



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

KEEMIA- JA MATERJALITEHNOLOOGIA TEADUSKOND
POLÜMEERMATERJALIDE INSTITUUT

POLÜMEERSETE PÄIKESEELEMENTIDE PERSPEKTIIVID

Bakalaureusetöö

Jakob-Anhtu Tran

Juhendaja: Andres Öpik, füüsikalise keemia õppetool, teadus- ja
arendusprodekaan

Puidu-ja tekstiilitehnoloogia õppekava KAOB02/09

Tallinn 2015

Deklareerin, et käesolev bakalaureusetöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli bakalaureusekraadi taotlemiseks ja et selle alusel ei ole varem taotletud akadeemilist kraadi.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud või (avaldamata tööde korral) toodud autorlus välja põhitekstis.

.....

Jakob-Anhtu Tran

Sisukord

| | |
|---|----|
| SISSEJUHATUS..... | 4 |
| 1. PÄIKESEELEMENTID NING NENDE TÖÖPÕHIMÕTTED | 5 |
| 1.1. Mis on Päikeseelemendid? | 5 |
| 1.2. Keelutsoon | 5 |
| 1.3. Päikeseelementide energiamuundamise määr | 7 |
| 1.4. Degradatsioon..... | 9 |
| 1.5. Päikese elementide tehnoloogiline areng | 10 |
| 2. FOTOGALVAANILISTE SÜSTEEMIDE MAJANDUSLIK SEIS..... | 13 |
| 2.1. Fotogalvaaniliste süsteemide turg | 13 |
| 2.2. Fotogalvaaniliste süsteemide kulu arvutamine ning LCOE standard..... | 14 |
| 3. POLÜMEERSED PÄIKESEELEMENTID..... | 16 |
| 3.1. Teooria..... | 16 |
| 3.2. Polümeersete päikeseelementide degradatsioon..... | 17 |
| 3.3. Kaal..... | 18 |
| 3.4. Tootmine..... | 20 |
| 3.5. Polümeersete päikeseelementide alal tegutsevad firmad..... | 22 |
| 3.6. Potentsiaalne turg | 23 |
| KOKKUVÕTE..... | 25 |
| KASUTATUD KIRJANDUS | 26 |
| RESÜMEE | 28 |
| LISA | 29 |

SISSEJUHATUS

Fotogalvaaniliste elementide põhine päikeseenergia on üheks tähtsaimaks osaks taastuenergia alal, mis omab tänu kiirele ja mitmekesisele tehnoloogilisele arengule väga positiivseid perspektiive nii elamute kui ka tööstuslike energiavajaduste täitmisel. Tänu tootmismahdade eksponentsiaalsele kasvule, seda eriti Aasias, on fotogalvaaniliste päikesepaneelide süsteemide hinnad märkimisväärselt langenud. Päikeseenergia hind on pidevalt langemas ning praegusel hinnangul on üle poole Euroopa Liidu elanikonnale PV süsteemide investeerimiskulu odavam kui kohaliku turu elektri hind [1].

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on tutvustada päikeseelementide olemust ja arengut ning selle taustal keskenduda polümeersetele päikeseelementidele, mis töötavad olla odavamad, lihtsamini toodetavad ning mitmekesisemate rakendustega kui tänapäeval kasutusel olevad kristallilise räni põhised päikesepaneelid. Sageli kutsutakse polümeerseid päikeseelemente ka orgaanilisteks fotogalvaanilisteks elementideks (*OPV – organic photovoltaic*), mis viitab aktiivse kihi materjalide liigile, mis eristuvad anorgaanilistest pooljuhtmaterjalidest.

Polümeersete päikeseelementide turu kujunemise väljavaateid prognoosides saab enamasti analüüsitud Konarka poolt kasutatud tootmistehnoloogiat, sest nende tööstusliku mahuga tootmisliin on siiani ainuke praktiline näide, millest teha ennustusi polümeerseid päikeseelemente ees ootavatest väljakutsetest.

Eesmärgiks on hinnata antud tehnoloogia küpsust ning anda hinnang polümeersete päikeseelementide turu kujunemise perspektiividele.

1. PÄIKESEELEMENTID NING NENDE TÖÖPÕHIMÕTTED

1.1. Mis on Päikeseelemendid?

Definitsiooni järgi peavad päikeseelemendid olema võimelised täitma kahte funktsiooni:

1. Genereerima valguskiirguse toimel vabasid laengukandjaid
2. Eraldama laengukandjad juhtivatele kontaktidele

Esimese funktsiooni täitmisel kulub elemendile absorbeerunud footonite energia materjalis olevate elektronide kõrgemasse energeetilisesse olekusse tõstmiseks. Ergastamise käigus tekib elektron-auk paar, mis jaotub vastavalt negatiivseks ja positiivseks laengukandjaks. Seda protsessi võib kutsuda elemendis toimuvaks energiamuundamiseks. Saadud laengukandjad tuleb nüüd eraldada juhtivatele kontaktpunktidele, et neid oleks võimalik rakendada vooluahelas. Peale vooluahelas koormuse alt läbimist toimub elektron-auk paaride rekombinatsioon, mille tõttu peab püsiva elektrivoolu saavutamiseks toimuma pidev laengukandjate fotogeneratsioon. Antud protsessidest saab täpsemalt räägitud järgneva punkti all.

1.2. Keelutsoon

Üheks tähtsaimaks fundamentaalseks fotogalvaanilise elemendi omaduseks on keelutsoon ehk energiavahemik valentsooni ja juhtivustsooni vahel. Keelutsoon piirab maksimaalset fotovoolu ning on eelduseks fotopinge realiseerimiseks. Teisisõnu on see erinevus potentsiaalsete energiatega vahel, mille juures saab elektrone eraldada fotogalvaanilisest elemendist ning mille juures saavad elektronid tagasi kanduda peale välise koorma alt läbimist. [2, lk. 44]

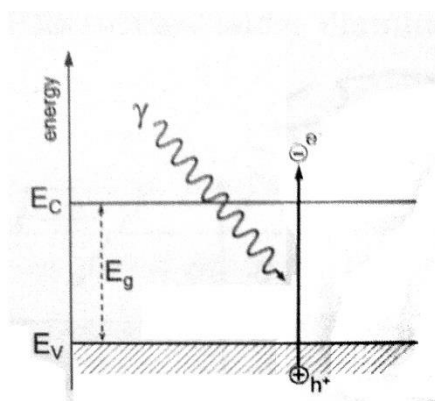
Absorptsiooni käigus kulub footoni energia elektroni küllastamiseks ehk elektroni tõstmiseks kõrgemasse energeetilisesse olekusse. Ergastatud elektronid peaksid olema mobiilsed, et võimaldada voolu teket fotogalvaanilises elemendis. Seda protsessi kutsutakse vabade elektronide fotogeneratsiooniks. [2, lk. 44]

Fotogalvaanilisel energia muundamisel eraldatakse fotogenereeritud vabad elektronid päikeseelemendist esimese juhtiva kontakti kaudu, et läbida välist koormat, peale mida elektronid kanduvad tagasi elementi teise juhtiva kontakti kaudu. Elektri genereerimiseks peab olema võimalik eraldada elektrone kõrgemal potentsiaalsel energial kui nende tagasi viimisel peale koormuse alt läbimist. Seega on päikeseenergia muundamiseks tarvis fotogenereeritud vabade elektronide potentsiaalse energia tõstmine. See on võimalik vaid siis,

kui ergastatud elektroni energia on eraldatud põhiolekus oleva elektroni energiast keelutsooniga. [2, lk. 45]

Keelutsoon kahe oleku vahel annab ülemise limiidi potentsiaalile kahe päikeseelemendi kontakti vahel ehk teisisõnu ülemise piiri avatud vooluahela pingele. [2, lk. 45]

Valentstsooni elektronid osalevad keemilistes sidemetes, kuid juhtivustsoonis olevad elektronid seda ei tee ning on seega vabad ja mobiilsed ning mõjutavad aine juhtivust. Pimedas on fotogalvaanilises elemendis enamus energeetilised olekud valentstsoonis okupeeritud. Valguskiirguse toimel ergastuvad negatiivse laenguga elektronid juhtivustsooni ning jätavad valentsooni positiivse laenguga n-õ augud, mis on ka mobiilsed laengukandjad, sest nad ei osale üheski keemilises sidemes. Neid kaht laengukandjat nimetatakse elektron-auk paariks. [2, lk. 46]



Joonis 1 Elektron-auk paari fotogeneratsioon. [2, lk. 46]

Materjale, mille valents- ja juhtivustsooni eraldab keelutsoon, nimetatakse pooljuhtideks. Keelutsooni laius (E_G) on määratletud kui juhtivustsooni alumise piiri (E_C) ja valentstsooni ülempiiri (E_V) vahe.

$$E_G = E_C - E_V$$

Valem 1 Keelutsoonilaius [2, lk. 46]

