

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Materjaliteaduse instituut

Füüsikalise keemia õppetool

PÄIKESEENERGIA KASUTUS NING RAKENDUSE VÄLJAVAATED EESTIS

Bakalaureusetöö

Oskar Koit

Juhendaja:

Pof. Andres Öpik; Füüsikalise keemia õppetool; õppetooli juhataja,
teadus- ja areendusprodekaan

Puidu- ja tekstiilitehnoloogia õppekava KAOB02/09

Tallinn 2015

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

Lõpetaja andmed:

Ees- ja perekonnanimi: Oskar Koit

Üliõpilaskood: 104202

Bakalaureusetöö teema:

Päikeseenergia kasutus ning rakenduse väljavaated Eestis

Harvesting solar energy and suitable solutions for Estonia

Juhendaja:

Ees- ja perekonnanimi: prof. Andres Öpik

Töökoht: Materjaliteaduse instituut, Füüsikalise keemia õppetool

Ametikoht: Professor, õppetooli juhataja, teadus- ja arendusprodekaan

AUTORIDEKLARATSIOON

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.

Oskar Koit

METAANDMED

Töö pealkiri (eesti keeles): Päikeseenergia kasutus ning rakenduse väljavaated Eestis

Töö pealkiri (inglise keeles): Harvesting solar energy and suitable solutions for Estonia

Autor: Oskar Koit

Juhendaja(d): Andres Öpik

Kaitsmise kuupäev:

Töö keel: est / eng / rus: Eesti

Asutus (eesti keeles): Tallinna Tehnikaülikool

Asutus (inglise keeles): Tallinn University of Technology

Teaduskond (eesti keeles): Keemia- ja materjalitehnoloogia teaduskond

Teaduskond (inglise keeles): Faculty of Chemical and Materials Technology

Instituut (eesti keeles): Materjaliteaduse instituut

Instituut (inglise keeles): Department of Materials Science

Õppetool (eesti keeles): Füüsikalise keemia õppetool

Õppetool (inglise keeles): Chair of Physical Chemistry

Märksõnad /kui on/ (eesti keeles):

Märksõnad /kui on/ (inglise keeles):

Õigused: juhul kui ligipääs on piiratud, siis sellekohane märkus

SISUKORD

Sissejuhatus	7
PÕHIOSA.....	8
1 Päikesepaneelid.....	8
1.1 Päikeseenergia muundamine elektrienergiaks	8
1.2 Päikesepaneelide areng läbi ajaloo	9
2 Üldiselt fotogalvaanikast	9
2.1 Fotogalvaaniline element	9
2.2 P-n siire	10
2.3 Fotogalvaaniline efekt.....	10
3 Fotogalvaanika tehnoloogiad.....	10
3.1 Monokristallilised räni elemendid	11
3.2 Polükristalsed räni elemendid	12
3.3 Amorfse räni elemendid.....	12
3.4 Kaadmiumtelluur (CdTe) elemendid	13
3.5 Orgaanilised päikeseelemendid	13
3.6 PV paneelide lisaseadmed	14
3.6.1 Akud	14
3.6.2 Inverterid	14
3.6.3 Laadimiskontrollerid	15
4 Päikesekollektorid	16
4.1 Statsionaarsed kollektorid.....	16
4.1.1 Lame-paneel kollektor	16
4.1.2 Õhukollektorid.....	18
4.1.3 Vaakumtoru kollektorid.....	18
4.2 Päikest järgivad kollektorid	20
4.2.1 Päikest järgivad kontsentreeritud kollektorid	20

4.2.2	Hüperboolne parabool kollektor (PTC).....	21
4.3	Torn päikeseelektrijaamad.....	22
5	Päikeseenergia kasutus Eestis.....	24
5.1	Päikesepaneelid Eestis	24
5.1.1	Valik ja paigaldamine.....	24
5.1.2	Maksumus.....	26
5.2	Päikesekollektorid Eestis	26
5.2.1	Valik ja paigaldamine.....	27
5.2.2	Kollektorite tasuvus.....	28
6	KOKKUVÕTE.....	30
7	SUMMARY	31
8	Viidatud materjalid.....	32
	LISAD	35
	Lisa 1	36
	Lisa 2	37
	Lisa 3	38
	Lisa 4	39
	Lisa 5	40
	Lisa 6	41

SISSEJUHATUS

Seoses aina karmistuvate nõuetega hoonete energiatõhususele, tõusvatele energiahindadele ja vajadusele saavutada suuremat energeetilist sõltumatust on päikesepaneelid ja –kollektorid üks parimaid taastuenergiaal põhinevaid lahendusi. Päikesepaneelide tootmiseks on mitmeid erinevaid tehnoloogiaid, mida arendatakse pidevalt ning ka kollektorite töö ja tõhususe parandamine on kiires arengus. Antud bakalaureusetöös on uuritud põhilisi ja maailmas laialt kasutatavaid tehnoloogiaid päikeseenergia kasutamiseks, soojuse või elektri tootmiseks.

Töös antakse ülevaade päikeseenergia populaarsematest, efektiivsematest tehnoloogiast ja kasutusvaldkondadest eesmärgiga luua terviklik pilt erinevate süsteemide tööpõhimõtetest. Igale süsteemile vastavad kindlad väljundid ning nende saavutamiseks on vaja uurida, millised tingimused peavad olema tagatud soovitud tulemuse saamiseks. Seetõttu on töös uuritud Eesti geograafilise asendit ja kliima parameetreid ning nende mõju päikesepaneelide ja –kollektorite tööle. Töös antakse soovitusel süsteemide valikuks ning Eestisse sobivad paigaldusparameetrid vastavalt kasutatavale tehnoloogiale.

PÕHIOOSA

1 PÄIKSESEPANEELID

1.1 Päikeseenergia muundamine elektrienergiaks

Päikesevalgus on elektromagnetiline kiirgus lainepikkuse spektris ultravioletsest(100 nm) kuni infrapuna valguseni (1 mm). Enamus päikesevalgust on nähtavas valgusespektris (380-720 nm), millest 44% on valguse energia osa. Ülejäänud päikeseenergia Maal on 4% ultraviolet A ja B (UVA ja UVB) vahemikus 380-280 nm ning 52% infrapuna – katab pika lainepikkuse ala, 780 nm kuni 1 mm. Maavälise kiirguse intensiivsus, mõõtühikuga W/m^2 vastab valguse intensiivsusele atmosfääri ülemistes kihtides ja on omandatud integreerides maavälise kiirgusspektri üle kogu lainepikkuste spektri. Maaväline kiirgus on muutuv läbi aasta, kuna seda mõjutab Päikese kaugus Maast. Vahemaa on suurim 3. juulil ($152 * 10^6 km$) ja lühim 3. jaanuaril ($147 * 10^6 km$). See teeb muutuvaks vahemaaks 5 miljonit kilomeetrit. Päikesekiirguse vähenemist mõjutab suurel hulgal atmosfääri neelduvusest tulenev kadu ja kiirguse hajumine. Kõige suuremat mõju päikesekiirguse intensiivsusele Maal avaldab õhu mass. Õhu mass on defineeritud suhtena kiirte läbitava teepikkuse ja atmosfääri tiheduse vahel. Lisaks õhu massile sõltub päikesekiirte intensiivsus ka atmosfääri vee ja osoonis sisaldusest ning pilvisusest ja udust [1].

Valgus reageerib materiaga peamiselt kolmel viisil:

1. Genereerides laengukandjaid, toodab valgus PV energiat.
2. Paneb elektrone võnkuma, mis avaldub soojusenergiana.
3. Genereerides laengukandjaid, toimuvad väga aeglaselt elektrokeemilised reaktsioonid, mille tulemusel tekivad sünteetilised kütused.

Enamasti saab päikeseenergiat muundada siiski elektri- ja soojusenergiaks. Kuna päikeseenergiat ei saa ammutada ööpäevaringselt, on vaja seda salvestada. Enamasti kasutatakse kolme salvestusmeetodit:

1. Päikeseenergia salvestamine patareidesse.
2. Päikeseenergia talletamine soojusena.
3. Päikeseenergia muundamine vesinikuks ja vesiniku kasutamine kütuseelementides [1].

1.2 Päikesepaneelide areng läbi ajaloo

Päikesest energia talletamine ja selle muundamine sai alguse Edmond Becquereli poolt, kes avastas fotoelektrilise efekti (fotogalvaanilise efekti) olemasolu. 1893 aastal, olles 19-aastane, avastas Becquerel fotoelektrilise efekti kasutades hõbekloriidi happelises lahuses koos plaatina elektrodidega. Valgustades lahust tekkis elektrodidele pinge ja vool. 1828. aastal avastas Willoughby Smith seleeni fotoelektrilisuse ja ehitas esimesed seleenist fotoelemendid. Esimese päikeseenergiaal töötava mootori leiutas Augustin Mouchot, tema mootoris muundus päikeseenergia auruenergiaks. Audobert avastas fotoelektrilise efekti kaadmium-seleniidis (CdSe), materjal mida kasutatakse ka tänapäeval. 1954 aastal teatas Bell Labs, et valminud on esimene praktiline ränist toodetud päikesepaneel, mille efektiivsuseks on 6%, hakkas levima arvamus, et päikesepaneelid võivad katta kogu meie energiavajaduse. 1955 aastal tõi Hoffman Electronic turule paneeli, mille efektiivsus oli 2% ja turuhinnaks kujunes 25 dollarit/paneel või 1 W hinnaks 1,785 dollarit. Viis aastat hiljem tuli Hoffman Electronic turule paneeliga, mille efektiivsus oli 14%. 1977 aastal ületas päikesepaneelide maailmatoodang 500 kW piiri. 1980. aastal toodeti esimene õhukese kihiga päikesepaneel Delaware'i ülikooli poolt, mille efektiivsus ületas 10%, kasutati Cu₂S/CdS tehnoloogiat. 1983. aastaks ületas maailma päikeseenergia toodang 21,3 MW. 1985 aastal töötatakse välja New South Wales ülikooli poolt 20% efektiivsusega räni baasil elemendid. Lõuna-Florida ülikool töötas välja 1992. aastal 15,89% efektiivsusega õhukese kihiga elemendi. 1999 aastal on saavutatud ülemaailmne fotoelektriline võimsus 1000 MW. 2011. aastal viivad Hiinas kiiresti arenevad firmad ränist PV paneelide hinna alla 1,25 \$/W, tänu sellele paigaldus maailmas kahekordistub [2].

2 ÜLDISELT FOTOGALVAANIKAST

2.1 Fotogalvaaniline element

Fotogalvaanilised elemendid on tahked elemendid, mis muundavad päikeseenergiat otse elektrienergiaks ilma vahelseisva soojusmootori või ilma turbiiniga. Fotogalvaanilised osad ei liigu ning seetõttu vajavad vähe hooldust ja kestavad kaua. Fotogalvaanilise elemendi töötamise ajal ei teki jääkprodukte ega müra, elemente saab alati olemasolevatele juurde ühendada, et tõsta tootlikkust. Tervikelement on seatud paika nii, et paneeli sisenev energia oleks võimalikult võrdne paneelist väljuva energiaga. Paneelide pealispind kaetakse peegeldumisvastase kihiga, et suurendada paneeli suunatava kiirguse kogust. Võimsus, mis saadakse ühest elemendist on väike, seega ühendatakse palju elemente teineteisega ja kaetakse kaitsva kihiga (klaasiga), et saada tervik moodul. Seda moodulit võib nimetada paneeliks. Paneelide tipukoormust

iseloomustatakse vattides, ühikuga (Wp). Paneelide energiatootlikkust iseloomustab kilovatt-tund (kWh) [3].

