikto tyrimo metu Valančius ir Grigaliūnas, 2016 m. vertino saulės energijos naudojimo efektyvumą modernizuojamuose pastatuose. 5, 9 ir 16 aukštų daugiabučiams pastatams parinkti saulės moduliai generuojantys dalį reikiamos energijos kiekio. Modeliuojant ant nagrinėjamų daugiabučių stogų sumontuojami „YingliSolar YL275C-30b_IEC“ fotovoltiniai saulės elementai, kurie yra derinami su Vokiečių gamintojo „SMA“ TripowerTL“ (8, 10, 17 kW) keitikliais.

Modeliavimo rezultatai: išanalizavus duomenis apie 9-ių aukštų pradedamo modernizuoti daugiabučio su 17 kW fotovoltinių elementų elektrine, matyti, kad vasarą padengiama 27–34 % elektros energijos poreikio (butams, laiptinėms apšviesti ir liftams reikalingo kiekio). Iš viso per metus kompensuojama 16 % viso elektros poreikio.

Išanalizavus 16-os aukštų daugiabučio duomenis, paaiškėjo, kad gegužės–rugpjūčio mėnesiais bus kompensuojama 18–21 % elektros energijos poreikio. Ant daugiabučio įrengus 16 kW saulės elektrinę ir gaminant energiją iš atsinaujinančių energijos išteklių, būtų padengiama 8 % bendro metinio namo elektros poreikio.

Remiantis anksčiau pateiktais duomenimis, matyti, kad didžiausia dalis elektros energijos poreikių yra užtikrinama įrengiant 30 kW fotovoltinę saulės elektrinę ant 5-ių aukštų daugiabučio. Įrengus elektrinę ant

modernizuoto daugiabučio stogo gegužės–rugpjūčio mėnesiais būtų pagaminama 93–98 % elektros energijos poreikio. Iš viso per metus būtų padengiama 44 % viso 5-ių aukštų namo elektros energijos poreikio.

Palyginus integruotų saulės elektrinių daugiabučiuose įrengimo sąnaudas, taip pat įvertinus tikrąjį atsiperkamumo laiką, greičiausiai, tai yra per 9 metus, atsiperka 30 kW saulės elektrinė ant 5-ių aukštų daugiabučio stogo. Ilgiausias tikrasis atsipirkimo laikas yra 16 kW elektrinės ant 16-os aukštų stogo, kuris siekia 14 metų. Taigi tokia investicija gali būti laikoma perspektyvia, ypač vertinant nuolat didėjančias energijos kainas.

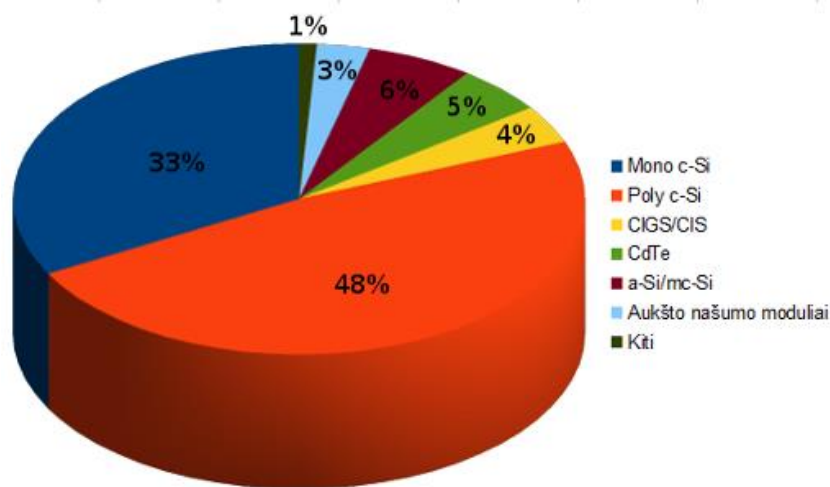
1.2 Fotovoltiniai saulės moduliai

Saulės energija surenkama ir paverčiama į elektros energiją naudojant fotovoltinius elementus, kurių veikimas pagrįstas fotovoltiniu efektu – įtampos, arba srovės, atsiradimu medžiagą paveikus šviesa.

Fotovoltiniai elementai susideda iš saulės elementų sujungtų į vieną modulį (Stylos, Koroneos 2014). Svarbiausia saulės elemento dalis yra puslaidininkiniai sluoksniai, kuriuose sukuriama elektronų srovė. Tam sukurti naudojamos įvairios medžiagos, jos turi įvairių privalumų ir trūkumų, todėl nėra vienos idealios medžiagos. Pagrindiniai saulės elementų tipai yra šie:

- Silicio (monokristaliniai, polikristaliniai, amorfinio silicio);
- Kadmio telūrido;
- Vario indžio galio selenido;
- Vario indžio diselenido.

Šiuo metu rinkoje vyrauja kristaliniai silicio moduliai, jie užima apie 80 % pasaulio rinkos, visų pirma dėl to, kad kitos puslaidininkinės medžiagos yra kur kas brangesnės (4 pav.).

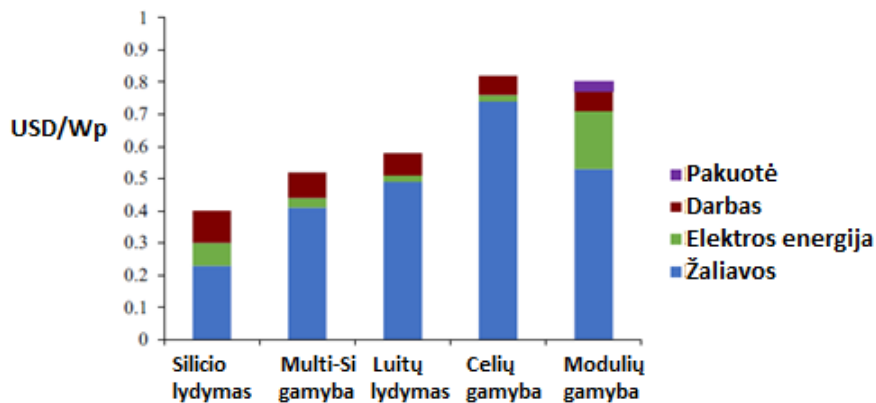


4 pav. Fotoelementų paplitimas pasaulyje pagal tipą (Xu ir kt. 2018)

1.2.1 Modulių gamyba ir rinka

Kristalinių silicio modulių gamyba prasideda nuo kvarco kasybos ir apdorojimo, kvarcas gryninamas iki silicio. Gautas didelio grynumo silicis lydomas ir formuojamas į polikristalinio silicio luitus. Gaminant monokristalinius silicio modulius, silicio plokštelė yra auginama aplink vieną bazinį monokristalą ir sukuriamas idealiai orientuotas kristalinis tinklelis. Polikristalinio modulio atveju silicio plokštelė formuojama iš karto aplink kelis bazinius kristalus. Tokie luitai pagal formą pjaustomi į 10 x 10, 12,5 x 12,5 ar 15,6 x 15,6 cm dydžio plokšteles, kurių storis svyruoja tarp 150 ir 250 μm. Tuomet ant plokštelių formuojamas N tipo emiterio sluoksnis, dažniausiai jis kuriamas fosforo atomų difuzijos būdu 850–900°C temperatūroje. Ant galinės dalies dedamas iš aliuminio ir sidabro sukurtas sluoksnis. Plokšteles padengiant kontaktais ir antirefleksine danga gaunami saulės elementai. Šie saulės elementai testuojami, bandymo procedūra apima gaminio bandymą (pvz., struktūros ir elektrinės charakteristikos testas) bei patikimumo bandymas (pvz.: terminis ciklas, šiluminis, mechaninės ir statinės apkrovos, bei tvirtumo testai). Atitikus reikalavimus SE jungiami tarpusavyje į pageidaujamo dydžio modulius. Paskutinis žingsnis yra modulio įterpimas į etilen vinil acetato (EVA) polimero ar kitokio tipo foliją. Laminavimas vyksta 120–150°C temperatūroje, o modulio kraštai yra užsandarinami polisulfido elastomeru, po ko moduliai plaunami ir džiovunami. Galiausiai pritvirtinama jungimo dėžutė ir modulis įreminamas aliuminio rėmu.

Detaliai ištirtas Kinijos įmonių FvE gamybos ekonominis bei socialinis poveikiai šaliai. Kinija itin svarbi šalis šiai rinkai, kadangi apie 70 % saulės modulių pagaminama būtent šioje valstybėje, o nuo 2015 metų ji aplenkė Vokietiją ir pagal instaliuotų modulių galią (Jiang 2015). FvE gamyba apima pradinę fazę (žaliavas) ir vidurinę fazes (pramoninė kristalinio silicio gamyba ir liejinių liejimas, saulės elementų ir modulių gamyba, surinkimas ir transportavimas). Didžiąją dalį kristalinių silicio modulių kainos sudaro žaliavų, medžiagų apdorojimo ir komponentų gamybos sąnaudos (Gu 2012). Taigi, atliktame tyrime skaičiuojant gamybos išlaidas moduliuose atsižvelgiama į žaliavų kainą, darbo jėgą, energiją, pakavimo priemones, silicio liejinių liejimą, SE apdorojimą ir modulių surinkimo etapus (Huang ir kt. 2018). Didėjant saulės energijos įrenginių apimtims svarbu suprasti ir šios rinkos kuriamą socialinę vertę. Kalbant apie gamybos procesą, darbuotojai ir visuomenė paprastai yra laikomi pagrindiniais suinteresuotaisiais subjektais. Pagrindiniai elementai, susiję su darbo jėga, apima darbo vietą, pajamas už darbą, darbo našumą ir aplinką. Remiantis statistika, modulių gamintojų įmonėse Kinijoje dirba daugiau nei pusantro milijono žmonių, iš kurių 55 % dirba protinį darbą. Ekonominė analizė parodė, kad pagrindinės modulio gamybos išlaidos slypi žaliavose ir darbo apmokėjime ir sudaro apie 70 % visų kaštų. O tarp jų saulės elementų gamyba turi didžiausią kainą iš penkių FvE gamybos etapų. 5 pav. pateikiami skirtingų gamybos etapų kaštai vertinant žaliavas, elektros energiją, darbą ir pakuotę.



5 pav. Gamybos etapų kaštai (1 USD = 0,89 EUR) (Huang ir kt. 2018)

Jeigu naujos polikristalinės silicio gamybos technologijos, tokios kaip fizinis šildymas, bus plačiai pritaikomos, tikimasi, kad ateityje FvE kaina bus ženkliai sumažinta. Kalbant apie darbo sąnaudas, didėjant automatizavimo lygiui gamyboje, ateityje kaštai tenkantys darbui, tikėtina bus sumažinti. Įdomu tai, kad skaičiuojant darbuotojų skaičių tenkantį 1 GWp galingumo moduliams pagaminti, Jungtinėse Amerikos Valstijose šis skaičius yra 5240, kuomet Kinijoje net 32490. Tai tik įrodo automatizavimo lygio ir darbo našumo skirtumus.

Nepaisant to, kad ši rinka sparčiai plečiasi, o Kinija yra pirmaujanti pagal gaminamų modulių skaičių, bendrame šalies kontekste, ši gamybos šaka užima menką dalį lyginant su sunkiąja pramone.

1.2.2 Fotovoltinių modulių atliekos

Didele dalimi dėl ekonominių paskatų, gamybos procesai tampa vis efektyvesni, tačiau problema lieka modulių atliekų tvarkymas. 2016 m. bendras jų atliekų srautas siekė apie 125000 tonas, ir tai sudaro sąlyginai nedidelį kiekį nuo bendros įrengtų įrenginių masės (4 milijonai tonų). Tačiau šiandieninis atliekų kiekis tėra seniai sumontuotų modulių atliekos, o ateityje planuojama visiškai kitokia situacija ir tuomet efektyvus atliekų valdymas turės didelę reikšmę norint vystyti darnią šios pramonės plėtrą. Atsižvelgiant į vidutinį 30 metų trukmės FvE tarnavimo laiką, dideli metinių atliekų kiekiai numatomi apie 2030 metus, kuomet atliekomis taps amžiaus pradžioje įrengti fotovoltiniai saulės moduliai. Tuomet susidariusių atliekų kiekis turės kur kas didesnę procentą nei dabar vertinant su naujai įrengiamų modulių skaičiumi. Prognozuojama, kad 2050 m. atliekų susidarys apie 5,5–6 milijonai tonų ir tai beveik atitiks naujai gaminamų įrenginių masę – 6,7 mln. tonų per metus (International Renewable Energy Agency 2016). Stipriai didės ir fotovoltinių atliekų kiekis skaičiuojant santykį nuo bendrai susidariusių elektronikos atliekų. 2014 metais susidarė 41,8 milijono elektros ir elektroninės įrangos atliekų, o saulės modulių atliekos jose sudarė mažiau nei 1 %, prognozuojama, kad 2050 metais, šios atliekos sudarys apie 10 % nuo bendro elektros ir elektroninės įrangos atliekų skaičiaus.

Klasikinės atliekų tvarkymo hierarchijos (mažinimas, pakartotinis naudojimas ir perdirbimas) sistemos turi būti taikomos ir fotovoltinėms plokštėms. Pirminis tikslas – mažinti atliekų kiekius arba keisti medžiagas mažiau taršiomis. Medžiagų sudėtis FvE žymiai nesikeitė per jų naudojimo laiką. Tačiau didelis kiekis žaliavų sutaupyta dėl padidėjusio išteklių ir medžiagų veiksmingumo. Medžiagų taupymas ir jų pakeitimai buvo ir yra tęsiami dėl tyrimų analizavusių švino, kadmio ir seleno kaip pavojingų medžiagų efektyvesnio panaudojimo. Kitoms medžiagoms naudojamoms saulės moduluose, tyrimai daugiausia dėmesio skiria mažinant reikalingą medžiagų kiekį vienam moduliui pagaminti.

Norint pakartotinai panaudoti FvE, jie visų pirma testuojami ir nustatoma ar remontas ekonomiškai efektyvus. Kai remontas reikalingas ir įmanomas, paprastai tai reiškia, kad reikia naudoti naują rėmą, naują jungiamąją dėžę, keisti diodus, kištukus, lizdus ir kitas detales. Plokštės gali būti perlaminuotos ir parduotos per specialius projektus ar kitu prekiniu pavadinimu. Remontuotos fotovoltinės plokštės gali būti perparduotos kaip pakaitalai. Jos taip pat gali būti parduotos kaip naudotos plokštės mažesne rinkos kaina, kuri yra maždaug 70 % nuo pradinės naujo gaminio pardavimo kainos. Iš dalies pataisytos plokštės ar komponentai gali būti parduodami naudotų prekių rinkoje.

Galbūt dėl to, jog ši – saulės elementų atliekų problema, pakankamai nauja, daug kur pasaulyje nėra nustatytų procesų jai spręsti. Remiantis nacionalinėmis taisyklėmis FvE daugelyje šalių priskiriami gamybinėms atliekoms. Europos Sąjunga, rodydama pavyzdį, sukūrė taisykles, nurodančias kaip šios atliekos turi būti renkamos, laikomos ir perdirbamos. Šios gairės nurodomos Europos Sąjungos Elektros ir elektroninės įrangos atliekų direktyvoje. Ši direktyva pradėjo galioti 2003 metų vasario mėnesį, bet buvo nepakankama spręsti greitai augančių skirtingų atliekų srautus, todėl 2012 metais buvo peržiūrėta ir pirmą kartą joje aprašytas fotovoltinių modulių atliekų tvarkymas. Dabar kiekviena ES šalis yra atsakinga už nurodytų elementų atliekų surinkimą ir apdorojimą. Direktyva visų pirma remiasi išplėstine gamintojo atsakomybe, pagal kurią visi gamintojai turi padengti šių atliekų surinkimo, apdorojimo ir stebėsenos kaštus (EP 2012).

Direktyvos V priedas numato minimalius naudojimo tikslus atsižvelgiant į atliekų kategoriją ir laikotarpį. Fotovoltiniams elementams nuo 2018 rugpjūčio 15 dienos šie tikslai numatomi taip: 85 % turi būti panaudota ir 80 % turi būti parengta pakartotiniam naudojimui ir perdirbta.

Atliekų perdirbimas

Didžiausias dėmesys tvarkant FvE atliekas skiriamas perdirbimo procesų efektyvumui gerinti. Kadangi šiuo metu visame pasaulyje atliekų rinkoje yra palyginti nedideli fotovoltinių atliekų kiekiai, nėra ir pakankamai ekonominės paskatos kurti specialius tokių atliekų perdirbimo įrenginius (Xu ir kt. 2018). Todėl šis darbas atliekamas įprastose perdirbimo gamyklose. Čia didžiausias dėmesys kreipiamas į mechaninį pagrindinių komponentų atskyrimą. Pasiekiamas pakankamai aukštas medžiagų atgavimo procentas, vis tik, kai kurios aukštos vertės, bet mažos masės medžiagos negali būti visiškai atgautos. Toks perdirbimo būdas nereikalauja specialių investicijų, tačiau

ilguoju laikotarpiu didėjant modulių kiekiui gali būti pelninga kurti vien saulės elementų perdirbimui skirtas gamyklas. Perdirbimo technologijos šiems atliekoms jau tiriamos pastaruosius 15 metų. Didėjant žinių kiekiui ir pritaikant naujas technologijas atsiranda specializuotų perdirbimo įmonių vystymo pagrindas, nes didėjantys atliekų srautai gali užtikrinti pelningą veiklą. Išsamius tyrimus atlieka tyrimų institutai ir saulės energetikos bendrovės, įskaitant „AEG“, „BP Solar“, „First Solar“, „Pilkington“ ir daugelį kitų. Nors daug įvairių technologinių perdirbimo procesų yra tiriama tačiau tik du iš jų aktyviai diegiami pramonėje: vienas sukurtas „Deutsche Solar“ siliciniams moduliams (anksčiau taikytas Vokietijoje), o kitas – „First Solar“ plonasluoksniams CdTe moduliams (šiuo metu veikia Jungtinėse Valstijose, Vokietijoje, ir Malaizijoje). Kiti eksperimentai tiriantys mechaninius, terminius ir cheminius perdirbimo procesus, daugiausia yra vykdomi ir finansuojami pagal Europos Sąjungos mokslinių tyrimų programas: *Recovery of Solar Valuable Materials, Enrichment and Decontamination (RESOLVED)*, *Sustainability Evaluation of Solar Energy Systems (SENSE)*, *(Implementation of a Circular Economy Based on Recycled, Reused and Recovered Indium, Silicon and Silver Materials for Photovoltaic and Other Applications) (CABRISS)*.

Nauji perdirbimo sprendimai turėtų padėti atgauti pagrindinius komponentus, tokius kaip stiklas, aliuminis, silicis ir kitas – mažos masės medžiagas (sidabras, indis) dar aukštesne kokybe. Privaloma reaguoti ir į nedidelius pavojingų bei toksiškų medžiagų kiekius (pvz., kadmio). Tarp pagrindinių problemų perdirbant modulius yra labai nepatogus kai kurių medžiagų perdirbimas, vienas daugiausia resursų perdirbimui reikalaujančių elementų yra laminato užpildas (paprastai EVA), kadangi moduluose jis sudaro nemažą dalį svarbu didinti jo perdirbimo efektyvumą (Sica ir kt. 2018). Jo perdirbimui dabar taikoma daug įvairių fizinių, mechaninių, cheminių ir šilumos metodų atsižvelgiant į modulio sudėtį, tačiau vis tiek nepavyksta visiškai atgauti modulio medžiagos arba jos kokybė prasta.

Norint aukštu grynumo koeficientu perdirbti modulius reikalingi įvairūs procesai. Cheminis apdorojimas yra reikalingas atgaunant silicį iš elementų. Perlydimas ir cheminiai procesai privalomi ir atkuriant sidabrą bei aliuminį (Huang ir kt. 2017). Taip pat reikia pažymėti, jog visos medžiagos negali būti atgautos 100 %. Tyrimu įvertintos 1 kWp multikristalinio silicio modulio perdirbamų medžiagų procentinės išraiškos ir gauta masė, jos pasiskirstė taip: stiklas (42,3 kg, 89 %), silicis (2 kg, 80 %), aliuminis (10,3 kg, 81 %), sidabras (0,03 kg, 89 %).

Tinkamas FvE atliekų tvarkymas yra sudėtingas ne tik dėl pakartotinio panaudojimo ar perdirbimo, bet ir dėl pavojingų medžiagų šalinimo, pvz., kadmio iš plonasluoksnių modulių ar švino iš silicinių. Visuose CdTe, CIS ir CIGS moduluose yra kadmio junginių, kurie laikomi toksiškais aplinkai ir žmogaus sveikatai. CIS ir CIGS moduluose taip pat yra seleno, kuris kaupiasi maisto grandinėse ir sudaro vandenilio selenidą, labai toksišką bei kancerogeninę medžiagą. Nors tai kelia susirūpinimą gaminant ir šalinant FvE modulius, kadmio toksiškumas CdTe gyvavimo ciklo metu yra 100–360 kartų mažesnis už anglies naudojimą įrenginiuose su veikiančiais kietųjų dalelių filtrais (Sinha ir kt. 2008).

Vis tik c-Si modulyje esantis švino kiekis svyruoja nuo 1,64 iki 11,4 g ir yra didesnis nei kadmio CdTe moduluose (0,32–11,4 g). Be to, švino išplovimo potencialas svyruoja nuo 13 % esant 6–7 pH, iki 90 %, kuomet pH

3–4 ir tai yra kur kas didesnės vertės nei kadmio (atitinkamai 29 % ir 40 %). Išlaidos, susijusios su tarša, atsirandančia dėl netinkamo šių medžiagų pasklidimo buvo apskaičiuotos ir yra maždaug tokios: švinui – 1174 €/kg, kadmiui – 46 €/kg. Remiantis tokiu vertinimu, įmanoma, kad 2050 m. neteisingas atliekų tvarkymas susidarius 1741 t švino kristaliniuose silicio moduliuose ir 302 t kadmio CdTe moduliuose gali kainuoti atitinkamai daugiau kaip 2 milijardus eurų ir apie 14 mln. eurų (Malandrino ir kt. 2017).

Perdirbimas prisideda ne tik prie aplinkosauginių, bet ir ekonominių verčių kūrimo. Kristaliniai silicio moduliai yra dominuojantys rinkoje ir sudaro daugiau kaip 80 % įrenginių, todėl, kad būtent ši technologija yra pigiausia ir buvo pradėta plačiai naudoti paskutiniajame XX amžiaus dešimtmetyje. Dėl šios priežasties ir šiuo metu didėja šių modulių, tapusių atliekomis, kiekis. Tačiau silicio pagrindu pagaminti FvE turi mažesnę vertę medžiagų požiūriu ir jų perdirbimo išlaidos dažnai yra didesnės nei šalinimo sąvartynuose, todėl perdirbimas kol kas gali būti ekonomiškai neefektyvus (Cucchiella ir kt. 2015). Tuo tarpu plonasluoksnių modulių atveju (CIGS ir CdTe) perdirbimas garantuoja didesnes pajamas dėl aukštesnės vertės medžiagų. 1 lentelėje pateikiamos skirtingų tipų fotovoltinių modulių medžiagų sudėtys, jų perdirbimo efektyvumas, kaina. Tačiau kaina nurodoma 100 % grynumo medžiagoms, o tokį lygį ne visuomet galima pasiekti su šiandien naudojamomis technologijomis. Įvairios medžiagos naudojamos fotovoltiniuose moduliuose gali būti grąžinamos skirtinga procentine dalimi. Ypač didelis stiklo ir Al (atitinkamai 97 % ir 100 %) atgaunamumas. Mažesnis, bet vis dar didelis Cu ir Te (apie 80 %) ir dar mažesnis retiems metalams, In (apie 75 %), bet jos sudaro tik apie 1% viso plokštės svorio. Vis tik jų kainos už masės vienetą, aukštos, todėl ir mažų kiekių atgavimas gali nešti ekonominę naudą (Sica ir kt. 2018).

1 lentelė. Moduliuose naudojamos medžiagos, jų perdirbimo procentas, kaina (Sica ir kt. 2018)

	Medžiagos												
	Al	Cd	Cu	Ga	In	Mo	Plastikai	Se	Si	Sn	Te	Stiklas	Zn
c-Si (%)	17,5		1,0				12,8		2,9			65,8	
CdTe (%)		0,08	0,03				3,0			0,02	0,07	96,8	
CIGS (%)			0,01	0,01	0,01	0,12	3,0	0,01				96,9	0,04
Perdirbimo procentas													
(%)	100	98	78	99	75	99	-	80	85	99	80	97	90
Rinkos kaina													
Eur/kg	1,3	1,24	4,8	199	543	19	0,09	42	1,52	16,5	77	0,1	1,45

Europos Sąjungos šalyse nuo 2010 m. iki 2014 m. susidariusių fotovoltinių saulės modulių atliekų kiekis siekė 9225 tonas ir sudarė 0,11 % nuo bendro Elektros ir elektroninės įrangos atliekų skaičiaus (D'Adamo ir kt. 2017). Atskirose šalyse susidarę kiekiai nurodomi 2 lentelėje.

2 lentelė. ES šalyse susidaręs fotoelementų atliekų kiekis ir FvE instaliuota galia (D'Adamo ir kt. 2017)

Valstybė	Apdorota atliekų (t)	Instaliuota galia (MW)
Vokietija	5273	35700
Italija	1449	17900
Ispanija	812	5306
Lenkija	584	24
Prancūzija	376	4300
Belgija	242	2865
Olandija	145	650
Slovėnija	101	280
Didžioji Britanija	68	3100
Europos Sąjunga	9225	79952

Remiantis Italijos sąlygomis, atliktas tyrimas (Cucchiella ir kt. 2015) kuriame apskaičiuotos modulių perdirbimo ekonominė nauda. Tokiu atveju projektuojamas atliekų kiekis perdirbant 1480 tonų per metus. Atsižvelgiama į rinkoje vyraujančių įvairių tipų modulių kiekį: 80 % kristalinių silicio modulių ir 20 % plonasluoksnių (7 % CdTe, 13 % CIGS ir CIS). Ekonominiu požiūriu pabrėžiama, jog svarbiausi aspektai yra perdirbimo procentas, žaliavų rinkos kaina, grynumo lygis medžiagose. Iš aptarto modelio prieita išvados, kad:

- didelis pelnas garantuojamas tik pramoninėms įmonėms;
- apdorojant ne tik c-Si, bet ir plonasluoksnius modulius;
- turint ne mažiau kaip 20 000 tonų atliekų per metus.