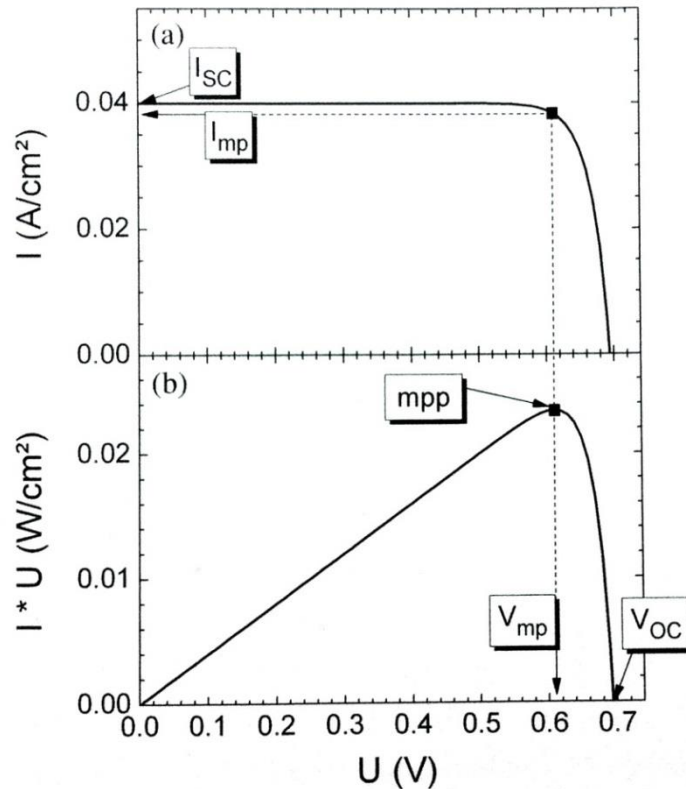
Mobiilsed elektronid omavad madalaimat potentsiaali juhtivustsooni alumise piiri (E_C) juures ning positiivse laenguga auk-laengukandjad omavad madalaimat potentsiaalset energiat valentstsooni kõrgeima energia piiri (E_V) juures. Absorbtsiooniprotsessi käigus lükkab keelutsooniga võrdse või kõrgema energiaga foton elektroni valentstsooni keemilise sideme tsoonist juhtivustsoonile. Keelutsoonist madalama energiaga fotonid päikeseelemendis aga ei absorbeeru. [2, lk. 46]

Pooljuhid võivad olla nii anorgaanilistest kui ka orgaanilistest materjalidest. Kõige levinumate anorgaaniliste pooljuhtide materjalideks on kristalliline räni (c:Se) ja gallium-arseniid (GaAr), mille E_G on toatemperatuuril vastavalt 1,1 ja 1,4 eV. Temperatuuri tõusul keelutsooni laius väheneb ning selle tõttu on ka täheldatud, et praktilistel tingimustel töötavad fotogalvaanilised süsteemid külmemates kliimades efektiivsemalt kui soojades. Orgaanilistel pooljuhtidel moodustavad juhtivus- ja valentstsooni vastavalt kõrgeim hõivatud molekuloorbitaal (HOMO) ja madalaim täitmata molekuloorbitaal (LUMO). [2, lk. 46]

1.3. Päikeseelementide energiamuundamise määrd

Päikeseelemendid muundavad päikeseenergiat elektrienergiaks (P) ehk elektrivooluks (I) ja pingeks (V). Voolu loomine tähendab fotogenereeritud laengukandjate loomist ning nende kogumist välistele kontaktidele. Potentsiaalide vahe kontaktidel peab olema sisemise pinge poolt loodud ning laengukandjate eraldamine laengut eelistavate kontaktide poolt päikeseelementides sees on selle pinge loomise eelduseks. [2, lk. 7]

Voolu ja pinge kombinatsioon, mille juures element töötab kutsutakse tööpunktiks. Kindel tööpunkt on Ohmi seaduse tõttu ka kindla takistusega (R_L). Ohmi seaduse järgi on pinge väga madal väga madalal takistusel (R_L) kui ka väga madal väga kõrgel takistusel (R_L). Voolu ning pinge väärtuseid lühis- ning avatud voolu ahela juures nimetatakse vastavalt lühisvooluks (I_{SC}) ja avatud vooluahela pingeks (V_{OC}). Elektrivool on võrdne nulliga lühis- ja avatud ahela operatsiooni korral. [2, lk. 8]



Joonis 2 Näide voolu-pinge graafikust (a) ning sellele vastavast võimsus-pinge graafik (b) [2, lk. 9]

Voolu-pinge graafik näitab kõiki võimalikke fotogalvaanilise elemendi tööpunkte. Pinge ja voolu kombinatsiooni, kus element omab maksimumvõimsust (kus pinge ja vool on V_{mp} ja I_{mp}), nimetatakse maksimaalseks võimsuspunktiks (mpp). [2, lk. 9]

Lühisvoolu ning avatud vooluahela pinget on lihtne mõõta ning selle tõttu on maksimaalset võimsuspunkti lihtsam nende ja ühe lisaparametri järgi arvutada kui maksimaalse võimsuspunkti pinge ja voolu järgi. Lisaparameter näitab V_{mp} ja I_{mp} poolt graafikule moodustuva ristküliku pindala suhet V_{OC} ja I_{SC} ristküliku omaga ning selle tõttu kutsutakse seda täituvusastmeks (FF – *fill factor*). [2, lk. 10]

$$FF = \frac{I_{mp} \cdot V_{mp}}{I_{SC} \cdot V_{OC}}$$

Valem 2 Täituvusaste [2, lk. 10]

Muundamiseefektiivsus (η) näitab suhet fotogalvaanilise elemendist mpp juures saadud võimsuse ja elemendile langeva valguskiirguse võimsuse vahel. Teisisõnu näitab see energiamuundamise määra. [2, lk. 10]

$$\eta = FF \cdot \frac{I_{SC} \cdot V_{OC}}{P_{valgus}}$$

Valem 3 Energiamuundamise määr [2, lk. 10]

Muundamise efektiivsus on otsustav näitaja kulude ja jätkusuutlikuse hindamiseks fotogalvaanilise energia tootmisel. Kõrgem efektiivsus võimaldab väiksemate moodulite kasutamist, mis omakorda võimaldab vähendada kulusid. Sageli kutsutakse päikeseelementide energiamuundamise määra lühendatult elemendi efektiivsuseks. Tänapäeval üldises kasutuses olevate päikesepaneelide efektiivsus jääb 20% piirkonda, kuid laborites loodud päikeseelementide efektiivsus on küündinud 46%-ni [3]. Termodünaamiline limiit maksimaalsele muundamise efektiivsusele on 85,4% [4, lk. 26].

Välitingimustes efektiivsuse mõõtmine on ebapraktiline, sest mõõtmise tulemusi mõjutavate muutujate hulk on liialt suur. Selle tõttu mõõdetakse efektiivsust päikese simulaatoriga. Päikese simulaatorid kasutavad kindlaid standardtingimusi (STC – *standard test conditions*), milleks on 1000W/m^2 , $t=25^\circ\text{C}$, $AM=1,5G$. 1000W/m^2 on kiiratud valguse energiatihedus, $t=25^\circ\text{C}$ tähistab katseruumi temperatuuri, $AM1,5$ on valguse poolt läbitud õhumass $48,2^\circ$ langemisenurga puhul ning G tähistab, et arvestatud on globaalset kiirgust ehk nii otsest kui ka hajunud valgust [2, lk. 6].

1.4.Degradatsioon

Päikeseelementide omadused halvenevad nende eluea jooksul ning seda astmelist omaduste langust nimetatakse degradatsiooniks. Päikeseelementide degradatsiooni põhjustajateks võivad olla niiskus, temperatuur, kiirgus, mehaaniline pinge ja komponentide omavaheline difusioon ning tagajärgedeks võivad olla korrosioon, delamineerumine, värvusemuut või elemendi pragunemine.

Päikeseelementide degradatsiooni jaotatakse kaheks:

- 1) Sisemine degradatsioon, mis on tingitud elemendi komponentide vahelisest käitumisest. Seda mõjutab materjalide valik ning sisemise ehituse olemus.
- 2) Väline degradatsioon, mille areng on põhjustatud väliste mõjutajate poolt nagu vesi, hapnik ja valguskiirgus. Siinkohal mängib tähtsat rolli elemendi ümbris (substraat, barjäärkiht). [5]

Kõige üldisem degradatsiooni mõõt on elemendi vähenenud võimsuse suhe algse võimsusega. Seda võib väjendada aastase langemisprotsendiga kasutamistingimustes või töötundide ja võimsuse graafikuna kontrollitud katsetingimustes. Päikesemoodulite tootjad loevad moodulit degradeerunuks, kui mooduli võimsus langeb alla 80% algsest võimsusest.

Seega peaks 20-aastase eluajaga ($T_{80}=20$) päikesemooduli võimsuse langus jääma märgitud aastate jooksul alla 20 protsendi.

Polümeersete päikeseelementide degradatsiooni mehhanisme on käsitletud üksikasjalikumalt kolmanda peatüki all.