2.2 P-n siire

P-n siire on monokristallilise pooljuhi ala, milles toimub üleminek aukjuhtivuselt (p-juhtivuselt) elektronjuhtivusele (n-juhtivusele). Niisuguse ülemineku eriomaduseks on tõkkekihi moodustumine negatiivse ja positiivse ruumlaengu mõjul. N-tüüpi kihi paksus tüüpilises kristallilises räni päikeseelemendis on 0,5 μm (0,005 mm), kui p-tüüpi kihi paksus on 0,25 mm. Siit on näha, et n-tüüpi kihi paksus on 50 korda väiksem kui p-tüüpi kihil [3].

2.3 Fotogalvaaniline efekt

Footon saab fotogalvaanilisse materjali sisenedes neelduda, tagasi peegelduda või seda materjali läbida. Kui footon neeldub aatomi vabasse elektroni, siis suureneb elektroni energia footoni energia võrra. Kui footoni energia on suurem, kui pooljuhi keelutsooni energia, liigub footoni neelanud elektron juhtivustsooni, kus ta saab vabalt liikuda. Võib öelda, et kui footon neeldub, lööb see elektroni aatomist eemale. Elektron saab edasi liikuda elektrivälja abil fotogalvaanilises materjalis, millele aitab kaasa ka P-n siire. Elektrivälja puudumisel taasühineb elektron aatomiga, elektrivälja olemasolul liigub elektron läbi aatomi ning tekitab voolu. Kui footoni energia ei ole keelutsooni energiast suurem, siis jääb elektron valentstsooni ja üleliigne energia muundub kineetiliseks energiaks, mille tulemusel tõuseb fotogalvaanilises elemendis temperatuur. Fotogalvaaniliste materjalide puhul ei ole footonite voo intensiivsus määrav keelutsooni energia ületamises, sest ainult üks elektron saab vabaneda, mistõttu fotogalvaaniliste materjalide kasutegur on madal [3].

3 FOTOGALVAANIKA TEHNOLOOGIAD

Tänapäeval on saadaval mitmeid fotogalvaanilisi (PV) elemente. Peamiseks tüübiks on kristalliline räni, millel põhineb umbes 80% PV elementide turust. Ülejäänud 20% kuulub õhukese kile PV elementidele (TFPV) ja kolmik siirde elementidele. Kristalliliste- või TFPV elementide valik sõltub kliimast ja vaba paigalduspinna suurusel. TFPV elemendid töötavad paremini soojas kliimas ja vajavad rohkem paigaldusruumi. Kristallilised elemendid töötavad paremini vahelduvas kliimas ja ei nõua nii palju ruumi [3].

PV paneelide toomisel ühendatakse kõigepealt PV elemendid omavahel jadamisi. Iga elemendi esikontakt ühendatakse järgmise elemendi taga kontaktiga. Osa tootjaid kasutavad pliivabu ühendusi. Ühendades iga negatiivse kontakti (eesmine) positiivse kontaktiga (tagumine)

saadakse jadaühendus, kus päikeseelemendid on teineteisest mõne millimeetri kaugusel. Tagantpoolt ühendatud elementide puhul kasutatakse ühenduseks paelte meetodit, mis kiirendab protsessi. Elementide nõõrimist kasutatakse masstootmises. Enamasti ühendatakse paneeli 36 või 72 elementi jadamisi, luues tavaliselt 4-6 elemendi rida, kus igas reas on 9-12 elementi [4].

Day4 Energy ettevõtte poolt väljatöötatud liitmissüsteem, kus esikontakt koosneb polümeerikihist, mis sisaldab pinnakattena peenete vasktraatide võrgustikku. Tootmismeetod väldib tavapärasest jootmisprotsessi, millega elemendid tavapärast omavahel ühendatakse. Tänu vähenenud mehhaanilisele pingele saab toota õhemaid elemente, mis on sama tõhusad. Teiseks liitmissüsteemi eeliseks on väiksem takistus elementide liitekohtades. Seda tüüpi kontakt omab mitmeid jadaühendusi ja see parandab paneelide varju sattumisest tulenevaid puudujääke [4].

Päikeseelemendid, mis on liidetud kokku tagaosast võtavad vähem ruumi ridade vahel. Kokku liimiseks on palju võimalusi: tagumised kontaktelemendid võib liimida või vajutada erinevatele juhtivatele radadele, või liita nad elemendi servast, sellised meetodid annavad võimaluse vältida jootmisprotsessi [4].

3.1 Monokristallilised räni elemendid

Monokristalliline räni element on valmistatud puhtast monokristallilisest ränist. Räni ei oma selles jätkuvas kristallvõres peaaegu üldse defekte ja lisandeid. Monokristalliliste elementide eeliseks on nende efektiivsus, mis on tavaliselt 14-15%. Kõrgtehnoloogilistel paneelidel on efektiivsus üle 20%. [3]

Kasvatatud või valatud ränistruktuur lõigatakse õhukesteks ketasteks, millest saab fotogalvaanilise elemendi alusmaterjal. Ränikristallelementidele pakuvad üha enam konkurentsi orgaanilised ja anorgaanilised kilelised (ingl. k. Thin Film) elemendid, mis on kõige uuem sõna fotogalvaaniliste elementide arengus. [5]

Monokristalliliste räni elementide miinusteks on:

1. Keerukas tootmisprotsess, millest tulenevalt on toomiskulud üsna kõrged, olenemata monokristallilise räni üldise tootlikkuse suurenemisest, mis on alandanud toormaterjali hinda.
2. Võrreldes TFPV tehnoloogiaga langeb kristallise räni elemendi efektiivsus väga kiiresti, 0,4-0,5% ühe kraadi kohta.

3. Hämaramates tingimustes langeb kirstalse räni elemendi efektiivsus, TFPV elemendi efektiivsus jääb suhteliselt muutumata. [3]

Energiamuundamise efektiivsus päikeseelementides sõltub räni kristalli kvaliteedist. Räni lehe kvaliteeti mõjutab:

1. Üleliigne vahemaa mida laengukandja peab läbima.
2. Pinna passiveerumine.
3. Pinna teksturiseerimine, ehk happega töötlemine.
4. Peegeldumisvastaste pinnakatete kasutamine.
5. Pindade metalliseerimine [3].

3.2 Polükristalsed räni elemendid

Polükristalseid räni päikeseelemente toodetakse monokristalse räni erinevatest teradest. Tootmisprotsessis valatakse polükristalset räni kangideks, mis lõigatakse õhukesteks viiludeks ning seatakse elementideks. Lihtsama tootmisprotsessi tõttu on polükristalseid elemente odavam toota. Polükristalse elemendi efektiivsus on 13-15% mis on keskmiselt madalam kui monokristalsel elemendil [3].

3.3 Amorfse räni elemendid

Amorfse räni elemendis paiknevad räni aatomid homogeenes kihis. Amorfne räni neelab valgust efektiivsemalt, kui kristalliline räni, mille tulemusel saab toota õhemaid elemente, millest tuleneb ka õhukese kihiga PV elementide nimetus. Elementide eeliseks on madal tootmiskulu ja suur energiatootlikkus. Suur tootlikkus tuleneb kahest faktorist:

1. Kõikidest masstootmises olevatest PV elementidest on TFPV efektiivsuse langus temperatuuri tõusu tõttu madalaim, kõigest 0,2% ühe kraadi kohta.
2. Amorfne räni on suhteliselt efektiivne sinise lainepikkuse neelamises, mis esineb pilvise ilmaga. Sellele tuginedes toodavad amorfse räni elemendid rohkem elektrit, kui monokristalsed elemendid, eriti soojemas kliimas [3].

Amorfse räni elemendi efektiivsus on 6-7%. Nende madala hinna tõttu paigaldatakse neid siiski laialdaselt, kuigi konkurents efektiivsemate TFPV elementide poolt on suur. Amorfse räni elemendi efektiivsuse tõstmiseks lisatakse elemendile polükristalse räni kihte, mille tulemusel saadakse hübriid räni päikeseelement. Hübriid räni päikeseelemendi efektiivsus jääb 9-10% suurusjärku. Paljud tootjad on loobunud puhta amorfse räni elemendi tootmisest ja toodavad ainult hübriid räni elemente. Amorfse räni suurim eelis on võimalus teda sadestada erinevatele

pindadele, mille tulemusel on populaarseks saanud näiteks amorfse räniga kaetud katusekivid [3].

3.4 Kaadmiumtelluur (CdTe) elemendid

TFPV turg oli enamasti First Solar firma võimuses, omades aastal 2008 59%-list turuosa. Aastal 2009 tõusis CdTe elementide kogutootlikkus üle 10% maailma kogutoodangust aastas. First Solar jõudis aastal 2009 tipukoormuseni 1,4 GWp ning ühe vati hinnaks kujunes 0,76 dollarit. 2012 aasta lõpuks oli First Solar paneelide tootlikkus 2 GW [3].

CdTe element on suhteliselt temperatuurikindel – elemendi efektiivsuse langus on 0,25-0,35% ühe kraadi kohta. Teoreetiline efektiivsuslimiit CdTe paneelidel on umbes 30%, praktikas on paneelide efektiivsus 10-11 %. Tänapäeva CdTe paneelid on mitmekihilised seadmed, kus üks kihtidest on CdS ja teine CdTe, mis on omavahel ühendatud p-n siirdega [3].

Valgus siseneb elementi läbi materjali, mis peab olema läbipaistev. Paneeli tootmisel kantakse esiklaasile esmalt läbipaistev ja elektrit juhtiv oksiid (edaspidi TCO)[vt Lisa 6]. Tavaliselt kasutatakse selle jaoks fluoriga töödeldud tinaoksiidi, tinaga töödeldud indiumoksiidi või alumiiniumi ja kaadmiumstannaadiga rikastatud tsinkoksiidi. TCO peale kantakse absorberkiht, mis koosneb kahest kihist. Esimene kiht on n-tüüpi pooljuhi kiht, näiteks CdS. Teine päikeseelemendi kiht on p-tüüpi CdTe absorber. TCO/CdS/CdTe hübriidstruktuuri karastatakse kloori ja hapnikku sisaldava ümbriskihi abil, mida nimetatakse aktivatsiooni töötluks. Peale päikeseelemendi kihti lisatakse metalliline taga kontakt ja tagaklaas [6].

3.5 Orgaanilised päikeseelemendid

Orgaanilised päikeseelemendid (OPV) on elemendid, mis on tehtud orgaanilisest, enamasti süsinikupõhisest pooljuhi molekulidest või polümeeridest. OPV muundavad päikesekiirgust elektrienergiaks. Nad on väga erinevad anorgaanilistest päikese-elementidest nii ehituselt, kui ka tootmisviisist. OPV kantakse õhukesetele, enamasti 10-100 nm kihtidele, kasutades printimist, vaakumaurustust, rullimist ja tänu sellele on OPV elemente lihtne masstootmisesse suunata. Võimalus masstootmiseks langetab OPV elementide hinda ja pakub konkurentsi rüni päikeseelementide kõrgele hinnale. OPV elemente on väga lihtne kasutada tarbeelektronika, tekstiilide või painduvate struktuurielementide tootmises, kuna OPV elemente saab nendele pindadele kanda. Tootmisel kasutatakse tavaliselt klaasi või plaste, kusjuures uurimistes kasutatakse enamasti klaasi, kuna see on odav, stabiilne ja heade barjääri omadustega. Laboratoorselt kasutatakse enamasti plaste nagu polüetüleenitereftalaat, polüeetersulfonaat ja polükarbonaat [6].

Sobivad substraadid OPV elementide jaoks peaksid täitma järgmisi tingimusi:

1. Madal hind.
2. Keemiline ja termiline vastupidavus mitmekordsete töötlemiste vältel.
3. Vastupidavus mehhaanilisele pingele ja keskkonna teguritele.
4. Hea optiline läbitavus [6].

