

Santeri Laurila

ENERGIANKERÄYS YMPÄRISTÖSTÄ

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Maaliskuu 2020

TIIVISTELMÄ

Santeri Laurila: Energiankeräys ympäristöstä
Kandidaatintyö, 27 sivua
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä
Maaliskuu 2020

Tämä kandidaatintyö on kirjallisuusselvitys eri tavoista kerätä energiaa ympäristön energiapotentiaaleista. Työssä käydään läpi neljä erilaista tapaa kerätä energiaa, energian kerääminen aineen mekaanisesta rasituksesta pietsosähköisen kalvon avulla, energian kerääminen radioaalloista, aurinkoenergian kerääminen ja energian kerääminen lämpötilagradientista.

Tyypillisesti ympäristöstä kerätyn energian tehotehous on huomattavasti pienempi verrattuna esimerkiksi akuista saatavan energian tehotehouteen. Työn loppuosassa vertaillaan eri energiankeräystapoja keskenään ja pohditaan niiden sopivuutta erilaisiin käyttötarkoituksiin.

Pietsosähköistä ilmiötä käydään läpi selittämällä ilmiön peruseräät ja mekanismi. Pietsosähköisyyden vahvuuksia on kerätyn energian suhteellisen korkea tehotehous, ja se on teknologiana pitkälle viety. Heikkouksia on ulostulon suuri vaihtelu, joka riippuu aktiivisuudesta.

Energian keräämisessä radioaalloista käydään läpi ilmiön perustoimintaa, lähi- ja kaukokentän eroa ja ilmiön sovelluskohteita. Radioaalloista kerättävä energiamäärä on tyypillisesti pieni, mutta se on riittävä signaalin takaisinlähetykseen.

Aurinkoenergian tapauksessa energiaa voidaan kerätä hyvin paljon, ja keräys skaalautuu suoraan keräimien pinta-alan suhteen. Heikkouksia aurinkoenergian keräämisellä on energian saatavuuden syklisyys. Työssä aurinkoenergian keräämisestä käydään läpi ilmiön teoriaa ja yleisempiä sovelluskohteita.

Avainsanat: energian kerääminen, pietsosähköisyys, aurinkoenergia, autonomiset sensorit, energy harvesting

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopistolle sähkötekniikan koulutusohjelmassa syksyllä 2019 uuden yliopistomuutoksen jälkeen. Aiheeksi valikoitui energian keräämiseen liittyvä kokonaisuus, johtuen omasta mielenkiinnosta aihepiiriä kohtaan. Valittu aihe on myös ajankohtainen ja aihealueesta on runsaasti tehty tutkimuksia.

Haluan kiittää kandidaatintyön ohjaajaa yliopistonlehtori Erja Sipilää antamastaan palautteesta ja neuvoista. Kiitoksia myös kandidaatintyön opponentille Merci Ngaruralle kehittävstä palautteesta työhön liittyen sekä kannustuksesta.

Tampereella, 2.3.2020

Santeri Laurila

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ENERGIANKERÄYS YMPÄRISTÖN ENERGIAPOTENTIAALEISTA.....	2
2.1 Pietsosähköinen ilmiö	2
2.1.1 Pietsosähköinen mekanismi.....	3
2.1.2 Luun pietsosähköisyys.....	4
2.2 Energian kerääminen radioaalloista	5
2.2.1 Lähi- ja kaukokenttä.....	6
2.2.2 RFID	7
2.3 Aurinkoenergian kerääminen	8
2.3.1 Valosähköinen ilmiö	8
2.3.2 Aurinkokennon hyötysuhde.....	9
2.3.3 Aurinkoenergian sovelluskohteita.....	10
2.3.4 Talon katolle sijoitetut ja rakennuksiin integroidut aurinkopaneelisysteemit.....	11
2.3.5 Keskitetyt valosähköiset systeemit ja hybridikeräimet	12
2.3.6 Aurinkosähkön käyttö ajoneuvoissa	13
2.4 Lämpösähkö	13
2.4.1 Seebeckin ilmiö.....	14
2.4.2 Lämpösähköinen generaattori.....	15
3. YHTEENVETO.....	17
LÄHTEET	18