1.5. Päikese elementide tehnoloogiline areng

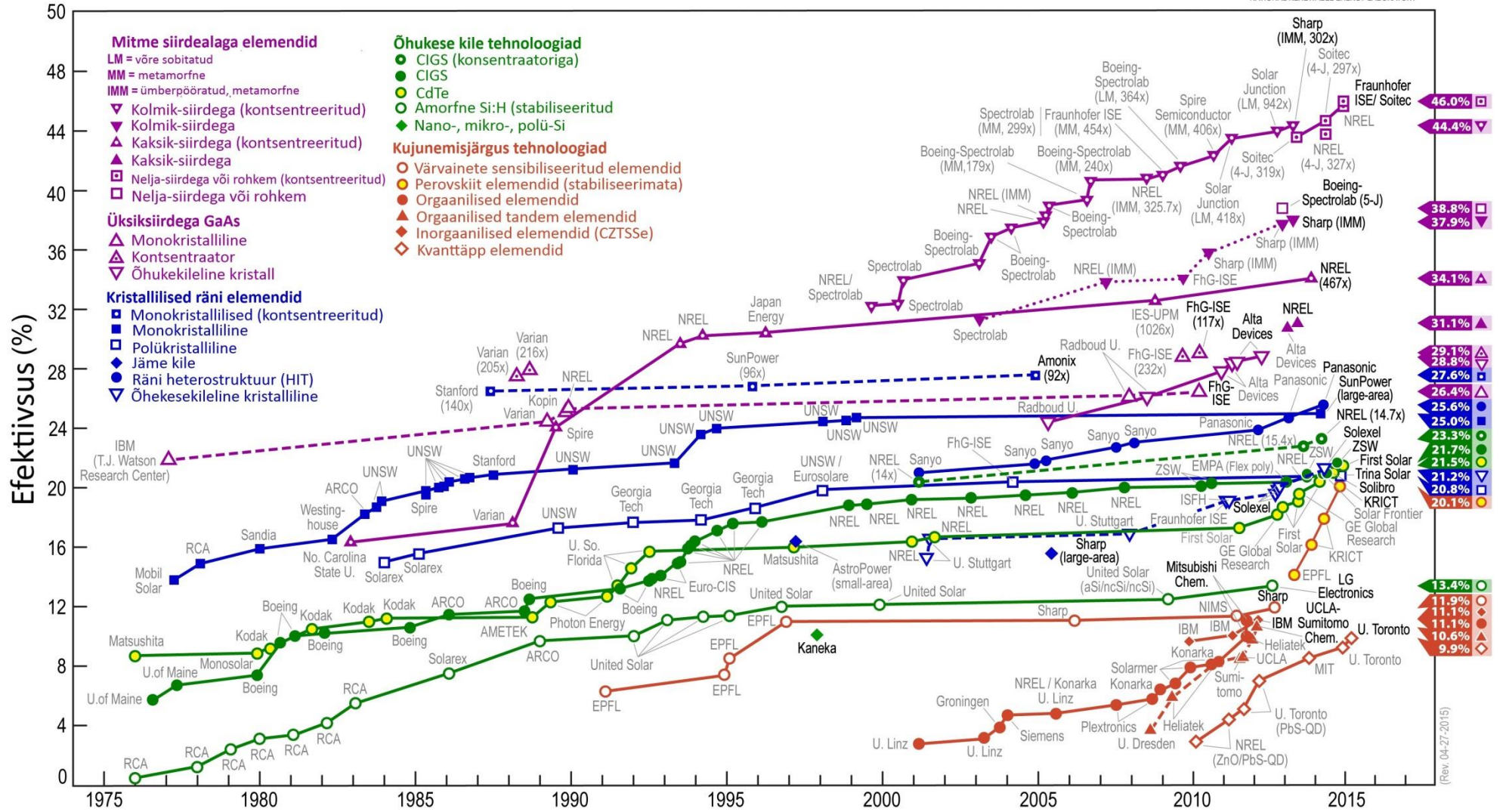
Päikeseelemente jaotakse sageli kolmeks põlvkonnaks. Esimeseks põlvkonnaks loetakse mono- ja polükristallilise räni päikesepaneeli. Esimene kristallise räni põhine päikesepaneel loodi 1954. aastal Bell Laboratories' e teadlaste Daryl Chapini, Calvin Fulleri ning Gerald Pearsoni poolt. Esimeste päikeseelementide efektiivsus oli 4%, kuid pooleteise aasta pikkuse arendustöö käigus suudeti see 11%-ni tõsta. [6]

Teiseks põlvkonnaks kutsutakse 1970ndatel turule tulnud õhukesekilelisi päikeseelemente, mis olid palju odavamad tänu väiksemale materjalikulule, kuid ka väiksema efektiivsusega kui esimese põlvkonna elemendid. Levinumateks materjalideks on amorfne räni (a:Si), kaadmiumtelluriid (CdTe) ning vask indium gallium seleniid (CIGS). Kandes element polümeersele substraadile (näiteks polüümiidkilele), on võimalik saada paindlik, õhuke ja kerge kaaluga moodul. Tänapäevaks on õhukesekilelised päikeseelemendid nii oma hinna kui ka efektiivsuse poolest konkurentsivõimelised esimese põlvkonna päikesepaneelidega.

Kolmanda põlvkonna definitsioon pole veel kindlalt määratletud ning sinna alla käivad enamasti arengufaasis päikeseenergia tehnoloogiaid. Üldiselt iseloomustavad selle põlvkonna elemente uudsed materjalid, mis lubavad kõrgemaid efektiivsuseid ning madalamat hinda, ning sinna alla lähevad näiteks kvantttäpp, värvainete sensibiliseeritud ning orgaanilised ehk polümeersed päikeseelemendid. Sageli nimetatakse ka mitme siirdealaga päikeseelemente kolmandaks või isegi neljandaks põlvkonnaks.

Joonisel 3 on näha National Renewable Energy Laboratory poolt koostatud kõige kõrgemate kinnitatud efektiivsuste edetabel. Sinisega on märgitud esimese põlvkonna kristallilise räni elemendid, rohelisega teise põlvkonna õhukesekilelised elemendid ning oranžiga kujunemisjärgus kolmanda põlvkonna elemendid. Täidetud ringidega on markeeritud orgaanilised ehk teisisõnu polümeersed päikeseelemendid. Lisaks on lillaga märgitud erinevad mitme siirdealaga ning galliumarseniid elemendid.

Parimad laborielementide efektiivsused



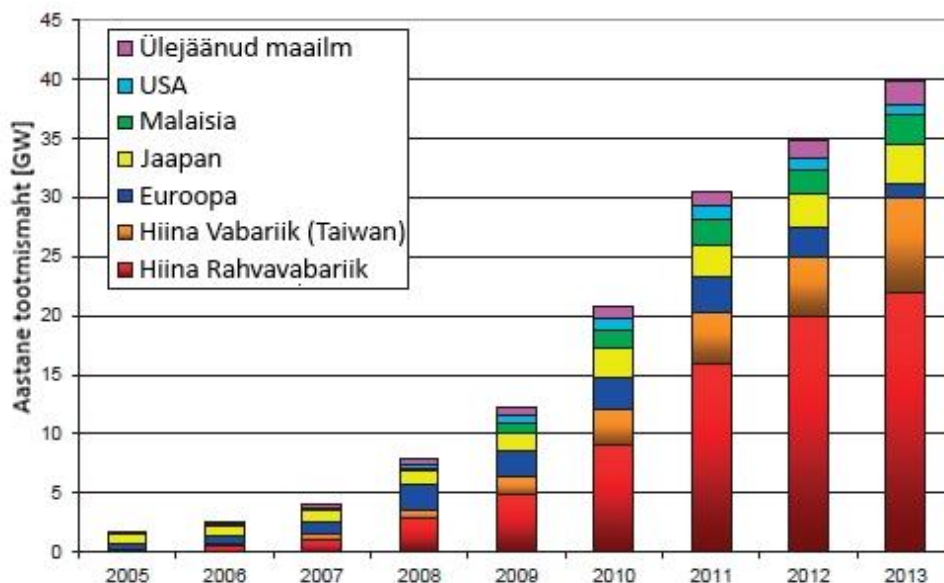
Joonis 3 Kinnitatud energiamuundamise rekordeid püstitanud päikeseelemendid [3]

Nagu näha, on esimese põlvkonna elementidel siiani kõrgeimad efektiivsused kolmest põlvkonnast. Üldiselt on uued tehnoloogiad keskendunud pigem madalamate tootmiskulude saavutamisele ning elementide efektiivsuse kiire kasvu perspektiividele. Tuleb märkida, et iga järgneva põlvkonna efektiivsused tõusevad järjest kiirema tempoga. Kui esimese põlvkonna elementide efektiivsuse tõus on platoon saavutanud, jätkub teise põlvkonna elementide kasv stabiilselt. Kolmanda põlvkonna efektiivsuse kasv on aga kahe eelnevaga võrreldes eksponentsiaalne. Tänapäevase kõige kõrgema efektiivsusega polümeerne päikeseelement on Mitsubishi Chemicali poolt toodetud 11,7% efektiivsusega element. Siiski peab märkima, et tegu on laboritingimustes testitud elementidega, mille praktilistes tingimustes kujunev keskmine efektiivsus on tõenäoliselt madalam.