3.6 PV paneelide lisaseadmed

PV paneele saab asetada maha või hoonete katustele, paneele saab ka hoonesse integreerida (nt PV-paneelidest katused). Kui paneel on osa hoone fassaadist, siis peab lisaks elektritootmisele olema tagatud ka ilmastikukindluse ja soojusisolatsioon. Fassaadisisesed paneelid pakuvad hoonetele sünergia ja visuaalselt rahuldavat lahendust. PV paneelid peavad vastu rohkem kui 25 aastat, mistõttu peaks ka hoone ja paneelide toetus olema planeeritud sama vastupidavaks. Paneelidega kaasnevateks peamiseks lisaseadmeteks on akud, inverterid ja laadimisregulaatorid [3].

3.6.1 Akud

Akusid on vaja, et võimaldada elektri kasutamist ka aegadel, millal paneel ei tooda, näiteks öösel või kui paneeli tootlikkus jääb tarbimisele alla. Akusid kasutatakse enamasti eraldiseisvate PV süsteemide korral, mis pole ühendatud elektrivõrguga. Aku tuleks valida vastavalt võimsusele ja elektri kättesaadavuse vajalikkusele. Akud tuleb asetada hea ventilatsiooni ja stabiilse temperatuuriga ruumidesse, et vältida akude termilisi kahjustusi. Tänapäeval enimkasutatavad on plii-, nikkel-kaadmium-, nikkel hüdriid- ja liitiumakud. Pliiakud on kõige laialdasemalt kasutatavad. PV paneelide akud peavad olema korduvalt täis- ja tühjaks laetavad ilma kahjustusteta. Kuigi PV paneelide akud sarnanevad autoakudega, ei kannata autoakud pidevat tühjenemist ning seetõttu ei tohiks neid PV paneelide puhul kasutada. Elektrimahtuvuse suurendamiseks võib akusid ühendada rööbiti. Aku salvestab energiat, kui tootlikkus ületab tarbimist ning salvestunud energiat kasutatakse, kui tarbimine ületab tootlikkust või kui tootlikkus on null. Akusid liigitatakse elektrimahtuvuse järgi, mille mõõtühikuks on amper tund (Ah) [3].

3.6.2 Inverterid

Inverterit kasutatakse, et muuta PV paneelist tulenev vahelduvvool alalisvooluks. Inverteri väljund saab olla kas ühe või kolmefaasiline. Invertereid liigitatakse võimsuse järgi, mis võib olla mõnesajast vatist kuni mõne megavatini. Peale selle, et inverter muudab vahelduvvoolu alalisvooluks, peab inverter alalisvoolul hoidma ka konstantset voolutugevust, võimalikult

efektiivselt. Inverteri efektiivsust hinnatakse seda kõrgemaks, mida vähem ta elektrit voolu muundades kasutab ning efektiivsus jõuab maksimumini, ehk üle 90%, kui PV paneelide jõudlus on vahemikus 30-50% neile määratud maksimumjõudlusest. Kui PV paneel on varjus, langeb paneeli toodang märgatavalt, mis mõjutab negatiivselt ka inverteri efektiivsust. Inverteri efektiivsus sõltub tööpunktist, opereerimislävendist, sagedusest, PV paneeli efektiivsusest. Paneelidel saab kasutada ka mikroinvertereid, mis on mõeldud kasutamiseks igale paneelile eraldi. Mikroinverteritel põhinev lahendus, ehk moodulinverterite süsteem on siiski mõnevõrra kallim [3].

Moodulinverterite plussid:

1. Igat moodulit või paneeli opereeritakse tema maksimaalses võimsuspunktis.
2. Moodulite erinevatest karakteristikutest tulenevad kokkusobimatuse kaod vähenevad.
3. Osalised varjud ei mõjuta kõiki paneele.
4. Mikroinverteri rike viib rivist välja ühe paneeli, mitte kogu süsteemi.
5. Paneelide kaabeldamine toimub ainult alalisvoolu peal, mis välistab vahelduvvoolu kaablitest tulenevad ohud.
6. Mikroinverterite tihedam kasutamine suurendaks nende tootmist ja alandaks hinda [7].

Mikroinverterite kasutamisel on ka miinuseid, mida saab kõrvaldada, töötades välja keerukamaid ja kallimaid lahendusi. Mikroinverterite miinused:

1. Moodul integreeritud mikroinverterid on suure termilise koormuse all, tulenevalt paneelide tüüpilisest kõrgemast temperatuurist. Ülekuumenemise vältimiseks disainitakse keerukamaid ja parema lahendusega komponente, sest ka mikroinverter süsteemidele antakse üldiselt 25 aastast garantiid.
2. Moodul integreeritud mikroinverterite vahetamine on väga kallis, näiteks fassaadisisesed inverterid, mis on hoone osaks ehitatud.
3. Mikroinverterid peavad olema kontrollitavad ühest keskusest. Võimalik on kasutada invertereid mis on juhtmevabalt kontrollitud, kuid see lahendus on jällegi kallim ning nõuab vastava tarkvara väljatöötamist.
4. Kuna inverteri efektiivsus langeb koos paneeli tootlikkuse langemisega, peab arvestama sellest tulenevat tootlikkuse kadu [7].

3.6.3 Laadimiskontrollerid

Laadimiskontrollerid reguleerivad akude laadimist ning hoiavad akusid ülelaadimise eest. Kontroller saab olla kõrvalejuhtiv või järjestikku juhtiv. Vajadusel takistab kontroller akude

täielikku tühjenemist ning sellest tulenevaid võimalikke kahjustusi akule. Tavaliselt arvestab kontrolleri töötamispinget aku lubatud pinge järgi. Kasutusel on ka vastupidine variant, kus paneel töötab maksimaalsel võimsusel ja sellele vastaval optimaalsel pingel, arvestamata aku maksimaalset pinget. Iga elektriline süsteem kasutab kontrolleri ja kontrollimisstrateegiat, mis määrab komponentide vahelisi toiminguid. Laadimiskontroller reguleerib energia voogu PV süsteemist akudesse, mis laetakse kasutades aku vastuvõetavat maksimum ja miinimum pinget [3].

4 PÄIKESEKOLLEKTORID

Päikesekollektorite peamine eesmärk on võimalikult väikeste kulutuste juures koguda võimalikult palju päikeseenergiat.

Päikesekollektoreid eristatakse enamasti liigutatavuse poolest. Päikesekollektorid võivad olla liikumatud, ühedimensionaalselt järgivad või kahedimensionaalselt järgivad. Esmalt vaatleme statsionaarseid kollektoreid, mis on paigal, ega liigu üheski suunas [3].

4.1 Statsionaarsed kollektorid

Statsionaarsed kollektorid jagunevad kolme pearühma:

1. Lame-paneel kollektor
2. Paraboolne kollektor
3. Torujas kollektor [3]

4.1.1 Lame-paneel kollektor

Päikesekiirgus liigub läbi läbipaistva kihi ning seejärel edasi absorberile, mis on valgust neelavast materjalist. Energia liigub mööda absorberit soojuskandjale ning edasiselt saab seda salvestada või kasutada. Absorberi tagaosa ja küljed on hästi soojustatud, et soojuskaod oleks minimaalsed ja kollektor oleks võimalikult efektiivne. Soojuskandja torustik on tavaliselt absorbermaterjali külge keevitatud või asub selle sees. Kõige tavalisem lame-paneel kollektori tüüp on serpentiin tüüpi kollektor, kus vedelik jookseb ühest otsast sisse ja teisest välja, läbides paneeli sees maksimaalselt pika teekonna. See tagab et vedelik, olles paneeli sees, saab piisavalt energiat endaga kaasa transportida. Serpentiin tüüpi paneel ei funktsioneerib naturaalse tsirkulatsiooni korral ning vajab soojust sisaldava vedeliku transportimiseks ringluspumpa. Lame-paneel kollektorite eeliseks on odav hind ja madalad tootmiskulud, lisaks koguvad nad nii otsest, kui ka hajutatud kiirgust. Kollektorid peaksid olema suunatud otse ekvaatori poole, ehk lõuna poole põhjapoolusel ja põhja poole lõunapoolusel. Sobiv kaldenurk kollektoril on

enam-vähem võrdne geograafilise laiuskraadi väärtusega, kus kaldenurk võib vastavalt asukohale erineda soovitatavalt kuni 15 kraadi. Lame-paneel kollektoreid saab ehitada väga erinevatest materjalidest ja soojuskandjaks on enamasti tavaline vesi, vesi koos antifriisiga või õhk. Soojuskandja võib põhjustada liikumise toimet ummistusi, mis on tingitud aluselisusest, happelisusest või tihedusest. Vaatamata korrosioonile ja torude ummistumisele peaks paneelil olema väga pikk eluiga [3].

Päikesekollektori absorber neelab endasse võimalikult palju kiirgust läbi klaasi, kaotades samas võimalikult vähe soojust ümbritsevasse keskkonda. Energia salvestamine peab olema efektiivne ning selleks peab kollektori absorber olema päikesekiirgust hästi neelav. Absorberil peab samas olema madal kiirguse tagasipeegeldus atmosfääri. Sellist pinnatüüpi nimetatakse selektiivseks pinnaks. Kollektori pind päikesekiirguse neelamiseks peab olema tume, tavaliselt on must või tumesinine. Selektiivsed pinnad saadakse elektrokeemilisel töötlusel. Selektiivsed pinnakatted on vajalikud, kui vajatakse väga kõrget paneeli sisetemperatuuri võrreldes ümbritseva keskkonna temperatuuriga. Kõige odavam suure neelduvusega materjal on matt must värv, aga see pole selektiivne materjal ja seetõttu oleks sellise kattega päikesekollektori tööefektiivsus madal ning paneel kaotaks töövõime, kui temperatuur paneelis on üle 40°C ümbritsevast temperatuurist. Tänapäeval laialdaselt kasutatavad absorberid toodetakse elektroplaatimise, anodeerimise ja selektiivsete värvidega. Kõige enam kasutatakse siiski selektiivseid värve millest enimlevinud on must kroom. Kui pinna ebatasasus on väiksem lainepikkusest, mis langeb pinnale, käitub see kui peegel. Kui see ebatasasus on suurem, neelab see pind päikesekiirgust väga hästi. Kõrge kiirguse neeldumine on võimendatud näiteks poorse mikrostruktuuriga materjalide puhul, mille omadus on päikesekiirgust endasse sulgeda ja luua päikesekiirtele lisa kontaktpinda. Pindade ebatasasuse saavutamiseks on võimalik pindu töödelda happega. Happega töötlemise tagajärjel on pinnad päikeseenergiale väga vastuvõtlikud [3].

Vedelikke soendavatel kollektoritel peab soojuskandja torustik olema kollektorplaadiga ühenduses või sellele hoolikalt kinnitatud. Peamiseks probleemiks hea termilise ülekande saavutamisel torustike ja absorberi pinna vahel on selleks tehtavad lisakulutused ja suurenev tootmisaeg. Uuema tootmistehnikana kasutatakse laser ja ultraheli keeviusmasinaid, mis suurendavad keeviste kvaliteeti ja kiirendavad tootmisprotsessi. Ultraheli keevituse suurimaks eeliseks on keevituse läbiviimine toatemperatuuril, mille tulemusel välditakse deformatsioone keeviste piirkonnas. Ultraheli keevitusel jääb keemisest maha õhuke joon, mis vähendab absorberi neelduvust. Laserkeevitusel saab sama tulemuse, kuid laserkeevitusel ei teki

keevitusjälge, mis vähendaks absorberi neelduvust. Lame-paneel kollektori tagumine isolatsioon on tehtud klaaskiust või kiudmatist, et kõrgematel temperatuuridel ära hoida õhu läbilaskvust tagaosast. Ehituses kasutatav klaaskiud ei ole optimaalne, kuna selle sideained võivad kõrgetel temperatuuridel aurustuda ning seejärel kondenseeruda kollektori esiküljele, takistades sellega päikesekiirguse ligipääsu. Lame-paneel kollektorid on maailmas enim kasutatavad kollektorid. Peamiselt kasutatakse neid madalatel temperatuuridel, kuni 80°C [3].