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AFM	Atomic Force Microscope, atomivoimamikroskooppi
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit, mikropiiri, joka on suunniteltu johonkin tiettyyn käyttötarkoitukseen
BIPV	Building-Integrated Photovoltaics, rakennukseen integroitu valosähköinen systeemi
CPV	Concentrator Photovoltaics, keskitetty monijuotos-aurinkopaneeli
DNA	Deoksiribonukleiinihappo
EM	Electromagnetic, sähkömagneettinen
EMF	Electromagnetic Force, sähkömagneettinen voima
FF	Far-Field, kaukokenttä
IC	Integrated Circuit, mikropiiri
IoT	Internet of Things, esineiden internet
Li-ion	Litiumioni
MCU	Microcontroller Unit, mikrokontrolleri
NF	Near-Field, lähikenttä
NFC	Near-Field Coupling, lähikenttäkytkytyminen
NSOM	Near-Field Scanning Optical Microscope, lähikenttäskannausoptinen mikroskooppi
PMU	Power Management Unit, tehonsäätöyksikkö
PV	Photovoltaics, valosähköinen
PVT	Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector, valo- ja lämpösähköinen hybridikeräin
PZT	Lyijyzirkonititanaatti
RF	Radio Frequency, radiotaajuus
RFID	Radio Frequency Identification, radiotaajuinen etätunnistus
STC	Standard Test Conditions, standardoidut testiolosuhteet
STM	Scanning Tunneling Microscope, tunnelointimikroskooppi
TE	Thermoelectric, lämpösähköinen
TEG	Thermoelectric Generator, lämpösähköinen generaattori
WiFi	Wireless Local Area Networking, paikallinen langaton tiedonsiirtoverkko

1. JOHDANTO

Viimeisten vuosisatojen aikana ihmiset ovat etsineet lähinnä tapoja lisätä energiantuotantoa kehittääkseen teollisuutta, tapoja liikkua paikasta toiseen ja parantaakseen yleistä elämänlaatua. Ilmastonmuutos ja yleinen pyrkimys kestävän kehityksen suuntaan pakottavat tieteellisen tutkimuksen ja teollisuuden etsimään uusia tapoja kerätä energiaa. Todellisuudessa kaikki tässä kandidaatintyössä esitellyt teknologiat ovat vanhoja, mutta niitä sovelletaan tai tutkitaan uudella tavalla.

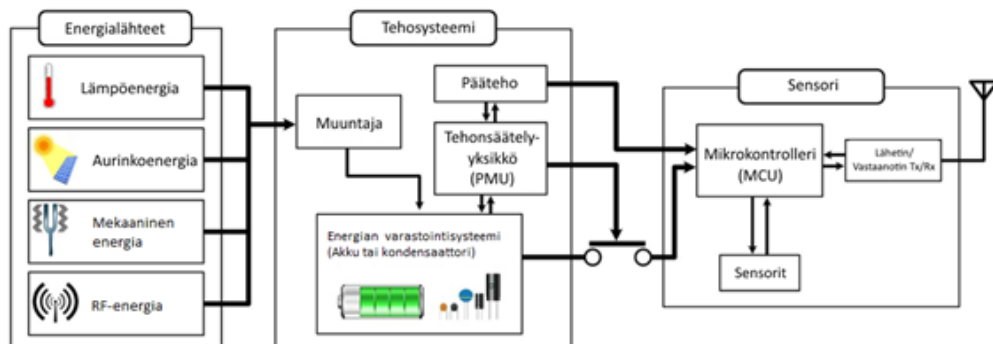
Energian kerääminen tarkoittaa vallitsevan ympäristön pienten energiapotentiaalien hyödyntämistä sähkölaitteiden tai elektroniikan kulutustarpeeseen. Tällaisia energialähteitä ovat muun muassa mekaaninen energia kuten tärinä, taivutus tai paine, valo, lämpö ja radioaallot. Energian keräys mahdollistaa myös langattomien laitteiden tekemisen, jotka eivät välttämättä tarvitse lisäenergiaa. Energian kerääminen tällaisissa pienissä laitteissa on ympäristöystävällistä, kustannustehokasta, kätevää ja turvallista. Tällainen energian keräys on erityisen käyttökelpoista alueilla, jossa ei ole sähköä muuten saatavilla ja välimatkat ovat pitkiä [1][2].