2. FOTOGALVAANILISTE SÜSTEEMIDE MAJANDUSLIK SEIS

2.1. Fotogalvaaniliste süsteemide turg

2014. aasta alguseks oli globaalne fotogalvaaniliste elementide aastane tootmismahut tõusnud 40GW-ni. Kõige suurem kasv on tulnud Aasiast, kus Hiina Rahvavabariik ning Hiina Vabariik (Taiwan) moodustavad nüüdseks üle 70% kogu maailma toodangust. 2015. aastaks hinnatakse fotogalvaaniliste moodulite globaalset tootmismahu kasvu üle 50GW suuruseks ning seda enamasti Aasia turu jätkuva kasvu arvelt. Hiina Rahvavabariik oli 2013. aastal juhival kohal taastuenergiasse investeerimisel, kus aastased investeeringud olid 40,2 miljardi euro mahus. Suuruselt järgnevad riigid olid USA (€27,2 miljardit) ning Jaapan (€21,2 miljardit). Euroopa Liidu kumulatiivne investering taastuenergiasse 2013. aastal oli €25 miljardit, millest suurima hulga moodustasid Ühendkuningriik (€9,2 miljardit) ning Saksamaa (€7,5 miljardit). [7]



Joonis 4 Pääkeselementide tootmismahud [7]

Alates 2008. aastast on elamutele suunatud fotogalvaaniliste süsteemide hind langenud üle 70% ning fotogalvaaniliste elementide hind üle 80%. Üldiselt moodustab fotogalvaaniliste moodulite hind vaid 40% kogu installeeritud süsteemi kulust. [7]

Kristallilise räni põhised fotogalvaanilised elemendid moodustasid 2013. aastal üle 85% globaalset tootmisest. Fotogalvaaniliste elementide tööstuse hiiglaslik kasv alates 2000. aastast lõi olukorra, kus kristallilise räni nõudlus ületas pooljuhttööstusele jõukohase

pakkumise. 2008. aastal saavutas polükristalliline räni enda kõrgeima hinna, milleks oli 500\$/kg. Hiiglaslik hinnatõus viis kristallilise räni tootmise laiendamiseni, mis koos majanduskriisiga langetas 2009. aastaks hindu kümne korra võrra madalamaks (50\$/kg). Polükristallilise räni hinna langemine on aastate vältel jätkunud ning 2014. aastaks oli hinnatase vahemikus 20-25\$/kg. Kristallilise räni põhised päikeseelemendid moodustavad tänaseks üle 85% globaalsest päikeseelementide tootmisest. 2014. aasta räni tootmiskaudu prognoositi 306 000 ja 426 360 tonni vahel ning sellest ligikaudu 27 000 tonni oli elektroonikatööstusse suunatud. [7]

2004. ja 2008. aasta vahel tekkinud kristallilise räni defitsiidiga kaasnenud fotogalvaaniliste moodulite hinna tõus võimaldas paljude uudeid tehnoloogiaid arendavate firmade kerkimist, mis kasutasid enda elementide aktiivsel kihil räni asemel alternatiivseid materjale. Nende seas olid ka polümeersete päikeseelementidega tegelevad firmad. Räni ning selle põhiste moodulite hinna langus lõi aga palju tugevama konkurentsi turul, mis pärssis veel arengufaasis olevate uudeid tehnoloogiate kasvu. Näitena võib tuua õhukesekileliste päikeseelementide globaalsest toodangu osakaalu, mis langes selle aja vältel 16 protsendilt 2009. aastal 10 protsendini 2014.aastal [8].

2.2. Fotogalvaaniliste süsteemide kulu arvutamine ning LCOE standard

Tasandatud elektri hind (LCOE - *Levelized Cost Of Electricity*) on energiaallika poolt toodetud elektri keskmise tasakaalustatud kulu mõõt, mille eesmärgiks on luua võrdlusmoment erinevate energiaallikate vahel. Energiatööstuses kasutatakse LCOE-d ka minimaalse elektri hinna arvutamiseks. Ennekõike on tegemist esimese astme majandusliku hinnanguga elektrienergiat genereeriva süsteemi kulude konkurentsivõimekusele, mis kaasab kogu süsteemi elueal esinevad kulud (esialgse investeringu suurus, kapitalikulu, hooldus, kütusekulu). Siiski ei haara LCOE kõiki määrajaid, nagu aktsiidid, maksuvabastused ning tootmise-nõudluse järgi seadistamise keerukust (ehk kui suurel määral langeb tootmise profiil nõudluse omaga kokku ning kui kiiresti on võimalik süsteemil tootmist vastavalt nõudlusele kiirendada, aeglustada või isegi peatada). [9]

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, [7]$$

Kus I_t – investeering aastal t
 M_t – hoolduskulud aastal t
 F_t – kütusekulu aastal t
 E_t – genereeritud elekter aastal t
 r – allahindlus
 n – majanduslik eluiga

Päikeseenergia perioodilise olemuse tõttu võivad LCOE hinnangule lisanduda veel energiasalvestamise või tagavarageneraatorite kulud. Sellest hoolimata võivad ka

perioodilised energiaallikad konkurentsivõimelised olla, kui nad suudavad elektrit toota aegadel, mil nii nõudlus kui ka elektri hind kõige kõrgemal on, näiteks keskpäevasetel tarbimisetõusudel. [9]

Päikeseenergiale ülemineku murdepunktiks loetakse võrgupariteedi saavutamise momenti ehk elektri turuhinnaga konkureerivale tasemele jõudmist. LCOE järgi on võimalik võrrelda päikeseenergia süsteemide eluea jooksul toodetud elektri hinda turul olevate traditsiooniliste elektrienergia allikatega.

Eesti tingimustes on arvestatud polükristalse räni elementide põhise katusesüsteemi tasandatud elektri hinnaks 0,24€/kWh võrku ühendatud süsteemi ja 0,38€/kWh autonoomse süsteemi puhul ning CdTe õhukesekilise katusesüsteemi hinnad on vastavalt arvestatud 0,21€/kWh ja 0,34€/kWh [10]. Need tulemused näitavad, et teise põlvkonna õhukesekilised päikeseelementid suudavad tänapäeval konkureerida hinna poolest esimese põlvkonna kristalliliste räni paneelidega. Mõlemad tulemused on siiski kordades kõrgemad võrreldes elektri turuhinnaga Eestis, mis oli näiteks 2014. aastal keskmiselt 0,04€/kWh [11].

Polümeersete päikeseelementide tasandatud elektri hinna kohta ei leidu arvutusi, sest andmed võimalike turuhindade või isegi tootmiskulude kohta üldiselt puuduvad. Tehes tasandatud elektri hinna arvutusi Konarka moodulite tootmiskulude andmetel (vt punkti 3.4.) eeldades, et hoolduskulud puuduvad, allahindluse määr on 3%, eluiga on 3 aastat (Konarka garantii põhjal) ning tootmisvõimsus on fotogalvaanilistele süsteemidele kohaselt 20%, saab mooduli LCOE väärtuseks 1,50€/kWh. Sinna lisanduksid veel mooduli juurdehindlus, teiste süsteemi komponentide kulu ning seadistamiskulud. Siiski peab märkima, et Konarka tooted polnud mõeldud antud mastaapides elektri tootmiseks ning keskendusid hinna poolest vähem tundlikutele nišiturgudele.

Kuigi LCOE on hea verstapost päikeseenergia arengu hindamiseks, sõltub selle hinnangu kvaliteet elektrienergia genereerimise kulu arvutusviisi täpsusest, mis ei ole sugugi stabiilne. Sageli tekitab arusaamatusi, kui arvutustes kasutatakse turuhinna asemel päikesepaneelide tootmiskulu. Sellest hoolimata on LCOE hetkel kõige sagedamini kasutatav standard alternatiivsete energiaallikate võrdlemiseks. [9]

3. POLÜMEERSED PÄIKESEELEMENTID

Polümeersetel päikeseelementidel on palju loomupoolseid eeliseid nagu kerge kaal, mehaaniline paindlikus ning materjali- ja tootmiskulude märkimisväärse alandamise võimalus. Viimasel ajal on arenenud läbipaistvate polümeersete päikeseelementide kasutus tandem-elementides, mis võimaldavad üksikelementidest kõrgemat efektiivsust. Kuigi päikeseenergiatööstus on hästi subsideeritud ning ränipõhiste paneelide hind on tootmismahdade suurenedes kõvasti langenud, pole nende hind siiski täielikult konkureeriv traditsiooniliste energiaallikatega. Üheks tootmiskulude alandamise viisiks oleks orgaaniliste materjalide kasutamine, mida saaks vähem nõudlikes tingimustes töödelda. Orgaanilisi päikeseelemente on arendatud üle 30 aasta, kuid viimase 10 aasta jooksul on huvi antud ala vastu hüppeliselt kasvanud.

Õhukesekilelised polümeersed päikeseelementid on atraktiivsed tänu töötlemise lihtsusele, mehaanilisele paindlikusele ning potentsiaalile luua odavalt suure alaga elemente. Lisaks saab nende omadusi mõjutada nende keemilist ehitust muutes, andes sellele rohkem kohandamisvõimalusi kui traditsioonilistel fotogalvaanilistel elementidel [12]. Siiski pole polümeersed päikeseelementid veel valmis tarbekasutuseks, kuna efektiivsused on suhteliselt madalad ning degradatsioonikiirus on märkimisväärselt suurem kui anorgaanilistel elementidel.

Orgaaniliste pooljuhtide materjalid võivad kujuneda odavamaks alternatiiviks räni pooljuhtidele ning omavad kõrgeid optilisi absorptsiooni koefitsente, mis võimaldavad õhemate elementide loomist. Lisaelisteks on tootmise võimalused kõrgetel läbilaskevõimelistel, madalatemperatuurilistel viisidel ning kindlakskujunenud printimistehnoloogiate kasutamiseks nn. rullilt rullile (R2R) protsessidega. See võimaldab paindlike polümeerpäikeseelementide suure kiirusega printimist, mis vähendab polümeersete päikeseelementide põhiste süsteemide tootmiskulusi. [12]

3.1. Teooria

Orgaanilised pooljuhid põhinevad juhtivatel konjugeeritud polümeeridel. Konjugeeritud polümeeriahelaid moodustavad sp^2 hübridiseerunud süsiniku aatomid, mis omavad p-orbitaale. Tänu p-orbitaalidel olevatele elektronidele on sp^2 hübridiseerunud süsinikud võimelised peale σ -sidemete ka nõrgemaid π -sidemeid moodustama, mis väljendub ahelas vaheldumisi asetsevates kovalentsetes kaksiksidemetes. π -sidemeid moodustavad elektronid omavad kõrget mobiilsust ning ei ole otseselt ühegi süsiniku aatomiga seotud.