Tokios įmonės galėtų gauti 795829 eurų (priklausomai nuo medžiagų rinkos kainų) mėnesines pajamas su 243227 eurų išlaidomis. Tačiau jos patirtų didesnes kapitalo, veiklos ir logistikos sąnaudas nei mažesnės įmonės. Vertinant mažesnę gamyklą (apie 185 tonų per metus), mėnesinės pajamos sumažėja iki 7917 eurų, o bendros išlaidos sudarytų net 16853 eurus.

Analizuojama ir tai, kas neša didžiausią pelną šiuose įrenginiuose (D'Adamo ir kt. 2017). Kristaliniuose silicio moduliuose tai susiję su kritinėmis žaliavomis. O plonasluoksniuose moduliuose tai aukštos vertės metalai (indis, galis, telūras, selenas). Didesnis pelningumas būtų pasiekiamas jei pavyktų sumažinti perdirbimo procesų kaštus, taip pat pagerinti atgaunamų medžiagų grynumą, o rinkoje parduodamų pirminių žaliavų kainos būtų didesnės nei esančios šiuo metu.

Kol kas pakankamai mažas susidarančių atliekų kiekis stabdo technologinių procesų vystymąsi, tuo pačiu ir daro perdirbimą ekonomiškai neefektyviu. Tačiau manoma, kad apie 2025–2030 metus, kuomet ateis pastaraisiais dešimtmečiais montuotų elementų eksploatacijos pabaiga, tikėtini visai kitokie perdirbimo bei regeneravimo

rezultatai ir tikslai. Prognozuojama, kad santykis tarp susidariusių atliekų ir naujai įrengiamų modulių pasieks 14 % 2030 metais, o 2050 metais net 80 %. Preliminarūs skaičiavimai rodo, kad žaliavų atkuriamų iš FvE plokščių, 2030 metais vertė gali siekti 540 mln. EUR 2017 m. gegužės mėn. kainomis. Tai yra suma, lygiavertė dabartinei žaliavų, reikalingų pagaminti, 21 GWp pajėgumo FvE, vertei (Sica ir kt. 2018).

1.3 Fotovoltinių saulės modulių poveikio aplinkai vertinimo metodai

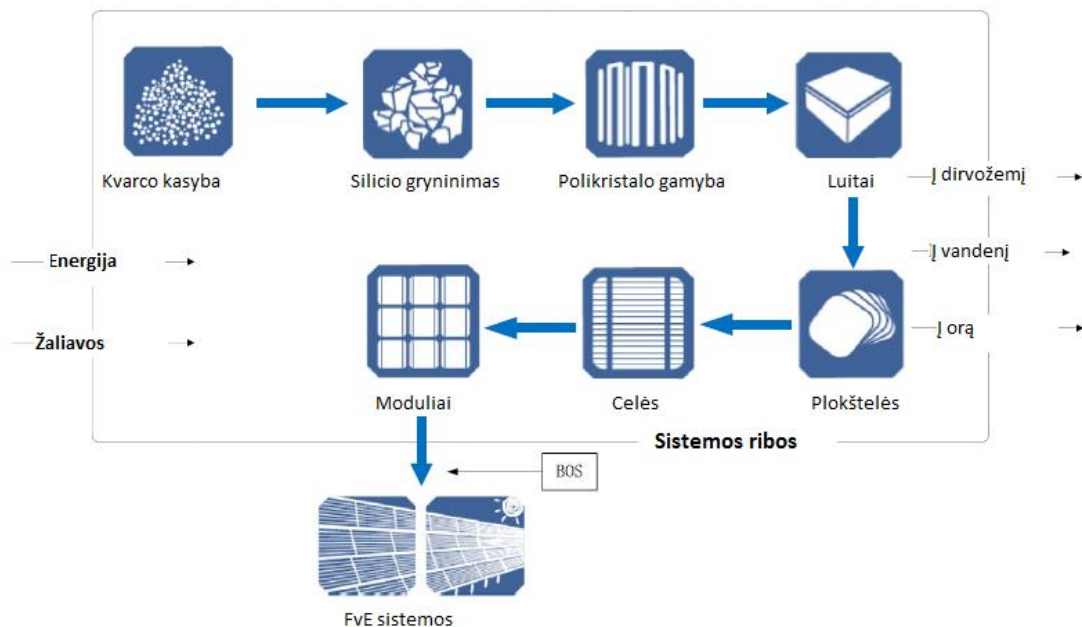
Vertinant produkto ar paslaugos poveikį aplinkai galima remtis skirtingais metodais ir būdais. Saulės fotoelementai – ne išimtis, literatūroje naudojami įvairūs poveikio aplinkai rodikliai. Visapusiškiausias ir daugiausia apimantis būvio ciklo vertinimas, kuriuo galima vertinti įvairius produkto poveikius aplinkai nuo pradinio iki galutinio etapo, tai daugiau mokslinėje literatūroje analizuojamas metodas. Gamintojų rinkoje ir informacijos pateikime vartotojams dažniau pateikiami rodikliai yra:

- energijos atgavimo laikas, nurodantis, kiek laiko turi veikti modulis kol sugeneruos energijos kiekį, kuris buvo sunaudotas gaminant tą modulį;
- šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis 1 kWh elektros energijos pagaminti.

Reikia pripažinti, jog fotovoltinių elementų poveikis aplinkai yra labai priklausomas nuo gamtinių sąlygų (saulės spinduliavimo), todėl nuo pasirinktos vietovės gaunamų rezultatų skirtumai gali būti itin žymūs.

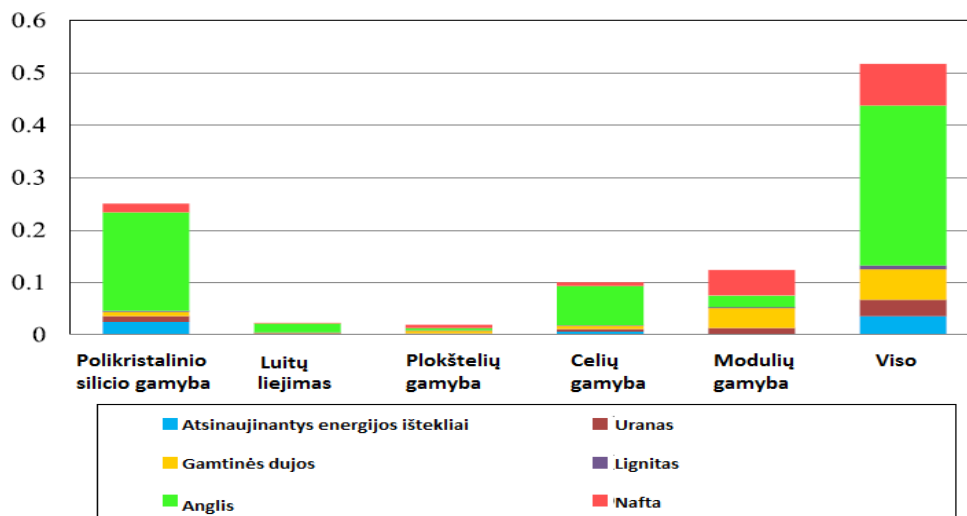
1.3.1 Fotovoltinių modulių poveikio aplinkai vertinimas būvio ciklo metodu

Vertinant FvE poveikį aplinkai būvio ciklo metodu atlikta įvairių tyrimų analizuojant skirtingų modulių tipus. Neigiamas poveikis aplinkai kuriamas daugiausia gamybos metu, naudojimo metu elektra generuojama, atliekų etape poveikis priklauso nuo pasirinkto atliekų tvarkymo varianto.



6 pav. FvE modulių gamyba (Fu ir kt. 2015)

Remiantis Kinijoje surinktais duomenimis ir naudojantis *GaBi* programine įranga Fu ir kt. 2015, vertino pagrindinių Kinijos įmonių gaminančių FvE modulių gamybos poveikį aplinkai. Tyrimo sistemos ribos pavaizduotos 6 paveiksle. Surinkti duomenys apie žaliavų suvartojimą ir išmetalus, susijusius su silicio gavyba ir apdorojimu, bei luitų, plokštelių, celių ir modulių gamyba. Skaičiuoti santykiniai rodikliai vertinant koks poveikis aplinkai sukuriamas FvE pagaminant 1 kWh elektros energijos. Tokiu atveju gamyboje reikalingas energijos poreikis ir jai sukurti naudojami energijos šaltiniai pavaizduoti 7 pav.



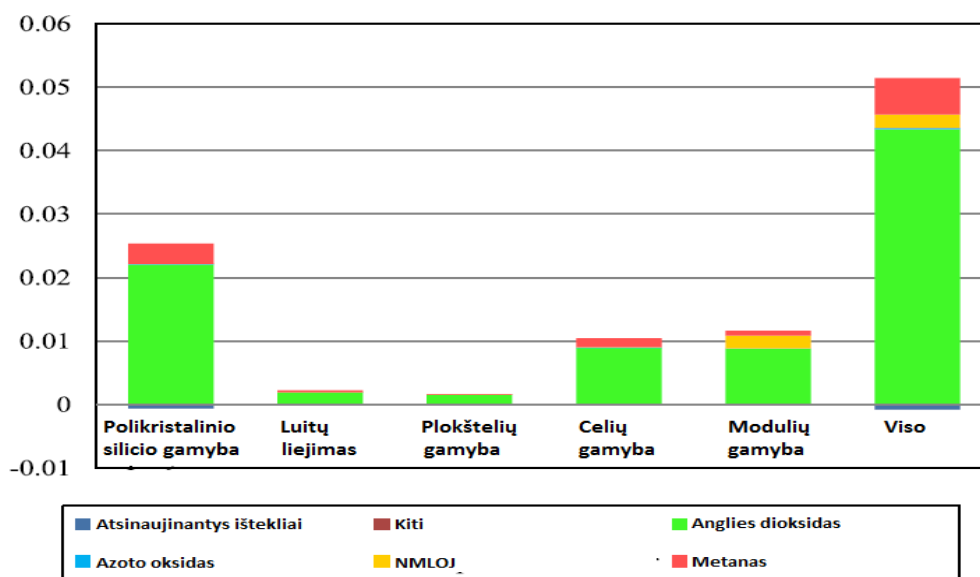
7 pav. Gamybos energijos poreikiai iš atsinaujinančių ir neatsinaujinančių šaltinių, MJ/kWh (Fu ir kt. 2015)

Nustatyta, jog bendras energijos poreikis iš atsinaujinančių ir neatsinaujinančių šaltinių FvE gamyboje yra 0,517 MJ/kWh. Ši energija daugiausia sugeneruota deginant iškastinius energijos išteklius, o didžioji dalis jos Kinijoje gaminama anglimi kūrenamose elektrinėse. Nafta ir gamtinės dujos daugiausia buvo suvartotos modulio gamybos etape, kur etilen vinil acetato (EVA) polimero gamybai, polietileno tereftalato (PET) plėvelei ir polivinilfluorido (PVF) plėvelei sunaudojami dideli jų kiekiai. Modulių gamyba sudarė 25 % pirminės energijos poreikio. Didžiausia dalis (apie 48,5 %) energijos sunaudota polikristalinio silicio gamybos metu, reikalaujančiu didelių elektros energijos sąnaudų. Remiantis šiais rezultatais apskaičiuotas energijos atgavimo laikas, jis skiriasi priklausomai nuo konkrečios pasirinktos vietovės, vis tik polikristaliniams silicio moduliams optimaliu atveju jis siekia 0,75 metų, o vidutiniškai apie 2 metus.

Rūgštėjimo potencialas dėl FvE gamybos buvo $4,27E-4$ kg SO₂ ekvivalentu/kWh, ir labiausiai buvo nulemtas sieros dioksido emisijų (apie 73,4 %), daugiausia dėl suvartotos elektros energijos, kuri kaip minėta, Kinijoje daugiausia gaminama anglimi kūrenamose elektrinėse, kurios išskiria daug sieros dioksido ir azoto oksidų.

Eutrofikacijos potencialas buvo $4,23E-5$ kg PO₄³⁻ ekvivalentu/kWh, jame vyrauja išmetimai į orą ir vandenį. Poveikį labiausiai nulėmė azoto oksidai, fosfatai ir nitratai. Fosfatų išmetimai į gėlą vandenį sudarė 45,6 % daugiausia dėl Kinijos sąlygomis gaminamos elektros energijos. Azoto oksidų emisijos į orą sudarė 44,4 % taip pat daugiausia dėl elektros ir garų naudojimo.

Apskaičiuotas FvE sistemos ŠESD buvo 50,9 g CO₂ ekvivalentu/kWh, kuriame dominuoja anglies dioksidas (83,6 %) ir metanas (11,2 %). Rezultatai pavaizduoti 8 pav.



8 pav. FvE gamybos ŠESD emisijos, kg CO₂ ekvivalentu/kWh (Fu ir kt. 2015)

Reikšmingiausi etapai buvo polikristalinio silicio gamyba, su kuriuo susiję apie 50 % ŠESD, dėl didelio elektros energijos ir garų suvartojimo. Reikšmingos buvo ir celių gamyba (20,5 %), bei antra pagal dydį, modulių gamyba (22,8 %), kurioje žymesnę reikšmę turėjo ne tik CO₂, bet ir kitų medžiagų išskyrimas (metanas, NMLOJ).

Vertinant toksiškumą žmonėms, jo išmatuotas dydis gaminant FvE sistemas buvo 1,76E-2 kg DCB ekvivalentu/kWh, ir reikšmingiausiai nulemtas išmetalų patekimo į orą ir gėlą vandenį. Emisijų kiekis į orą sudarė 74,4 % įskaitant sunkiuosius metalus, neorganinius ir organinius teršalus. Metalai, daugiausia arsenas, chromas, nikelis ir selenas susidaro iš elektros energijos ir garų gamybos etapų. Pagrindinė to priežastis – anglies deginimas. Tarp neorganinių medžiagų patekusių į orą daugiausia buvo vandenilio fluorida. Organinių medžiagų emisijose didžiausia dalis tenka polichlorintiems dibenzo-p-dioksinams, susidarantiems stiklo apdorojimo metu. Išlakos į gėlą vandenį sudaro 25,5 % šio poveikio ir buvo sąlygotos sunkiųjų metalų, tokių kaip seleno, vanadžio ir talio.

Poveikis ozono sluoksnio mažėjimui įvertintas 3,02E-9 kgR11 ekvivalentu/kWh, bei nulemtas Halono (1301), anglies tetrachloridas ir halono (1211). Halono (1301) įtaka sudarė 67,8 % modulių gamybos etape dėl aliuminio rėmo naudojimo ir elektros sąnaudų. Anglies tetrachloridas sudarė 15,6 % ozono sluoksnio mažėjimui silicio apdirbimo metu.

Kitu tyrimu taip pat analizuotas polikristalinio silicio modulio poveikis aplinkai apimant visas žaliavas, energijos suvartojimą, teršalus, transportą bei atliekų šalinimą (Hong ir kt. 2016). Vertinimas atliktas 1 kWp funkciniam vienetai naudojantis IMPACT2002+ metodu.

Kaip ir prieš tai aptartame tyrime, taip ir čia, nustatyta, jog didžiausią reikšmę kuriant poveikį turi elektros energijos naudojimas, dideli šios energijos kiekiai reikalingi įvairiuose procesuose, ypač polikristalinio silicio gamyboje. Vėlgi, dėl Kinijos elektros rinkos, kur ji daugiausia gaminama anglimi, aplinkai daromas reikšmingas poveikis. Moduluose esantis aliuminis turėjo reikšmingą poveikį visoms kategorijoms, išskyrus jonizuojančią spinduliuotę ir mineralų gavybai. Tiesioginiai išmetimai dėl TPT sluoksnio gamybos etapo žymiai prisidėjo prie kancerogenų, jonizuojančiosios spinduliuotės ir ozono sluoksnio eikvojimo, o sidabro naudojimas lėmė poveikį vandens ir sausumos ekotoksiškumo kategorijoms.

Nuotekų valymas turėjo didžiausią įtaką vandens eutrofikacijai, o stiklo apdorojimo procesai darė didelę įtaką žemės naudojimui. Poveikis, atsirandantis iš kitų procesų (pvz.: transportavimo, azoto, vandenilio ar amoniako gamybos) nebuvo reikšmingas. Taigi, keičiant elektros energijos efektyvumą gamybai bei jos šaltinius galima žymiai sumažinti bendrą aplinkosauginę naštą.

Tyrimas atliktas remiantis Kinijos atveju, o ši šalis jau imasi veiksmų kaip didinti energijos ir žaliavų efektyvumą FvE gamyboje. Vidutinis elektros energijos kiekis, reikalingas pagaminti 1 kg poly-Si modulį sumažėjo nuo 275 kWh/kg 2006 metais iki 170 kWh/kg 2010 metais, o numatomais Kinijos vyriausybės planais šis vidurkis turi būti mažinamas iki 120 kWh/kg pagal 12-ąjį penkmečio planą saulės energetikos pramonei. Silicio kiekis

reikalingas 1 Wp moduliui pagaminti nuo 11 g/Wp 2006 m. sumažėjo iki 7 g/Wp 2010 m. (Hong ir kt. 2016) tyrime bendras elektros energijos suvartojimas gaminant 1 kg saulės elemento buvo 148 kWh/kg, o silicio kiekis 6,6 g/Wp. Šios vertės yra mažesnės nei Kinijos vidurkis 2010 m. Tyrime apskaičiuoti rodikliai buvo palyginti su pažangiomis Europos technologijomis. Jei pasirenkama efektyviausia turima technologija elektros efektyvumo prasme (120 kWh/kg) tai gaminant tokį patį 1 kWp FvE modulį atitinkamai 2,03 %, 0,42 %, 7,82 % ir 7,0 % sumažėtų kancerogenų, sausumos ekotoksiškumo, klimato atšilimo ir neatsinaujinančios energijos poveikis. Europoje gaminant 1 kWp modulio taip pat sunaudojamas ir mažesnis silicio kiekis, jei tokio kiekio pakaktų tirtiems elementams būtų 3,57 %, 2,96 %, 4,86 % ir 4,76 % sumažintas kancerogenų, sausumos ekotoksiškumo, klimato atšilimo ir neatsinaujinančios energijos poveikis.

Medžiagos, kurios daugiausia prisidėjo prie kancerogeninio poveikio buvo dioksino ir angliavandenilių emisijos į orą bei arseno emisijos į vandenį. Sausumos ekotoksiškumo įtakai dominuojanti buvo cinko, vario, aliuminio bei gyvsidabrio tarša į dirvožemį ir orą. Pagrindinės medžiagos globalinio atšilimo poveikiui buvo anglies dioksidas ir metanas, o neatsinaujinančių energijos išteklių eikvojimą nulėmė akmens anglis, gamtinės dujos ir nafta.

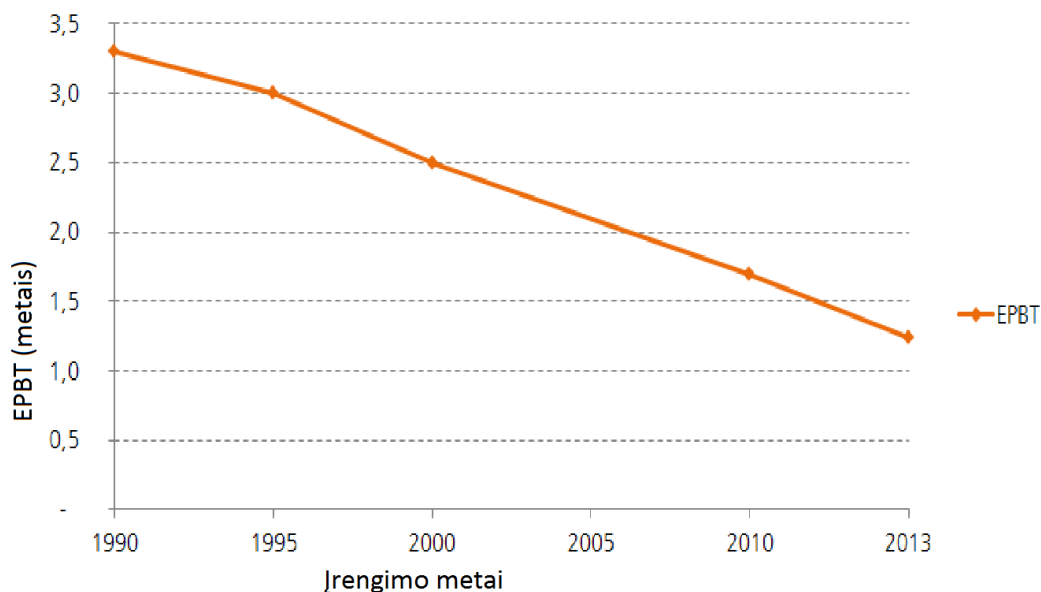
Kadangi elektros energijos vartojimas turi itin didelę reikšmę aplinkos poveikiui FvE gamybos procese, labai svarbu kas yra šios energijos šaltinis. Kinijoje, kuri yra didžiausia FvE gamintoja pasaulyje, 77 % elektros gaminama terminiu būtu naudojant kurą, daugiausia anglis, tokios energijos naudojimas buvo dominuojantis faktorius visose poveikio aplinkai kategorijose, išskyrus sausumos ekotoksiškumą.

Silicio moduliuose reikšmingą aplinkai kuria silicio gavybos ir apdorojimo etapai, visų pirma dėl didelių elektros energijos sąnaudų, tad svarbiausiu aspektu kuriant poveikį aplinkai galima įvardinti tai, kad dažnai didžioji dalis saulės modulių gamybai reikalingos energijos vis dar gaminama įprastu būdu deginant iškastinį kurą. Taip pat gamyboje tiek patenkančios į produktą, tiek kaip papildomos medžiagos naudojama daug įvairių žaliavų, tarp jų ir pavojingų, tokių kaip švinas ar kadmio. Taigi siekiant mažinti neigiamus poveikius aplinkai efektyviausi būdai būtų mažinant energijos vartojimą, silicio kiekį bei pasirenkant mažiau kenksmingas ir antrines žaliavas FvE modulių gamybai.

1.3.2 Energijos atgavimo laikas

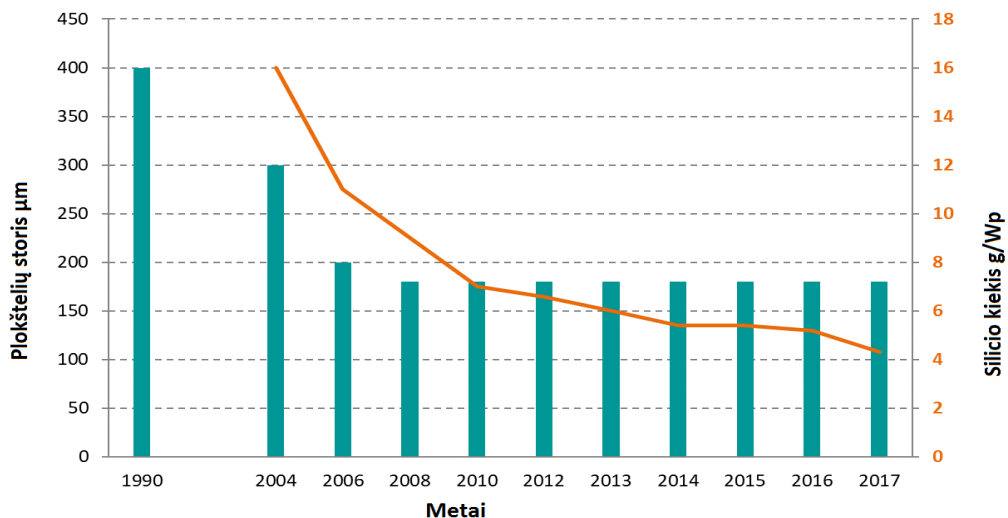
Kaip jau minėta anksčiau, vienas dažniausiai naudojamų rodiklių FvE veiksmingumui įvertinti yra energijos atgavimo laikas. Jis nusako koks laikas reikalingas, kad veikdamas modulis pagamintų tokį patį energijos kiekį, koks buvo sunaudotas gaminant tą modulį. Šis dydis nuolat mažėja, o labiausiai priklauso nuo trijų faktorių: nuo FvE sudarančių medžiagų ir jų kiekio, modulio efektyvumo ir vietovės, kurioje jis naudojamas bei atitinkamo saulės spinduliavimo joje (de Rooij 2015). Poly-Si modulių gamyboje daugiau kaip 60 % energijos suvartojama silicio ruošimui ir plokštelių gamybai. Tai tik įrodo kaip svarbu tobulinti gamybos procesus susijusius su energijos efektyvumu (Luo ir kt. 2018). 2000 m. FvE sistemų energijos atgavimo laikas buvo 8–11 metų, o 2006 m. kristalinių silicio elementams krito iki 3,5 metų. Šiuo metu Šiaurės Europos sąlygomis reikia maždaug 2,1 metų, kad būtų

pasiektas šis dydis, o Pietų Europos klimatu – 1,2 metų ir mažiau, priklausomai nuo pasirinkto FvE tipo. Sicilijoje esantis fotovoltinis polikristalinis silicio modulis turi maždaug vienerių metų energijos grąžinimo laiką. Kaip keitėsi energijos atgavimo laikas Pietų Europos klimato sąlygomis galima matyti 9 pav. (spinduliavimas – 1700 kWh/m² optimaliu pasvirimo kampu). Vertinant modulių efektyvumą negalima atmesti ir fakto, kad moduliams veikiant, jų efektyvumas kasmet mažėja.