Myös laaja langattoman tiedonsiirtoteknologian kehitys luo uusia mahdollisuuksia energiaa kerääville laitteille. Esineiden internet (engl. Internet of Things, IoT) -laitteet voivat käyttää matalan tehon tiedonsiirtoprotokollia, jolloin ne voivat kerätä tarvitsemansa pienen määrän energiaa ympäristöstään. Esimerkiksi materiaalin kosteutta aistiva sensori voi olla sijoitettuna paikkaan, johon ei ole mahdollista vaihtaa akkua, joten sensorin on kerättävä energiansa ympäristöstä [2].

Tässä kandidaatintyössä on tutkimuskysymyksenä kartoittaa ja vertailla erilaisia tapoja kerätä energiaa ympäristöstä. Eri energiankeräysteknologioilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Sovelluskohteesta riippuen on tärkeää, että kohteeseen valitaan sopivin teknologia. Työssä luvussa 2 esitellään erilaisia menetelmiä energian keräämiseen ympäristöstä. Yhteenvedossa luvussa 3 pohditaan työn lopputulemaa.

2. ENERGIANKERÄYS YMPÄRISTÖN ENERGIAPOTENTIAALEISTA

Jos elektroninen laite kerää energiansa suoraan ympäristöstä, laitteessa ei ole tarvetta suurelle akulle. Energian keräyksellä voidaan kattaa joko osa laitteen energiantarpeesta, tai sen koko energiatarve [2]. Kuvassa 1 on esitettyä periaatekuva energiaa keräävästä itsenäisestä langattomasta sensorista. Kuvan systeemi koostuu kolmesta osasta. Ensimmäinen osa on energialähdeteknologia, jolla kerätään käyttövoimaenergia sensorille. Toinen osa koostuu muuntajasta ja energian varastointiosasta, sekä tehonsäätely-yksiköstä sensorille. Itse sensorin koostuu mikrokontrollerista (engl. Microcontroller Unit, MCU), aistivasta sensoriosasta ja lähetin-vastaanotinlohkosta.



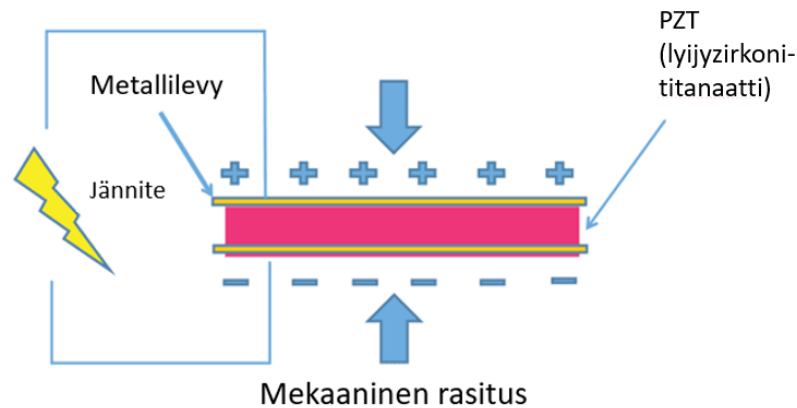
Kuva 1. Yleinen lohkokkaavio ympäristön energiaa keräävästä itsenäisestä sensorista, kuva muokattu lähteestä [1].

Erilaisia energiankeräysmenetelmiä ovat mekaanisen energian kerääminen pietsosähköisen kalvon avulla, RF-energian keräys, aurinkoenergian keräys aurinkopaneeleilla tai lämpöenergian kerääminen lämpöparin avulla. On olemassa myös muita energiankeräystapoja, mutta tässä kandidaatintyössä tarkastellaan vain edellä mainittuja neljää tapaa.