Kõrvuti asetsevate aatomite p-orbitaalide kombineerimisel tekib siduv ning mittesiduv π -orbitaal. Kahe orbitaaliga seonduvate energiaolekute vahel on keelutsoon ning pooljuhtidega sarnasel kombel on võimalik elektrone ergastada ühest olekust teise. Orgaaniliste pooljuhtide keelutsooni laius on vahemikus 1,5-2,5 eV [2]. Polümeersetes päikeseelementides absorberkihis kasutatavaid orgaanilisi pooljuhte nimetatakse sageli ka lihtsustades juhtivateks polümeerideks.

Juhtivad polümeerid käituvad polümeersetes päikeseelementides elektrondonoritena. Elektronakseptorina kasutatakse C_{60} fullereene sisaldavaid ühendeid. Fullereen on sfäärilise kujuga süsinikuühend, mille struktuur sarnaneb grafiidiga. Orgaanilisi pooljuhte on võimalik n-tüüpi legerida elektronakseptor osakestega, mis haaravad elektrone konjugeeritud ahelalt. P-tüüpi legerimisel lisatakse elektrondonoreid näiteks metalseid ioone lisades. [2, lk. 383]

Orgaanilisi päikeseelemente saab eristada tootmise tehnoloogia, materjalide iseloomu või seadme disaini poolest. Kaheks põhiliseks tootmistehnoloogiaks on märgtöötlemine ning termoaurustamine. Elemendi arhitektuur võib olla bikihiline, massi- või järjestatud heterosiirdega. On olemas ka ühematerjaliseid elemente, kuid üldiselt koosneb aktiivne kiht siiski elektrondonor ja elektronakseptor materjalist. Erinevus seisneb laengu genereerimise mehhanismis: üksikkihilised seadmed nõuavad üldiselt Scotty barjääri ühe kontakti juures, mis võimaldab fotogenereritud elektroni eraldamist barjäärast välja. Doonor-akseptor elementides toimub elektroni liikumine ergastatud doonori HOMO-lt akseptor materjali LUMO-le. Seega peab akseptor omama suuremat elektronikülgetõmmet. Laengu eraldamisele järgnevalt peavad elektron ja auk liikuma vastandlike elektroodideni (vastavalt katood ja anood) ning alles siis saab alalisvoolu genereerida välisele vooluahelale. [12]

3.2. Polümeersete päikeseelementide degradatsioon

Põhilisteks polümeersete päikeseelementide stabiilsust piiravaks komponendiks on elementide aktiivne kiht. Juhtiva polümeeri konjugeeritud ahel on tundlik valguskiirguse poolt põhjustatud fotokeemilistele reaktsioonidele ning morfoloogilistele muutustele. UV-kiirgus soodustab radikaalide teket, mis omakorda võivad lõhestada polümeeri põhiahelat. See põhjustab juhtivuse kahanemist ning võib kulmineeruda delamineerumisega. Aktiivse kihi degradatsiooni teiseks põhiliseks teguriks on elementi difundeerunud niiskus ja hapnik.

UV-kiirguse vastu saab kaitsta UV-absorber lisanditega ning lisakaitsekihtidega. Viimase eeliseks on aktiivse kihiga reageerimise ohu puudumine, kuid siiski mõjutab see elemendi optilisi omadusi ning nõuab eraldi töötlemisetappi. [13]

Juhtiva polümeeri stabiilsusele mõjuvad negatiivselt alküülkõrvalrühmade sisaldus, sest nad annavad lähenemispunkti erinevatele oksüdeerijatele, millega kaasneb aja jooksul ka konjugeeritud ahela degradatsioon. Siiski mängib polümeeri kõrvalahelate kogus tähtsat rolli tootmiseks vajaliku lahustuvuse saavutamisel. Lahendusena on uuritud kõrvalahelate lõhestamist peale aktiivse kihi pealekandmist. [13]

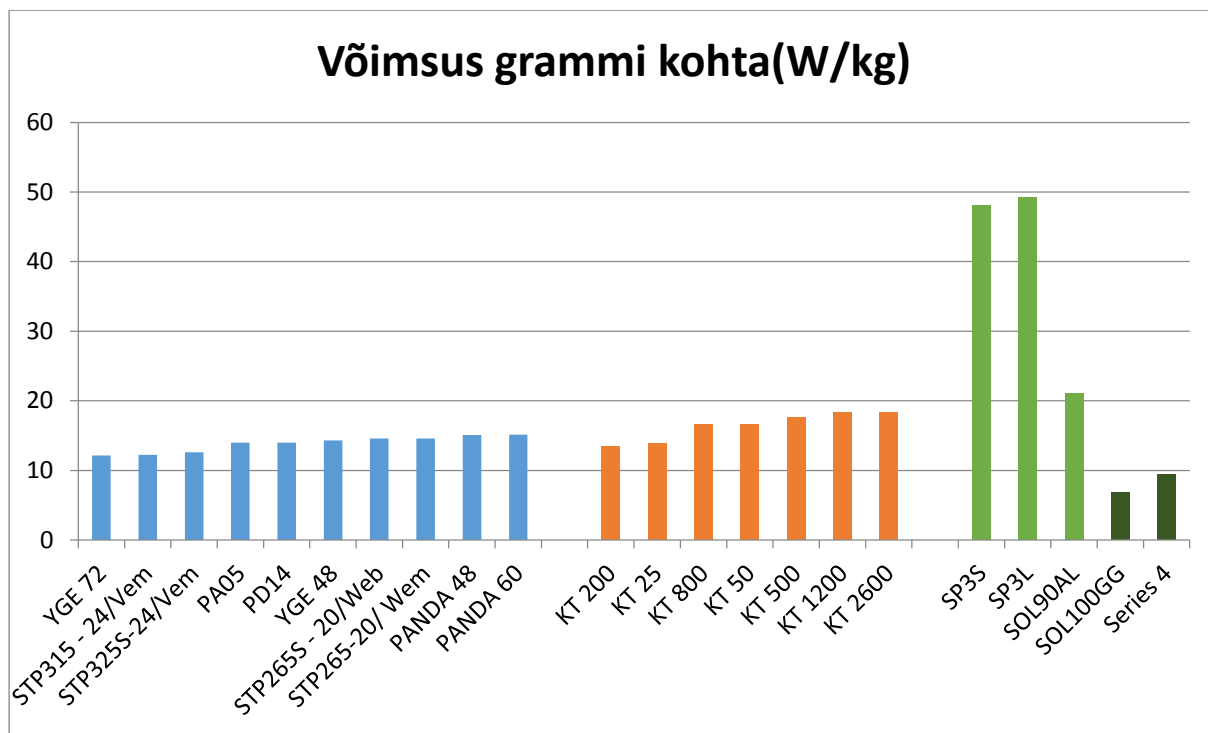
Lõhestamisel eristatakse termolõhestamist ning happe katalüseeritud lõhestamist. Termolõhestatavaks kõrvalahelaks võivad olla näiteks tertsiaalsed estrid, mis on konjugeeritud ahelaga ühendatud kuumustundliku estersidemega. Termolõhestatavaid kõrvalahelaid on võimalik aktiivse kihi pealekandmise järel kuumtötluse toimel (ca 300°C) eemaldada juhtiva polümeeri ahelast. Energiakulu kaalutlustel on kõrgetel temperatuuridel tootmisprotsessid kulukad ning selle tõttu on arendatud happe kasutamist katalüsaatorina, et viia reaktsiooni temperatuur madalamale. Uuringud on näidanud, et asendades tertsiaalsed esterahelad silaankõrvalahelatega, on võimalik eemaldamisreaktsiooni ka toatemperatuuril läbi viia. Siiani pole aga happe-lõhestatud kõrvalahelaid polümeersete päikeseelementide alal kasutatud. [13]

Väliskihtidelt difudeerunud niiskus ja hapnik võivad põhjustada ka metalsete elektroodide oksüdatsiooni, mis soodustab insuleerivate laikude teket elektroodvõrestikul. Hõbeeletroodid on üldiselt silmapaistvad suurema vastupidavuse poolest erinevate oksüdeerijate vastu [13]. Ka mehaaniline pinge võib olla polümeersete päikeseelementide degradatsiooni põhjustajaks, seda eriti hapramate komponentide puhul nagu indium tinaoksiidi (ITO) kile [5].

Polümeersete päikeseelementide stabiilsuse tagamine on üheks suurimaks väljakutseks, et tagada pikem eluiga ning madalam tasandatud elektri hind. Kui turul olevate päikesepaneelide tootjate poolt garanteeritud eluiga on üldiselt 20-30 aastat (T80), siis Konarka moodulite garantii oli vaid 3 aastat. LCOE poolest pole polümeersedel päikeseelementidel võimalik konkureerida turul olevate tehnoloogiatega enne, kui nende eluiga märkimisväärselt suureneb.