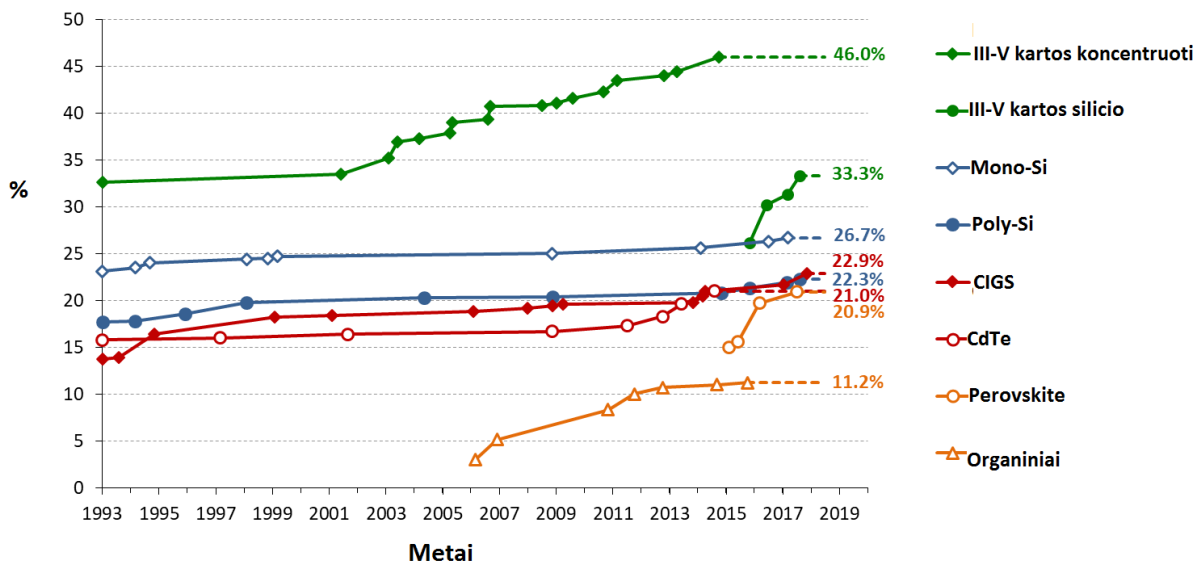
9 pav. Energijos atgavimo laikas Pietų Europos sąlygomis (1700 kWh/m²) (Burger ir kt. 2018)

Darant prielaidą, kad eksploataavimo trukmė 25 metai, tokia sistema gali pagaminti beveik dvidešimt penkis kartus didesnę energijos kiekį nei buvo reikalinga jo gamybai (Burger ir kt. 2018). Suprantama, kad tam įtakos turi ir vis mažėjantis medžiagų kiekis elementuose. Pastaraisiais metais silicio plokštelių gamintojai vis mažina plokštelės storį ir todėl žymiai sumažina tenkančių medžiagų sąnaudas. 10 pav. pavaizduota kaip kito plokštelių storis ir silicio kiekis vienam galios vienetui Wp (šis dydis nurodo FvE modulių W galią esant standartinei apšvietai). Per pastaruosius 13 metų medžiagų naudojimas gerokai sumažėjo – nuo maždaug 16 g/Wp iki maždaug 4 g/Wp, tai įvyko dėl padidėjusio elementų efektyvumo bei plonesnių plokštelių.



10 pav. Plokštelės storis ir silicio naudojimas moduliuose (Burger ir kt. 2018)

Kitas aspektas sumažinės energijos atgavimo laiką yra vis didėjantis modulių efektyvumas. Kuomet didėja saulės elementų efektyvumas, tuo pačiu medžiagų kiekiu naudojimo fazėje pagaminama daugiau energijos. 11 pav. matomas skirtingų technologijų FvE efektyvumo kitimas.



11 pav. Saulės fotoelementų efektyvumo kitimas (Burger ir kt. 2018)

Singapūre atliktu tyrimu (Luo ir kt. 2018) lygino skirtingus poly-Si modulius. Remiantis jais, FvE gamybai didžiausi energijos kiekiai reikalingi polikristalinio silicio ir plokštelių gamybai. Dėl aukšto saulės spinduliavimo lygio Singapūre tokių modulių energijos atgavimo laikas yra 1,06 metų.

Kiek kitokie rezultatai gauti įvertinus įvairių tipų modulių energijos atgavimo laiką (Kommalapati ir kt. 2017). Apibendrinti rezultatai pateikiami 3 lentelėje. Vis tik dėl didelio kiekio įvairių tirtų elementų bei skirtingų vietovių sunku apibendrinti išvadas vertinant net ir tos pačios technologijos modulius. Tačiau didžioji dalis tirtų elementų vertinti Vokietijos klimatinėmis sąlygomis, kuriomis saulės intensyvumas gerokai mažesnis nei Singapūre. Tad bent jau tuo paaiškinamas ilgesnis energijos atgavimo laikas, taip pat tarp analizuotų gaminių yra ir XX amžiaus pabaigoje – XXI amžiaus pradžioje gamintų modulių, kuomet gamybai reikalingos energijos kiekis būdavo kur kas didesnis, o modulių efektyvumas mažesnis. Kartu tokie duomenys leidžia palyginti ir skirtingų tipų elementų energijos naudojimo veiksmingumą.

3 lentelė. Energijos atgavimo laikas įvairių tipų moduliams (Kommalapati ir kt. 2017)

Tipas	Bandinių skaičius	Energijos atgavimo laikas, metais
mono-Si	19	6,07
poly-Si	24	3,15
a-Si	16	3,18
CdTe	18	1,25
CIS	3	2,07

Šie rezultatai rodo, kad monokristalinių silicio modulio energijos atgavimo trukmė ilgiausia lyginant su kitais, pirmiausia dėl didelių energijos sąnaudų luitų liejimo procese, o didžioji dalis jos sugeneruojama iškastinio kuro deginimu. Trumpesni laikotarpiai plonaslukšnėms plokštėms paaiškinami mažesniu žaliavų ir energijos suvartojimu nei reikalingu kristaliniams silicio FvE.

Vystantis fotovoltinių modulių pramonės technologijoms, svarbu atkreipti dėmesį ir į dabar gaminamos, trečios kartos, organinius elementus. Jų efektyvumas mažesnis bei trumpesnis naudojimo laikas lyginant su įprastais silicio fotoelementais. Tokiu atveju svarbu įvertinti ar nauda aplinkai pasiekama dėl pasikeitusių žaliavų (Tsang ir kt. 2016). Tyrimu palyginti organiniai ir įprastiniai silicio pagrindu pagaminti moduliai. Gauti rezultatai rodo, kad organinių elementų poveikis aplinkai mažesnis pagal daugelį kriterijų, o vertinant energijos atgavimo laiką, šis dydis organiniams FvE – 436 dienos, o tomis pačiomis sąlygomis vertintiems polikristaliniams moduliams – 918 dienų. Organinio tipo modulių naudojimas ateityje turėtų didėti dėl nuolat pasiekiamo aukštesnio efektyvumo, o vertinant tik aplinkosauginiu požiūriu jie sukelia žymiai mažesnę poveikį aplinkai nei tradiciniai silicio moduliai.

1.3.3 Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos

Norint mažinti įtaką klimato kaitai svarbią reikšmę gali užimti saulės energijos naudojimas. Vienas iš būdų kiekybiškai įvertinti aplinkosauginę fotovoltinių modulių naudą yra skaičiuoti su jais susijusių šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijų (ŠESD) kiekį. Tokiu atveju skaičiuojamos ŠESD tiesiogiai išmetamos energijos gamybos metu, taip pat visos netiesioginės emisijos, susijusios su kuriame nors būvio ciklo etape naudotu kuru ar

technologijomis. Netiesioginiai išmetimai atsiranda dėl įvairių procesų, tokių kaip medžiagų gavyba, transportavimas, įrenginių statyba, taip pat tolesni procesai, pvz.: įrenginių eksploatavimo nutraukimas, medžiagų perdirbimas ir atliekų šalinimas (Hsu ir kt. 2012). Kaip apytiksliai pasiskirsto išskiriamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis per skirtingus etapus lyginant saulės jėgaines ir anglies elektrinę galima matyti 12 paveiksle.



12 pav. Šiltnamio efektą sukeliančių emisijų pasiskirstymas per gyvavimo etapus (Masson, Izumi 2018)

Dažniausiai tyrimuose priimamas funkcinis ŠESD kiekio matavimo vienetas – g CO₂ ekvivalentu/kWh pagamintai elektros energijai. Apibendrintai sakoma, kad vidutinė fotovoltiniu pagrindu pagamintos elektros emisija yra apie 40 g CO₂ ekv./kWh ir tai yra daugmaž dvylika kartų mažesnės nei vidutinės elektros gamybos emisijos iš įvairių šaltinių (491 g CO₂ ekv./kWh). Globaliu mastu tai leidžia išvengti daugiau kaip 247 mln. t CO₂ ekv. kasmet.

Toks kiekis sukuriamas tokiose šalyse kaip Ispanija, Tailandas ar Beniliukso valstybės. Tai taip pat prilygsta metiniam 140 mln. automobilių eismui arba 164 mln. pasodintų medžių (Masson, Izumi 2018).

Skaičiuojant ŠESD kiekį skirtingiems modulių tipams analizėse naudojami parametrai kurie nurodo modulių efektyvumą, saulės apšvietą, tarnavimo laiką, naudingumo koeficientą (Kommalapati ir kt. 2017). 4 lentelėje pateikiami duomenys apie įvairių modulių ŠESD emisijas pagamintai 1 kWh elektros energijos.

4 lentelė. Šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos (Kommalapati ir kt. 2017)

Tipas	Bandinių skaičius	ŠESD kiekis, g CO ₂ ekv./kWh
mono-Si	24	85
poly-Si	35	74
a-Si	16	57
CdTe	21	23
CIS	3	50

Šie rezultatai rodo, kad mažesnis šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis yra išmetamas iš plonasluoksnių modulių lyginant su daugiau naudojamais silicio pagrindu pagamintais moduliais. Didesnis rezultatas kristalinio silicio plokštėse visų pirma siejamas su tuo, kad, gaminant šiuos elementus, silicio gryninimui ir kristalizacijos procesams reikalingas didelis elektros energijos kiekis, o ji generuojama daugiausia naudojant iškastinį kurą (Peng ir kt. 2013). CdTe pagrindu pagaminti moduliai sukūrė mažiausias šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijas tarp visų skirtingų medžiagų pagrindu gaminamų elektros generavimo sistemų. Tą lemia ne taip imlūs energijai procesai bei mažesni žaliavų kiekiai.

Anksčiau aptartomis Singapūro sąlygomis atliktoje analizėje apskaičiuoti ir atskiri gamybos etapo emisijų kiekiai. Kaip ir kalbant apie energijos kiekius, suprantama, kad tie patys gamybos etapai sukelia didžiausias ŠESD emisijas, 59,5 kg CO₂ekv./moduliui dėl silicio gamybos ir 84,5 kg CO₂ekv./moduliui plokštelių gamybai. Tai parodo problemines sritis kuriose galima pasiekti pažangą, vienas iš būdų yra naudoti šiuo metu vystomas alternatyvias technologijas, pvz., fluidizuotą reaktorių silicio gamybai (Luo ir kt. 2018). O esamomis sąlygomis apskaičiuotas vidutinis ŠESD kiekis – 27 g CO₂ ekv./kWh pagamintai elektros energijai ir tai yra beveik 18 kartų mažiau nei Singapūro vidurkis (484 g CO₂ ekv./kWh).

Iš įvairių skaičiavimų matyti, kad dėl skirtingų klimatinė sąlygų, modulio efektyvumo, žaliavų, ŠESD kiekis tenkantis moduliui gali skirtis, tačiau bet koku atveju FvE naudojimas žymiai prisideda prie klimato kaitos poveikio mažinimo lyginant juos su įprastais energijos šaltiniais, todėl šios technologijos turi būti vystomos, ypač šalyse kuriose klimatinės sąlygos leidžia pasiekti itin gerus rezultatus dėl aukšto spinduliuotės lygio.

1.3.4 Ekotoksiškumas

Nepaisant to, jog FvE yra saugūs ir savo veikimo metu neišskiria medžiagų į aplinką, plokštės gali būti pažeidžiamos atsitiktinės žalos dėl gaisrų, šiluminio smūgio ar mechaninio poveikio. Kadangi moduliai montuojami lauke, tokiais atvejais pažeidus modulį, ypač jei jis veikiamas lietaus ar kitokio tipo drėgmės, padidėja tikimybė, jog pavojingos medžiagos lengvai pasieks vandens ar sausumos aplinką.

Todėl taip pat derėtų atkreipti dėmesį į moduliuose naudojamų medžiagų ekotoksiškumą (Tammaro ir kt. 2016). Tirta aštuoniolika metalų, naudojamų FvE plokštėse ir jų atitinkamas ekotoksikologinis poveikis. Tirti įvairių metų gamybos ir tipų moduliai. Pasirinkta 26 kristalinio silicio ir 12 plonasluoksnių FvE. Suprantama, kad tiek kristalinių silicio, tiek plonasluoksnių elementų sudėtis labai skiriasi, o gaminiai einant metams modifikuojami dėl technologijų ir naudojamų medžiagų evoliucijos. Todėl neįmanoma pateikti FvE plokštės standartinės sudėties. Ypatingas šio kintamumo pavyzdys yra lydmetalis, kurio sudėtis, paremta įvairiais metalais, laikui bėgant žymiai keitėsi. Be to, moduliai yra patentuoti, jų sudėtis dažnai pilnai nežinoma. Tyrimo metu skirtingų tipų FvE mėginiai buvo gauti taip: pašalinus aliuminio rėmą (jei jis buvo) ir jungiamąją dėžę, mėginiai buvo supjaustyti. Siekiant išvengti bet kokio užteršimo žiediniais pjūklais, mėginiai buvo nuvalyti. Norint atlikti bandymus, mėginiai buvo susmulkinti iki 0,5–3 cm² dydžio. Bandymas buvo atliktas pagal Italijos ir Europos standartų procedūrą, naudojant švarų vandenį kaip išplovimo tirpalą. Kiekvienas mėginys 24 valandas kambario temperatūroje buvo kratomas didelio tankio polietileno buteliuose (HDPE) su viršutiniu maišytuvu Rotax 6.8. Pasibaigus išplovimui, kieta medžiaga buvo pašalinta dekantuojant, po to filtruojama filtravimo popieriais. Rezultatai vertinami analizuojant metalus. Ekotoksikologiniam vertinimui skysčio mėginiai buvo nedelsiant surinkti į sterilizuotus stiklinius butelius ir laikomi tamsoje 4°C temperatūroje. Ekotoksikologiniai tyrimai buvo atlikti per 24 val. Mėginiams skaičiuoti duomenys apie Ag, Al, As, Ba, Cd, Cr, Cu, In, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Te, Zn kiekius, gauti rezultatai lyginti su teisės normomis pateikiamomis tokiuose dokumentuose: Italijos teisės aktai apie inertinių atliekų šalinimą sąvartynuose; Europos Bendrijos Direktyva 98/83/EB geriamajam vandeniui bei Italijos Dlgs 152/06 teisės aktas dėl miesto ir pramonės vandens išleidžiamo į dirvožemį.

Iš 26 tirtų kristalinių silicio modulių tik vienas neviršijo jokių nustatytų normų, o keturi viršijo tik vieno metalo nurodomas normas. Net 20 mėginių viršijo nustatytas aliuminio normas, 17 švino. Būtent švinas šiuo tyrimu nurodomas kaip pavojingiausias, kadangi jo normos kai kuriais bandiniais viršytos daugiau kaip 100 kartų vandeniui išleidžiamam į dirvožemį ir daugiau kaip 1000 kartų geriamajam vandeniui.

Tarp analizuotų plonasluoksnių FvE buvo įvairių tipų (a-Si, CdTe, CIGS). Iš 12 tirtų mėginių du neviršijo nustatytų ribų, o vienas viršijo tik švinui, visi šie trys mėginiai buvo amorfinio silicio moduliai. Kiti bandiniai viršijo aliuminio, švino, chromo koncentracijas 2-10 kartų geriamajam vandeniui. Dėl sudėties CdTe moduliai daugiau nei 70 kartų viršijo kadmio leistinas normas geriamajam vandeniui, taip pat telūriui ir molibdeniui nustatytas normas. Kaip ir kristalinių silicio FvE atveju, taip ir plonasluoksniai daugiausia viršijo aliuminio ir švino ribas.

Aplinkos rizika, kurią galima numatyti atsižvelgiant į nefiltruotų bandinių metalų kiekį, buvo dar didesnė. Nors nefiltruotų bandinių duomenys nėra lyginami su teisės aktų apribojimais, jie svarbūs norint pabrėžti galimą pavojų aplinkai ir žmonių sveikatai. Reikia pažymėti, kad naujesniuose c-Si moduliuose švino kiekis sumažėjo. Šie rezultatai iš tiesų tiesiogiai koreliuoja su šio metalo pakeitimu ekologiškesnėmis medžiagomis, pvz., sidabru. Vario, chromo ir nikelio koncentracijų atžvilgiu galima pastebėti gana pastovų lygį. Kalbant apie amorfinio silicio elementus lyginant tuos, kurie pagaminti 90-ųjų pradžioje ir naujesniuose (2010 m.) švino kiekis išliko panašus. Chromo kiekis senesniuose FvE buvo didesnis, o naujesniuose sumažėjo. Kitų tipų (CdTe ir CIGS) kitų elementų, pvz.: In, Se, Te ir Cd, kiekis daugiau susijęs su gamybos technologija, o ne gamybos metais.

Fotovoltinių plokščių ekotoksikologinis bandymas atliktas su bakterijomis (*Vibrio fischeri*), dumbliais (*Pseudochirneriella subcapitata*) ir vėžiagyviais (*Daphnia magna*). Pagal teiginį, kad net ir vienos medžiagos slenksčio viršijimas yra pakankamas, kad būtų galima įvardinti jog toks mėginys yra ekotoksiškas, daugelis mėginių pasirodė tokie esą. Daugiau kaip 80 % kristalinės silicio technologijos mėginių buvo ekotoksiški. Didžioji dalis (53,8 %) mėginių buvo ekotoksiški tik vienai medžiagai. 19,2 % mėginių buvo teigiami dviem bandiniams. Didžiausias ekotoksiškumas nustatytas seniausiuose FvE (1986 m. gamybos), taip lyg ir patvirtinant faktą, jog vystantis technologijoms modulių žala aplinkai mažėja. Kalbant apie plonasluoksnius modulius, ekotoksiškumas vienai, dviems ar trimis bandiniams buvo atitinkamai 50 %, 16,7 % ir 8,3 %. Panašūs silicio kristalinių (19,2 %) ir plonasluoksnių (25 %) modulių kiekiai buvo klasifikuojami kaip neekotoksiški. Dumbliams, iš trijų bandytų organizmų, tiek kristalinės silicio technologijos atveju, tiek plonasluoksnių modulių atveju, buvo nustatytas didžiausias jautrumas ir dažniausiai tai buvo vienintelis bandomasis organizmas, kuriam įrodytas toksinis poveikis.

1.3.5 Kiti poveikiai aplinkai

Taigi, nepaisant to, jog tinkamo naudojimo metu FvE neišskiria jokių medžiagų į aplinką, įvykus pažeidimui, pavojingos medžiagos gali patekti į orą, vandenį ar dirvožemį. Rezultatai rodo, kad šių medžiagų patekimas gali sąlygoti neigiamas pasekmes tiek gamtai, tiek žmogui, todėl mechaninis modulių atsparumas turėtų būti viena iš modulių projektavimo užduočių. Didžioji poveikių aplinkai dalis sukurama FvE gamybos metu, naudojimo metu įvertinta galima žala aplinkai mechaninio pažeidimu. Tačiau be anksčiau minėtų kriterijų yra ir kitų, rečiau ir sudėtingiau įvertinamų poveikių susijusių su FvE naudojimu. (Gunerhan ir kt. 2008) analizėje prie saulės fotoelementų poveikių aplinkai įvardijami ir tokie:

Žemės naudojimas ir šiluminė tarša

Saulės elementai turi įvairų poveikį gamtinei ekosistemai. Šis poveikis yra susijęs su kai kuriais specifiniais veiksniais, pvz.: žemės užėmimas, poveikis ekosistemoms ar biologinei įvairovei (Tsoutsos ir kt. 2005). Didelio ploto žemės naudojimas taip pat daro įtaką šilumos balansui sugeriant daugiau saulės energijos, kuomet atsispindėjusi nuo paviršiaus šiluma nebegrįžta atgal. Kuriant galingas saulės elektrines užimami dideli plotai dykumose. Tokiu atveju

šios vietovės šiluminė pusiausvyra išbalansuojama. Be to, papildoma šiluma gali sunaikinti kai kurias rūšis, kurios gyvena tokiomis sąlygomis.

Vizualinis poveikis

Išskyrus konkrečias ir aiškiai pamatuojamas problemas, kaip oro, dirvožemio ar vandens tarša, taip pat egzistuoja ir kitas taršos faktorius, kurį sukelia vizualinė tarša. Ji labiau įtakoja psichologinę būseną. Vizualinė tarša gali būti apibrėžta kaip neįprastos žmogui formos, kurios paprastai neegzistuoja natūralioje ar įprastoje aplinkoje. Dėl to, toks poveikis dažniausiai atsiranda netiesiogiai ir dėl jo kyla neigiamų simbolių žmogaus atmintyje. Vizualinė tarša daugiausia turi psichologinį poveikį žmogui, bet gali paveikti ir fizinę žmogaus sveikatą. Šiandien vizualinė tarša tapo problema, nes urbanizacijos planavimas nepakankamai atsižvelgė į šį aspektą ir nenumatė gairių jo vystymui. Didėjantis saulės energijos sistemų naudojimas prisideda prie šios taršos dėl nepakankamo teisinio reglamentavimo ir visuomenės sąmoningumo trūkumo. Kaip tinkamo vizualinio poveikio kūrimą galima paminėti modulius pastatų konstrukcijose, jie gali būti naudojami kaip medžiaga, kuri integruojama į pastatų statybos metu. Tuo tarpu įrengiant saulės elektrines ant jau esamo statinio gali būti sukurtas neigiamas vizualinis poveikis, ypač senos ar išskirtinės architektūros pastatuose. Todėl saulės modulių naudojimas turėtų būti planuojamas atsižvelgiant ir į tinkamą dizainą bei pritaikymą prie situacijos. Kitas svarbus veiksnys, susijęs su vizualiniu poveikiu, yra spalvų pasirinkimas. Šiuo atveju problema iš dalies sprendžiama, nes yra galimybė rinktis įvairių spalvų įrenginius.

1.4 Analizės apibendrinimas

Saulės energetikos reikšmė ateityje tik augs, visų pirma dėl to, kad energijos poreikis didės, ypač besivystančiose pasaulio šalyse. Šios šalys dažnai yra aukšto saulės spinduliavimo sąlygose tad siekis keisti iškastinio kurą naudojimą saulės energija atneša ne tik aplinkosauginę, bet ir ekonominę naudą, tuo pačiu prisidedamas ir prie kitų darnaus vystymosi tikslų.

Norint užtikrinti pagrindinę atsinaujinančių energijos išteklių idėją – mažinti įtaką klimato kaitai ir aplinkos taršai, ieškoma sprendimų kaip minimizuoti šias įtakas FvE gamybos metu, visų pirma didinant žaliavų naudojimo efektyvumą. Tai ypač reikšminga silicio atveju, kuris yra dominuojanti medžiaga saulės energiją generuojant į elektros energiją. Atsižvelgiant į tai, reikšmę ekonomikai, bei žaliavos išteklius, ji įtraukta į kritinių žaliavų sąrašą. Su silicio gavyba, jo gryninimo, lydymo bei kitais apdorojimo procesais, susijusi ir didžioji dalis FvE aplinkai kuriamų poveikių. Pagrindine šios įtakos priežastimi yra dideli šiluminės ir elektros energijos poreikiai. Globaliu mastu tą įtaką daugiausia nulemia Kinijos energetinė sistema, kurioje dominuoja iškastinis kuras, ypač anglis. Ir jos įtaka tik didėja, nes Europoje nebėra įmonės gaminančios FvE tinkamas silicio plokšteles. Tad gaminių projektavimo etape renkantis įvairius sprendimus galima mažinti jų poveikį aplinkai, o būvio ciklo metodika leidžia įvertinti reikšmingiausius iš jų, taip pat ir tuos, kuriais dažniausiai apibūdinami FvE moduliai norint palyginti skirtingų gaminių aplinkosauginę naudą.

2. FOTOVOLTINIŲ SAULĖS MODULIŲ POVEIKIO APLINKAI VERTINIMO METODIKA

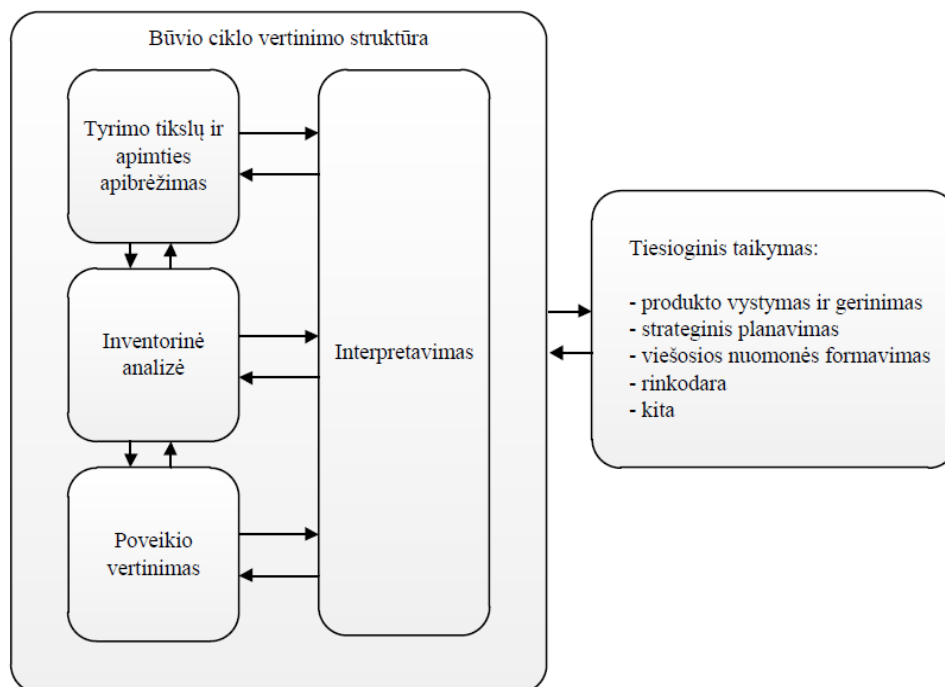
Tyrimas atliekamas siekiant įvertinti, apskaičiuoti bei palyginti fotovoltinių saulės modulių gamybos poveikį aplinkai, išskirti reikšmingiausias jos kategorijas, nustatyti kokius pasikeitimus sukėlė gamybos inovacijų taikymas bei teikti pasiūlymus tolesniam produktų tobulinimui atsižvelgiant į visą gaminio būvio ciklą.