4.1.2 Õhukollektorid

Õhukollektor kasutab päikesekiirgust õhu soojendamiseks. Soojusvaheti paikneb katteklaasi all ja õhk võib liikuda selle sees või ka selle ümber. Soojendatud õhku võib kasutada ringleva soojuskandjana, mis annab oma temperatuuri edasi läbi teise soojusvaheti, olles nii suletud ja steriilses ringluses. Kuid soojendatud õhku võib ka otse ruumidesse puhuda. Sellisel juhul toimib kollektor õhu eelsoojendajana ning asendab klassikalist ventilatsioonisüsteemi soojusvahetit, hoides nii kokku elektrit. Eriti hästi sobib see koos õhkküttesüsteemiga ruumide soojendamiseks või tehnoloogilise kuumaõhu tootmiseks [8].

4.1.3 Vaakumtoru kollektorid

Vaakumtorudega päikesekollektorid on keskmiselt 30% võimsamad kui plaatkollektorid, seda klaastoru sees oleval spetsiaalse kattekihi tõttu, mis ei lase päikesekiirgusel klaastorust tagasi peegelduda. Vaakumtorudega kollektorid on kerged ja sobivad paigalduseks katustele. Torud on varustatud infrapunakiirgust läbi laskva kihiga, mis soodustab süsteemi toimimist ka mõõdukalt pilves ilmaga, mistõttu võimalik päikeseenergiast osaliselt kasu saada ka hajuspilvede korral. Täiendavalt on torukollektori vaakumi tõttu vedelikuosakeste liikumistakistus peaaegu olematu, mis võimaldab energia kiiremat edasikandumist ning päikesekiirguse tõhusamat ära kasutamist [9].

Vaakumtoru kollektori eelised:

1. Vaakumkollektori klaastoru sees on spetsiaalne kattekiht, mis lubab päikesekiirgusel siseneda ilma tagasi peegeldumata. Samuti võimaldab spetsiaalne kiht ammutada infrapuna kiirgust ehk toota soojusenergiat ka hajusast kiirgusest ehk tagab süsteemi toimimise ka pilves ilmaga.
2. Kollektori klaastorus olev vaakum minimeerib soojusülekannet kollektori raamile ning soojakadu võrreldes lamekollektoriga on kaks korda väikesem. Halb soojusisolatsioon muudab plaatkollektori ilmastikuolude (tuul, niiskus) suhtes tundlikuks ning võib seadme paari aastaga kasutuskõlbmatuks muuta.

3. Tänu kollektori soojustorus olevale vaakumile on vedelikuosakeste liikumistakistus peaaegu olematu ja energia edasikandmine kiirem ning seetõttu on ka päikeseenergia ära kasutamine efektiivsem. Vaakum võimaldab vedeliku aurustumise juba 30°C juures, mis muudab kogu soojuse tootmise protsessi efektiivsemaks.
4. Vaakumkollektorid taluvad tugevat tuult, rahet (tera läbimõõte 25 mm ja löögitugevus 10 bar), lund ning külma kuni -30°C.
5. Kollektori koosnemine mitmest eraldi vaakumtorust ning soojuse juhtimine alati vaid ühesuunaliselt kollektorist sojussalvesti suunas tagab kollektori töötamise ka juhul, kui mõni vaakumtoru peaks katki minema.

Vaakumtoru kollektori puudused:

1. Vaakumkollektorid on efektiivsemad külmemate temperatuuride juures ning efektiivsus väheneb otsese päikese kiirguse juures.
2. Vaakumkollektoreid suure lume korral keerulisem puhastada ning nad on kallimad kui lamekollektorid [10].

Vaakum minimeerib ka soojusenergia ülekandumist kollektori raamile, seetõttu on soojakadu võrreldes plaatkollektoriga kuni kaks korda väiksem. Lisaks sellele muudab halb isolatsioon plaatkollektori tundlikuks ilmastikuoludele, s.h. tuulele ja niiskusele, mistõttu võib ta vaid paari aastaga kasutuskõlbmatuks muutuda. Teisest küljest väheneb vaakumkollektorite efektiivsus otsese päikese kiirguse juures, suure lume korral keeruline puhastada ning need on plaatkollektorist kallimad [9].

4.2 Päikest järgivad kollektorid

4.2.1 Päikest järgivad kontsentreeritud kollektorid

Päikest järgivate kontsentreeritud kollektorite peamised eelised:

1. Soojuskandja saavutab kontsentreeritud kollektoris suurema temperatuuri pinnahügie suhtes, kui lame-paneel kollektoris. Järeldub, et kontsentreeritud kollektorite termodünaamiline efektiivsus on suurem.
2. Termiline efektiivsus on suurem, kuna soojuskao ala on võrreldes vastuvõtva alaga väiksem.
3. Peegeldavad pinnad vajavad vähem materjali ja on ehituselt lihtsamad kui lame-paneel kollektorid ehk kulu pinnahügie kohta on kontsentreeritud kollektoritel väiksem.
4. Vastuvõtja väiksema pinna tõttu on selle töötlemine selektiivse kihiga ja vaakum isolatsiooni rakendamine odavam ja ökonoomsem [3].

Kontsentreeritud kollektorite peamised miinused:

1. Kontsentreeritud kollektorid ei peegelda, ega salvesta hajutatud päikesekiirgust, või teevad seda minimaalselt.
2. Peab rakendama järgimis süsteemi, et paneel järgneks päikesele.
3. Kiirgust peegeldavad pinnad võivad kaotada oma peegeldumisvõime vananedes ning peegeldavad pinnad vajavad regulaarset puhastust ja hooldust [3].

Kontsentreeritud kollektorid järgivad päikest pidevalt. Järgimissüsteem peab olema töökindel ja võimalikult täpne. Päeva lõpuks viiakse kollektorid tagasi algasendisse, süsteem peaks liigutama kollektoreid päeva jooksul vastavalt pilvisusele. Lisaks järgimisele peab süsteem kaitsma kollektoreid võimalike ohtude eest nagu tugevad tuuled, ülekuumenemine või soojuskandja voolamise tõkestatus. Ohu ilmnemisel pöörab järgimissüsteem kollektorid fookusest välja, et kaitsta neid tugevate tuulte või ülekuumenemise eest. Järgimissüsteeme on mitmeid, erinevate keerukuse astetega [3].

Peamiselt saab jagada järgimissüsteeme mehhaanilisteks ja elektroonilisteks. Elektroonilised süsteemid on töökindlamad ja täpsemad, ning jagunevad omakorda kaheks alagrupiks:

1. Järgimissüsteem, kus mootoreid juhivad sensorid, mis reageerivad päikesekiirguse intensiivsusele.
2. Järgimissüsteem, kus arvutiga juhivad mootorid saavad sensorite abil tagasisidet päikesekiirguse voo kohta vastuvõtjal.

Esimene järgimissüsteem kasutab kolme valgustundlikku takistit, mis registreerivad fookust, pilvisust ja ööpäeva tsüklit. Järgimissüsteem töötab põhimõttel, et ükski takisti ei ole varjus või kõik on varjus. Kui üks takisti jääb varju, annab see mootorile signaali, et kollektor peab liikuma senikaua, kuni ükski andur pole enam varjus. Kui kõik takistid on varjus, tähendab see mootorile, et tuleb liikuda algasendisse. Saades signaali, talitab mootor järgnevalt:

1. Selge ilmaga fokuseerib päikest võimalikult täpselt.
2. Pilves ilmaga järgib päikest ligikaudselt, vastavalt kiirguse intensiivsusele.
3. Öö saabudes liigub tagasi idasse algasendisse ning ootab päikesetõusu [3].

Andur 1 on paigutatud kollektori idaküljele, mida varjab raam. Andurid 2 ja 3 on installeeritud anduri raamile. Andur 1 on fokuseeriv sensor, mis saab otsest päikesekiirgust, kui kollektor on fookuses. Kui päike liigub, läheb andur 1 varju ja mootor liigutab kollektorit. Andur 2 on pilve andur ja pilvine ilm registreeritakse, kui valgustase langeb alla kindla punkti. Sel juhul käivitub taimer, mis liigutab kollektorit kindla ajavahemiku tagant päikese liikumise suunas. Kui pilv eemaldub ja andurisse tuleb piisavalt valgust, jätkab kollektor tööd anduri 1 järgi. Andur 3 on öö andur, mis käivitub, kui valgustase on väga madal. Andur 3 lülitab elektri vastupidisele releele ja mootori polaarsus muutub ning see pöörab kollektorit kuni algasendi stopperini [3].

Päikese järgimist saab hõlpsasti teha kahe meetodiga. Esimeseks meetodiks on *altazimuth* meetod, mis võimaldab seadme pööramist nii geograafilise laiuse kui ka pikkuse järgi. Nende kahe parameetri järgimine tagab kollektori täpse asukoha päikese suhtes. Meetodit kasutatakse enamasti elliptiliste parabool kollektorite puhul. Teisel juhul järgitakse päikest ainult ühel teljel, kas idast läände või põhjast lõunasse. Tavaliselt kasutatakse ühe telje järgimist hüperboolsete parabool kollektorite puhul. Järgivate kollektorite eeliseks on nende suur tõhusus päeva alguses ja lõpus, võrreldes statsionaarsete kollektoritega. Näiteks suvel, kui päike tõuseb idast, saab järgiv kollektor alustada tootmist varakult, olles ida-lääne suunal ennast paika seadnud, kui tavaline statsionaarne kollektor saab neelata vaid lõuna poolel olevat hajutatud kiirgust. Tänu sellele on vähepilvistes paikades järgivad kollektorid efektiivsemad [3].

4.2.2 Hüperboolne parabool kollektor (PTC)

Kõrgete temperatuuride efektiivseks omandamiseks vajatakse suure jõudlusega päikesekollektoreid. PTC on efektiivne ja odav lahendus, saavutamaks temperatuure 50-400°C. PTCsi toodetakse peegeldavat materjali paraboolseks painutades. Vastuvõtjaks on must metalltoru, mis on kaetud klaasiga. Klaaskihiga tagatakse päikesekiirguse läbivus ja soojuskadude vähenemine. Klaaskiht aga takistab päikesekiirte läbilaskvust umbes 10%, kui

klaas on puhas. Klaaskihil on tavaliselt peegeldumisvastane kiht, mis suurendab päikesekiirte neelduvust. Maksimaliseerimiseks saavutamiseks paigutatakse vastuvõtja toru mööda paneeli fookuskeset. Vastuvõtja toru pikkus on enamasti 25-150 meetrit. Kui parabool on suunatud päikese poole, peegeldab paraboolne kollektor langeva päikesekiirguse vastuvõtjale. Kontsentreeritud kiirgus vastuvõtja torul soendab torus olevat vedelikku ja tekkiv soojus transportitakse kasutusse. Kasutatakse ühedimensionaalset järgimist, mille tulemusel saab kollektoritest koostada pikki mooduleid. Kollektor võib olla suunatud ida-lääne poole, järgides põhjast lõunasse või suunaga põhja-lõuna poole, järgides päikest idast läände [3].