2.1 Pietsosähköinen ilmiö

Pietsosähköisyys tarkoittaa potentiaalieroja, joka syntyy tietynlaisissa kiinteissä materiaaleissa kuten esimerkiksi keraameissa, kun aine altistuu mekaaniselle rasitukselle. Pietsosähköisyyttä esiintyy myös elävissä kudoksissa kuten luussa, DNA:ssa ja useissa eri proteiineissa. Ranskalaiset fyysikot Jacques ja Pierre Curie havaitsivat ensimmäisen kerran pietsosähköisyyden vuonna 1880. [3][4] Pietsosähköinen ilmiö johtuu lineaarisesta elektromekaanisesta vuorovaikutuksesta mekaanisen ja sähköisen tilan välillä ki-

derakenteisissa materiaaleissa, joilla ei ole inversiivistä symmetriaa. Pietsosähköinen ilmiö toimii myös käänteisesti. Pietsosähköisten materiaalien muotoa voidaan muuttaa altistamalla ne ulkoiselle potentiaalierolle. [5] Kuvassa 2 on esitettyä periaatekuva pietsosähköiselle ilmiölle. Mekaaninen rasitus aiheuttaa potentiaalieron pietsosähköisen materiaalin eri pintojen välille.



Kuva 2. Pietsosähköisen materiaalin toimintaperiaate, kuva muokattu lähteestä [6].

Eräs pietsosähköinen materiaali on lyijyzirkonititanaatti (PZT). Lyijyzirkonititanaatin kiteet generoivat mitattavan potentiaalieron, kun niiden staattinen rakenne muuttuu 0,1% alkuperäisestä rakenteesta. Toisaalta kiteet muuttavat staattista rakennettaan 0,1%, kun kiteet altistetaan ulkoiselle sähkökentälle. Käänteistä pietsosähköistä ilmiötä hyödynnetään käytännössä mm. ultraääniaaltojen generoinnissa. [7]

Pietsosähköisyyttä hyödynnetään useissa eri sovelluskohteissa, kuten äänen tunnistamisessa ja tuottamisessa, mustesuihkutulostimissa, korkeiden jännitteiden generoimisessa ja ylääänisten suuttimien ajamisessa. Pietsosähköisyys muodostaa myös pohjan monille tieteellisille instrumenteille joilla on atomitason resoluutio, kuten tunnelointimikroskooppi (engl. Scanning Tunneling Microscope, STM), atomivoimamikroskooppi (engl. Atomic Force Microscope, AFM) ja lähikenttäskannausoptiselle mikroskoopille (engl. Near-Field Scanning Optical Microscope, NSOM). Sitä myös käytetään arkipäiväisissä sovelluksissa kuten tupakansytyttimissä, pihagrillien käynnistysnappuloissa, kvartsikidekelloissa ajan referenssinä, vahvistimissa, sähkökitaroissa ja sähkörummuissa. [4][8][9]

2.1.1 Pietsosähköinen mekanismi

Pietsosähköisen ilmiön syntymekanismi liittyy vahvasti sähköisten dipolimomenttien esiintymiseen kiinteissä aineissa. Ionit voivat indusoida dipolimomenteja kidehiloissa, joilla on läheisiä epäsymmetrisiä varausalueita, kuten esimerkiksi bariumtitanaatilla ja

lyijyzirkonititanaatilla. Dipolimomenteja voi syntyä myös molekyyliyhmissä, kuten kidesokerissa. Dipolien tiheys tai polarisointi voidaan helposti laskea kiteille summaamalla dipolimomenttien määrä suhteessa kiteen kiderakenteeseen. Jokainen dipoli on vektori, ja dipolien tiheys on vektorikenttä, joka aiheuttaa polarisaation. Toisiaan lähellä olevilla dipoleilla on tapana suuntautua alueiksi, joita kutsutaan Weissin vyöhykkeiksi. Vyöhykkeet ovat yleensä sekalaisesti orientoituneita, mutta niiden suunta voidaan yhdenmukaistaa altistamalla aine voimakkaalle sähkökentälle. Kaikissa pietsosähköisissä materiaaleissa ei kuitenkaan vyöhykkeiden yhdenmukaistamista voida tehdä. [10] Kuvassa 3 on esitetty pietsosähköinen kalvo. Pietsosähköistä kalvoa voidaan käyttää esimerkiksi, kun halutaan muuntaa ääni audiosignaaliiksi kuten tehdään mikrofoneissa [5].