Pasirinktas funkcinis vienetas – 1 kWp. Tai 1 kW galios modulis veikdamas standartinėmis sąlygomis – 1000 W/m² apšvita ir 25°C aplinkos temperatūra. Šis funkcinis vienetas dažniausiai naudojamas vertinant FvE, tai pagrindinė charakteristika kuria apibūdinami saulės elementai. Tai ir labiau tikslinga norint palyginti skirtingus modulius, kadangi masės ar vieneto funkciniai dydžiai neapibrėžia produkto galimybės pagaminti vienodą energijos kiekį. Taip pat šiuo funkciniu vienetu dažniausiai vertinami ir lyginami literatūroje aprašomi FvE (Huang ir kt. 2017, Kommalapati ir kt. 2017, Luo ir kt. 2018). Norint įvairiapusiškai ir detaliam įvertinti gaminio poveikį aplinkai pasitelkiamas būvio ciklo vertinimas (BCV). Siekiant efektyvaus išteklių naudojimo, atliekų mažinimo bei žiedinės ekonomikos tikslų, BCV tampa viena iš svarbiausių prevencinių bei darnios plėtros priemonių, o taip pat ir svarbia metodika verslui kuriant įmonės vystymo strategijas. BCV metodika leidžia įvertinti gaminių ir paslaugų aplinkosauginį poveikį visuose gyvavimo ciklo etapuose, modeliuoti jų sąveiką su aplinka ir apimti visus etapus nuo žaliavų gavybos iki galutinio atliekų sutvarkymo (Asdrubali ir kt. 2015). Būvio ciklo metodas leidžia tiksliausiai palyginti skirtingų gaminių poveikių aplinkai skirtumus, kadangi vertina visus, ir tiesioginius ir netiesioginius, su juo susijusius poveikius. Taip užtikrinama, kad bet koks pasikeitimas bus įvertinamas visuose aspektuose, nes teigiamas pokytis vienoje kategorijoje gali sukelti neigiamą pokytį kitoje. Tai ypač svarbu vertinant gamybos medžiagų ar procesų pakeitimus.

Tiksliam būvio ciklo vertinimui atlikti naudojama SimaPro programinė įranga. Ši programa sukurta „Pre Sustainability“ kompanijos ir yra profesionali priemonė, skirta rinkti, analizuoti ir stebėti įvairius poveikio rodiklius. Ši programinė įranga pagal versijas orientuota į atitinkamų tyrimų tikslus bei leidžia rinktis įvairias poveikių bei žalos kategorijas ir turi detalią duomenų bazių biblioteką. Programa apskaičiuoja visus su gaminiu susijusius poveikius ir pagal vartotojo įvestus inventorinius duomenis pateikia vertinimą pasirinktai kategorijai.

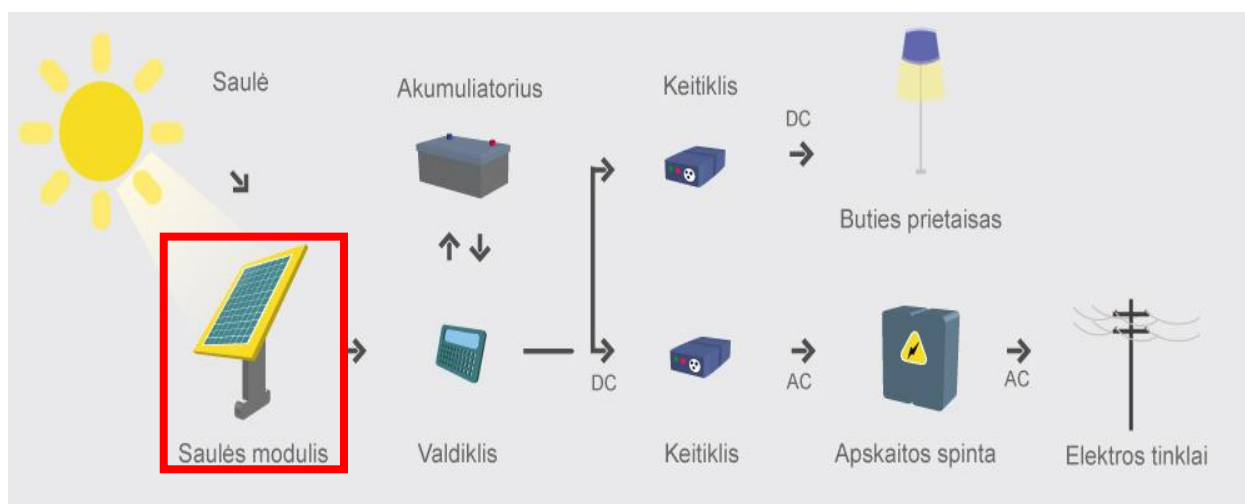
Pagal LST EN ISO 14040:2007 standartą Aplinkos vadyba. Būvio ciklo įvertinimas. Principai ir sandara., būvio ciklo vertinimą sudaro keturi tarpusavyje susiję etapai, kurių sąveika pavaizduota 13 pav.:

1. tyrimo tikslų ir apimties apibrėžimas;
2. inventorinė analizė;
3. poveikio vertinimas;
4. rezultatų interpretavimas.



13 pav. Būvio ciklo vertinimo struktūra (LST EN ISO 14040:2007)

Pilnai sistemai generuojančiai elektros energiją iš saulės energijos reikalingi ne tik moduliai, bet ir daugiau įrenginių: keitiklių, laidų, apskaitos spintos, energijos kaupimui galima naudoti baterijas. Gaminio sistema be apribojimų gali išaugti iki neapibrėžiamo masto, o duomenų rinkimas ir analizė gali tapti labai imli laiko ir kitiems ištekliams. Dėl šios priežasties tyrime apsiribota FvE modulių būvio ciklo metodu (14 pav.). Vertinamos FvE modulio būvio ciklo ribos nuo yra žaliavų išgavimo iki galutinio atliekų sutvarkymo. Skaičiuojant FvE pagaminamos elektros energijos kiekį projektuojamas veikimas vidutinėmis Lietuvos spinduliavimo sąlygomis – 1000 kWh/m².



14 pav. Elektros generavimo iš saulės energijos sistema (www.sauleselektros.lt)

Inventorinė analizė. Inventorinė analizė – tai būvio ciklo vertinimo etapas, skirtas kiekybiniais duomenimis apie visą produkto būvio ciklą surinkti. Tyrimas atliekamas bendradarbiaujant su UAB „Soli Tek R&D”, įmone, kuri projektuoja, tiria, gamina fotovoltinius saulės modulius. Įmonės veikla apima saulės elementų ir modulių gamybos etapus. Surinkti duomenys apie įvedinius ir išvedinius. BCV vertinime įvediniais laikomos medžiagos ir energija. Šiuo atveju surinkti duomenys apie kiekviename gamybos procese sunaudojamas medžiagas, energiją, susidariusius išmetalus bei perskaičiuoti į funkciniam vienetui tenkantį dydį. Kadangi įmonės veikla neapima visų FvE gamybos etapų vertinamas ir netiesioginis poveikis aplinkai, sukuriamas už įmonės ribų. Tai poveikiai, susidarę dėl žaliavų gavybos, sudėtinių medžiagų gamybos, energijos generavimo ir pan. Jiems įvertinti pasitelkiama programinė įranga ir duomenų bazės, kuriose jau sukaupta informacija ir atlikti skaičiavimai. Tiksliai žinant įvedinių kilmę renkama atitinkama vietovė, šaltiniai. Kuomet medžiagos kilmė nežinoma arba ji įmonėje priklauso nuo tiekėjo, projektuojamas globalus variantas, kuris apima vidutinį su įvediniu susijusį poveikį. Atvejais kuomet duomenų bazės nepateikia tinkamo pasirinkimo, remiamasi mokslinėje literatūroje aprašytais pavyzdžiais, kurie yra artimiausi tyrimui naudotoms medžiagoms ir technologijoms.

Poveikio vertinimas. Būvio ciklo poveikio vertinimo etapas apima rezultatų rodiklių surinkimą įvairioms poveikio kategorijoms, kurios kartu sudaro produkto sistemos būvio ciklo poveikio vertinimo aprašą (LST EN ISO 14040:2007). Poveikis aplinkai gali būti vertinamas ir pagal poveikio aplinkai kategorijas (Midpoint) ir pagal pasekmes ar padarinius t.y. žalos kategorijas (Endpoint). Programinė įranga leidžia rinktis įvairias poveikio aplinkai ir žalos kategorijas, todėl svarbus žingsnis yra atitinkamų kategorijų atranka. Skirtingų metodikų taikymas padeda identifikuoti įvairiapusį poveikį aplinkai bei palyginti poveikio aplinkai reikšmingumą skirtingose aplinkos kategorijose.

ILCD Midpoint+ metodas vertina poveikį aplinkai šešiolikoje kategorijų. Šios metodikos pirminis variantas sukurtas Europos Komisijos Jungtinio tyrimų centro Aplinkos ir darnumo instituto 2010 metais. Metodika nurodo kaip atlikti kokybišką būvio ciklo vertinimą Europos kontekste, kadangi jis jungia skirtingus metodus kurie yra reikšmingiausi Europoje. Norint sukurti vienodą vienetą visoms poveikio kategorijoms ir parodyti atitinkamos kategorijos santykinę indėlį aplinkos apsaugos problemoms atliekamas poveikio vertinimas normalizuojant apibūdinimo rezultatus (Navickas, Venslauskas 2012).

ReCiPe Endpoint (E) metodu atliekamas vertinimas trijose apibendrintose žalos kategorijose (žala žmogaus sveikatai, žala ekosistemoms, žala susijusi su išteklių naudojimu). Žala žmogaus sveikatai, išreiškiama kaip nenugyventas metų skaičius ir kaip negalios metų skaičius. Žala, kuri sąlygoja ekosistemų kokybę, parodo rūšių išnykimą tam tikroje teritorijoje ir per tam tikrą laiko tarpą. Žala ištekliams apibūdinama kaip papildoma energija, kurios reikės išgaunant mineralines medžiagas ir gamtinį kurą ateityje.

Kadangi literatūros analizėje aptarta dažniausiai naudojama FvE poveikio aplinkai kategorija – pasaulinis klimato šiltėjimas, atliekama detalesnė šio poveikio analizė. Ši kategorija nurodo su visomis žaliavomis ir procesais susijusias ŠESD emisijas. Rezultatu, išvestiniu iš šio rodiklio, galima palyginti koks poveikis klimato kaitai buvo

sukurtas generuojant tokį patį energijos kiekį skirtingais energijos šaltiniais. Tai susiję ir su pagrindine idėja, kad atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas visų pirma yra priemonė siekiant mažinti įtaką klimato kaitai.

Vertinamas ir dažnai literatūroje pasitaikantis energijos atgavimo laikas. Tai laikas, kurį modulis turi veikti, kad pagamintų tokį patį energijos kiekį, kuris buvo sunaudotas jį gaminant. Tokiu vertinimu proporcingai parodomas laikas, kuomet buvo pasiektas toks energijos kiekis, o tolesnis FvE veikimas generavo papildomą elektros energiją.

Kadangi tyrimas atliekamas gamybos srityje, vertinamas ir ekonominis aspektas. Įvertinamas žaliavų vertės palyginimas, apskaičiuojama kokią finansinį poveikį turės gamybos inovacijų taikymas.

Rezultatų interpretavimas. Būvio ciklo programinės įrangos naudojimas leidžia vienu projektu gauti įvairių poveikio kategorijų rezultatus. Taip galima išskirti reikšmingiausias gaminio kuriamų poveikių kategorijas, įvertinti juos dažniausiai taikomomis metodikomis, nustatyti probleminius etapus. Lyginamos skirtingų gamybos sprendimų įtakos aplinkai, pagal gautus rezultatus ir atsižvelgiant į ateities tendencijas teikiamos produkto gerinimo galimybės taikant ekologinio projektavimo, atliekų hierarchijos, žiedinės ekonomikos principus. Atsižvelgiant į Lietuvos nacionalinės energetikos strategijos tikslus 2020, 2030 ir 2050 metams siūlomi sprendimai jų įgyvendinimui. Taip pat, remiantis Europos Sąjungos 2030 metų klimato ir energetikos politikos strategija, siūlomos priemonės remti aplinkai palankesnę fotovoltinių saulės modulių gamybą. Atsižvelgiant į potencialius FvE vartotojus teikiama pasiūlymai gaminių ir įmonės populiarinimui.

3. FOTOVOLTINIŲ SAULĖS MODULIŲ POVEIKIO APLINKAI VERTINIMO REZULTATAI

3.1 Fotovoltinis modulis „Solid PRO P.60“

Šiam tyrimui parinktas objektas yra 1 kWp fotovoltinio saulės modulio. Analize siekiama būvio ciklo metodika palyginti skirtingus FvE modulius, įvertinti kokius pasikeitimus poveikiuose aplinkai nulėmė gamybos inovacijų taikymas. Tyrimas atliekas bendradarbiaujant su UAB „Soli Tek R&D“, kuri savo ruožtu buvo viena iš dalyvių projekte CABRISS (*Implementation of a Circular Economy Based on Recycled, Reused and Recovered Indium, Silicon and Silver Materials for Photovoltaic and Other Applications*) (CABRISS). Jame dalyvauja 16 Europos įmonių ir tyrimų institutų, dirbančių saulės energetikos sektoriuje. Projektas finansuojamas pagal Europos Bendrijos mokslinių tyrimų ir inovacijų pagrindų programą „Horizontas 2020“.

Pagrindinis projekto tikslas yra rasti efektyviausius kelius žiedinės ekonomikos vystymui FvE rinkoje, taip pat elektronikos bei stiklo pramonėse.

Tyrimo sritys: In, Ag ir Si perdirbimo efektyvumo gerinimas; veiksmų planai medžiagų pakartotiniam naudojimui kitose pramonėse; gamybos energetinis efektyvumas, anglies pėdsakas.

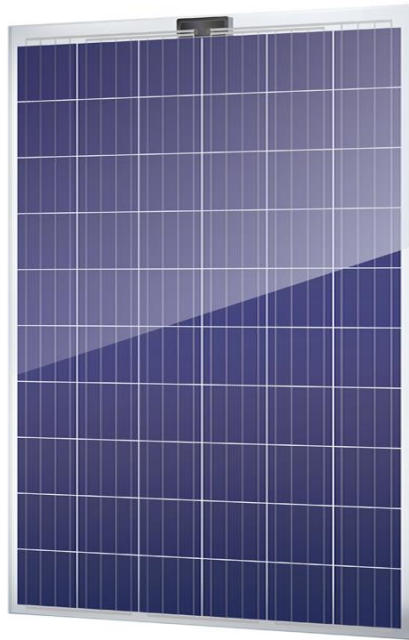
Penki projekto siekiai:

- Plėtoti pramoninę simbiozę, teikiant žaliavas, pvz., stiklą ar sidabro pastas, kaip žaliavą kitoms pramonės šakoms (pvz., stiklo, elektronikos ar metalurgijos);
- Europoje surinkti iki 90 % FvE atliekų, palyginti su 40 % 2013 m.;
- Atgauti didelės vertės žaliavas (silicį, indį, sidabrą) iki 90 % efektyvumu iš FvE atliekų;
- Saulės elementų ir FvE gamyboje naudoti perdirbtas žaliavas;
- Įtraukti ES piliečius ir pramonę į tvarią ir finansiškai perspektyvią naują ekonomikos rinką.

Pagrindinis „Soli Tek R&D“ tikslas šiame projekte buvo nustatyti kaip perdirbtas silicis įtakoja saulės elementų efektyvumą, elektrinę varžą, kitus parametrus (Denafas J. ir kt. 2017). Atsižvelgiant į šį tikslą ir siekius ieškoti aplinkai draugiškesnių gamybos sprendimų, įmonė sukuria gaminį kuriame priimamos trys gamybos inovacijos:

1. Silicio plokštelių gamybai naudojamas perdirbtas silicis;
2. Keičiama modulio konstrukcija ir sudėtis: atsisakoma aliuminio rėmo, naudojamas stiklas galinėje dalyje;
3. Optimizuojami gamybos procesai, dėl ko sumažėja kai kurių žaliavų naudojimas.

Analizuojamas „Soli Tek R&D“ gaminamas „Solid PRO P.60“ polikristalinio silicio modulis (15 pav.).



15 pav. Modulis „Solid PRO P.60“ („Soli Tek R&D“)

Šio modulio techninė charakteristika pateikiama 5 lentelėje. Lyginant du modulius perdirbtas silicis ir gamybos pakeitimai įtakos galutiniams produkto parametrams neturi, todėl abiejų FvE specifikacija yra tokia pati.

5 lentelė. Techniniai modulio „Solid PRO P.60“ duomenys („Soli Tek R&D“)

Galia	270 Wp
Efektyvumas	16,30 proc.
Išmatavimai (mm)	1670 x 992 x 7,1
Svoris	27 Kg
Saulės elementų išdėstymas	6 x 10
Priekinė dalis	3 mm grūdintas stiklas + AR danga
Galinė dalis	3 mm grūdintas stiklas
Rėmas	Berėmis
Maksimalios vėjo/sniego apkrovos	2400 Pa/ 8000 Pa
Kontaktų dėžutė	Plastmasinė, IP 67, Ventiliuota

Vieno modulio galia – 270 Wp. Vieną modulį sudaro 60 saulės elementų. Pagal pasirinktą funkcinį vienetą (1 kWp) galima apskaičiuoti kiek modulių ir saulės elementų jį sudarytų.

$$N = P_V \div P_M * 60 \quad (1)$$

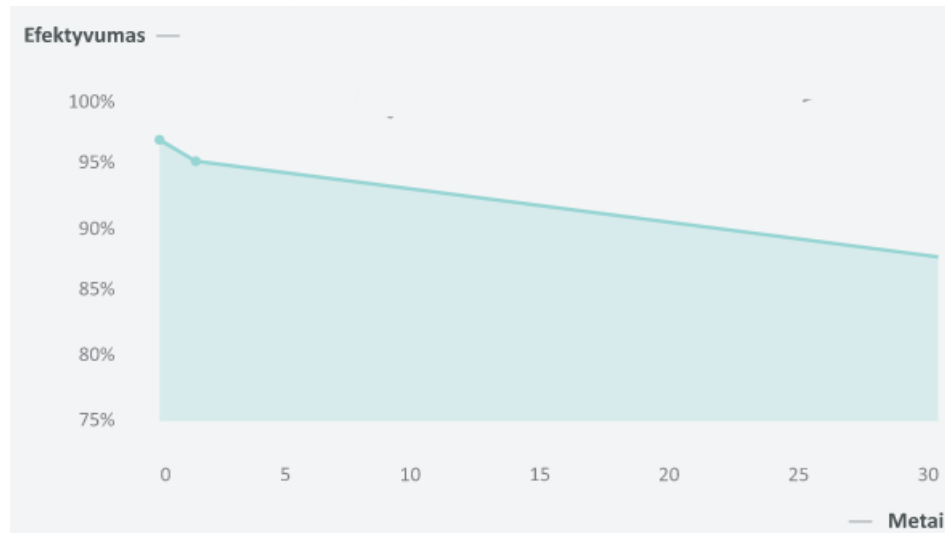
čia: N – saulės elementų kiekis tenkantis funkciniam vienetai;

P_V – funkcinio vieneto galia;

P_M – modulio galia.

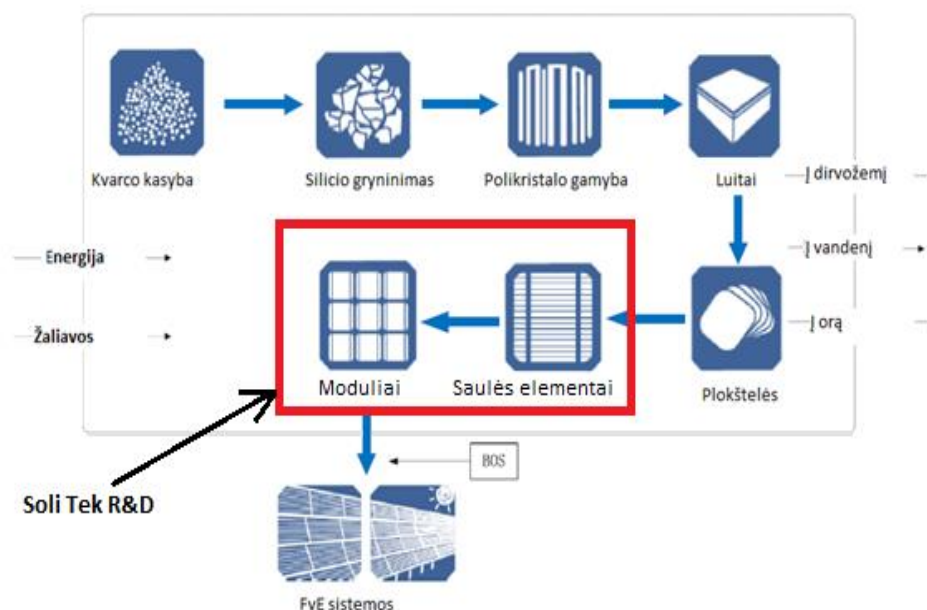
$$N = 1000 \div 270 * 60 = 3,7 * 60 = 222$$

Taigi funkcinę vienę sudarytų kiek mažiau nei 4 moduliai – 3,7. Bendras silicio plokštelių kiekis būtų – 222. Projektuojamas modulio tarnavimo laikas – 30 metų. Efektyvumo kitimas pavaizduotas 16 pav. Įmonės pateiktais modeliavimo duomenimis 1 kWp tokio modulio veikdamas Lietuvos sąlygomis pirmais metais pagamintų apie 1000 kWh, o per projektuojamą gyvavimo ciklą būtų pagaminama apie 27000 kWh elektros energijos.



16 pav. Efektyvumo kitimas per modulio tarnavimo laiką („Soli Tek R&D“)

Vieną „Solid PRO P.60“ modulį sudaro 60 silicio plokštelių, kurios išpjaustomos iš polikristalinio silicio luitų. Įmonė UAB „Soli Tek R&D“ šių plokštelių negamina, jos veikla apima saulės elementų ir modulių gamybos etapus. FvE gamybos schema pavaizduota 17 pav.



17 pav. FvE modulių gamyba (Fu ir kt. 2015)

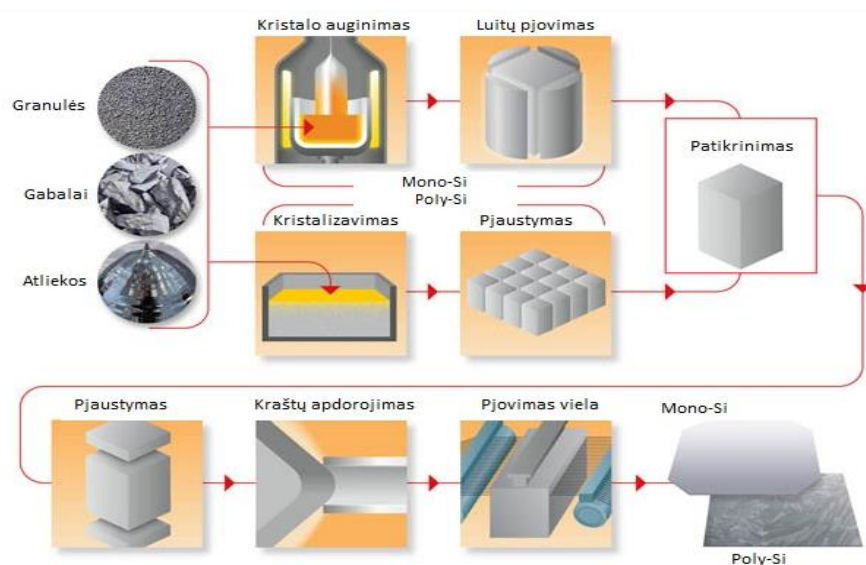
Įmonė naudoja jau pagamintas plokšteles, todėl iki šio gamybos etapo jos galimybė įtakoti gaminio poveikį aplinkai nepriklauso nuo įmonėje vykstančių gamybos procesų, tačiau priklauso nuo pasirinktų sudėtinių medžiagų sugeneruoto poveikio.

Analizuojamame modelyje vienos plokštelės dydis yra – 156 x 156 mm, tokioje plokštelėje yra apie 11 g polikristalinio silicio. Kaip apskaičiuota anksčiau pasirinktą funkcinį vienetą (1 kWp) sudarytų 222 silicio plokštelės.

3.1.1 Silicio perdirbimas

FvE naudojamas polikristalinis silicis gaunamas iš aukšto grynumo (6-7N) silicio. Silicis ištirpdomas ir supilamas į formą. Formuojamas silicio luitas pradeda lėtai (dėl susidariusio temperatūrų skirtumo) kristalizuotis. Užauginti polikristalinio silicio luitai pjaustomi į plonas plokšteles, kurios vėliau naudojamos saulės elementų gamyboje. Kaip aptarta literatūros analizėje šie procesai dėl didelių energijos sąnaudų kuria itin didelį poveikį aplinkai, ypač kai energijos gamybai naudojamas iškastinis kuras (Peng ir kt. 2013, Fu ir kt. 2015). Todėl įmonės ir tyrimų institutai ieško sprendimų kaip siekiant darnios plėtros mažinti aplinkosauginius, ekonominius ir socialinius su šia medžiaga susijusius neigiamus poveikius. Pasirenkant naudoti perdirbto silicio plokšteles siekiama mažinti šių procesų įtaką aplinkai.

Tokiu atveju produkcijai tinkamos silicio plokštelės pereina tik luitų liejimo bei jo pjaustymo procesus, bet išvengiama kvarco kasybos, silicio apdorojimo, polikristalo gamybos, o visi šie procesai yra imlūs energijos vartojimui, net iki 50 % bendrų FvE gamybos energijos sąnaudų gali tekti šiems etapams. Šiuo metu apie 90 % polisilicio gaminama TCS/Siemens technologija (Bye, Ceccaroli 2014). Ši technologija pradėta naudoti praėjusio amžiaus 7-ajame dešimtmetyje ir iki šiol yra populiariausia. Proceso metu reikalinga aukšta temperatūra, siekianti ir 1100°C, patiriami dideli energijos nuostoliai prisideda prie aukštų šilumos ir elektros energijos sąnaudų. Šiais procesais pagaminamos polisilicio granulės tinkamos luitų liejimui (18 pav.).