1. Ida-lääs asetuse eeliseks on vähenenud liikumisvajadus päevasel ajal. Kollektorid asetsevad keskpäeval alati päikesega risti ja tootlikkus on suur, kuid hommikul ja õhtul on päikesekiirguse langemisnurgad suured ja tootlikkus madal.
2. Põhi-lõuna asetuse puhul on tootlikkus kõige väiksem keskpäeval, kuid hommikul ja õhtusel ajal on tootlikkus hea, kui päike on idas või läänes. Aasta lõikes on põhja-lõuna asetuse veidi parema tootlikkusega kui ida-lääne asetuse. Põhi-lõuna asetusega kollektor kogub väga palju kiirgust suvel ja talvel väga vähe. Ida-lääne asetusel on aastaringne tootlikkus stabiilsem. Asendi valiku peaks langetama vastavalt energia vajadusele erinevatel aastaaegadel. PTC on arenenuim päikese soojuse tehnoloogia kuna paigaldamine ja tootmine on odavamad ega nõua palju aega. Kollektorite pesemisvajadusest tulenevaid kõrgeid hoolduskulusid püütakse vähendada automaatsete pesemissüsteemidega, mis on tänapäeval saanud üha populaarsemaks [3].

Kollektorite efektiivsuseks ja tasuvaks tootmiseks on vaja võimaliku väikese massi juures suurt vastupidavust ja jäikust. Oluline on, et materjali ja tööjõukulu oleks minimaalne. Tuginedes tänapäevastele keskkonnauuringutele on peegelduv klaas enimkasutatavam kollektorite pinnakattena. Kasutatakse ka peegelduvaid materjale mis on isenakkuvad, kuid elueaga 5-7 aastat [3].

4.3 Torn päikeseelektrijaamad

Torn päikeseelektrijaamades on päikesekiirgus kontsentreeritud jaama keskmes asuvasse torni, mille tipus asub vastuvõtja. Torn ümbritseb tavaliselt sadu, kuni tuhandeid kollektoreid, vastavalt sellele, kui võimsat jaama on vaja. Peeglite suunamiseks kasutatakse järgimissüsteeme ja *altazimuth* meetodit, mille kohaselt liigub kollektor igas suunas. Kasutatavad kollektorid on kergelt nõgusad, et päikesekiirgus kontsentreeruks tornile efektiivsemalt. Kontsentreeritud soojusenergia, mis vastuvõtjasse salvestub juhitakse

soojuskandja abil aurugeneraatori auruturbiini, mis toodab elektrit võrku või juhitakse soojus salvestisse, hilisemaks kasutamiseks. Soojuskandja on tornis suletud ringluses [3].

Torn päikeselektrijaama eelised:

1. Päikeseenergia suunatakse optiliselt ühele vastuvõtjale, mis minimaliseerib soojusenergia transporti ja sellest tulenevaid soojuskadusid.
2. Energia kogumine ja muundamine elektriks on väga efektiivne.
3. Soojusenergiat on lihtne hoiustada.

Igal kollektoril on umbes 50-150 m² peegelduspinda, kus üks kollektor koosneb neljast peeglist, mis on asetatud samale raamile. Kollektorid asetsevad torn päikeselektrijaamades enamasti kolmes erinevas konfiguratsioonis:

1. Kollektorid ümbritsevad torni täielikult ja vastuvõtja on silindriline ning sellel on väline soojust juhtiv kiht.
2. Kollektorid asuvad tornist põhja pool ja vastuvõtjal on suletud soojust juhtiv kiht
3. Kollektorid asuvad tornist põhja pool ja vertikaalse tasandiga vastuvõtjal on põhja poole suunatud soojust juhtiv kiht [3].

5 PÄIKESEENERGIA KASUTUS EESTIS

Eesti asub põhjapoolkeral 59°40' ja 57°30' laiuskraadi vahel. Pilviseid päevi on Eestis aastas umbes 180-200. Aastaaegade poolest on päikesekiirguse intensiivsus väga erinev. Atmosfääri üldine õhuringlus võimendab aastaajalisi erinevusi päikesekiirguses. Atmosfääri läbimisel nõrgeneb valgus mõnedel lainepikkustel väga tugevasti. Osoonikiht löikab ära spektri ultravioletse osa, mis on lühem kui 290 nm. Nähtava valguse ja infrapunase osas neelavad tugevasti veeaur, süsihappegaas ja õhuaerosool [11]. Detsembris, kui tsüklonid lähevad üle Eesti on päikesepaiste kestvus 4-14% maksimumist. Suvine päikesepaiste kestvus on 60-55% maksimumist. Päikesepaiste intensiivsus on suurim Lääne-Eestis ja madalaim Peipsi järve lähistel [vt Lisa 5]. Näiteks Tartus on päikeseenergiat juunikuus 172 kWh/m², aga detsembris ainult 7,8 kWh/m² [12].

Eesti ja kogu Põhja-Euroopa päikeseenergia ressursist moodustab hajuskiirgus ligikaudu 50% [vt Lisa 2]. Päikeseenergiat langeb Eesti pinnale ~1000 kWh/m² aastas [vt Lisa 3]. Suvesessioon, mis kestab aprillist septembrini, on päikeseenergia kasutuseks kõige sobivam ja siis langeb Eestile 88% kogu otsesest- ja 77% hajuskiirguse aastasest energiast. Kuna talvel on hajuskiirgust rohkem, kui otsesest päikesekiirgust on hajuskiirgus Eestis oluline ressurss. Hajuskiirgus tekib päikesekiirguse hajumisest atmosfääris ja peegeldumisest pilvedelt ning selle osakaal on selge ilmaga 10-20%, lauspilvisuse ja lahkpilvede varjude puhul on kogu kiirgus hajuskiirgus [13]. Hajuskiirguse suure osakaalu tõttu ei ole Eestis otstarbekas kasutada süsteeme, mis kasutavad ainult otsesest päikesekiirgust, nagu torn päikeseelektrijaamad ja muud kontsentreerivad kollektorid [12].

Ennustatavalt on Eestis päikesepaneelidega aastaks 2050 kaetud 45 km². 1 m² ränil baseeruv PV paneel annab Eesti tingimustes tipuvõimsust 150 Wp ja toodab optimaalse paigutuse korral 130 kWh elektrienergiat aastas [14].

5.1 Päikesepaneelid Eestis

5.1.1 Valik ja paigaldamine

Arvutused annavad katusel paneelide optimaalseks kaldenurgaks lõuna suunal 40°. Tegelikult pole märkimisväärset vahet aastases toodangus kui paneelide kaldenurk jääb vahemikku 30°...45° [5].

Katuse pinna optimaalseim kasutus oleks siis kui paneelid paigaldatakse kaldega 30°. Tootlikkus ruutmeetri kohta võrreldes 40 kraadise kaldega paneelidega väheneb ligikaudu 1%,

kuid kasutatav pind suureneb 5 % võrra, mistõttu suurema arvu paneelide installeerimisest tulenev summaarne aastane tootlikkus suureneb teoreetiliselt 10%. Paneelide paigaldusel kaldega 30° tuleb arvestada mustumisest tingitud kadudega 2...10%, väiksema kaldega paigaldamisel suurenevad mustumisest tingitud kaod märgatavalt. Talvise väikese tootlikkuse tõttu on paneelide lumest puhastamise majanduslik tasuvus küsitav ja vajab konkreetse lahenduse puhul eraldi hindamist [5].

Teine oluline analüüsi osa on PV-paneelide asimuut ehk suund lõuna suhtes ja sellest sõltuv kiirgus 30-kraadise kaldega PV-paneelidele. Päikesekiirgus pinnauhikule ei muutu kui PV-paneele pöörata lääne või ida suunal 15 kraadi. Kui paneelid on pööratud lõuna suhtes 15...25 kraadi, siis toob see kaasa ca 1% päikesekiirguse languse pinnauhikule sealhulgas ka samaväärse tootlikkuse languse. Et tagada sama tootlikkus, mis on lõunasuunaliselt paigaldatud paneelidel, on soovitatav valida paneelide asimuut vahemikus ± 15 kraadi [5].

PV paneele võib integreerida ka fassaadiga, kuid sellisel juhul tuleb arvestada PV paneelide omadustega. Suurema läbipaistvusega ehk valguse läbilaskvusega (transparency) moodulite puuduseks on väikesem nimivõimsus ruutmeetri kohta. Reeglina amorfsete räni paneelide läbipaistvus pole suurem kui 20%. Kui soovitakse saada suuremat läbipaistvust või heledust fassaadi taga, siis kasutatakse erineva mono- või polükristall PV-elementide muustriga paneele. Kuna mono- ja polükristall PV-elementidel on suurem kasutegur, siis vaatamata suuremale läbipaistvusele on neil tootlikkus pinnauhikule reeglina samaväärne või parem kui thin-film paneelidel [5].

PV paneelide valimisel ja projekteerimisel tuleb arvestada mitmete asjaoludega:

1. PV-paneelide ebahühtlane mustumine mõjutab oluliselt paneelide väljundvõimsust ja selle üksikelementide eluiga. Sellest tulenevalt tuleb paneelide valikul eelistada PV-paneele, millel on suuremal arvul möödaviik (bypass) diode. Möödaviik diodidele peavad olema tagatud head jahutustingimused.
2. PV-paneeli pinna 2% katmine või varjamine võib teatud juhtudel vähendada tootmisvõimsust kuni 70%. 18 elemendi ja 2 möödaviikdiodiga moodulil ühe elemendi 50% varjamine vähendab mooduli võimsust 50%.
3. Projekteerimisel tuleb silmas pidada, et otsese päikesekiirguse mõjul võib PV-paneelide temperatuur olla 20 kuni 40 kraadi kõrgem ümbritsevast temperatuurist. Selline temperatuuri tõus põhjustab PV-paneelidel täiendavaid võimsuskadusid, mida saab vältida paremate jahutustingimuste tagamise abil.

4. Paneelide valikul pöörata tähelepanu temperatuuri koefitsientidele, mis väljendab kadu temperatuuri ühekraadise muutuse kohta.
5. Käidukulude vähendamise seisukohalt tuleb projekteerimisel arvestada sellega, et PV paneelide mustumine toimuks võimalikult aeglaselt, kontrollimine ja väljavahetamine oleks kiire ja lihtne, vastupidavus keskkonnatingimustele sh tuule survele ja lumele oleks oludele vastav.

Eelistada tuleks standardseid tooteid nt seadmeid, mille tootlikkus on pärast 25 aastast käitu vähemalt 80% esialgselt [5].

5.1.2 Maksumus

PV paneelide süsteemi maksumus sõltub installeeritud süsteemi suuruselt. Suurema süsteemi puhul on hind 1 W kohta odavam. Tabelis 1 on toodud PV paneelide maksumuse prognoosid järgneva 15 aasta kohta. Süsteemi hinnale on arvestatud juurde inverteri- ja paigalduskulud [14].

Süsteemi suurus installeeritud võimsuse järgi	2012	2020	2030
Väike süsteem, kuni 10 kW, €/W	1,8	1,5	1,2
Keskmine süsteem, kuni 100 kW, €/W	1,6	1,2	1
Suur süsteem, üle 100 kW, €/W	1,3	1	0,8

Tabel 1. PV paneelide installeerimise maksumus [15]

PV jaama installeerimise puhul tuleb arvestada jaama tootlikkuse muutumist aasta lõikes. Eestis on PV jaamad kõige tootlikumad suvel, kui elektritarbimine on madal ja kõige vähemtootlikumad talvel, kui kodumajapidamiste elektritarbimine on kõrge [vt Lisa 1]. Talvel tuleneb PV süsteemi madal tootlikkus päikese madalast kaldenurgast [16].

Lisaks on tootmise nihe avalduv päeva lõikes. Enamasti tarbitakse elektrit hommikul ja õhtul, aga PV süsteem pole hommikul veel tootmist alustanud, toodab enamasti päeva keskel ja lõpetab tootmise enne õhtu saabumist [vt Lisa 1]. PV süsteemist üleliigset elektrit võrku müüa on keskpäeval kõige tulusam börsi hinnaga, kuna Nord Pool Spoti börsi hinnad on igapäevaselt kõrgeimad keskpäeval. See vähendab PV süsteemi tasuvusaega ja suurendab tarbija jaoks paneeli efektiivsust [16].