3.3.Kaal

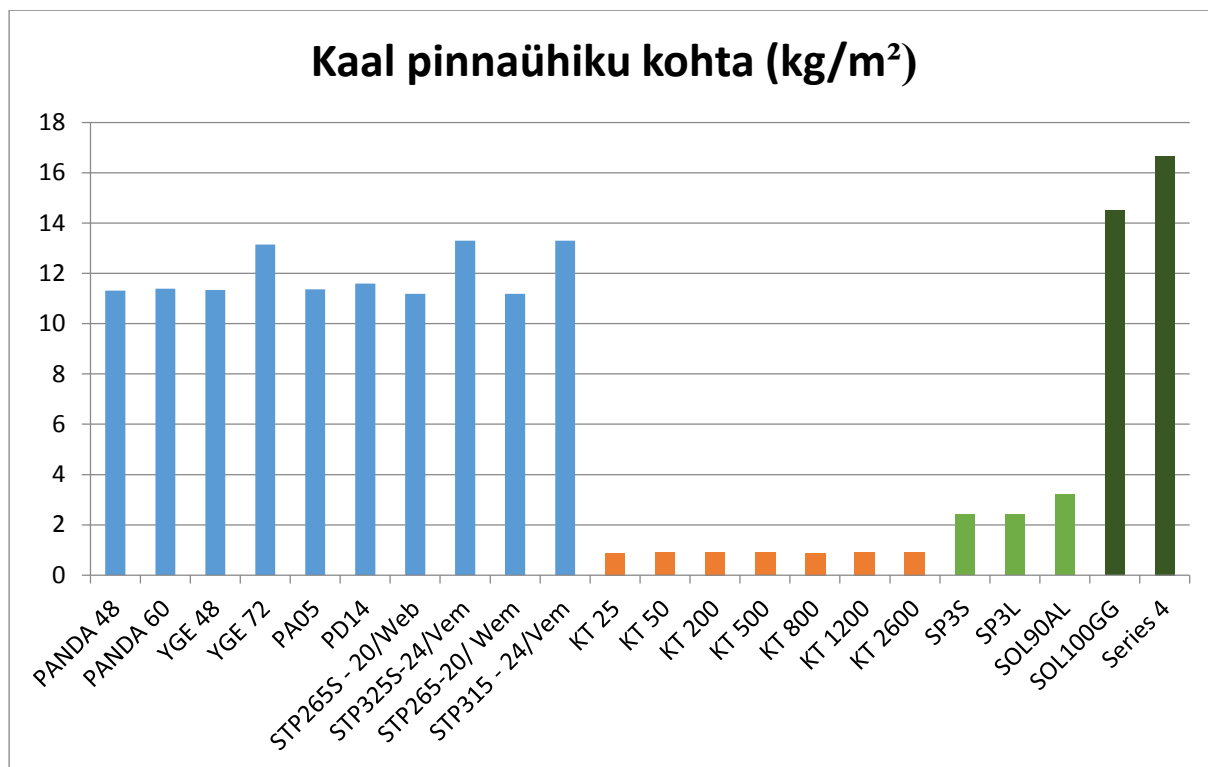
Kaal on üks parameeter, mida sageli ei käsitleta süvitsi uudseid päikeseenergia tehnoloogiaid uurides. Siiski mängib see tähtsat rolli paljudel praktilistel rakendustel, kus kaal on määravaks asjaoluks (autotööstus, lennundus, kosmonautika, kaasaskantav elektroonika), ning ka logistilises mõttes hoiab kerge kaal transpordikulused madalana. Polümeersed päikeseelemendid lubavad juba enda mõõtmete ning koostisosade poolest kergemat kaalu.



Joonis 5 Päikeseelementide võimsus grammi kohta. Sinisega on märgitud mono- ja polükristallilised päikesepaneelid, punasega polümeersed päikeseelemendid ning hele- ja tumeroheliselega vastavalt polümeersele ja klaas substraadile kantud õhukesekile elemendid. Andmed on saadud toodete andmelehtedelt (vaata lisa). Võimsus on mõõdetud standard tingimuste all (STC: 1000W/m², t=25°C, AM=1,5).

Kasutades võrdluseks erinevate moodulite võimsuse ja kaalu suhet, on näha, et turul olnud Konarka polümeersed päikeseelemendid olid vaid marginaalselt paremate näitajatega kui kristallilise räni põhised moodulid. Piiravaks põhjuseks oli Konarka elementide madal efektiivsus ($\eta=2\%$). Siiski tuleb märkida, et kui kristallilise räni paneelide võimsuse ja kaalu suhe kannatas võimsamatele moodulitele liikudes (Suntech'i 265W mudeli 14,6 W/kg võrreldes 315W mudeli 12,2 W/kg), siis orgaanilised moodulid näitasid vastupidist tendentsi. Antud võrdluses kajastus kõige paremini polümeersele substraadile kantud õhukesekilised moodulid, mis omasid üle kahe korra paremat võimsuse ja kaalu suhet. Jäigad õhukesekilised paneelid kajastusid aga kõige nõrgemalt.

Polümeersete päikeseelementide efektiivsuse tõusuga paraneks ka antud näitaja ning selle paranemise arvestamiseks võib vaadata samade mudelite kaalu ja pindala suhet.



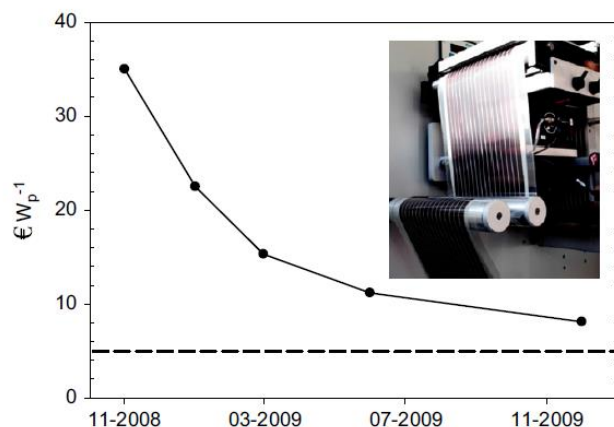
Joonis 6 Päikeseelementide kaal pinnaühiku kohta. Andmed on saadud toodete andmelehtedelt.

Antud võrdluses on selgelt näha polümeersete päikeseelementide eeliseid. Konarka moodulid olid üle 10 korra kergemad kui kristallilise räni põhised paneelid ning kaks korda kergemad kui paindlikud õhukesekilelised moodulid. Polümeersete päikeseelementide efektiivsuse lähenemisel 10%-ni saaks näha sama edumaad ka võimsuse ja kaalu suhtes.

3.4. Tootmine

Tootmise lihtsus on polümeersete päikeseelementide üheks suurimaks müügipunktiks. Tänu elementide paindlikusele on võimalik elementide valmistamiseks kasutada rullikutel jooksvat substraati, millele kantakse elemendi komponendid kihtidena peale. Sellist tootmist kutsutakse rullilt rullile tootmiseks (R2R). Antud tootmistehnika positiivseteks omadusteks on suur automatiseerituse määr, madalad töötlemiskulud, kõrge kiirus ning esialgse investeeringu madal hind.

Kuna polümeersed päikeseelemendid on veel arengufaasis, pole meil väga palju praktilisi andmeid tööstusliku tootmise kohta. Ainukene konkreetne näide, mida oleks võimalik analüüsida, on Konarka väiksemahuline tootmisliin, mis kasutas Process One tootmistehnoloogiat. Seda tehes peab märkima, et tegu oli esimese tööstusliku vabrikuga, mis tegutses vaid neli aastat.



Joonis 7 Tootmise õppimiskurv. Punktiir joon näitab ennustatud miinimumkulu, mis oleks antud materjalikulude juures saavutatav. [14]

Madalaim saavutatud tootmiskulu oli Konarka tehastes 8,1€/W_p ning ennustatav alampiir antud materjalidega oli 5 €/W_p [14]. See pole sugugi konkureeriva hinnaga ränipõhiste paneelidele, mille globaalne keskmine hind on 0,56 €/W_p [7]. Järgnevas tabelis on näha eri komponentide materjali- ning töötlemiskulu.

| Materjal | Materjali kulu (€) | Töötlemise kulu (€) | Kokku (€) |
|--------------------------|--------------------|---------------------|---------------|
| PET-ITO | 2,6077 | 0,21111 | 2,8188 |
| ZnO | 0,0582 | 0,16667 | 0,2249 |
| P3HT-PCBM | 0,4492 | 0,16667 | 0,6159 |
| PEDOT:PSS (EL-P 5010) | 0,2311 | 0,16667 | 0,3978 |
| Hõbe (PV410) | 0,4120 | 0,16667 | 0,5787 |
| Barjäär | 0,4575 | 0,03173 | 0,4892 |
| Survetundlik liim | 0,1918 | 0,03173 | 0,2236 |
| Kokku | 4,4078 | 0,9412 | 5,3491 |

Tabel 1 Madalaim saavutatav kulu ProcessOne R2R tootmistehnoloogiat kasutades 360 cm² aktiivse alaga elemendi valmistamiseks. Kuludesse on sisse arvestatud ka materjalikadu. Antud mooduli võimsus on kuni 660 mW (AM 1.5G, 1000 W m⁻²) [14]

Kulude arvestamisel on näha, et töötlemisega kaasnevad kulud (tööjõud, ajakulu) moodustavad vaid 18% kogukulust ning seega saab määravaks just sisseostetud komponentide hind. ITO elektroodkihi materjalikulu on ebaproportsionaalselt kõrge: 59% materjali kulust ning 49% kogukulust. Kulude märkimisväärseks alandamiseks on kindlasti vaja leida alternatiiv. Tänapäevaks on juba avastatud, et ITO elektroodi on võimalik asendada kroom-alumiinium-kroom mikrovõrestikust elektroodiga, millega kaasneks vaid alla 20%-ne efektiivsuse langus [15]. Polü-3,4-etüleendioksiüthiofeen polüstüreen sulfonaati

(PEDOT:PSS) toodetakse juba tööstuslikes kogustes, kuid aktiivse kihi materjalide hind võib langeda nõudluse suurenemisel kaasneva tarnija poolse tootmise laienemisega [14]. Kui eeldada muude kulude stabiilsust, peaksid 10% efektiivsusega ITO vaba mooduli kulud siiski langema veel kuni poole võrra madalamaks, et saavutada konkureeriv $<0,5\text{€}/W_p$ hind.