18 pav. Silicio plokštelių gamyba (Bye, Ceccaroli 2014)

Norint išvengti minėtų etapų galima naudoti perdirbtą silicį, tačiau egzistuoja keletas aspektų, kurie stabdo jo naudojimą FvE gamyboje. Visų pirma, svarbu atkreipti dėmesį į tai, kokie resursai reikalingi norint perdirbti silicį. UAB „Soli Tek R&D“ eksperimentais tyrė įvairios kokybės perdirbtą silicį. Bendrai įmonėje saulės elementų gamyboje susidaro iki 4 % plokštelių atliekų. Eksperimentais tirtos po įvairių gamybos procesų surinktos atliekos ir nustatyta, jog panaudojimui antrą kartą tinkamos tos silicio plokštelės, kurios tampa atliekomis po tekstūrizacijos proceso. Atliekos surinktos po vėlesnių procesų – naudojimui antrą kartą gamyboje tinkamos, bet tik po papildomų valymų, kuriems reikalingos įvairios medžiagos. Neatliekant šių valymų dėl didelio priemaišų kiekio plokštelėse gaunamas žemas SE efektyvumas. Surenkant silicio plokštelių duženas po tekstūrizacijos proceso jų perdirbimas yra paprastas, nes tokias plokšteles, kaip ir polisilicio granules galima iš karto dėti į lydimo procesą be papildomo apdorojimo.

Todėl koks poveikis aplinkai sukuriamas perdirbant silicį priklauso nuo to kokia yra perdirbamoji medžiaga. Kuo vėlesni gamybos procesai nuo tekstūrizacijos, tuo didesnė žaliavų įvairovė saulės elemente ir tuo daugiau energijos bei medžiagų reikalinga jam perdirbti. Tačiau gamyboje susidariusios atliekos vis tiek nėra tokios sudėtingos perdirbimui, kaip atliekomis virtusių FvE tvarkymas. Nepaisant, jau anksčiau minėtų galimybių, kuomet pakankamai aukštu procentu atgaunamos žaliavos, tačiau toks perdirbimas neefektyvus procesuose naudojamų medžiagų prasme ir atgautų žaliavų kokybe. Dėl šios priežasties UAB „Soli Tek R&D“ tiek gamyboje susidariusių atliekų, tiek atliekomis tapusių modulių kol kas neperdirbinėja, o sandėliuoja, nes vystomos perdirbimo technologijos gerina situaciją, o ir atliekų kiekis nėra didelis. Šiuo metu Europoje nebėra silicio plokštelių gamintojų, o pagrindiniai gamintojai yra Rytų Azijos šalyse, tokiu atveju ir atliekų transportavimas gali įgauti didesnę reikšmę.

Dar viena iš priežasčių kodėl perdirbto polisilicio naudojimas nėra plačiai paplitęs FvE gamybos pramonėje, yra ta, jog susidariusių atliekų kiekis yra labai mažas lyginant su naujai gaminamų modulių skaičiumi, ypač pastaraisiais metais, kuomet FvE plėtra itin sparti. Kadangi pagrindinė polisilicio naudojimo sritis yra fotoelementų pramonė, galimybės perdirbti šias medžiagas yra ribojamos priklausomybės nuo šios rinkos.

Rinkoje esant žemoms pirminės žaliavos kainoms, FvE gamintojai neturi ir ekonominio suinteresuotumo rinktis perdirbtą žaliavą. Vis tik, didėsiantis atliekų skaičius, silicio resursų mažėjimas skatina ir perdirbimo technologijų vystymąsi. Dalis perdirbėjų tik dalinai išardo modulį ir toliau perdirba jį su kitomis elektros ir elektroninės įrangos atliekomis. (Latunussa ir kt. 2016) tyrimu analizuotas „*Full Recovery End of Life Photovoltaic – FRELP*“ metodas, specializuotas FvE atliekų perdirbimui. Šiuo metodu pakankamai aukštu procentu atgaunamos žaliavos, o procesams reikalinga energija, vanduo, rūgštys, kalcio hidroksidas. Tačiau taip atgautas silicis nebūna pakankamos kokybės naujo elemento gamybai, nes naudojant tokį silicį krenta gaminių efektyvumas, todėl reikalingi papildomi procesai jo kokybei gerinti.

Pagrindine šio metodo problema įvardinamas enkapsuliantų atkyrimas ir tai, kad šios medžiagos nebebūna tinkamos pakartotiniam naudojimui, todėl dažniausiai yra sudeginamos. Yra tiriamų gamybos metodų, kuomet atsisakoma enkapsuliacijos, tai turėtų sumažinti įtaką aplinkai gamybos etape bei palengvinti perdirbimą, bet šios technologijos kol kas nėra plačiai naudojamos rinkoje.

3.1.2 Modulio konstrukcijos ir sandaros pakeitimai

Perdirbto silicio naudojimas plokštelėse yra pilotinis įmonės bandymas norint išsiaiškinti ar tokia žaliava gali pakeisti pirminę, kokie aplinkosauginiai ir ekonominiai privalumai pasiekiami. Tad ar šis žingsnis bus taikomas praktikoje paaiškės kai bus surinkta ir išanalizuota visa su tuo susijusi informacija.

Tačiau „Solid PRO P.60“ modulis yra gaminamas ir jo projektavime jau buvo numatyti veiksniai, kuriais siekiama sumažinti įtaką aplinkai. Šiame modulyje, skirtingai nei daugumos pasaulyje gaminamų FvE, nenaudojamas aliuminio rėmas. Aliuminio gamybos bei apdorojimo poveikiai aplinkai gana žymūs. Tą visų pirma nulemia nemaža aliuminio masė, ji sudaro 15-20 % nuo bendros FvE masės. FvE gamybos Kinijoje atveju galutiniame modulių gamybos etape būtent procesai susiję su aliuminiu yra vyraujantys kuriant poveikį aplinkai. Aliuminio santykis nuo bendro poveikio PKŠ kategorijoje šiame gamybos etape yra net 46,1 % (Fu ir kt. 2015). Tai ir tiesioginiai poveikiai apdorojant aliuminį į norimą formą ir netiesioginiai, susiję su jo gavyba ar perdirbimu. Jei tiesioginius poveikius įmonė stengiasi minimizuoti naudodama atsinaujinančius energijos išteklius tai netiesioginius kontroliuoti sunkiau. Tad toks įmonės sprendimas yra ekologinio projektavimo pavyzdys, kuomet konstrukcijos pakeitimas įtakoja gaminio poveikį aplinkai, šiuo atveju visiškai atsisakant vienos iš žaliavų ir taip sumažinant bendrą produkto poveikį aplinkai. Aliuminio rėmo atsisakymas ne tik eliminuoja su juo susijusius poveikius aplinkai, tačiau ir padidina modulio atsparumą mechaninei apkrovai, kadangi nelieka iš šonų ribojančio rėmo, modulis gali šiek tiek išsilenkti ir atlaikyti 800 kg/m² apkrovą, o tai pusantro karto daugiau nei tokios konstrukcijos modulis su aliuminio rėmu. Toks sprendimas užtikrina mažesnę galimybę mechaniniam pažeidimui dėl apkrovos, todėl mažėja tikimybė, jog gaminys bus apgadintas veikimo metu. Literatūros analizėje aprašytas tyrimas (Tammaro ir kt. 2016) kuomet tirtas FvE ekotoksiškumas. Didžioji dalis modulių, kurie viršijo leistinas ribas (20 iš 26) bandinių, neatitiko būtent aliuminiui nustatytų verčių.

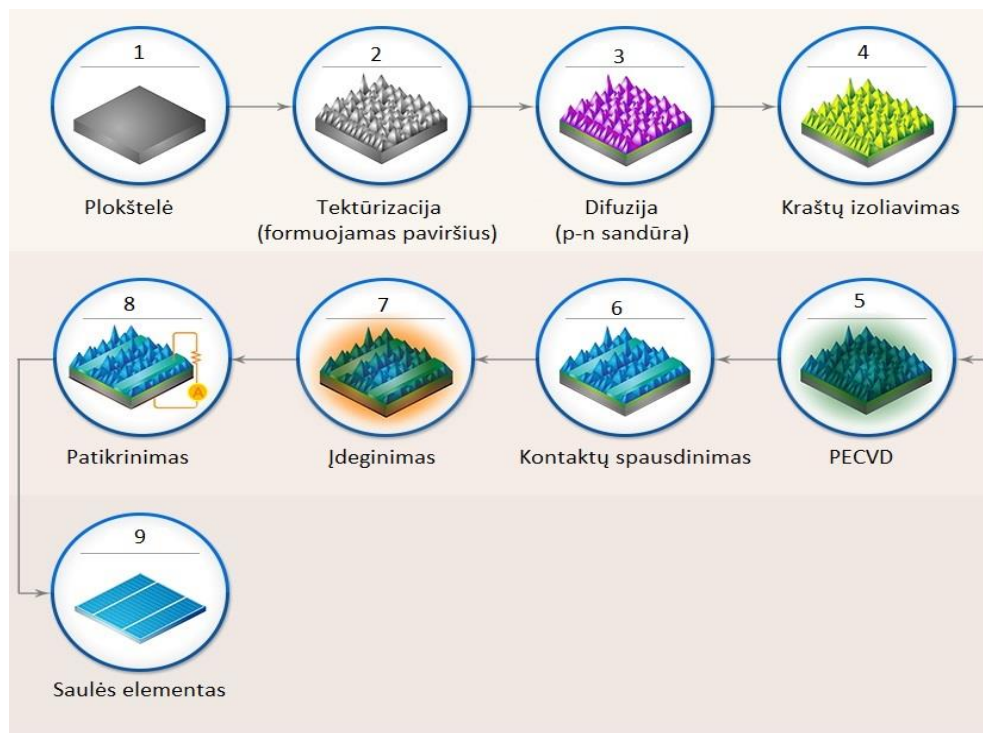
Dar vienas projektavimo sprendimas šiame modulyje yra galinėje modulio pusėje naudoti stiklą, dažniausiai FvE gamyboje dėl pigesnės žaliavų kainos naudojamas polimeras. Stikliniai saulės moduliai gali atlaikyti daugiau nei 1600°C temperatūrą prieš užsidegant bet kuriai modulio daliai. Taip pat toks sprendimas užtikrina didesnę efektyvumą net ir po tarnavimo laiko, kadangi homogeniškos medžiagos (stiklas ir stiklas) reaguoja į šilumos pokyčius sinchronizuotai ir nekelia vidinės įtampos modulyje. Jų paprastesnė ir labiau inertiška kompozicija leidžia geriau apsaugoti modulio viduje esančius saulės elementus nuo aplinkos poveikio. Moduliai atlaikė 5000 valandų testavimo klimatinėse kamerose (50-ties metų ekvivalentas realiame pasaulyje) ir parodė puikius rezultatus – per tą laiką jie prarado tik 6 % galios. Tad nepaisant garantuojamo efektyvumo 30 metų, tokių modulis veikimas gali būti pakankamai efektyvus kur kas ilgesnį laiką, taip mažinant atliekomis tampančių modulių kiekį ir didinant FvE sugeneruotos energijos kiekį.

Norint įsitikinti ar toks sprendimas tikrai sumažina poveikį aplinkai, SimaPro pagalba palyginamas iš pirminių žaliavų gaminamas „Solid PRO P.60“ ir standartinis modulis su aliuminiu rėmu bei polimero naudojimu galinėje dalyje vietoje stiklo. Standartiniam FvE moduliui priskiriamos reikšmės remiantis (Hong ir kt. 2016) tyrimo

duomenimis. Taigi naudojant aliuminio rėmą bei polimerą galinėje dalyje į aplinką patektų 47,2 kg CO₂ ekv. emisijų daugiau nei sprendimais, kuriuos įmonė įgyvendino. Tokiu atveju su aliuminio gavyba bei apdorojimu susiję procesai atsakingi už 67,1 kg CO₂ ekv. ŠESD. Apskaičiuota, jog visas paskutinis modulių gamybos etapas (stiklas, rėmas, polimeras, jungimo dėžė, laidai, litavimas ir kt.) bendrai sugeneruoja 223,1 kg CO₂ ekv. ŠESD. Taigi, su aliuminiu susiję procesai lemia 30 % ŠESD paskutiniame modulių gamybos etape. Nepaisant to, kad tai mažiau nei minėtame (Fu ir kt. 2015) tyrime, kuriame šis rodiklis buvo net 46,1 %, vis tiek tai reikšminga dalis. Lyginant ne atskirų etapų, bet bendrą FvE ŠESD emisijų kiekį, modulis su aliuminiu rėmu ir polimeru turi 4,5 % didesnę įtaką klimato kaitai. Įmonės sprendimas atsisakyti tų medžiagų įrodo, jog labiausiai paplitusios praktikos nebūtinai yra naudingiausios, o dažnai yra lemiamos tik ekonominių paskatų. Toks žingsnis tik dar labiau prisideda prie fotovoltinių modulių naudos mažinant anglies pėdsaką. Tai ir puikus ekologinio projektavimo pavyzdys, kuomet gaminio konstrukcijos keitimas leidžia sumažinti poveikį aplinkai. Kaip ir minėta, svarbu pažymėti jog polimero keitimas stiklu suteikia produktui mechaninio patvarumo bei efektyvumą ilgesniame laikotarpyje, tad nors šie rodikliai ir nebuvo vertinti lyginime, tačiau taip pat suteikia privalumų įgyvendintam įmonės sprendimui.

3.1.3 Saulės elementų gamyba

Saulės elementų iš silicio plokštelių gamybos etape paeiliui vykdomi tokie procesai: tekstūrizacija, difuzija, cheminis kraštų izoliavimas, PSG valymas, SiN_x dengimas (PECVD), kontaktų spausdinimas, džiovinimas ir įdeginimas. Saulės elementų gamyba pavaizduota 19 pav.



19 pav. Saulės elementų gamyba („TSEC“)

Tekstūrizacijos metu nuplaunamas dėl pjaustymo pažeistas plokštelių paviršius ir labai plonas silicio sluoksnis. Tuomet polikristalinio silicio plokštelės tekstūruojamos rūgštimi.

Difuzija – plokštelės juda aukštos temperatūros vakuuminio vamzdžiu ir yra veikiamos POCl_3 dujomis. Taip sukuriama p ir n laidumas. Ieškodama draugiškesnių aplinkai sprendimų įmonė siekia mažinti gamyboje tenkančių žaliavų kiekius bei rinktis mažesnę poveikį aplinkai kuriančias medžiagas. Kartu su Vokietijos saulės energetikos instituto ISC-Konstanz komanda, įmonės gamyboje buvo įdiegtas modifikuotas difuzijos gamybos proceso receptas, leidžiantis sumažinti azoto, deguonies ir POCl_3 medžiagos kiekius. Šio modifikuoto proceso metu yra suformuojamas „naudingas“ oksido sluoksnis saulės elemento paviršiuje, dėl ko vėliau galima visiškai eliminuoti PSG plovimo etapą ir taip dar labiau sumažinti bendrą HF rūgšties bei dejonizuoto vandens suvartojimą.

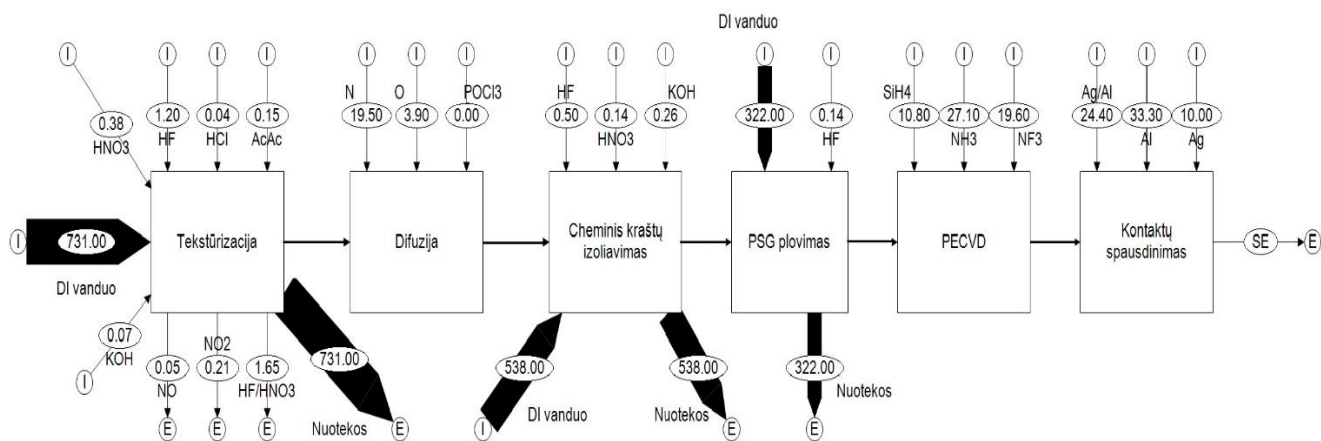
Cheminis kraštų izoliavimas – šis procesas pašalina fosforo difuziją aplink plokštelės kraštą taip, kad priekinė pusė būtų izoliuota nuo galinės.

PSG plovimas – HF rūgštimi plaunamas fosforo silikatinis stiklas (PSG), paviršius iš hidrofiliinio tampa hidrofobiniu.

PECVD – antirefleksinė danga padengiama garų nusodinimo metodu. Silano (SiH_4) ir amoniako (NH_3) dujoms patenkant į kamerą, kur jos suskaidomos dėl veikimo plazma (PECVD).

Kontaktų spausdinimas – sidabrine pasta tose vietose, kuriose yra tarpai, ant paviršiaus paliekamas metalo ruoželis ir formuojama struktūra. Galinė dalis spausdinama dvejais būdais: lituojama plati aliuminio pastos linija, kuria plokštelės jungiamos viena su kita bei juostelių tinklas, dengiantis visą paviršių. Atspausdinus pasta vis dar drėgna, todėl plokštelės patenka į džiovintuvą, kad išgaruotų organinės rišiklio medžiagos.

Visuose išvardintuose procesuose taip pat kontaktų džiovinime ir įdeginime bei technologiniame oro ištraukime naudojama elektros energija. Visa „Soli Tek R&D“ naudojama elektros energija pagaminta iš atsinaujinančių energijos šaltinių. Procesams tenkantys medžiagų bei išmetalų kiekiai pavaizduoti 20 pav.



20 pav. Saulės elementų gamyba

Naudojamų žaliavų bei energijos kiekiai standartinėje ir patobulintoje gamyboje tenkantys 1 kWp FvE pateikiami 6 lentelėje.

6 lentelė. Saulės elemento gamybos įvediniai

Procesas	Tekstūrizacija	Difuzija		Cheminis kraštų izoliavimas	PSG plovimas		PECVD	Kontaktų spausdinimas	Kontaktų džiovinimas ir įdeginimas	Technologinis oro ištraukimas
		SG	PG		SG	PG				
Įvediniai		SG	PG		SG	PG				
DI vanduo, l	731			537,8	322	0				
HF, l	1,2			0,5	0,14	0				
HNO₃, l	0,38			0,14						
AcAc, l	0,15									
HCl, l	0,042									
KOH, l	0,073			0,26						
Azotas, l		19,5	3,2							
Deguonis, l		3,9	2,3							
POCl₃, l		0,00095	0,00027							
SiH₄, l							10,8			
NH₃, l							27,1			
NF₃, l							19,6			
Ag/Al, g								24,4		
Al, g								33,3		
Ag, g								10		
El. en., kWh	11,6	11,47	11,47	4,38	5,28	0	19,33	12,37	5,15	10,74

Gamybos metu susidaro įvairių tipų išmetalų. Didelis vandens kiekis naudojamas plovimui po tekstūrizacijos, cheminio kraštų izoliavimo ir PSG plovimo procesų. Standartinės gamybos atveju 1 kWp FvE pagaminti tam sunaudojama 1591 l dejonizuoto vandens, patobulintos gamybos atveju 1269 l. Susidariusios nuotekos valomos vietinėje vandens valymo sistemoje, po to šalinamos į komunalinių nuotekų tinklus.

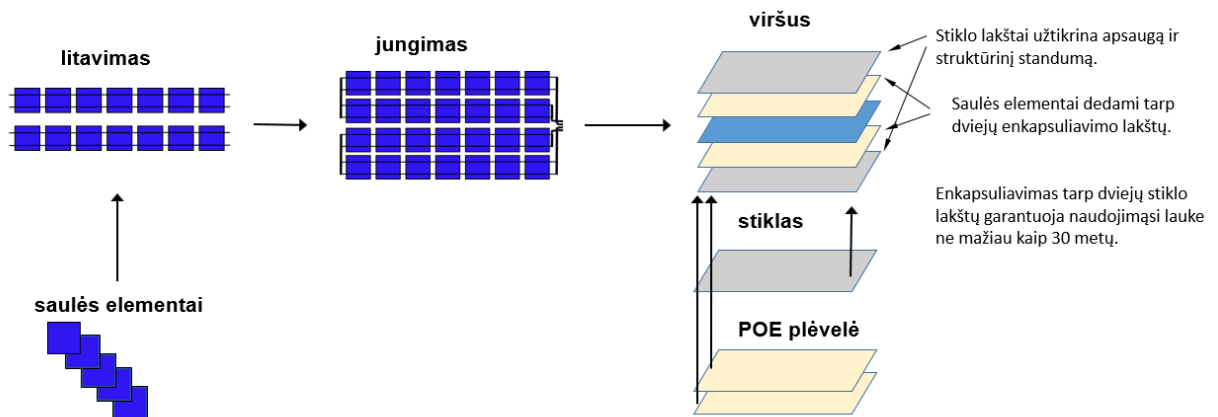
Susidaro įvairios emisijos į orą, jų kiekiai atskiruose procesuose nurodomi 7 lentelėje. Rūgštinės dujos neutralizuojamos šlapio skruberio pagalba (neutralizacija naudojant 50 % NaOH). Abiejų modifikacijų modulių gamybos atveju susidariusių atliekų kiekis toks pats, o tos, kurios perduodamos atliekų tvarkytojams nurodomos 7 lentelėje.

7 lentelė. Saulės elemento gamybos išvediniai

Procesas	Tekstūrizacija	PECVD	Kontaktų džiovinimas ir įdeginimas
Emisijos			
NO, g	51,5	Vietinė valymo sistema – deginimo plovimo skruberis	
NO ₂ , g	206,2		
SiF ₄ , g	12,8		
LOJ, g			8,38
Atliekos			
Neorganinės dulkės, kg		0,01	
HF/HNO ₃ , l	1,65		
LOJ atliekos, kg			0,05
CaF ₂ dumblas, kg	1,21		

3.1.4 Modulių gamyba

Visi anksčiau aptarti procesai reikalingi silicio plokšteles paversti saulės elementais, toliau šie elementai jungiami ir gaminamas modulis. Šie procesai pavaizduoti 21 pav.



21 pav. Modulių gamyba

Visų pirma saulės elementai jungiami į nustatytą eilę (10 elementų) ir lituojami. Tokia eilė jungiama su kita eile, kol sudaromas 6 eilių tinklas. Toks tinklas ir sudaro polikristalo sluoksnio pagrindą vienam moduliui. Norint sustiprinti FvE toks tinklas visų pirma iš abiejų pusių enkapsuliuojamas dviejų poliolefino (POE) lakštų. Šie lakštai

yra tarsi riškis tarp įvairių plokščių sluoksnių. Jie turi būti skaidrūs, turėti mažą šiluminę varžą bei atsparumą dideliame UV poveikiui. Šis permatomas polimeras terminio proceso metu tampa panašus į permatomą gelį ir apima saulės elementus. Tada gaminys iš abiejų pusių dengiamas stiklu. Priekinis stiklas yra sunkiausia FvE dalis, nes jo funkcija apsaugoti ir užtikrinti viso modulio tvirtumą, išlaikant aukštos kokybės skaidrumą. Taip pat paviršiaus medžiaga turi būti nepralaidi vandeniui, stabili ilgo laiko UV poveikyje ir turėti mažą šiluminę varžą. Šiame modulyje, skirtingai nei daugumoje rinkoje parduodamų FvE (kuriuose dažniausiai naudojamas plastikas) ir galinėje dalyje dengiamas stiklas. Pagrindinė jo funkcija – izoliuoti ir apsaugoti nuo oro ir drėgmės. Kaip jau minėta, inertiška kompozicija leidžia geriau apsaugoti modulio viduje esančius saulės elementus nuo aplinkos poveikio. Ant galinės modulio dalies tvirtinama jungimo dėžutė, kuria perduodama elektros srovė. IP67 klasę turintis plastikinis korpusas kuriame yra diodai bei laidai, kuriais atskiri moduliai jungiami vienas su kitu formuojant saulės elektrines. Visų medžiagų sąrašas nurodomas 8 lentelėje.

8 lentelė. Modulių gamybos procesuose naudojamos medžiagos

Proceso pavadinimas	Žaliavos	Kiekis			
		1 FvE		1 kWp	
Saulės elementų litavimas	Silicio plokštelės	60	vnt.	222,2	vnt./1 kWp
	Litavimo juosta (siaura)	0,18	kg	0,65	kg/1 kWp
	Litavimo juosta (plati)	0,06	kg	0,22	kg/1 kWp
	Litavimo skystis	0,03	l	0,11	l/1 kWp
Plėvelės ir stiklo paruošimas	Priekinis stiklas solar grade: 1670x992x3,2 mm	1	vnt.	3,7	vnt./1 kWp
	Galinis stiklas grūdintas: 1670x992x3,2 mm	1	vnt.	3,7	vnt./1 kWp
	Galinė POE plėvelė	1,7	m ²	6,3	m ² /1 kWp
	Priekinė POE plėvelė	1,7	m ²	6,3	m ² /1 kWp
Jungimo dėžutės montavimas	Jungimo dėžutės korpusas	1	vnt.	3,7	vnt./1 kWp
	Jungimo dėžutės diodai	3	vnt.	11,1	vnt./1 kWp
	Silikono hermetikas	0,05	l	0,2	vnt./1 kWp

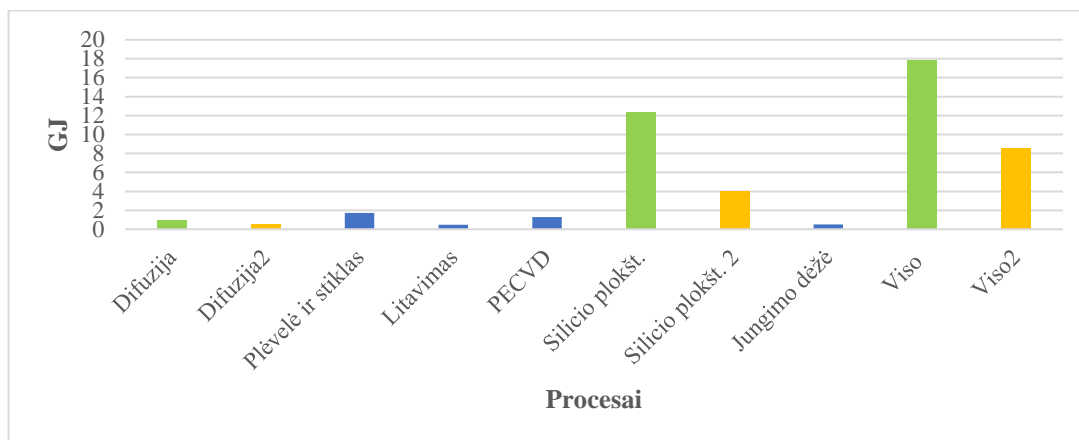
3.2 Fotovoltinio modulio gamybos energijos poreikis

Remiantis SimaPro programos Cumulative Energy Demand metodu apskaičiuotas 1 kWp „Solid PRO P.60“ gamybai reikalingas energijos kiekis. Įvertinamos visos tiesioginės energijos sąnaudos, taip pat netiesioginės, susijusios su sudėtinių medžiagų gavyba bei gamyba.