5.2 Päikesekollektorid Eestis

Päikesest soojusenergia tootmise efektiivsus on Eestis kõrgem võrreldes elektri tootmisega päikeseenergiast. Kuna kollektorite efektiivsus sõltub suuresti nende tehnoloogiast, on kollektorite keskmiseks efektiivsuseks 33% [12].

Madaltemperatuurilisi päikesekollektoreid saab Eestis edukalt kasutada nii sooja tarbevee tootmiseks kui ka küttesüsteemi toetava lahendusena, suvisel päikesepaistelisel ajal on võimalik katta kogu tarbimise vajadus. Peamiselt kasutatakse kahte tüüpi päikesekollektoreid: plaatkollektorid ning vaakumtorudega kollektorid [9].

Vaakumtoru kollektorid sobivad hästi külmema välisõhu temperatuuridega nagu Eestis on, sealjuures pakkudes soojusenergiat järjepidevamalt kui lamedad plaatkollektorid (pigem kasutuseks soojemas kliimas, rohke otsese päikese kiirgusega) [9].

Kõige efektiivsemaks lahenduseks Eesti jaoks on vaakumtorudega kollektoreid. Eesti kodumajapidamises sooja vee tootmine suvel on hea valik. Päikesekollektori säästvus on 5-15%, kui teda kasutada ainult majapidamisvee soojendamiseks, kui arvestada ka päikesekollektorite kütteotstarvet, on sääst 20-60% majapidamise soojusenergia vajadusest. Päikeseenergiast toodetud soojusenergia on odavam soojusenergia allikas Eestis ning on kindlasti odavam, kui toota soojusenergiat elektrist [12].

5.2.1 Valik ja paigaldamine

Lihtsustatud reegel kollektorite kasutamisel tarbevee soojendamiseks:

- Kollektori suurus: 1...1,5 m² inimese kohta
- Salvesti suurus: 80...100 l inimese kohta
- Vaakumtorudega kollektorite puhul võib kollektori pindala vähendada ca 30% võrreldes lamekollektoriga
- Alla 3...4 m² kollektorite puhul kadude osakaal torudes kõrge (üle 15%)

Päikesekollektor paigaldatakse maja lõunapoolsele küljele ja tavaliselt katusele, kuid kollektoreid võib kinnitada samuti seinale või maapinnale. Kollektori kaldenurk peab olema selline, et ta oleks enamuse päevaajast risti päikesega. Seega tuleb kollektori kaldenurga seadistamisel arvestada geograafilist laiuskraadi. Kui on soov kasutada rohkem kevadist ja sügist päikese kiirgust võib kaldenurka suurendada, aga arvestada tuleb veel sellega, et kaldenurga suurenedes suureneb ka tuulekoormus kollektorile, eriti plaatkollektoritele. Ülejäänud päikeseküttesüsteemi komponendid paigutatakse tavaliselt olemasolevasse küttevõi abiruumi [17].

Vaakumkollektorid on kerged ning sobivad hästi ainult katustele. Nendel on suhteliselt väiksem purje pind, mis on oluline lamekatustele paigaldusel, viilkatusele paigaldades ei oma purjepind üldiselt tähendust. Vaakumkollektoril on ette nähtud paigalduse nurk, mis Eesti tingimustes on

46° . See vahemik võib tegelikkuses varieeruda 46- 65° vahele. Vaakumkollektori kasuks räägib ka asjaolu, et vaakumtorude ümar pind püüab päikest efektiivselt kogu selle aja kui päike paistab, sest päikese poole on alati vähemalt pool toru pinnast ning lisandub hajusvalgus, mis ümbritseb toru kogu aeg. Kui tegemist ei ole lõunapoolse katusega tuleb arvestada ida või lääne suunas 15% suurema pinnaga [18].

Vaakumtorukollektorite puuduseks on vajadus asetada need vähemalt 45° nurga alla, kuid plaatkollektorid töötavad ka 90° nurga all, seega saab viimaseid paigaldada majade seintele [17].

Väheste saadud andmete analüüsi tulemusel võib väita, et olulisem on paigaldada kollektorid meie laiuskraadidele vastava nurga alla ja kohtadesse (ka suunatuna ilmakaarde), kus päikesekiirgus neile ööpäeva jooksul maksimaalselt peale langeb. Eestis saadud andmetele tuginedes on optimaalne paigaldada kollektorid suunaga lõunasse ja 45° nurga all. Päikesekiirgus muundub kollektoris ringleva soojuskandja (peamiselt vedelikud glükool, etüleenglükool, propüleenglükool) energiaks, mis omakorda kandub üle soojussalvestisse. Suurema võimsuse saavutamiseks lülitatakse jadamisi mitut kollektorit [17].

Suvisel päikesepaistelisel ajal suudab päikesekollektori lahendus pea täielikult katta vajaliku tarbevee vajaduse. Kogu süsteem annab reaalselt kasu umbes 6 kuni 8 kuud aastas. Eestis saab päikesekollektoritega edukalt toota sooja tarbevett veebruari keskelt oktoobri alguseni. Eelistada tasuks vaakumtorudega päikesekollektoreid, sest need suudavad päikesekiirgust paremini kätte saada - nad on umbes 30% võimsamad, kui tasapinnalised kollektorid. Seda seetõttu, et ükskõik, mis ilmakaarest päike paistab, pakub vaakumtorudega kollektor päikesele alati sama neeldumispindala. Tavaoludes ei vaja paneel hooldust, sest tänu vaakumtoru kaarjale kujule hoiavad nii tuul kui vihm paneelipinna puhtana. Toru purunemisel on selle vahetamine lihtne, ei maksa palju ega nõua ohutusnõuete ja kasutusjuhiste järgimisele spetsiaalseid oskusi [19].

5.2.2 Kollektorite tasuvus

Päikeseküttelahenduste ning nende tasuvuse puhul on reeglits - mida keerulisem ning integreeritum on algne süsteem tehniliselt, seda lühem on ka tasuvusaeg. Ehk, kui tegemist on vaid tarbevett soojendava süsteemiga, on tasuvusaeg pikem, aga kui süsteemiga on liidetud ka küttesüsteemid, on tasuvus lühem. Süsteemide tasuvusaeg algab kaheksast aastast. Süsteemide pakkujad hindavad tasuvusajaks tüüpilistel juhtudel 12...15 aastat [20].

Tasuvuse arvutamisel võetakse arvesse, et keskmiselt saab päikeseküttega tagasi 40% tarbeveele kuluvast energiast. Näiliselt madala protsendi põhjustab talve- ja suvekuude suur erinevus. Kui aprilli algusest kuni augustikuu lõpuni kõigub soojuseks muudetava kiirguse hulk Eestis päevas keskmiselt 4,5...5,5 kWh/m² ümber, siis novembrist veebruarini jääb see alla 0,7 kWh/m² päevas, mis tähendab, et kui juulis saab päikeseküttest 80% vajaminevast tarbeveest, siis detsembris vaid 5% [20].

Tasuvus kollektorite puhul on küllaltki keeruline asjaolu. Probleemaatiliseks asjaoluks on süsteemi projekteerimisel vältida võimalikku ületootmist. Võttes arvesse talvekuid, oleks võimaluseks lisada päikesekollektoreid ning sellega suurendada energia hulka, mida on võimalik vähese valgusega kuudel toota. See tingib aga suvekuudel energia ülejäägi, mida pole kuhugi paigutada - veetarbimisest üksi on vähe, küttevajadus puudub, akumulatsioonipaak täitub ning selle põhjusena võib tõusta soojusvahetusvedeliku temperatuur üle lubatud piiride ning seega rikneda, mis tingib süsteemi hooldusvajaduse [20].

Päikesekollektorite hinnad on väga erinevad. Päikeseküttesüsteemi kogu hind jaguneb laias laastus kolmeks osaks: 1/3 kollektor, 1/3 akumulatsioonipaak ja 1/3 paigaldus- ja ühenduskulud. Oluline faktor alginvesteeringu tegemisel on kasutusaeg – mida pikem see on, seda suurem on tasuvus. Tasuvusajaks arvestatakse praeguste kütusehindade juures umbes 12-15 aastat. Arvestades aga fossiilsete kütuste järjepidevat ning paratamatut kallinemist, lüheneb päikesekollektorite tasuvusaeg kindlasti. Enamik kollektoreid säilitab 100% tootlikkuse 25–30 aastaks. Erinevatest element-osadest kohapeal katusesse monteeritavate seadmete parameetrid püsivad muutumatuna 50–60 aastat [21].

6 KOKKUVÕTE

Bakalaureusetöös on kirjeldatud erinevate päikesepaneelide ja -kollektorite tehnoloogiaid, tööpõhimõtteid ja tootmisprotsesse, mis kujundavad arusaama nende sobivusest ja võimalikust maksumusest Eesti tingimustes. Lisaks on välja toodud päikeseenergia kasutamisel olulised lisaseadmed, mis mõjutavad kasutusprotsessi ja toodud välja erinevate tehnoloogiate eelised ja puudused. Töös on kirjeldatud ka päikeseenergia kasutust meetoditega, mis Eesti tingimustes pole sobivad, kuid on osutunud väga efektiivseks lahenduseks teistes riikides.

On uuritud, millised on päikesekiirguse tingimused Eestis nii aasta, kui ka päeva lõikes ning millised on sobivaimad asukohad ja seadmete asendid päikeseenergia kasutuseks. Esitatud on erinevad päikesepaneelide ja kollektorite lahendused Eesti jaoks ning hinnatud nende lahenduste tasuvusaega ja maksumust.

Jõudsin järeldusele, et Eestis on suhteliselt palju võimalusi päikeseenergia efektiivseks kasutamiseks. Tänu tehnoloogia arengule, mis lubab paremini kasutada hajuskiirgust ning hindade jätkuvale alanemisele on päikeseenergia kasutamise trend kasvav. On reaalne, et tulevikus kasutatakse väga palju mikrotoomist ning tänu paranevatele elektri ja soojuse salvestamise võimalustele tagatakse süsteemide aastaringne stabiilne ja tõhus töö.

7 SUMMARY

In this Bachelor thesis different technologies and working principles for solar panels and – collectors have been discussed, in order to form an understanding on their eligibility and cost in Estonia. Also, related equipment for solar panel- and solar collector systems have been discussed, which influence the efficiency and stability of the systems. Additionally, systems which are not suited for Estonia have also been discussed, since they have a significant impact on other countries energy consumption.

Estonian solar irradiation intensity parameters and location have been researched to give information about irradiation variation over the year and over a day-night cycle. Different solar energy solutions and evaluation of their cost and payback period have been discussed.

I came to a conclusion that Estonia has many possibilities for effective solar energy usage. As a result of a fast advancements in technology and material science, diffuse light has found better use in solar energy systems. Because of the decreasing cost of solar energy appliances the trends in usage have increased. It's safe to say that in the future the use of solar energy in micro production will be broadly used due to the improvements in storing thermal and electrical energy that allow greater stability and efficiency of solar power systems.