Antud andmetest võib järeldada, et polümeersete päikeseelementide materjalid ei ole iseenesest odavamad kristallilisest ränist. Siiski on oodata paljude polümeersete päikeseelementide komponentide hindade langemist tootmismahdade suurenemisel ning lähtematerjalidega seotud piirangutest tingitud hinnatõusud on ebatõenäolised.

3.5. Polümeersete päikeseelementide alal tegutsevad firmad

Kui rääkida polümeersete päikeseelementidega tegelevatest firmadest, ei saa mainimata jätta Konarka. Konarka Technologies Incorporated oli üks profiilsemaid polümeersete päikeseelementidega tegelevaid firmasid ning oli üheks suurimaks alaga seotud patentide hoidjaks. Kõige olulisemalt oli Konarka esimene ning siiani ainus firma, mis on polümeersete päikeseelementidega turule tulnud ning sellest tulenevalt toetub ka suur osa antud lõputöö analüüsist Konarka andmetele.

Konarka oli oma tegevusaastatel (2001-2012) polümeersete päikeseelementide lipulaevaks ning suutis koguda \$170 miljoni väärtuses erakapitali investeringuid ning \$20 miljoni väärtuses riiklikku toetust.

Konarka hinnangul oli nende aastase tootmise võimekust ühe gigavati väärtuses, kuid üldiselt suhtutakse sellesse väitesse skeptiliselt. Tootmise kiirust arvestades võib teoreetiline aastane maksimaalne tootmiskogus nii kõrgele isegi ulatuda, kuid tuleb arvestada, et Konarka vabrik ei olnud täielikult optimeeritud ning tootmise seiskumine oli madala nõudluse tõttu sagedane [16]. Seega on kaheldav, kas Konarkal oli piisavalt arenenud taristu, et hinnatud tootmiskoguste maksimumini reaalsuses jõuda.

Olenemata heldest rahastusest ei suutnud Konarka moodulid konkureerida turul olevate alternatiivide kulu, eluea ega efektiivsusega. Lux Research, arenevaid tehnoloogiaid analüüsiv konsultatsioonifirma, oli ligi kolm aastat hinnanud Konarkat „*strong caution*“ hindega, mis oli tingitud tehnoloogiast, mis oli nende sõnul kümnekordselt kallim ning kümnekordselt väiksema efektiivsusega, kui turul olevad alternatiivsed tehnoloogiad [17]. Oma pankroti hetkel oli Konarkal 59 patenti ning uudne tehas Massachusettsis, mis suutis rakendada Polaroidilt hangitud tootmistehnikat vaid minimaalsete muudatustega, vähendades

seega märkimisväärselt esialgset kapitaliinvesteeringut [18]. Kõrgeim kinnitatud muundamiseefektiivsus oli Konarkal 8,3%.

Konarka pankrotiga kaasnes ka skandaal seoses 2003. aastal Massachusettsi osariigilt saadud 3,3 miljoni dollarise toetusega tolleaegse kubeneri Mitt Romney poolt. Kogu fiaskot õhutas asjaolu, et Konarka pankrottiminek toimus 2012. aasta presidendivalimiste eel, mis põhjustas ka ebanproportsionaalset kajastust ajakirjanduses. See andis hoobi USA maksumaksjate usaldusele arenevate päikeseenergia tehnoloogiaga tegelevate firmade rahastamisele [16].

Enamus polümeersete päikeseelementidega seotud firmadest tegelevad aktiivse kihi materjalide sünteesiga, neist eelkõige juhtivate polümeeride omaga. Selle põhjuseks on juhtivate polümeeride rakendamise võimalused ka teistel aladel nagu prinditav elektroonika. Neist suurimateks on Solarmer, Merck KGaA ning Sumitomo Chemical. Eelnimetatud firmad teevad sageli koostööd ka ülikoolide laboritega ning omavad NREL-i poolt tunnustatud efektiivsuse rekordeid.

Üks vähestest firmadest, mis tegeleb polümeersete päikeseelementide arendamisega tervikuna, on Mitsubishi Chemical, mis omab hetkel kõige kõrgemat efektiivsuse rekordit 11,7% juures. Kuna tegu on väga laia tegevusala omava firmaga, võimaldab see neile pikemat arendamisaega ning suuremat kannatlikust kui polümeersetele päikeseelementidele primaarselt keskenduvatel firmadel. Selle tõttu on ka liikvel suhteliselt vähe informatsiooni Mitsubishi Chemicali polümeersete päikeseelementide kohta.

3.6.Potentsiaalne turg

Suurema tõenäosusega ei jõua polümeersete päikeseelementide tehnoloogia lähima 10 aasta jooksul tasemele, kus seda oleks tarbekohane kasutada elamute või tööstuslike elektrivajaduste täitmiseks. Vähem energianõudliku kaasaskantava elektroonika toiteks võivad polümeersed elemendid leida lihtsamini rakendust tänu enda kergele kaalule ning kompaktsusele, mis võivad antud turul tasandatud elektri hinnale eelistatumad olla. Sarnastel kaalutlustel võib antud tehnoloogia leida ka kasutust militaarsel või hädaabi alal. See võimaldaks näiteks GPS-seadmetele või hädaabisignaalisaatjatele lisada tagavaruenergiaallikas, mis ei suurendaks oluliselt seadmete kaalu.

Ka oma esteetiliste omaduste poolest võivad polümeersed päikeseelemendid leida mitmekesist rakendust. Tänu oma läbipaistvusele ning eelkõige neutraalsele värvusele on võimalik polümeerseid päikeseelemente kanda akente pindadele ehitiste välist väljanägemist

ning sisemist valgustatust kompromiteerimata. See annaks võimaluse luua ökonoomseid ruumilahendusi, ilma kujundulike piiranguteta. See võib olla juba ala, kus klientuur on nõus tegema lisakulutusi funktsionaalsuse eest.

Siiski on tegu eelkõige nišiturgudega ning suurematele turusegmentidele liikudes tekib juba ületamatu konkurents. Päikesepaneelidele odava alternatiivina turuletulek on praeguste näitajate juures võimatu. Hetkel ei konkureeri polümeersed päikeseelemendid ilmtingimata traditsiooniliste energiaallikatega, vaid pigem teiste päikeseenergia tehnoloogiatega. Suurimaks konkurendiks on polümeersetele elementidele just õhukesekilelised elemendid, sest nende positiivsed omadused kattuvad väga suurel määral: kerge kaal, mehaaniline paindlikus, läbipaistvus. Õhukesekilelise tehnoloogia eeliseks on esimese põlvkonna päikesepaneelidega võrreldav efektiivsus ja eluiga. Pealekauba on antud tehnoloogia enda jätkusuutlikust turul viimase 20 aastaga juba tõestanud. Sellest hoolimata on õhukesekilelise päikeseelementide turusegment viimase 6 aasta jooksul kokku tõmbunud, mille põhjuseks on kristalliliste räni põhiste päikesepaneelide tootmise plahvatuslik kasv Aasias ning sellega kaasnenud paneelide turuhinna lang. See omakorda tähendab aga seda, et polümeersed ja õhukesekilelised päikeseelemendid peaksid võistlema veelgi väiksema turusegmenti eest.

Orgaaniliste päikeseelementidega turule tulevad firmad peavad investeerijate usalduse saavutamiseks suutma eristuda Konarkast. Seda on teinud näiteks Heliotek, mis rõhutab oligomeeride kasutamist polümeeride asemel aktiivsel kihil. Kindlasti omab see kindlaid tehnoloogilisi eeliseid, kuid tõenäoliselt on selle esile toomine kaalutletud otsus usaldusväärse tõstmiseks.

KOKKUVÕTE

Polümeersete päikeseelementide põhiliseks müügipunktiks on alati olnud lähtematerjalide küllus, lihtsad tootmisprotsessid ning nendega kaasnev madalate kulude väljavaade, kuid seni, kuni see väljendub moodulite turuhinnas, ei ole polümeersed päikeseelemendid alternatiivsete tehnoloogiatega võimelised konkureerima.

Kõrget hinda hoiavad üleval madal efektiivsus, kiire degradatsioon ning väikesemahulise tootmisega seotud kulukus. Efektiivsuse rindel on viimastel aastatel juba edusamme tehtud ning 10% piir on laboris toodetud väikese alaga elementidega ületatud. Elementide stabiilsuse tagamine on ka arenemas, kuid siiani pole hiiglaslikku läbimurret tekkinud. Komponentide valik on liikunud juba majanduslikult mõistlikumate variantide poole, kuid aktiivse kihi materjalid on tagasihoidlike tootmismahdade tõttu veel suhteliselt kõrged.