Modulis1 arba *pirmuoju moduli* vadinamas FvE pagamintas iš pirminių žaliavų.

Modulis2 arba *antruoju moduli* vadinamas FvE įgyvendinus gamybos inovacijos, kuomet silicio plokštelių gamybai naudojamas perdirbtas silicis, o dėl pakeisto difuzijos etapo, sumažėja jame tenkančių medžiagų kiekiai bei nebelieka PSG plovimo proceso.

Skaičiuojant energijos poreikį gamybai pirmuoju atveju gaunamas kiekis – 17,84 GJ, antrojo modulio energijos poreikis – 8,54 GJ. Tad energijos poreikis sumažėja net 52 %. Pagrindinė to priežastis – silicio perdirbimas, jei pirmojo gaminio atveju silicio plokštelėms pagaminti buvo reikalinga 12,38 GJ energijos, tai antrajame modulyje šis rodiklis lygus 4 GJ.



22 pav. Procesų energijos sąnaudos

22 paveiksle proporcingai pavaizduoti energijai imliausi procesai, taip pat tie, kurių energijos poreikis pasikeitė įvykdžius inovacijas. Žalia spalva parodo pirminio gaminio reikšmes, geltona – antrojo gaminio, mėlyna spalva pažymėti procesai nepasikeitė. Bendras energijos poreikis po inovacijų įgyvendinimo yra beveik 50 % mažesnis nei vien su silicio plokštelėmis susijęs poveikis gaminant jas iš pirminių žaliavų.

Tačiau netgi daugiau nei tris kartus sumažinus energijos poreikį silicio plokštelių gamyboje, tai vis tiek lieka reikšmingiausias etapas. Nors jo dalis bendroje sumoje krenta nuo 69 % iki 47 %. Dėl gamybos inovacijų difuzijos procese energijos poreikis sumažėja 41 %, tad nepaisant to, jog sumuojant rezultatus ne tai yra esminis ryškaus rezultatų pasikeitimo faktorius, tačiau tai įrodo, kad net ir efektyviai dirbančioje įmonėje inovacijų diegimas yra įmanomas technologiniame procese radus sprendimus kaip sumažinti sudėtinių žaliavų kiekius. 9 lentelėje pateikiami abiejų gaminių visų procesų energijos poreikiai pagal skirtingus energijos šaltinius, paryškinti procesai, kuriuose yra pasikeitimų.

9 lentelė. Sunaudotos energijos kiekis pagal energijos šaltinį

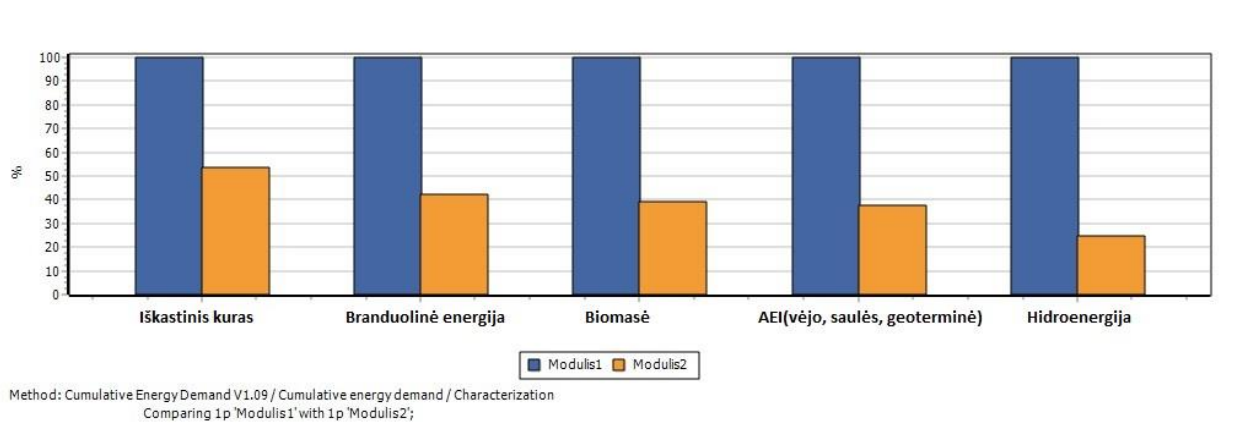
Kuro rūšis	Mat.	Viso	Viso2	Difuzija	Difuzija2	Tekstūrizacija	PSG plovimas	Kontaktų spausdinimas	Chem. kraštų izoliavimas
Iškastinis kuras	GJ	12,71	6,83	0,45	0,26	0,14	0,01	0,11	0,04
Branduolinis kuras	GJ	1,97	0,83	0,30	0,18	0,02	0,00	0,01	0,01
Biomasė	GJ	0,53	0,21	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
AEI (vėjo, saulės en.)	GJ	0,15	0,06	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Hydroenergija	GJ	2,47	0,61	0,09	0,07	0,05	0,02	0,06	0,02
Viso	GJ	17,84	8,54	0,90	0,54	0,21	0,04	0,18	0,07

9 lentelės tęsinys

Kuro rūšis	Mat.	Chem. kraštų izoliavimas	Kontaktų džiov. ir įdeginimas	Plėvelė ir stiklas	Litavimas	PECVD	Silicio plokšt.	Silicio plokšt. 2	Jungimo dėžė
Iškastinis kuras	GJ	0,04	0,00	1,59	0,38	1,15	8,43	3,16	0,41
Branduolinis kuras	GJ	0,01	0,00	0,06	0,06	0,04	1,41	0,46	0,06
Biomasė	GJ	0,00	0,00	0,03	0,02	0,01	0,42	0,12	0,01
AEI (vėjo, saulės en.)	GJ	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,03	0,01
Hidroenergija	GJ	0,02	0,02	0,02	0,02	0,09	2,01	0,22	0,03
Viso	GJ	0,07	0,02	1,71	0,48	1,29	12,38	4,00	0,52

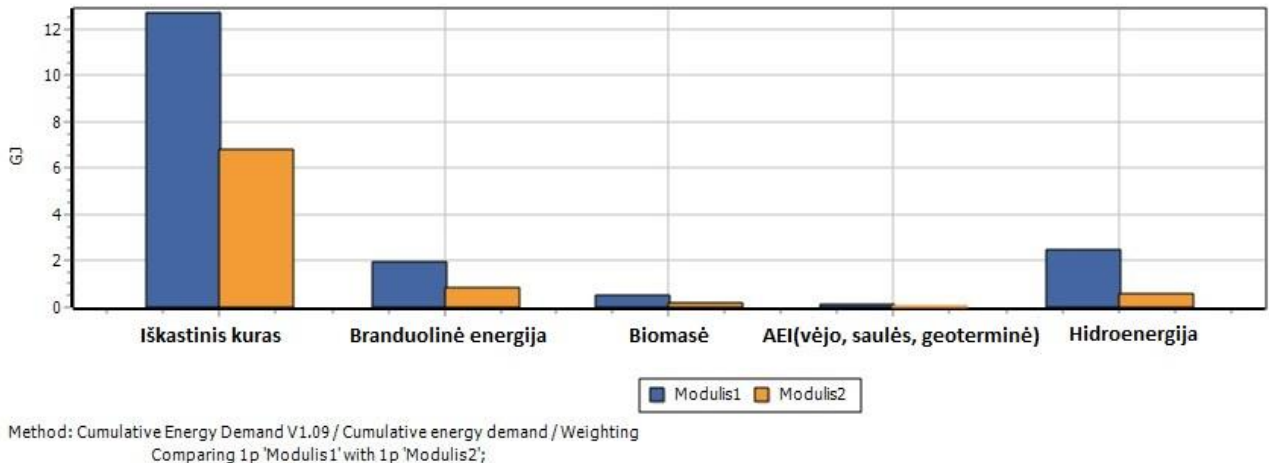
Nepaisant to, kad „Soli Tek R&D” naudoja tik atsinaujinančių išteklių energiją, tačiau sudėtinėms medžiagoms gaminti taip pat naudojama energija, kuri pagaminta naudojant ir neatsinaujinančius išteklius. Įmonėje vykdomuose saulės elementų ir modulių gamybos etapuose tiesioginis ir netiesioginis energijos poreikis yra – 5,46 GJ pirmajam gaminiui ir 5,06 GJ antrajam, tačiau iš jų tik 0,60 GJ ir 0,55 GJ atitinkamai, pagaminta atsinaujinančiais energijos šaltiniais. Tai įrodo, jog didžioji dalis energijos skirta su medžiagų gamyba susijusiems gamybos, apdorojimo, transportavimo procesams, bet ne su tiesioginiu energijos vartojimu įmonėje. Kita vertus, tai patvirtina aukštą įmonės efektyvumą energijos vartojime.

Bendrose sąnaudose pirminio modulio atveju iškastinio kuro naudojimu pagaminta net 71 % energijos. Didžioji dalis šios energijos skirta kvarco gavybai, silicio gryninimui, polikristalo formavimui ir plokštelių pjaustymui. Kadangi apie 60 % polikristalinio silicio gaminama Kinijoje (U.S. Geological Survey 2019), o šios šalies energetinė sistema daugiausia remiasi iškastiniu kuru, ypač anglimi, tuo galima paaiškinti ir aukštą procentą neatsinaujinančio kuro naudojime. Lyginant gaminius pagal energiją pagamintą skirtingais šaltiniais, grafinis pasiskirstymas pavaizduotas 23 pav. Labiausiai, net tris ketvirtadalius sumažėja hidroenergija generuojamas energijos kiekis. Mažiausiai pasikeičia iškastinio kuro naudojimas, tačiau pasikeitimas, net 46 %, ir tai yra žymus skirtumas. Kitais ištekliais pagamintos energijos sąnaudų skirtumai svyruoja tarp 48 % ir 57 %.



23 pav. Gaminių energijos poreikio pasikeitimas pagal įvairius energijos šaltinius

Visgi vertinant iškastinio kuro naudojimą, taip pagaminta energijos dalis nuo bendros gaminiui reikalingos sumos netgi padidėja (nuo 71 % iki 80 %), o atsinaujinančių dalis sumažėja, teigiamu poslinkiu tokiu atveju galima laikyti tai, jog visų pirma energetinis efektyvumas yra siekis energiją taupyti, o ne keisti jos šaltinius (24 pav.).



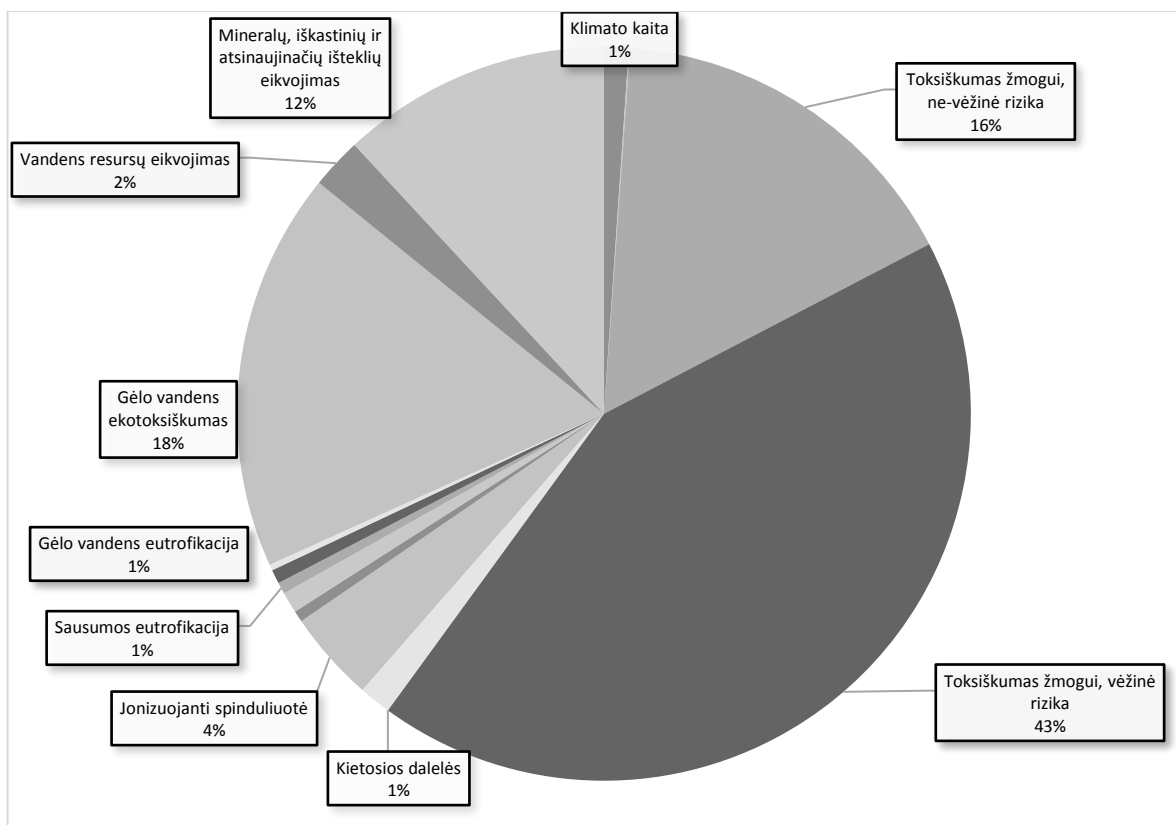
24 pav. Gaminių energijos poreikio proporcingas pasikeitimas pagal įvairius energijos šaltinius

Taigi, pirminio modulio 1 kWp pagaminti reikalinga 17,84 GJ energijos, o tai lygu 4956 kWh. Vertinant tomis pačiomis Lietuvos sąlygomis (apie 1000 kWh elektros energijos pagamintos per pirmuosius metus), energijos atgavimo laikas būtų apie 5 metus, tai reiškia, jog toks FvE turėtų veikti 5 metus, kol jis pagamintų tą energijos kiekį, kuris buvo reikalingas jį gaminant. Projektuojant modulio veikimą 30 metų, tai parodo, jog pirmą šeštadalį laiko toks modulis veiktų generuodamas jo gamybai reikalingas energijos sąnaudas. Vis tik tai ilgesnis energijos atgavimo laikas lyginant su anksčiau aprašytais tyrimais (Kommalapati ir kt. 2017, Fu ir kt. 2015), tačiau dauguma jų atlikti didesnės apšvietos sąlygomis, tad suprantama, jog su tuo didėja sugeneruotos energijos kiekis bei atitinkamai trumpėja energijos atgavimo laikas.

Įdiegus gamybos inovacijas 1 kWp gamybai reikalinga – 8,54 GJ arba 2372 kWh energijos. Taigi, skaičiuojant energijos atgavimą laiką Lietuvos sąlygomis (1000 kWh pagamintos elektros energijos pirmaisiais veikimo metais), šis rodiklis būtų apie 2,4 metus. Toks rodiklis yra panašus aptartiems atvejams, taigi net ir veikdamas Lietuvos sąlygomis toks modulis pakankamai greitai sugeneruotų jo gamybai reikalingą kiekį, o didesnio spinduliavimo veikime tas laikas būtų dar trumpesnis.

3.3 Poveikis aplinkai vertinant ILCD Midpoint+ metodu

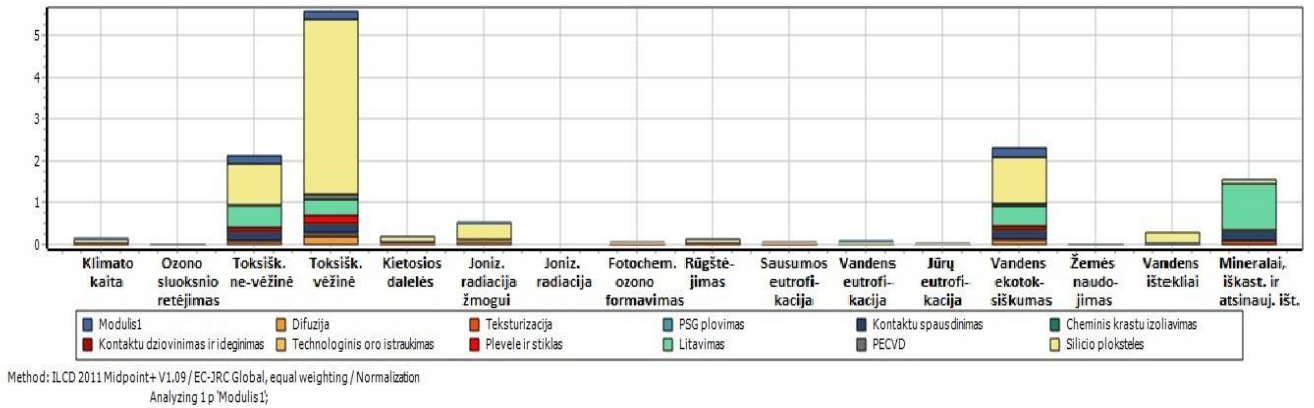
ILCD Midpoint+ metodas apima įvairias poveikio aplinkai kategorijas, galima matyti kuriose kategorijose daroma įtaka yra reikšmingiausia. Metodas leidžia ir normalizuojant rezultatus įvertinti kurioje kategorijoje sukuriamas reikšmingiausias poveikis. Taip skaičiuojant gauname, jog pirminio modulio bendras rezultatas – 13,07. Išskirsčius rezultatus atskiroms kategorijoms gaunamas toks pasiskirstymas (25 pav.)



25 pav. Normalizuotų pirminio modulio ILCD Midpoint+ metodikos rezultatų pasiskirstymas poveikio aplinkai kategorijose

Iš rezultatų matoma, kad reikšmingiausias poveikis daromas toksiškumo žmogui vėžinei rizikai kategorijoje (43 %), žymi ir ne-vėžinė rizika (16 %). Dvejais procentais daugiau tenka poveikiui gėlo vandens ekotoksiškumui (18 %), 12 % priskiriama mineralų, iškastinių bei atsinaujinančių šaltinių eikvojimui.

Svarbu pažvelgti į tai, kas konkrečiose kategorijose nulemia poveikį. Procesų įtaka visoms kategorijoms pavaizduota 26 pav.



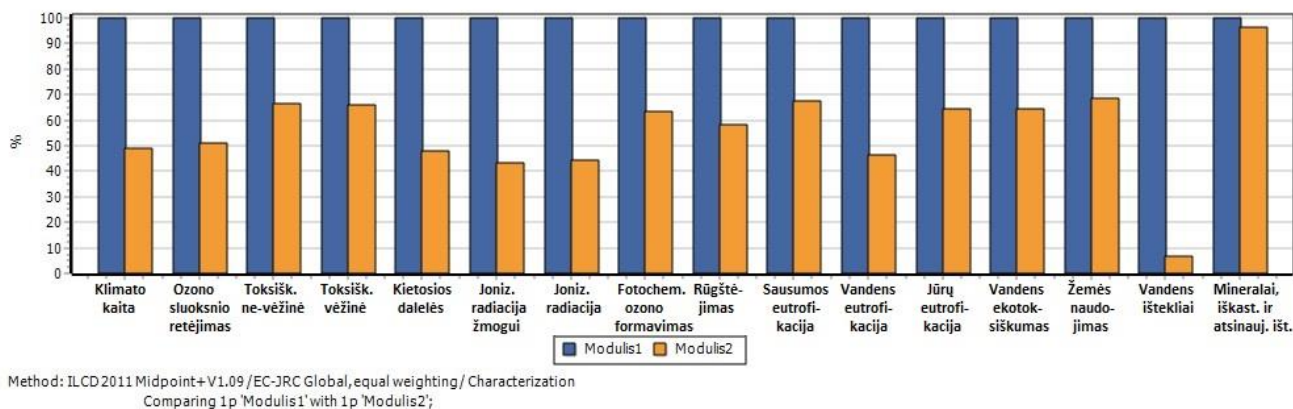
26 pav. Normalizuotas pirminio gaminio poveikis vertinant ILCD Midpoint+ metodu

Sunku priėti apibendrintų išvadų, nes skirtinguose kategorijose gali skirtis reikšmingiausi procesai, tačiau vis tik reikia konstatuoti, kad silicio plokštelių gamybos etapai, litavimas, difuzija bei plėvelės ir stiklo kuriami poveikiai yra žymiausi.

Didžiausią įtaką turintis – toksiškumas žmogui, daugiausia kuriamas dėl silicio plokštelių, čia reikšmingi įvairūs procesai, reikalingi jų gamybai. Tai ir silicio gavyba ir metalurgijos pramonė ir elektros energijos naudojimas. Kitose kategorijose didžiausią įtaką taip pat kuria silicio plokštelių gamyba. Kadangi pagal gaminamą polikristalinio silicio kiekį pasaulyje žymiai pirmauja Kinija, šios šalies energijos gamybos sistema tampa itin reikšminga. O Kinijoje beveik du trečdaliai elektros energijos gaminama deginant anglį ir taip žymiai prisidedant prie įtakos įvairioms kategorijoms.

Vertinant kitus gamybos etapus, galima išskirti litavimo etapą, jame net ir nedidelis kiekis yra reikšmingas aplinkos poveikiui dėl naudojamų litavimo medžiagų. Dėl jų poveikis itin žymus mineralų, iškastinių bei atsinaujinančių šaltinių eikvojimui. Difuzijos įtaka daugiausia nulemta deguonies vartojimu gamyboje, tad įmonės žingsnis sumažinti šios žaliavos kiekį patobulintos gamybos atveju gali prisidėti prie poveikio aplinkai mažėjimo. Stiklo ir plėvelės sukuriama įtaka galima paaiškinti tuo, jog šios medžiagos sudaro didelę dalį bendro modulio svorio, ypač stiklas. Stiklas sudaro apie 83 % bendros modulio masės, tad nepaisant pakankamai nedidelio kuriamo poveikio vertinant vienam masės vienetui, dėl nemažos masės susidaro ir reikšmingas bendras poveikis. Tokio tipo modelyje stiklo procentinė masė netgi didesnė nei daugumoje modulių, dėl to, kad atsisakius aliuminio rėmo, sumažėja bendras modulio svoris, o galinėje dalyje vietoj plastiko taip pat naudojamas stiklas.

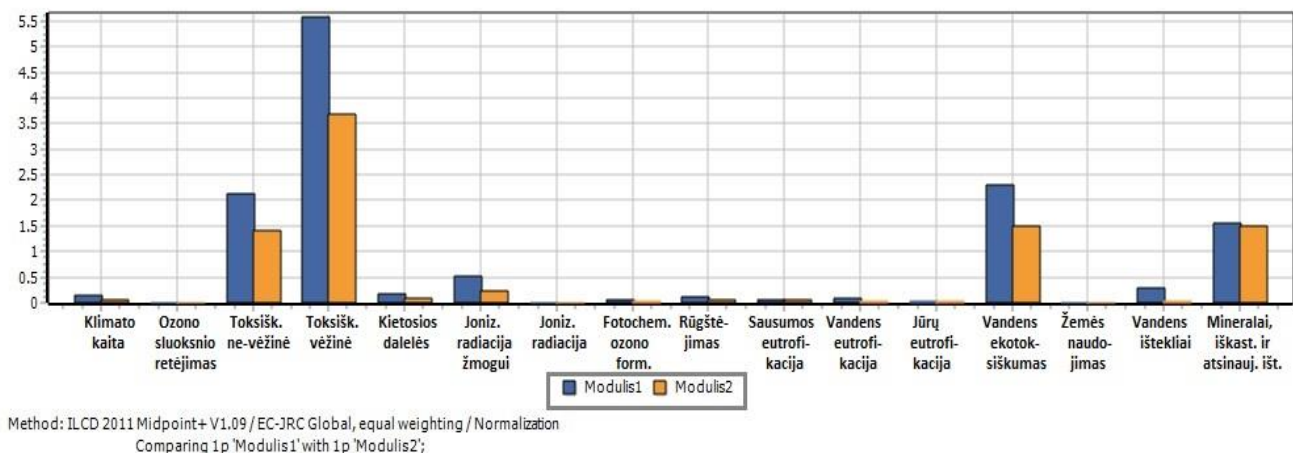
Skačiuojant antrojo FvE poveikį aplinkai, remiamasi pasikeitimais gamybos duomenyse, literatūros šaltiniais. Įvertintas 1 kWp patobulinta gamyba pagamintas modulis, bendras rezultatas – 8,70. Rezultatas 33 % mažesnis nei pirminio modulio (13,07).