8 VIIDATUD MATERJALID

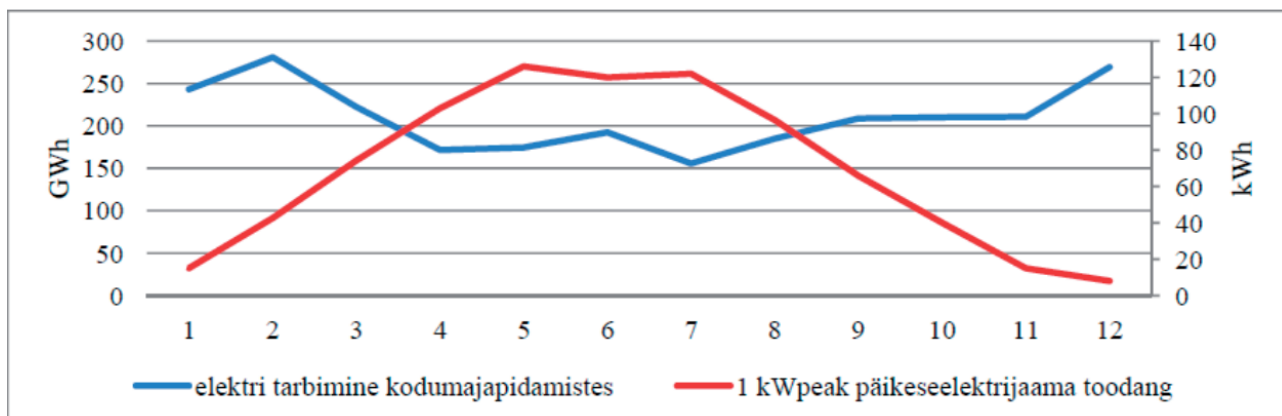
- [1] I. Dincer and C. Zamfirescu, *Advanced power generation systems*, Elsevier, 2014.
- [2] „Timeline of solar cells,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval:
http://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_solar_cells. [Kasutatud 24 mai 2015].
- [3] S. Kalogirou, *Solar energy engineering*, Elsevier, 2014.
- [4] D. G. f. *Sonnenenergie, Planning and installing photovoltaic systems*, Abingdon: Routledge, 2013.
- [5] A. Rosin, S. Link ja I. Drovtar, „Energia lokaalse tootmise analüüs büroohoonele, Osa I,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/b/b9/Energia_lokaalse_tootmise_anal%C3%BC%C3%BCs_b%C3%BCroofoonele_Taastuenergialahendused.pdf. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [6] C. Richter, D. Lincot and C. Gueymard, *Solar Energy*, New York: Springer, 2012.
- [7] M. Kaltschmitt, W. Streicher and A. Wiese, *Renewable energy*, Frankfurt: Springer, 2007.
- [8] M. Muiste ja J. Veskimeister, „Tuule ja päikeseenergia kasutamine Tartu linnas,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/3/36/Tuule_ja_p%C3%A4ikeseenergia_kasutamine_Tartu_linnas.pdf. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [9] „Sõltumatu päikeseenergia teemaline infoportaal,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<http://www.päikeseküte.ee/artiklid/paikesepaneel-paikesekollektor/>. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [10] „Heliokollektorid,“ Heliomaastik OÜ, [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<http://heliomaastik.weebly.com/heliokollektorid.html>. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [11] „Comfort home: Päikeseküte,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval:
<http://www.comforthome.ee/ee/paikesekute/>. [Kasutatud 23 mai 2015].

- [12] INFORSE-Europe, "International network for sustainable energy," [Online]. Saadaval: <http://www.inforse.org/europe/pdfs/Estonia-note.pdf>. [Accessed 23 5 2015].
- [13] T. Tomson, „Hajuskiirgus Eestis,“ %1 *Taastuvate energiaallikate uurimine ja kasutamine*, Tartu, Eesti Maaülikol, 2013, pp. 86-95.
- [14] „Energiatalgud: Päikeseenergia ressurss,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=P%C3%A4ikeseenergia_ressurss. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [15] J. Uiga, „Energiakandjad/Energia muundamiseks kasutatavad ressursid,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://docs.google.com/spreadsheets/d/10zsvX5VKMcKZbm4mKJrdktJYPbJNK3Zihq1g_7XHwS8/edit#gid=9. [Kasutatud 22 mai 2015].
- [16] A. Meesak, „Energiatalgud,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/7/7d/TEUK._kogumik_XV.pdf. [Kasutatud 23 5 2015].
- [17] Ü. Kask ja M. Hüüs, „Eestis kasutatavad päikesekütesüsteemid,“ 2011. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://www.energiatalgud.ee/img_auth.php/a/a5/H%C3%BC%C3%BCs,_M.,_Kask,_%C3%9C._Eestis_kasutatavad_p%C3%A4ikesek%C3%BCttes%C3%BCsteemid_ja_nende_k%C3%A4itamine._2011.pdf. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [18] M. Tuul, „Päikeseenergia,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://päikeseenergia.eu/et/content/p%C3%A4ikesekollektorid>. [Kasutatud 23 5 2015].
- [19] T. Salus, „University of Tartu,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://dspace.utlib.ee/dspace/bitstream/handle/10062/31436/Salus_Toivo.pdf. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [20] Tehnikamaailm, „Energiatalgud,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.energiatalgud.ee/index.php?title=P%C3%A4ikesekollektor>. [Kasutatud 23 5 2015].

- [21] „Ehitus info: Päikeseküte - päikesekollektor,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ehitusinfo.ee/index.php?aid=1713>. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [22] H. T. D. E. O. H. Šúri M., „PVGIS: Solar radiation and photovoltaic electricity potential,“ 2007. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/cmmaps/eur.htm#EE>. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [23] Statistikaamet, „Statistikaamet: Kaardid, Päikesepaiste,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.stat.ee/59793>. [Kasutatud 23 mai 2015].
- [24] A. Urbas, „Tehnikamaailm: Päikeseküte, valisti mõistetud küttesüsteem,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.tehnikamaailm.ee/kodujaehitus/index.php?id=128>. [Kasutatud 23 mai 2015].

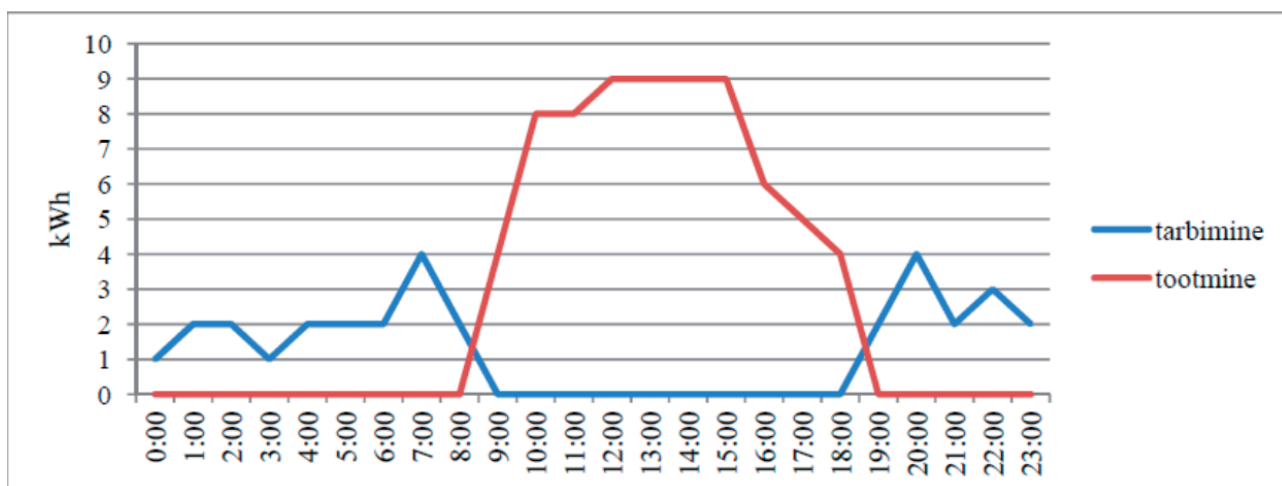
LISAD

LISA 1



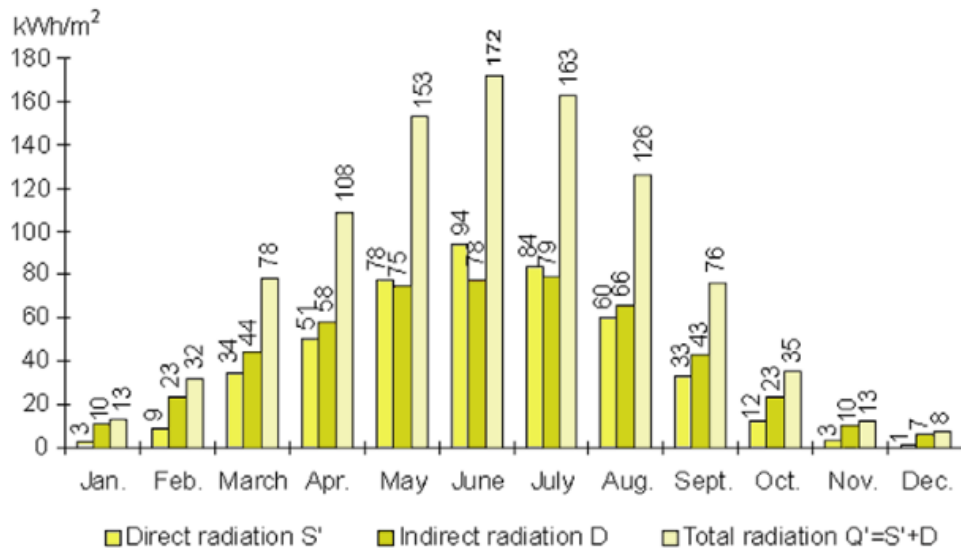
Joonis 1

Eesti majapidamiste kogu elektritarbimine (GWh) kuude kaupa ja Eesti laiuskraadil asuva optimaalselt paigaldatud teoreetilise 1 kW netovõimsusega PV- jaama toodang (kWh). [16]



Joonis 2

Tootmise ja tarbimise nihe ööpäeva piires. Tarbimine on kaetud omatoodanguga ja seetõtu ei kajastu graafikul. [16]