Polümeersedel päikeseelementidel on hetkeseisul keeruline leida suurejoonelist rahastust, sest antud tehnoloogia areng pole küllalt kiire, et olla tasuv. Selle tõttu sobib polümeersete päikeseelementide arendustöö pigem ülikooli teaduslaboritele ning suurkorporatsioonide väiksematele harudele, kus on rohkem kannatlikkust veel arengufaasis olevale tehnoloogiale.

Kuigi polümeersed päikeseelemendid töötavad pakkuda uusi võimalusi päikeseenergia rakendamiseks, pole nad veel valmis väljakujunenud fotogalvaaniliste süsteemide turgu tungimiseks. Seega jääb üle vaid uute turusegmentide loomine, kus puudub sama tugev konkurents nagu näiteks kergekaalulised kaasaskantavad või isegi seljaskantavad päikesemoodulid.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] [WWW] <https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/JRC%2083366%20PV%20Electricity%20Cost%20Maps%202013%20%28rev%29.pdf>. (10.05.2015)
- [2] T. Dittrich, *Materials Concepts for Solar Cells*, London: Imperial College Press, 2015.
- [3] [WWW] <http://www.nrel.gov/>. (18.05.2015)
- [4] M. Green, *Third Generation Photovoltaics*, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [5] N. Grossiord, J. M. Kroon, R. Andriessen ja P. W. Blom, „Degradation mechanisms in organic photovoltaic devices,“ *Organic Electronics*, kd. 13, nr 3, pp. 1566-1199, 2012.
- [6] [WWW] <http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/33947.pdf>. (15.05.2015)
- [7] A. Jäger-Waldau, „PV Status Report 2014,“ European Commission, DG Joint Research Centre, Ispra, 2014.
- [8] IEA, [WWW] <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/technology-roadmap-solar-photovoltaic-energy---2014-edition.html>. (29.05.2015)
- [9] M. P. J. P. K. Branker, „A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity,“ *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, kd. 15, nr 9, pp. 4470-4482, 2011.
- [10] A. Päsik, A. Jagomägi ja E. Mõttus, „Ehitisintegreeritud fotoelektriliste päikesepaneelide tootlikkus ja majanduslik tasuvus Eesti kliimas aastal 2011,“ %1 *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine XIII konverentsi kogumik*, Tartu, Eesti Maaülikool, 2011, pp. 37-49.
- [11] [WWW] <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Elspot/Area-Prices/EE/Yearly/?view=table>. (10.05.2015)
- [12] M. B. Askari, „Introduction to Organic Solar Cells,“ *Sustainable Energy*, kd. 2, nr 3, pp. 85-90, 2014.

- [13] E. Bundgaard, M. Helgesen, J. E. Carlé, F. C. Krebs ja M. Jørgensen, „Advanced Functional Polymers for Increasing the Stability of Organic Photovoltaics,“ *Macromolecular Chemistry and Physics*, kd. 214, nr 14, pp. 1546-1558, 2013.
- [14] T. D. Nielsen, C. Cruickshank, S. Foged, J. Thorsen ja F. C. Krebs, „Business, market and intellectual property analysis of polymer solar cells,“ *Solar Energy Materials and Solar Cells*, kd. 94, nr 10, pp. 1553-1571, 2010.
- [15] D. Kaduwal, B. Zimmermann ja U. Würfel, „ITO-free laminated concept for flexible organic solar cells,“ *Solar Energy Materials and Solar Cells*, kd. 120, pp. 449-453, 2014.
- [16] [WWW] <http://www.bostonglobe.com/business/2012/07/07/why-did-solar-cell-company-konarka-fail/tDEdGzmMQO6nNF55RfjvNJ/story.html>. (19 05 2015)
- [17] [WWW] <http://www.luxresearchinc.com/news-and-events/press-releases/read/konarka-bankruptcy-result-technology-performance-more-market>. (19 05 2015)
- [18] [WWW] <http://www.patentgenius.com/assignee/KonarkaTechnologiesInc/2.html>. (19.05.2015)
- [19] [WWW] <http://web.archive.org/web/20120104013051/http://www.konarka.com/index.php/power-plastic/about-power-plastic/>. (25.05.2015)
- [20] [WWW] <http://www.yinglisolar.com/en/products/solar-modules/>. (25.05.2015)
- [21] [WWW] <http://www.trinasolar.com/us/product/index.html>. (25.05.2015)
- [22] [WWW] <http://www.suntech-power.com/menu/suntech-products.html>. (25.05.2015)
- [23] [WWW] <http://solopower.com/products/>. (25.05.2015)
- [24] [WWW] <http://www.solarion.net/products/solar-cells/sunlight-meets-innovation/r-solar-cells-a-426.html>. (25.05.2015)
- [25] [WWW] <http://www.firstsolar.com/Home/Technologies-and-Capabilities/PV-Modules>. (25.05.2015)

RESÜMEE

SUMMARY

PERSPECTIVES FOR POLYMER SOLAR CELLS

Jakob-Anhtu Tran

Polymer solar cells possess a wide range of favorable characteristics which in turn allow them to be used in a diverse set of applications. However the main points of interest for polymer solar cells are the ease of large scale manufacturing and the perspective of becoming a low-cost alternative to traditional solar cells.

The aim of this work is to assess the perspectives for polymer solar cells. The first chapter starts by giving the reader a brief overview on the field of photovoltaics and by introducing the main parameters that are used to assess solar cells. The second chapter reviews the recent developments in the solar power market and introduces the methodology that is used to calculate the cost of solar power generated electricity. The last chapter focuses on polymer solar cells in detail and evaluates the characteristics and potential markets for the budding technology.

The evaluation of polymer solar cells in this work mostly focuses on the cells manufactured by Konarka Technologies Incorporated. This is due to the fact that Konarka is still the only manufacturer to make commercial solar modules based on this technology. Some recent developments in the field (such as new record efficiencies) are also considered, but the main projections for the challenges that polymer solar cells face draw on the conclusions made from the data collected on the Konarka modules.

It is the authors assessment that polymer solar cells are not economically viable at this time. This due to the high prices caused by low efficiency, low stability and high costs associated with small scale manufacturing. While polymer solar cells may not be competitive enough to rival traditional solar cells in established market segments, it might be more successful in novel applications such as portable chargers or transparent photovoltaic coatings for windows.

LISA

| Tootja | Mudel | Tüüp | Võimsus (w) | Kaal (g) | Mõõtmed (m2) | Võimsus grammi kohta(W/g) | Kaal pinnaühiku kohta (kg/m2) |
|--------------------|------------------|---------|-------------|----------|--------------|---------------------------|-------------------------------|
| Yingly | PANDA 48 | c-Si | 225 | 14900 | 1,3167 | 0,015100671 | 11,31616921 |
| Yingly | PANDA 60 | c-Si | 280 | 18500 | 1,6236 | 0,015135135 | 11,39443213 |
| Yingly | YGE 48 | Polü-Si | 210 | 14700 | 1,2969 | 0,014285714 | 11,33472126 |
| Yingly | YGE 72 | Polü-Si | 310 | 25500 | 1,9404 | 0,012156863 | 13,14162028 |
| Trina Solar | PA05 | Polü-Si | 260 | 18600 | 1,6368 | 0,013978495 | 11,36363636 |
| Trina Solar | PD14 | Polü-Si | 315 | 22500 | 1,940352 | 0,014000000 | 11,59583416 |
| Suntech | STP265S - 20/Web | c-Si | 265 | 18200 | 1,62688 | 0,014560440 | 11,18705744 |
| Suntech | STP325S-24/Vem | c-Si | 325 | 25800 | 1,940352 | 0,012596899 | 13,2965565 |
| Suntech | STP265-20/ Wem | Polü-Si | 265 | 18200 | 1,62688 | 0,014560440 | 11,18705744 |
| Suntech | STP315 - 24/Vem | Polü-Si | 315 | 25800 | 1,940352 | 0,012209302 | 13,2965565 |
| Konarka | KT 25 | OPV | 0,25 | 18 | 0,020124 | 0,013888889 | 0,894454383 |
| Konarka | KT 50 | OPV | 0,5 | 30 | 0,033368 | 0,016666667 | 0,899064972 |
| Konarka | KT 200 | OPV | 2 | 149 | 0,163328 | 0,013422819 | 0,912274687 |
| Konarka | KT 500 | OPV | 5 | 283 | 0,31328 | 0,017667845 | 0,90334525 |
| Konarka | KT 800 | OPV | 8 | 482 | 0,53856 | 0,016597510 | 0,894979204 |
| Konarka | KT 1200 | OPV | 12 | 657 | 0,720912 | 0,018264840 | 0,911345629 |
| Konarka | KT 2600 | OPV | 26 | 1421 | 1,556752 | 0,018296974 | 0,912797928 |
| Solopower | SP3S | CIGS | 250 | 5200 | 2,161356 | 0,048076923 | 2,405897039 |
| Solopower | SP3L | CIGS | 300 | 6100 | 2,517762 | 0,049180328 | 2,422786586 |
| Solarion | SOL90AL | CIGS | 80 | 3800 | 1,18125 | 0,021052632 | 3,216931217 |
| Solarion | SOL100GG | CIGS | 105 | 15500 | 1,0692 | 0,006774194 | 14,49682005 |
| First Solar | Series 4 | CdTe | 112,5 | 12000 | 0,72 | 0,009375 | 16,66666667 |

Andmed tootjate kodulehtedelt saadud toote andmelehtedelt [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25]