27 pav. Gaminių poveikių aplinkai pasikeitimai vertinant ILCD Midpoint+ metodu

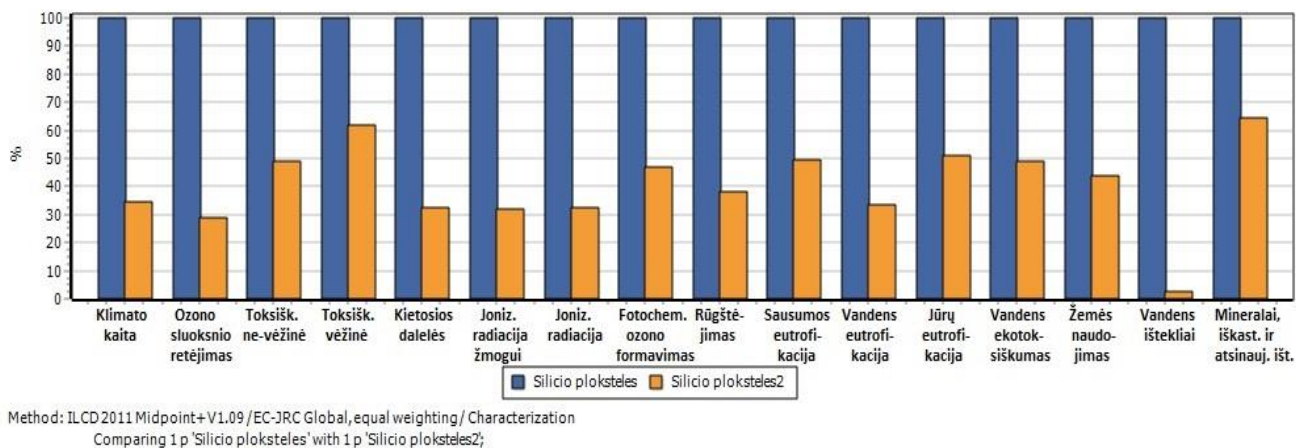
Lyginant gaminių poveikius aplinkai skirtingose kategorijose ILCD Midpoint+ metodu galima matyti jog skirtumų pasiskirstymas netolygus (27 pav.). Tai yra sąlygota fakto, jog kai kurių žaliavų kiekis nesikeičia, o kai kurių keičiasi itin žymiai. Didžiausias skirtumas (93 %) matomas vandens išteklių eikvojime. Mažiausias, vos 3 % pasikeitimas – mineralų ir iškastinių šaltinių eikvojimui, šis poveikis pirminio gaminio gamybos atveju, didžiąja dalimi buvo sukuriamas litavimo procese. Kadangi šiame etape nebuvo taikytos nei medžiagų nei procesų inovacijos, išlieka ir beveik toks pat poveikis kategorijoje. Kitose kategorijose rezultatų pasikeitimai svyruoja tarp 30 % ir 60 %.

Kadangi šis metodas leidžia normalizuoti rezultatus, svarbu įvertinti reikšmingiausių kategorijų skirtumus (28 pav.). Pirminiame FvE žymiausių poveikį kiekį turėjo toksiškumai žmogui vėžine ir ne-vėžine rizika. Šiose kategorijose lyginant gaminius rezultatų sumažėjimas yra apie 33 %. Nors toks procentas nėra tarp didžiausių pasikeitimų, tačiau antruoju gaminiu ne-vėžinės rizikos kategorija (1,41) tampa mažiau reikšminga už beveik nepasikeitusią mineralų ir iškastinių šaltinių eikvojimo kategoriją (1,5).



28 pav. Gaminių poveikiai aplinkai ILCD Midpoint+ metodu normalizavus rezultatus

Galima palyginti kaip silicio plokštelių gamyba (kuri yra reikšmingiausia kuriant įtaką daugelyje poveikių) keičiasi dėl perdirbimo. Kaip matoma iš 29 pav. skirtumai daugumoje kategorijų itin žymūs (apie 70 %) ir yra daugmaž proporcingi aptartam energijos sąnaudų sumažėjimui šiame procese.



29 pav. Silicio plokštelių poveikiai aplinkai ILCD Midpoint+ metodu

3.4 Fotovoltinio modulio poveikis aplinkai pasaulinio klimato šiltėjimo kategorijoje

Nepaisant to, kad normalizavus rezultatus ILCD Midpoint+ metodu poveikis klimato kaitai nebuvo tarp reikšmingiausių, tačiau fotovoltinių saulės elementų rinkoje tai yra svarbus rodiklis. Kai kuriose šalyse norint pardavinėti FvE, privaloma užtikrinti, jog gaminys atitiktų ŠESD emisijų reikalavimus. Kaip aptarta literatūroje, šis vertinimas svarbus ir lyginant įvairius energijos šaltinius pagal tai koks ŠESD emisijų kiekis pateko į aplinką generuojant 1 kWh elektros energijos.

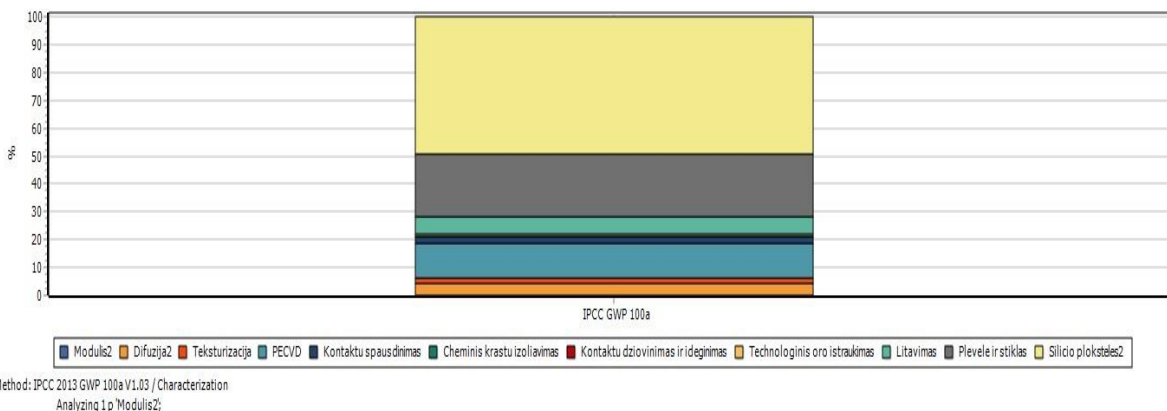
Taigi, pagal inventorinės analizės duomenis IPCC 2013 GWP 100 metodika įvertinama bendra iš pirminių žaliavų gaminamo FvE visų procesų poveikių PKŠ kategorijoje suma, kuri matuojama kg CO₂ ekvivalentu. Bendras ŠESD kiekis gaminant modulį iš pirminių žaliavų yra 1009 kg CO₂ ekv., didžioji dalis, net 708 kg CO₂ ekv., t.y. 70 % nuo bendro ŠESD kiekio susidarė dėl silicio plokštelių, o jų gamyba apima visus etapus nuo kvarcinio smėlio gavybos iki silicio luitų pjaustymo. Atskirų etapų ir procesų poveikis pateikiamas 10 lentelėje. Didžiausias poveikis kuriamas dėl procesams reikalingos energijos gamybos. Kadangi pagal gaminamą polikristalinio silicio kiekį pasaulyje žymiai pirmauja Kinija, šios šalies energijos gamybos sistema tampa itin reikšminga pasaulinio klimato šiltėjimo kategorijoje. O Kinijoje beveik du trečdaliai elektros energijos gaminama deginant anglį ir taip žymiai prisidedant prie pasaulinės klimato kaitos.

10 lentelė. FvE gamybos ŠESD emisijų kiekis

Etapas	ŠESD (kg CO ₂ ekvivalentu)
Silicio plokštelės	707,7
Plėvelė ir stiklas	109,8
PECVD	61,4
Difuzija	37,7
Jungimo dėžė	34,7
Litavimas	31,4
Kontaktų spausdinimas	11,2
Tekstūrizacija	9,6
Cheminis kraštų izoliavimas	5,0
PSG plovimas	0,9
Technologinis oro ištraukimas	0,05
Kontaktų džiovinimas ir įdeginimas	0,02
Viso:	1009,5

Pasiskirstymas kone identiškas energijos poreikio kategorijai, nes būtent energijos generavimas ir yra pagrindinė ŠESD emisijų priežastis. Kuomet net 70 % ŠESD emisijų susiję su plokštelių gamyba svarbu tuose etapuose siekti mažesnio poveikio PKŠ kategorijoje. Šis poveikis priklauso nuo pasirinktų energijos šaltinių, pirminė ar perdirbta žaliava naudojama, taip pat kokios sąlygos yra kvarcinio smėlio gavybai, kadangi ištekliams mažėjant jų prieinamumas darosi sudėtingesnis, tokios pačios masės vienetui pagaminti reikalingi didesni įvairių resursų kiekiai. Kaip jau minėta anksčiau įmonė UAB „Soli Tek R&D“ negali tiesiogiai įtakoti plokštelių gamybos būdų, tačiau norėdama rinktis aplinkai palankesnes medžiagas gali rinktis perdirbtas žaliavas ar tokias, kurioms gaminti buvo naudojama iš atsinaujinančių energijos išteklių sukurta energija. Vertinant kitus gamybos etapus, antras pagal reikšmę yra stiklo ir plėvelės naudojimas, šios įtakos priežastis buvo aptarta anksčiau.

Skaičiuojant ŠESD emisijų skaičių IPCC 2013 GWP 100 metodika antrajam gaminiui gaunamas rezultatas – 495 kg CO₂ ekv. Tai reiškia, jog poveikis klimato kaitai sumažėja daugiau kaip 2 kartus (51 %). Su silicio plokštelių gamyba susijęs tiesioginis ir netiesioginis poveikis PKŠ nuo 708 kg CO₂ ekv. krenta iki 245 kg CO₂ ekv., dėl difuzijos tobulinimo nuo 38 kg CO₂ ekv. iki 22 kg CO₂ ekv. Tačiau reikia prisiminti, jog dėl difuzijos tobulinimo PSG plovimas tapo nebereikalingas, tad nors ir nedidele reikšme, 1 kg CO₂ ekv., bet vis tiek papildomai mažinama įtaka klimato kaitai. Visų procesų įtaka PKŠ kategorijai pavaizduota 30 pav., sumažėjus silicio plokštelių gamybos įtakai bendroje proporcijoje, reikšmingesni tampa plėvelės ir stiklo bei PECVD procesai, kurių reikšmės (110 ir 61 atitinkamai) kg CO₂ ekv., nepasikeitė.



30 pav. Antrojo modulio ŠESD emisijos

Tiesiogiai UAB „Soli Tek R&D“ kuriamas poveikis klimato kaitai vertinamas tik saulės elementų ir modulių gamybos etapuose. Tokiu atveju saulės elementų gamybos procesuose (difuzija, tekstūrizacija, PSG plovimas, kontaktų spausdinimas, kontaktų džiovinimas ir įdeginimas bei PECVD) pirmojo modulio poveikis aplinkai pasaulinio šiltėjimo kategorijoje yra 126 kg CO₂ ekv., o tai sudaro apie 12 % nuo bendro ŠESD kiekio. Kinijos pavyzdžiu (Fu ir kt. 2015) aptartame tyrime šis gamybos etapas sudarė 20,5 %. Viena to priežasčių, kad įmonė naudoja tik iš atsinaujinančių energijos išteklių gaminamą elektros energiją. Taip pat siekia kuo mažesnio poveikio aplinkai bei aukšto žaliavų naudojimo efektyvumo gamyboje. Tai įrodo ir žingsniai, kad patobulintu atveju reikšmingai sumažinami žaliavų kiekiai difuzijos etape bei visiškai atsisakoma PSG plovimo. Patobulintos gamybos atveju šis rodiklis sumažėja iki 109 kg CO₂ ekv., bet jau siekia 22 % nuo bendrų su gaminiu susijusių ŠESD emisijų. Tad nors šis procentas ir yra aukštas lyginant su literatūroje analizuotais pavyzdžiais, tačiau tais atvejais buvo skaičiuojamas pirminis silicio ruošimas, kuris žymiai padidindavo bendrą gaminio poveikį PKŠ.

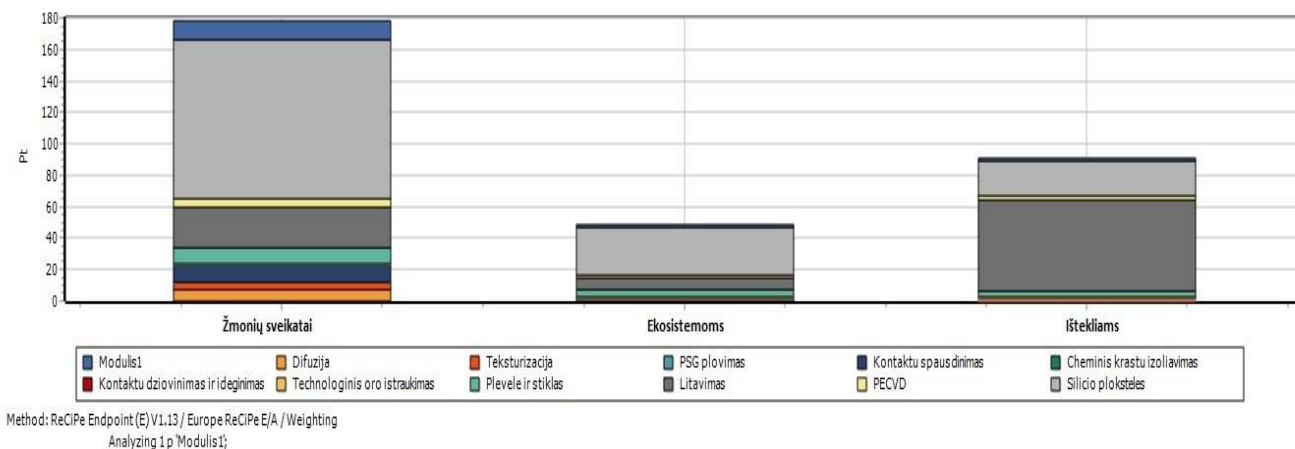
Pagal gautus rezultatus projektuojant modulių veikimą Lietuvoje galima apskaičiuoti koks ŠESD kiekis išskiriamas norint pagaminti 1 kWh elektros energijos. Projektuojamas pagamintos energijos kiekis – 27000 kWh, pirminio modulio ŠESD kiekis – 1009 kg CO₂ ekv., taigi 1 kWh pagaminti būtų išskiriama $1009000/27000 = 37,37$ g CO₂ ekv./kWh. Antruoju gaminiu ŠESD kiekis – 495 kg CO₂ ekv., taigi 1 kWh pagaminti būtų išskiriama $495000/27000 = 18,33$ g CO₂ ekv./kWh. Remiantis (Moro, Lonza 2018) tyrimu vidutinis Lietuvoje naudojamos elektros anglies intensyvumas yra 315 g CO₂ ekv./kWh., tad pirmojo modulio poveikis daugiau nei 9 kartus mažesnis lyginant su vidutinėmis reikšmėmis, o naudojant perdirbtą silicį ir optimizavus gamybą tokiu moduliu sugeneruota elektros energija daugiau nei 17 kartų mažina įtaką globaliniam šiltėjimui.

Tad FvE reikšmė PKŠ, net ir veikiant ne itin saulėtomis Lietuvos klimatinėmis sąlygomis, gali būti sviri ir turi būti vertinama kaip vienas iš būdų ieškant sprendimų tiek klimato kaitos klausimais, tiek atsinaujinančių išteklių aspektu, tiek valstybės siekiu didinti energetinę nepriklausomybę.

3.5 Fotovoltinio modulio poveikis ReCiPe Endpoint (E) metodika

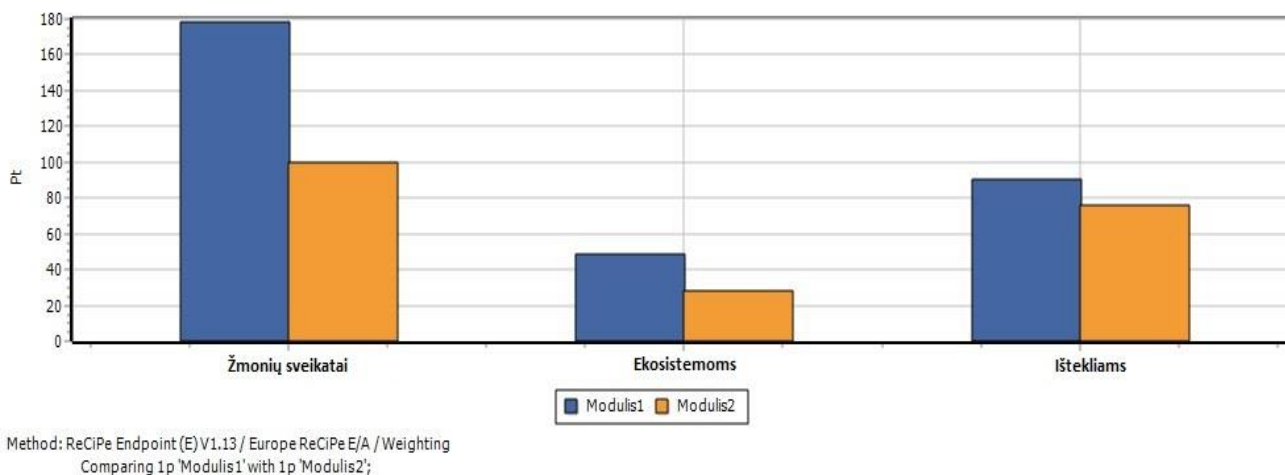
Norint nustatyti poveikį žalos kategorijoms naudojama ReCiPe Endpoint (E) metodika. Žalos kategorijas sudaro poveikiai žmonių sveikatai, ekosistemoms ir ištekliams. Vertinant poveikį žalos kategorijoms jie apskaičiuoti ir palyginti socialine verte pagrįstais svoriais. Šios vertės yra paremtos ekonominiais, socialiniais, politiniais, etiniais aspektais.

Visiems procesams suteikiant vertes gaunami rezultatai, pirminis modulis didžiausią įtaką kuria žalos žmonių sveikatai kategorijoje – 178 Pt, iš kurių silicio plokštelės atsakingos už 101 Pt. Bendra viso modulio taškų suma – 317 Pt, antra pagal reikšmingumą įtaka ištekliams – 90,7 Pt, o joje didžioji dalis nulemta litavimo proceso.



31 pav. Pirminio modulio įtaka žalos kategorijoms vertinant ReCiPe Endpoint (E) metodika

Gamybos inovacijų taikymas pakeičia šiuos rezultatus ir sumažėja poveikis visose žalos kategorijose (32 pav.).



32 pav. Pasikeitimas žalos kategorijose vertinant ReCiPe Endpoint (E) metodika

Žalos kategorijose žmonių sveikatai bei ekosistemoms pasikeitimas apie 44 %, žala ištekliams sumažėja 17 %.

3.6 Gaminių poveikio aplinkai rezultatų analizė

Lyginant FvE modulių poveikius aplinkai bei žalas įvairiomis metodikomis bandyta kuo įvairiapusiškiau įvertinti gamybos inovacijas. Todėl taikyti keturi metodai poveikio aplinkai įvertinimui.

Skaičiuojant energijos poreikį gamybai pirmuoju atveju gaunamas kiekis – 17,84 GJ, antrojo modulio energijos poreikis – 8,54 GJ. Tad energijos poreikis sumažėja net 52 %. Vertinant su FvE susijusias ŠESD emisijas iš pirminių žaliavų pagamintame modulyje jos 1009 kg CO₂ ekv., patobulintos gamybos atveju – 495 kg CO₂ ekv. Tad šiose kategorijose pasikeitimas kone identiškas, nes energijos generavimas ir yra pagrindinė ŠESD emisijų priežastis, o tokį žymų pasikeitimą nulemia didelės energijos sąnaudos silicio plokštelių gamybos procesuose. Šios medžiagos perdirbimo energijos poreikis kur kas mažesnis nei pirminės paruošimas.

Vertinant daugiau aplinkos poveikių bei žalos kategorijų nustatyta, jog didžiausia įtaka kuriama žmogaus sveikatos žalos kategorijoje, o tarp konkrečių poveikių toksiškumo žmogui vėžinės ir ne-vėžinės rizikos kategorijose. Įgyvendinus gamybos inovacijas pasiekiami žymūs teigiami pasikeitimai: daugelyje poveikio aplinkai kategorijų numatomi didesni nei 45 % pasikeitimai, reikšmingiausiose apie 33 %.

Taigi, visais atvejais visose kategorijose po inovacijų įgyvendinimo neigiamas poveikis aplinkai sumažėjo, tad galima daryti prielaidą, kad siūlomos prevencinės priemonės visose aplinkos kategorijose turi teigiamą potencialą mažinti žalos poveikį.

3.7 Ekonominis vertinimas

Diegiant gamybos inovacijas visuomet svarbus ir ekonominis šių sprendimų aspektas. Dėl patobulinto difuzijos proceso jame sumažėja azoto, deguonies ir POCl₃ kiekiai bei visiškai nebelineka PSG plovimo, kuriam reikalingas dejonizuotas vanduo, HF rūgštis ir elektros energija. Sutaupytų žaliavų kiekis 1 kWp FvE apskaičiuojamas pagal formulę:

$$X = SG - PG \quad (2)$$

čia: X – žaliavos kiekis;

SG – žaliavos kiekis tenkantis standartinės gamyba atveju 1 kWp FvE pagaminti;

PG – žaliavos kiekis tenkantis patobulintos gamyba atveju 1 kWp FvE pagaminti.

Tokiu atveju įgyvendinus gamybos inovacijas 1 kWp pagaminti būtų sutaupomi tokie žaliavų kiekiai:

$$\text{Azotas: } 19,5 - 3,2 = 16,3 \text{ l/kWp}$$

$$\text{Deguonis: } 3,9 - 2,3 = 1,6 \text{ l/kWp}$$

$$\text{POCl}_3: 0,00095 - 0,00027 = 0,00068 \text{ l/kWp}$$

Dejonizuotas vanduo: 322 l/kWp

HF: 0,14 l/kWp.

Elektros energija: 5,28 kWh/kWp

Pagal nurodytą žaliavų kainą matavimo vienetui, apskaičiuojami kaštų sutaupymai 1 kWp gamybai, rezultatai pateikiami lentelėje.

11 lentelė. Žaliavų kaina ir sutaupymai gaminant 1 kWp

Žaliava	Kaina	Kiekis	Suma (eur)
Azotas	0,00015 eur/l	16,3 l	0,0024
Deguonis	0,009 eur/l	1,6 l	0,0144
POCl ₃	798,97 eur/l	0,00068 l	0,5433
DI vanduo	0,05 eur/l	322 l	16,1
HF	1,95 eur/l	0,14 l	0,273
Elektros energija	0,125 eur/kWh	5,28 kWh	0,66
Viso:			17,59

Tobulinant difuzijos procesą nebuvo reikalinga papildoma įranga ar medžiagos. Vertinant šios inovacijos įgyvendinimo ekonomines sąnaudas reikia įvertinti išlaidas dėl žmogiškųjų išteklių. Kaip minėta, šis pakeitimas įgyvendintas kartu su Vokietijos saulės energetikos institutu ISC-Konstanz. Jo darbuotojai dirbo savaitę laiko (40 darbo valandų), valandinis atlygis – 150 eur/val., tad bendra suma atlyginimams – 6000 eur. Papildomai reikalinga įskaičiuoti apgyvendinimo ir transporto išlaidas, kurios sudarė 1000 eurų. Taigi bendra išlaidų suma – 7000 eurų. Reiškia jog ekonomiškai šis įmonės sprendimas pasiteisins pagaminus 400 kWp fotovoltinių saulės modulių, o tai nedidelis skaičius, įvertinant, kad maksimalūs gamybos metiniai pajėgumai yra 80 MWp.

Įgyvendinti gamybos inovacijų sprendimai ne tik sumažino neigiamą poveikį aplinkai, bet ir atnešė įmonei ekonominę naudą. Dėl mažesnio žaliavų kiekio susidarė sutaupymai buvo kur kas didesni nei išlaidos reikalingos inovacijoms.

3.8 Rekomendacijos dėl fotovoltinių modulių poveikio aplinkai mažinimo ir darnių inovacijų kūrimo

Atsižvelgiant į gautus rezultatus, aptartas problemas, valstybių, visuomenės bei verslo siekius teikiami pasiūlymai produkto tobulinimui, verslo vystymui, atsinaujinančios energetikos plėtrai.

3.8.1 Rekomendacijos produkto tobulinimui

Modulių projektavimas atsižvelgiant į gaminio būvio ciklo vertinimą

Bet kokio produkto ar paslaugos gamyboje visuomet galima ieškoti alternatyvių sprendimų, kurie pagerintų aplinkosauginę, ekonominę, energetinę ar kitas sritis. Naudojantis programine įranga tyrimu buvo įvertinti jau sukurtų gaminių poveikiai aplinkai. Tačiau ja naudotis galima ir kitu tikslu – produktų projektavime. Bet kokios gamybinės inovacijos, techninio sprendimo ar žaliavų pasirinkimo etapas prasideda nuo projektavimo, BCV programinė įranga leidžia įvairiapusiškai įvertinti bet kurio sprendimo įtaką. Išankstinis vertinimas leistų apskaičiuoti galimus su gamybos procesais susijusius poveikius ir pasirinkti geriausią variantą. Nepaisant to, kad kai kurie pasikeitimai iš pirmo žvilgsnio atrodo turintys tik teigiamą įtaką aplinkai, tačiau detalus būvio ciklo vertinimas gali parodyti neigiamo poveikio padidėjimą kurioje nors kategorijoje. Tad tokių programų pasitelkimas gali būti gaminių kūrimo įrankis, vertinantis įtaką aplinkai. Juo labiau, jog sukūrus vieną modelį galima lengvai keičiant duomenis lyginti įvairias modifikacijas. Tai leistų ne tik apskaičiuoti teorinį aplinkai kuriamą poveikį, bet ir būtų pirminis produkto vertinimas. Įvertinant nenumatytas problemas, kurias gali sukelti vienas ar kitas sprendimas sutaupoma laiko, lėšų ir pastangų jo įgyvendinimui, nes tokio žingsnio atsisakoma jau projektavimo stadijoje.

Enkapsuliantų poveikis

Su moduliais susiję poveikiai aplinkai aptarti rezultatų dalyje. Jie tik patvirtino literatūros analizėje aptartas problemas susijusias su silicio plokštelių gamyba, visų pirma dėl didelių energijos poreikių. Todėl žingsnis naudoti perdirbtą silicį turi reikšmingą įtaką aplinkai. Kituose etapuose taip pat ieškoma sprendimų kaip mažinti žaliavų kiekius ar keisti juos kitais. Svarbus ir šiuo metu plačiai aptariamas procesas FvE gamyboje yra enkapsuliantų naudojimas. Dažniausiai tam naudojamos medžiagos EVA arba POE. Šių medžiagų naudojimas turi įtaką aplinkai ne tik dėl tiesioginio jų sukurto poveikio, bet ir to, kad dėl jų FvE modulių atliekų perdirbimas tampa sudėtingesnis ir reikalaujantis didesnių pastangų. Kadangi enkapsuliantai šilumine energija aplydomi apie saulės elementus jų pašalinimas perdirbimo procese būna sudėtingas. Nors ir galima atgauti dalį šių medžiagų dabar naudojamais perdirbimo metodais tačiau dažniausiai šios medžiagos nebebūna tinkamos pakartotiniam naudojimui ir yra sudeginamos. Vienas iš būdų, kuris padėtų tiek sumažinti pačių enkapsuliantų įtaką, tiek lengvinti perdirbimo procesą yra keisti šias medžiagas tokiomis, kurių atskyrimas paprastesnis arba išvis atsisakyti šių medžiagų. Toks sprendimas yra įmanomas, vykdomi „Apollon Solar“ bandomieji projektai, juose montuojamas stiklas/stiklas berėmis NICE modulis. Lyginant su pradiniu scenarijumi, pasiekiamas teigiamas rezultatas visoms nagrinėjamoms poveikio kategorijoms (Wambach ir kt. 2016). Taikant specializuotus perdirbimo metodus tokius modulius galima išmontuoti iki pagrindinių komponentų (stiklo lakštų, silicio plokštelių) juos atgaunant geresne kokybe, su paprastesniu pakartotiniu panaudojimu FvE gamyboje arba kitose pramonės šakose.