■ Otsene päikesekiirgus S'
 ■ Hajuskiirgus D
 ■ Summaarne päikesekiirgus Q=S'+D

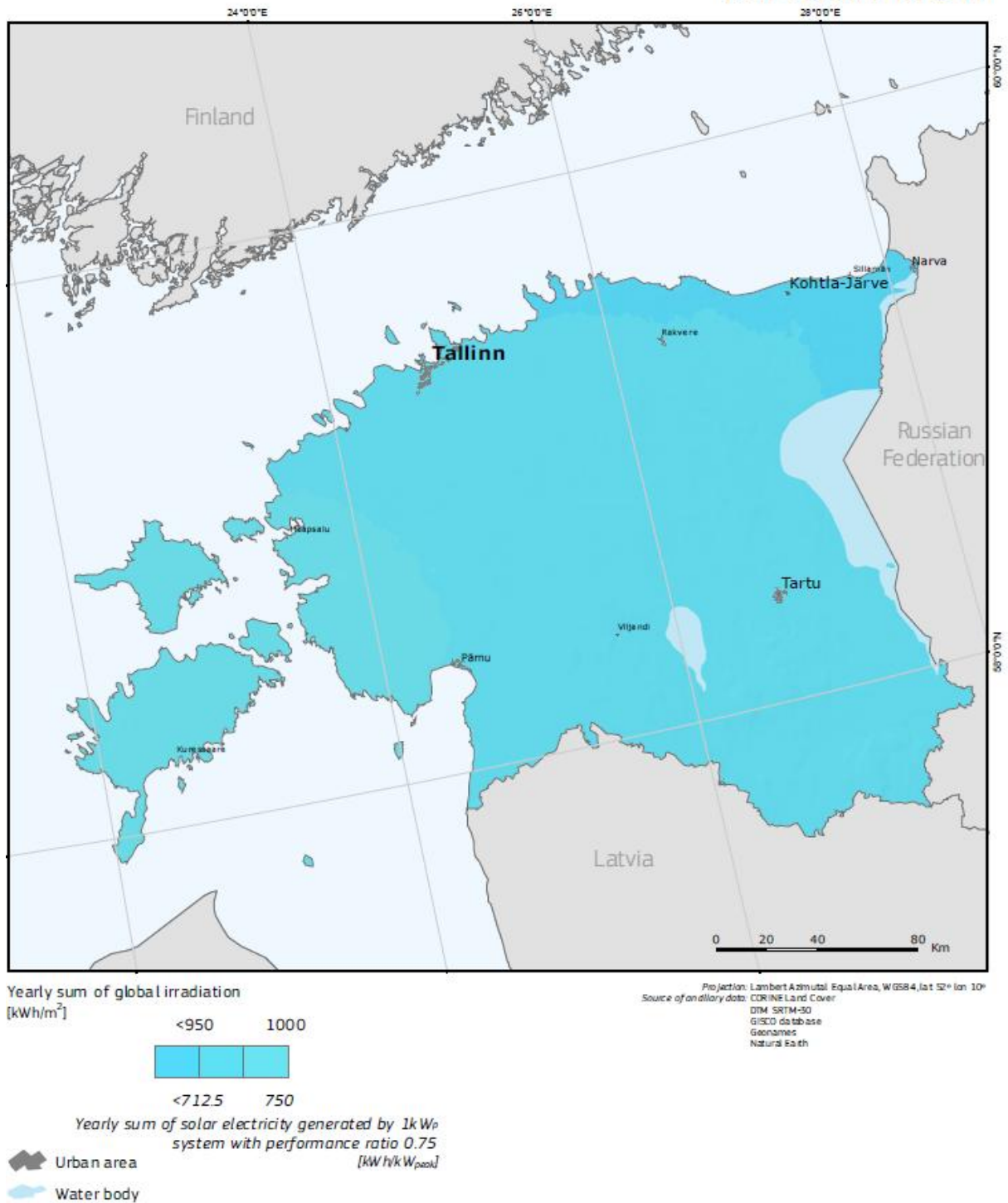
Joonis 3

Otsese-, hajusa ja summaarse päikesekiirguse langemine horisontaalsele pinnale kuude kaupa kWh. [12]

Päikesepaistelise ilmaga saame eristada otsest kiirgust (S') – päikeseketta suunast paralleelsete kiirte kimbuna langev kiirgus ja hajunud kiirgust (D) – taevavõlvi helendust, mis kokku moodustavad summaarse kiirguse (Q). $Q = S' + D$. Pilves ilmaga esineb ainult hajuskiirgus [11].

Global irradiation and solar electricity potential
Horizontally mounted photovoltaic modules

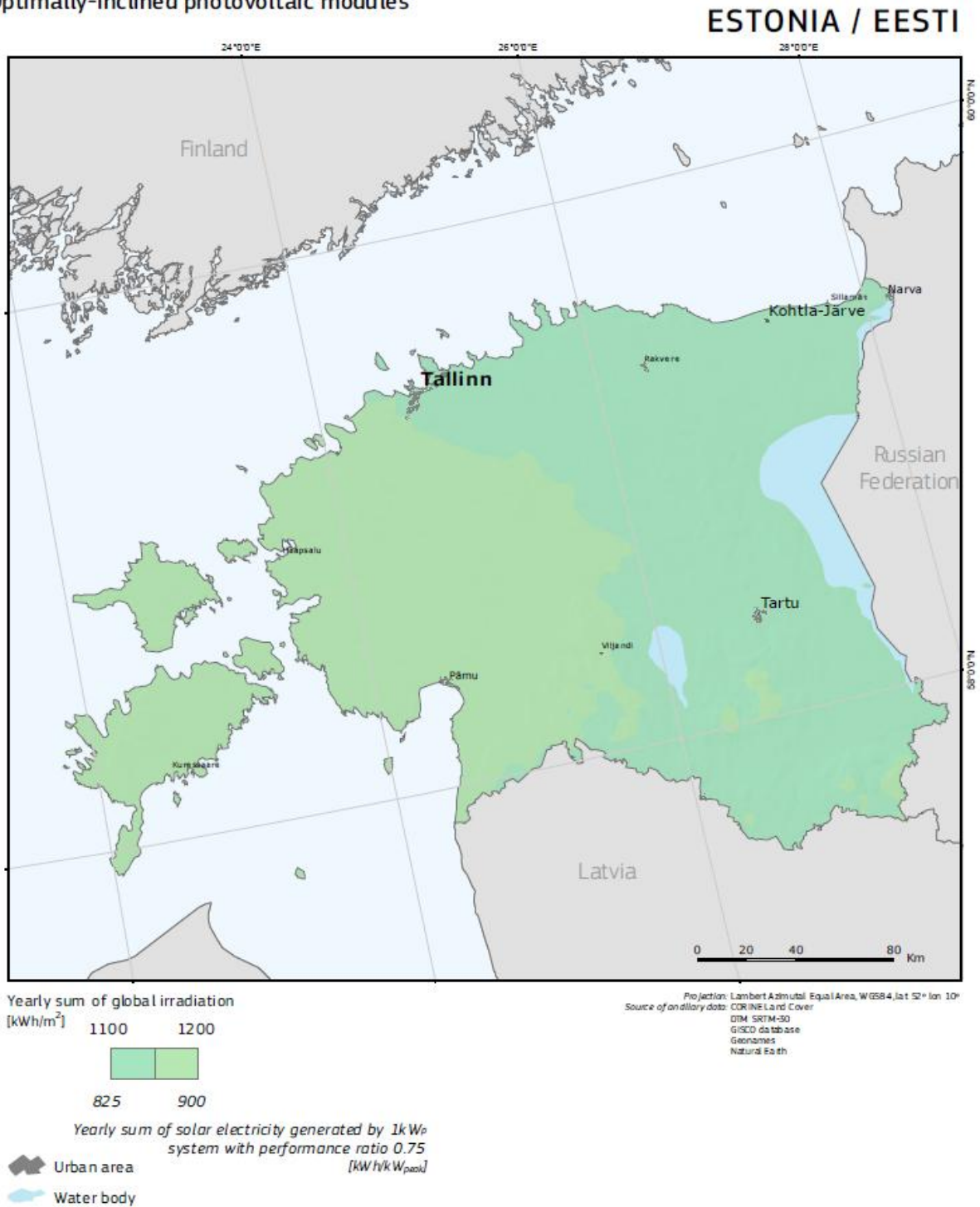
ESTONIA / EESTI



Joonis 4

Aastane summaarne päikesekiirgus Eestis horisontaalsele pinnale. [22]

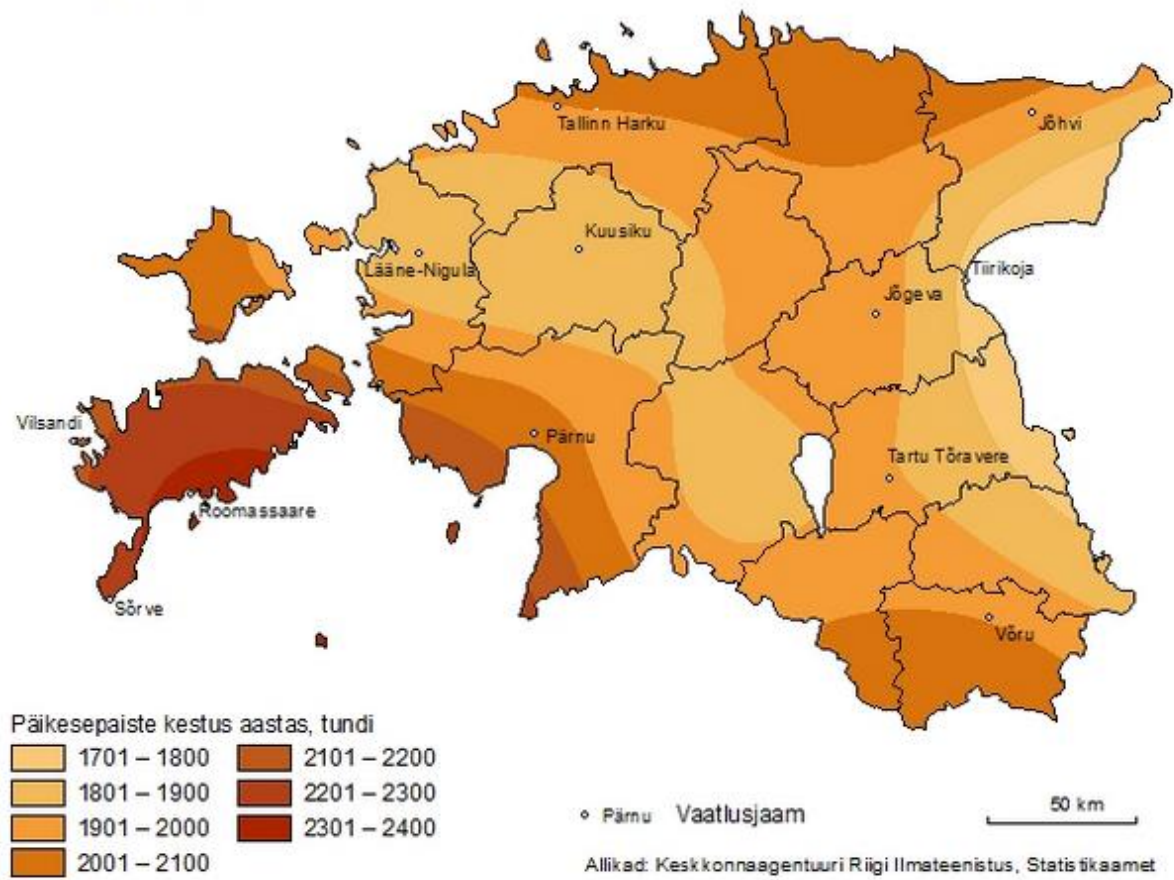
Global irradiation and solar electricity potential
 Optimally-inclined photovoltaic modules



Joonis 5

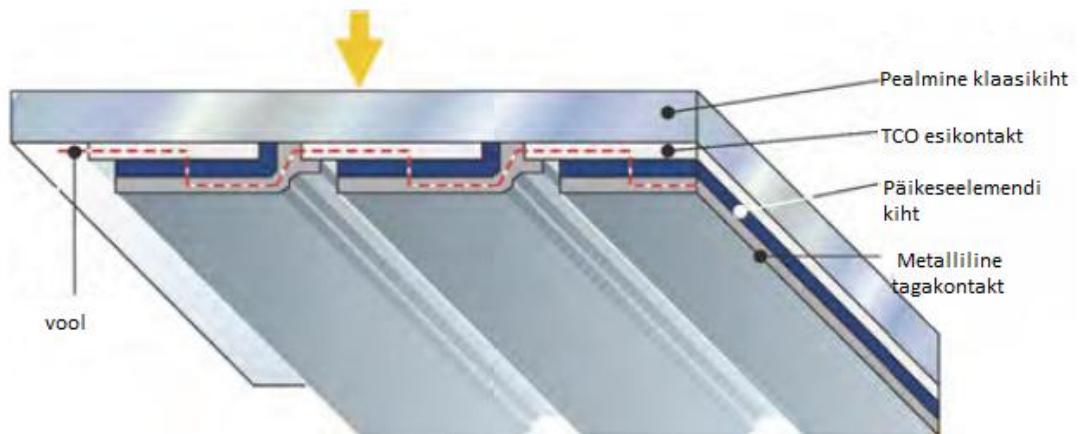
Aastane summaarne päikesekiirgus Eestis optimeeritud kaldenurgaga 1 kW_p PV süsteemil. [22]

Päikesepaiste, 2013



Joonis 6

Päikesepaiste kestust kirjeldav Eesti kaart aastal 2013. Tumedamad alad näitavad suuremat päikesepaiste kestust. [23]



Joonis 7

Õhukese kile paneelide (CdTe) tootmist kirjeldav joonis. [4]