Silicio plokštelių tobulinimas

Kadangi silicio plokštelės ir su jomis susiję procesai turi didžiausią poveikį aplinkai svarbu ieškoti galimybių kaip tą poveikį sumažinti. Įvertinus jų perdurbimo ypatybes reikia atkreipti dėmesį į kitus procesus. Vienas iš jų yra plokštelių formavimas. Siekiant sumažinti tenkančio silicio kiekį vystantis technologijoms gaminamos vis plonesnės plokštelės. Įprastai jos gaminamos polikristalinio silicio luitus pjaustant vielos pjūklų. Tačiau tokio pjaustymo metu nuo plokštumų susidaro polisilicio dulkių, jos gali sudaryti net iki 40 % bendros masės. Norint jas panaudoti šios atliekos vėl dedamos į lydymo procesus ir formuojamas luitas, tačiau tam vėl reikalinga energija. Ieškoma sprendimų kaip plokštelių pjaustyme minimizuoti atliekų susidarymą, naudoti susidariusias atliekas kitose pramonėse arba keisti patį pjaustymo metodą kitu. Viena iš alternatyvų įprastoms plokštelėms – tris kartus plonesnės (<50 μm) plokštelės formuojamos į silicio folijas. Tokiu pokyčiu siekiama sumažinti išlaidas ir padidinti efektyvumą tenkančiam polisilicio masės vienetui. Taip apdorojant luitus sumažinami susidariusių atliekų kiekiai. Tačiau pagrindiniai iššūkiai gaminant plonas plokšteles, kad jos tampa labai lanksčios, trapios ir lengvai lūžtančios. Dėl to vėliau jų neįmanoma apdoroti kaip įprastų plokštelių. Be to, sudėtingesnis tampa jų sujungimas į eiles (Radhakrishnan 2017). Kita alternatyva – iš susidariusių miltelių galima pigiai pagaminti silicio substratus. Juos galima gaminti ir iš suskilusių plokštelių ar FvE atliekų todėl toks variantas turi daugiau privalumų. Šie substratai vėliau gali būti naudojami aukštos kokybės epitaksinės folijos gamyboje, o tokie gaminiai savo efektyvumu jau gali būti lygiaverčiai įprastiems plokšteliniams modeliams. Tačiau tokių produktų gamyba taip pat reikalauja daug resursų, nors procesai tobulinami ir gali būti plačiau naudojami ateityje.

PERC technologija

Vienas iš būdų padidinti saulės elementų efektyvumą yra naudoti PERC (*Passivated Emitter and Rear Contact*) technologiją. Ja pasiekiamas iki 1 % efektyvumo padidėjimas. PERC elementas nedaug skiriasi nuo standartinių c-Si saulės elementų. Pagrindinis skirtumas yra tas, kad ant PERC saulės elemento galinės dalies paviršiaus sukuriama pasyvinimo sluoksnis, dėl trijų priežasčių padidinantis SE efektyvumą (Chen ir kt. 2019):

1. Dalis praėjusios pro elementą šviesos atspindima ir yra absorbuojama elemento;
2. Sumažinamas elektronų rekombinavimas;
3. Sumažinama šilumos absorbcija, elementas tiek neįkaista ir jo efektyvumas nekrinta.

Privalumas ir tai, kad šios technologijos įdiegimas gamyboje nėra labai sudėtingas ar reikalaujantis daug investicijų, tad FvE įmonės pastaraisiais metais diegia šias sistemas į gamybą.

Vertinti ir šia technologija paremtų elementų poveikiai aplinkai (M. Lunardi ir kt. 2018). Rezultatai parodė, kad dėl padidėjusio efektyvumo PERC saulės elementai darė mažesnę poveikį aplinkai nei įprasti c-Si elementai skaičiuojant modulių sugeneruotos elektros energijos vienetui. Vertintos globalinio atšilimo, toksiškumo žmogui, gėlo vandens eutrofikacijos, gėlo vandens ekotoksiškumo kategorijos. Pasikeitimai į teigiamą pusę buvo nuo 4 % iki 10 %. Sutrumpėja ir energijos atgavimo laikas.

Siekiant įvertinti kaip šie sprendimai įtakotų poveikį aplinkai SimaPro programine įranga projektuojamas modulis, kuriame atsisakoma enkapsuliantų, o saulės elementų galinė dalis dengiama PERC pasyvinimo sluoksniu.

Šis modulis projektuojamas remiantis (Chen ir kt. 2019, Wambach ir kt. 2016) straipsniais. Kadangi rezultatai lyginami su iš perdirbto silicio pagamintu „Solid PRO P.60“ FvE, į projektuojamą modulį neįtraukiami alternatyvūs silicio naudojimo būdai, juolab, kad jų naudojimui reikalingos ir visiškai kitokios technologijos.

Taigi įgyvendinus šias technologijas produkto gamybos poveikis aplinkai pasikeičia nežymiai, vertinant ILCD Midpoint+ metodu, normalizavus rezultatus gaunamas 1 % sumažėjimas, įtakoje klimato kaitai sumažėjimas apie 2 % procentus. Tačiau vertinant santykiniais rodikliais, dėl padidėjusio efektyvumo, o tuo pačiu ir sugeneruotos elektros energijos kiekio, skirtumai žymesni. Skaičiuojant ŠESD emisijų skaičių tenkantį 1 kWh elektros energijos pagaminti šis dydis nuo 18,33 g CO₂ ekv./kWh krenta iki 17,39 g CO₂ ekv./kWh. Tai didesnis nei 5 % sumažėjimas, tad tokie sprendimai gali prisidėti prie klimato kaitos iššūkių sprendimo. Svarbu pabrėžti ir tai, kad rezultatai buvo lyginami su iš perdirbto silicio pagamintu moduliu, o jo poveikis aplinkai ir taip yra kur kas mažesnis nei pagaminto iš pirminių žaliavų. Lyginant jo rezultatus su projektuojamu moduliu rezultatų skirtumai būtų kur kas didesni.

Aptarti sprendimai nėra vieninteliai kuriais didinamas modulių efektyvumas ar mažinamas poveikis aplinkai. Tobulinant gaminį ir gamybos procesą tam yra įvairių kelių, tačiau inovacijoms greitai vystantis įmonėms sunku priimti finansinį sprendimą investuoti į brangias technologijas, todėl būvio ciklo vertinimas padeda detaliau pažvelgti į galimą rezultatą dar gaminio projektavimo stadijoje.

3.8.2 Priemonės skatinančios fotovoltinių saulės elementų poveikio aplinkai mažinimą

Produkto rinkodara

UAB „Soli Tek R&D“ savo gaminių kaina negali lygintis su Kinijos gamintojais. Šioje šalyje modulių gamyba pirmiausia orientuota į kainą, tuo tarpu „Soli Tek R&D“ siekia aukštos kokybės ir patvarumo, aplinkosauginio efektyvumo, ilgesnio gaminių tarnavimo laiko. Tad su tokiu požiūriu sietinas ir noras mažinti poveikius aplinkai, kadangi įgyvendinti sprendimai sumažino neigiamą poveikį aplinkai, tokia įmonės žinia gali būti panaudota ir populiarinant savo produkciją. Remiantis (Camargo ir kt. 2016) tyrimu nustatyta, jog 93 % apklaustųjų atsakė, jog atsinaujinančių energijos išteklių naudojimas jiems yra svarbus. O iš taip atsakusių 90 % įsirengė arba norėtų įsirengti FvE. Svarbiausiomis priežastimis nurodyta:

- Aplinkos apsauga ir darnumas naudojant atsinaujinančius energijos išteklius;
- Poveikio klimato kaitai mažinimas ;
- Galimybė sutaupyti;
- Įvairių energijos šaltinių naudojimas;
- Priklausomybės nuo iškastinio kuro mažinimas;
- Gyvenimo kokybės gerinimas.

Tokie rezultatai įrodo, jog kaina nėra esminis faktorius renkantis fotovoltinius saulės modulių. Taigi pirkėjai ieškantys FvE dažnu atveju visų pirma kreipia dėmesį į aplinkosauginius rodiklius, todėl teigiamų rezultatų viešinimas leistų atkreipti jų dėmesį. Įgyvendinus gamybos modifikacijas poveikis aplinkai visose kategorijose sumažėjo, kai kuriose itin žymiai. Tokie žingsniai, atsinaujinančios energijos naudojimas gaminant savo produktus kuria atsakingos įmonės įvaizdį, tad galėtų būti išnaudojamas ir komunikuojamas pabrėžiant savo privalumus.

Finansinis skatinimas

Kaip minėta literatūros analizėje 2018 metais priimtoje Nacionalinės energetinės nepriklausomybės strategijoje viena iš keturių Strategijos kryptių – įtakos klimato kaitai ir aplinkos oro taršai mažinimas.

Taip pat joje ypatingas vaidmuo skiriamas mažajai energetikai ir aktyviam elektros energijos vartotojų įsitraukimui į energijos gamybą. Gyventojams, nusprendusiems patiems pasigaminti sau reikalingą elektros energiją iš atsinaujinančių išteklių, sudaromos palankios sąlygos bei kuriamos įvairios paramos priemonės. Tikimasi, kad iš atsinaujinančių energijos išteklių pasigamintą energiją vartojančių savo reikmėms vartotojų iki 2030 metų bus ne mažiau kaip 500 tūkst. gaminančių vartotojų arba 30 %, palyginti su visų vartotojų skaičiumi, o iki 2050 metų – ne mažiau kaip 50 % (Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija 2019). Tas ir skatinama skiriant paramą fiziniams asmenims įsirengiantiems FvE sistemas. Tačiau parama galima labiau prisidėti ir prie minėtos įtakos klimato kaitai bei oro taršai.

Šiuo metu paramos programos reikalavimai įrangai nėra pakankamai griežti efektyvumo požiūriu. Programos reikalavimas efektyvumui nurodomas „saulės moduliams turi būti suteikta 10 m. produkto garantija ir 25 m. 80 proc. efektyvumo garantija“. Tokie parametrai šiandieninėje rinkoje nėra ypatingai aukšti ir neskatina gamintojų didinti produkto efektyvumo ir ilgesnio tarnavimo laiko norint išlikti tarp tų, už kurių gaminius teikiama parama. Analizuojamu „Solid PRO P.60“ modulių užtikrinama 30 metų 87 % efektyvumo garantija. Aukštas mechaninis atsparumas taip pat nėra vertintinas paramos skyryje, kaip ir kiti sprendimai, kuriais buvo sumažinta įtaka aplinkai. Taip atsižvelgiant į ekologinio projektavimo, atliekų hierarchijos principus didinamas aplinkosauginis efektyvumas tačiau nėra suteikiamas pranašumas paramos teikimo sąlygomis. Antrinių žaliavų naudojimu gamyboje skatinama ir žiedinės ekonomikos koncepcija, tad tai dar vienas argumentas instituciniu lygiu remti ne tik pačią saulės energetikos idėją, bet ir visapusiškai atsižvelgti į įvairius Europos Sąjungos deklaruojamus prioritetus.

Svarbiausieji Strategijos tikslai orientuoti į energijos generavimą, bet ne į pačių įrenginių gamybą. Griežtesni reikalavimai atsinaujinančių energijos šaltinių naudojimui gamybos metu, ŠESD emisijos, antrinių žaliavų naudojimo galimybė turėtų būti svarbesni finansavimo klausimu. Kai kurios šalys kontroliuoja į šalį patenkančių FvE modulių anglies pėdsaką. Įtraukus aplinkosauginius reikalavimus į paramos programą gamintojai būtų skatinami ieškoti aplinkai palankesnių gamybos būdų. Skiriant paramą skatinamas vystymasis ta kryptimi, kuri atitinka ir valstybės, visuomenės interesus, tokiu atveju paramos skyryje tampa suinteresuotaisiais ir galinčiais įtakoti situaciją.

IŠVADOS

1. Atlikus mokslinės literatūros analizę nustatyta, jog fotovoltinių saulės modulių naudojimas auga. Tai viena iš pagrindinių priemonių darnios energetikos vystymui tiek globaliu mastu, tiek Lietuvoje. Spartus augimas pastaraisiais dešimtmečiais didina saulės energetikos reikšmę bendrame kontekste, tačiau jais siekiant mažinti įtaką klimato kaitai bei aplinkos taršai nepakankamai įvertinami modulių gamybos aspektai. Dėl ilgo įrenginių tarnavimo laiko neatkreipiamas pakankamas dėmesys į atliekomis tapsiančių modulių tvarkymą.
2. Nustatyta, jog didžiausiai iššūkiai fotovoltinių modulių gamyboje susiję su siliciu. Tai pagrindinė medžiaga generuojant elektros energiją iš saulės energijos. Ateityje silicio reikšmė tik augs, tiek dėl didėjančių fotovoltinių elementų gamybos apimčių, tiek dėl jo naudojimo visoje elektronikos pramonėje. Siekiant efektyviau naudoti silicį gaminamos vis plonesnės plokštelės, tačiau nepakankamai sprendžiamos problemos dėl gamybos metu susidarantių jo atliekų. Neefektyvus ir iš atliekomis tapusių modulių atgauto silicio naudojimas.
3. Vertinant fotovoltinių elementų poveikį aplinkai dažniausiai vertinama energijos poreikis gamyboje bei šiltnamio efektą sukeliančių dujų emisijos. Rečiau atliekami būvio ciklo metodika paremti tyrimai, analizuojantys įvairias poveikio aplinkai kategorijas.
4. Taikant BCV metodika paremtą SimaPro programinę įrangą, jos duomenų bazėmis bei inventorinės analizės duomenimis atliktas UAB „Soli Tek R&D“ gaminamų saulės modulių „Solid PRO P.60“ poveikio aplinkai vertinimas. ILCD Midpoint+ metodu apskaičiuotas bendras iš pirminių žaliavų gaminamo modulio poveikis aplinkai – 13,07. Nustatyta, jog didžiausia įtaka kuriama dėl silicio plokštelių ir su jomis susijusių gamybos procesų įtakos. Jos nulemia 57 % bendro poveikio. Reikšmingiausias poveikius nulemiantis veiksnys – dideli energijos kiekiai silicio gavybos bei apdorojimo procesuose, poveikis daugiausia įtakojamas Kinijos energetikos sistemos, kurioje dominuoja iškastinis kuras, ypač anglis. Normalizuojant rezultatus apskaičiuota, jog žymiausia įtaka kuriama toksiškumo žmogui vėžinės ir ne-vėžinės rizikos kategorijose, jose sukuriama 58 % nuo bendro 16 kategorijų vertinamo poveikio.
5. Įvertintas gamybos inovacijų poveikis aplinkai. Įgyvendinus gamybos pakeitimus: patobulinus difuzijos procesą sumažėja jame naudojamų azoto, deguonies ir POCl_3 kiekiai bei tampa nebereikalingas PSG plovimo procesas, o silicio plokštelių gamyboje naudojant perdirbtą žaliavą pasiekiamas žymus įtakos aplinkai sumažinimas. Bendra normalizuotų kategorijų rezultatų suma sumažėja 33 %. Dėl silicio perdirbimo plokštelių įtaka aplinkai žymiai sumažėja, daugelyje kategorijų apie 70 %. O jų įtaką bendram rezultatui sumažėja iki 47 %. Dvigubai sumažėja gaminio energijos poreikis bei jo įtaka globaliniam šiltėjimui. Inovacijų įgyvendinimas lemia ekonominius pasikeitimus, gaminant 1 kWp modulį dėl mažesnių žaliavų kiekių 17,59 euro sumažėja joms išleidžiama suma.
6. Atsižvelgiant į BCV rezultatus, pateikti gaminių tobulinimo siūlymai jų projektavimo etape. Pasiūlyti būdai atsižvelgiant į enkapsuliantų naudojimą moduluose, alternatyvius silicio plokštelių ruošimo metodus, PERC pasyvinimo sluoksnio dengimą galinėje saulės elemento dalyje. Atsisakius enkapsuliantų ir įdiegus PERC technologiją būtų 5 % sumažinama modulio įtaka klimato kaitai.

7. Gamybos inovacijų taikymas prisideda prie darnaus vystymosi tikslų. Reikšmingiausiai prisidedama prie 7, 9 ir 12 darnaus vystymosi tikslų – Atsinaujinanti ir prieinama energija, Inovacijos ir gera infrastruktūra, Atsakingas išteklių naudojimas. Darbe aprašytais pavyzdžiais mažinamas energijos generavimo sistemos poveikis aplinkai, ilginamas tarnavimo laikas, didinamas žaliavų efektyvumas, taikomi inovatyvios pramonės technologijos, mažinama įrenginio savikaina.

LITERATŪROS ŠALTINIŲ SĄRAŠAS

- Asdrubali, F., Baldinelli, G., D'Alessandro, F., Scrucca, F., 2015. *Life Cycle Assessment of Electricity Production from Renewable Energies: Review and Results Harmonization.* , February 2015, Available from: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S1364032114009071> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi-org.ezproxy.ktu.edu/10.1016/j.rser.2014.10.082>.
- Burger, B., Kiefer, K., Kost, C., 2018. *Photovoltaic Report.* Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- Bye, G., Ceccaroli, B., 2014. Solar Grade Silicon: Technology Status and Industrial Trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 130, pp. 634-646.
- Camargo, L.R., ir kt, 2016. Technical, Economical and Social Assessment of Photovoltaics in the Frame of the Net-Metering Law for the Province of Salta, Argentina. *Energies (19961073)*, 03, vol. 9, no. 3, pp. 133 ISSN 19961073. DOI 10.3390/en9030133.
- Chen, W., Liu, R., Zeng, Q., Zhou, L., 2019. *Low Cost Multicrystalline Bifacial PERC Solar Cells – Fabrication and Thermal Improvement.* , 15 May 2019, Available from: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0038092X19303706> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi-org.ezproxy.ktu.edu/10.1016/j.solener.2019.04.033>.
- Cucchiella, F., D'Adamo, I., Rosa, P., 2015. *End-of-Life of used Photovoltaic Modules: A Financial Analysis.* , July 2015, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115002294> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.076>.
- D'Adamo, I., MiliaccA, M., Rosa, P., 2017. Economic Feasibility for Recycling of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *International Journal of Photoenergy*, vol. 2017.
- De Rooij, D., 2015. *Energy Payback Time for Solar Systems.* Available from: <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-panels/energy-payback-time-for-solar-systems/>.
- Debbarma, M., Sudhakar, K., Baredar, P., 2017. Comparison of BIPV and BIPVT: A Review. *Resource-Efficient Technologies*, vol. 3, no. 3, pp. 263-271.
- Denafas J., Martel B., Audoin C., 2017. On the Fabrication of Solar Cells Based on Newly Produced Recycled Silicon Feedstocks from Cabriss – a Comparative Study between Material Properties and Solar Cells Performances DOI 10.4229/EUPVSEC20172017-2AV.1.3.
- Energy Information Administration and Energy Department., 2015. *Annual Energy Outlook 2015: With Projections to 2040.* Government Printing Office.
- EP, 2012. Europos Parlamento Ir Tarybos Direktyva 2012/19/ES Dėl Elektros Ir Elektroninės Įrangos Atliekų.
- Fu, Y., Liu, X., Yuan, Z., 2015. Life-Cycle Assessment of Multi-Crystalline Photovoltaic (PV) Systems in China. *Journal of Cleaner Production*, vol. 86, pp. 180-190.

- Gu, Q.R., 2012. *Study on the Cost of the Photovoltaic Industry in China*. Huazhong University of Science and Technology.
- Gunerhan, H., Hepbasli, A., Giresunlu, U., 2008. Environmental Impacts from the Solar Energy Systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 31, no. 2, pp. 131-138.
- Hong, J., ir kt, 2016. Life Cycle Assessment of Multicrystalline Silicon Photovoltaic Cell Production in China. *Solar Energy*, vol. 133, pp. 283-293.
- Hsu, D.D., ir kt, 2012. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Crystalline Silicon Photovoltaic Electricity Generation: Systematic Review and Harmonization. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 16, pp. S122-S135.
- Huang, B., ir kt., 2017. *Environmental Influence Assessment of China's Multi-Crystalline Silicon (Multi-Si) Photovoltaic Modules Considering Recycling Process*. , February 2017, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X16306454> ISBN 0038-092X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.038>.
- Huang, B., ir kt, 2018. Economic and Social Impact Assessment of China's Multi-Crystalline Silicon Photovoltaic Modules Production. *Journal of Industrial Ecology*, 08/01; 2019/02, vol. 22, no. 4, pp. 894-903 ISSN 1088-1980. DOI 10.1111/jiec.12576.
- International Renewable Energy Agency, 2016. End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels ISSN 978-92-95111-99-8.
- Jiang, H., 2015. *Review and Prospect of China's Photovoltaic Industry Development*. Industry Forum 9: 1–3. ed.
- JTO., 2015. *Darnaus Vystymosi Tikslai*. Available from: <https://www.globalgoals.org/>.
- Kommalapati, R., Kadiyala, A., Shahriar, M., Huque, Z., 2017. Review of the Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Different Photovoltaic and Concentrating Solar Power Electricity Generation Systems. *Energies*, vol. 10, no. 3, pp. 350.
- Lamnatou, C., Smyth, M., Chemisana, D., 2019. Building-Integrated Photovoltaic/Thermal (BIPVT): LCA of a Façade-Integrated Prototype and Issues about Human Health, Ecosystems, Resources. *Science of the Total Environment*, vol. 660, pp. 1576-1592.
- Latunussa, C.E.L., Ardente, F., Blengini, G.A., Mancini, L., 2016. *Life Cycle Assessment of an Innovative Recycling Process for Crystalline Silicon Photovoltaic Panels*. , November 2016, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024816001227> ISBN 0927-0248. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.03.020>.
- Lietuvos Respublikos Energetikos Ministerija., 2019. „*Elektros Energijos Iš Atsinaujinančių Išteklių Gamybos Įrenginių Įrengimas Namų Ūkiuose*“. Įsakymas ed.

- Luo, W., ir kt., 2018. *A Comparative Life-Cycle Assessment of Photovoltaic Electricity Generation in Singapore by Multicrystalline Silicon Technologies.* , January 2018, Available from: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0927024817304877> ISBN 0927-0248. DOI <https://doi-org.ezproxy.ktu.edu/10.1016/j.solmat.2017.08.040>.
- M. Lunardi, M., Alvarez-Gaitan, J.P., Chang, N.L.and Corkish, R., 2018. *Life Cycle Assessment on PERC Solar Modules.* , 1 December 2018, Available from: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.ktu.edu/science/article/pii/S0927024818304094> ISBN 0927-0248. DOI <https://doi-org.ezproxy.ktu.edu/10.1016/j.solmat.2018.08.004>.
- Malandrino, O., Sica, D., Testa, M., Supino, S., 2017. Policies and Measures for Sustainable Management of Solar Panel End-of-Life in Italy. *Sustainability*, vol. 9, no. 4, pp. 481.
- Masson, G., Izumi, K., 2018. *Trends 2018 in Photovoltaic Applications.* ISBN 978-3-906042-79-4.
- Moro, A., Lonza, L., 2018. *Electricity Carbon Intensity in European Member States: Impacts on GHG Emissions of Electric Vehicles.* , October 2018, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920916307933> ISBN 1361-9209. DOI <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.012>.
- Navickas, K., Venslauskas, K., 2012. *Biomassės Būvio Ciklo Analizė.*
- Peng, J., Lu, L., Yang, H., 2013. *Review on Life Cycle Assessment of Energy Payback and Greenhouse Gas Emission of Solar Photovoltaic Systems.* , March 2013, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112006478> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.035>.
- Radhakrishnan, S., 2017. SOLAR CELLS AND MINI-MODULES BASED ON 40 Mm-THICK EPITAXIAL SI FOILS.
- Sica, D., ir kt., 2018. *Management of End-of-Life Photovoltaic Panels as a Step Towards a Circular Economy.* , February 2018, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117314065> ISBN 1364-0321. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.039>.
- Sinha, P., ir kt., 2008. Regulatory Policy Governing Cadmium-Telluride Photovoltaics: A Case Study Contrasting Life Cycle Management with the Precautionary Principle. *Energy Policy*, vol. 36, no. 1, pp. 381-387.
- Stylos, N., Koroneos, C., 2014. *Carbon Footprint of Polycrystalline Photovoltaic Systems.* , 1 February 2014, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965261300677X> ISBN 0959-6526. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.014>.
- TAMMARO, M., ir kt., 2016. Experimental Investigation to Evaluate the Potential Environmental Hazards of Photovoltaic Panels. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 306, pp. 395-405.
- Temby, O., ir kt., 2014. Building-Integrated Photovoltaics: Distributed Energy Development for Urban Sustainability. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 56, no. 6, pp. 4-17.

Tsang, M.P., Sonnemann, G.W., Bassani, D.M., 2016. Life-Cycle Assessment of Cradle-to-Grave Opportunities and Environmental Impacts of Organic Photovoltaic Solar Panels Compared to Conventional Technologies. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 156, pp. 37-48.

TSoutsos, T., Frantzeskaki, N., Gekas, V., 2005. Environmental Impacts from the Solar Energy Technologies. *Energy Policy*, vol. 33, no. 3, pp. 289-296.

U.S. Geological Survey., 2019. *Mineral Commodity Summaries 2019*. ISBN ISBN 978-1-4113-4283-5.

Wambach, K., ir kt, 2016. Eco-Solar Factory: Environmental Impact Optimisation of Pv Production.

Xu, Y., ir kt., 2018. *Global Status of Recycling Waste Solar Panels: A Review*. , May 2018, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18300576> ISBN 0956-053X. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.036>.

Zheng, C., Kammen, D.M., 2014. *An Innovation-Focused Roadmap for a Sustainable Global Photovoltaic Industry*. , April 2014, Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421513012500> ISBN 0301-4215. DOI <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.006>.