Merkittävä ominaisuus pietsosähköisellä aineella on polarisaation P suunnan muutos, kun aine altistetaan mekaaniselle rasitukselle. Tämä ilmiö aiheutuu joko dipoleita muodostavan ympäristön uudelleenkonfigurointina, tai molekylääristen dipolimomenttien uudelleenorientoitumisena mekaanisen rasituksen alaisena. Pietsosähköisyys voi ilmetä polarisaation suunnan tai voimakkuuden muutoksena, tai molempina. Ilmeneminen riippuu polarisaation P orientoitumisesta kiteen sisällä, kidesymmetriasta ja altistetun mekaanisen rasituksen määrästä. Muutos polarisaatiossa P ilmenee muutoksena pinnan varaustiheydessä kidekristallien pinnoilla, kuten sähkökentän muutoksina kidekristallien pinnoilla. Esimerkiksi kuutiosenttimetri kvartsia oikella tavalla altistettuna 2 kN:n suuruiselle voimalle voi tuottaa 12,5 kV jännitteen. Pietsosähköinen ilmiö toimii materiaaleissa myös käänteisesti, jolloin ulkoinen sähkökenttä aiheuttaa mekaanisen muodonmuutoksen kidekristalleissa. [11]

2.1.2 Luun pietsosähköisyys

Kuivalla luulla on pietsosähköisiä ominaisuuksia. Pietsosähköiset ominaisuudet johtuvat luun sisältämästä kollageenista. Kollageeni on tukikudoksen yleisin säiemäinen proteiini, ja sitä esiintyy mm. luussa, rustossa, jänteissä ja ihossa. Kollageenilla on molekyylien dipolien polaarisien moniakσιαalisuuden orientoitumisen ominaisuus. Lisäksi sitä voidaan pitää bioelekreetinä, eli sen tyyppisenä dielektrisenä materiaalina, jolla on näennäisyypisyvä avaruusvaraus ja dipolaarinen varaus. Potentiaalierot ilmenevät, kun kollageenimolekyyyleja rasietaan mekaanisesti, tällöin suuret määrät varauksenkuljettajia vaihtavat paikkaa näytteen keskeltä kohti näytteen pintaa. [12]

Pietsosähköisen ilmiön on yleisesti ajateltu toimivan biologisena voima-anturina ihmisen kehossa. Ilmiötä tutkittiin 1970-luvun lopulla Pennsylvanian yliopistossa, jolloin päädyttiin lopputulemaan, että sähköiselle potentiaalierolle altistuminen voisi stimuloida luun kas-

vua ja paranemista elävässä organismissa. Laajemmat tutkimukset 1990-luvulla osoittivat luun toimivan samalla tavalla kuin pietsosähköinen luokan 6 hexagonaalinen kidera-kenne. [13][14][15]

2.2 Energian kerääminen radioaalloista

Energiaa voidaan kerätä myös radiotaajuuksisesta (engl. Radio frequency, RF) sähkömagneettisesta säteilystä. Tämä energian keräämisen muoto on yksi yleisimmistä keräysmuodoista, joka tulee usein vastaan arkisissa tilanteissa. Esimerkiksi luottokortin lähimaksu, kulkukortit ja varashälyttimet hyödyntävät tätä teknologiaa. Verrattuna muihin energiankeräysmenetelmiin RF-keräämisellä on hyvin pieni tehotehiys. Tämä tuottaa omat haasteensa, sillä kerättävät energiamäärät ovat hyvin pieniä. [16][17]

Faradayn induktiolain mukaan sähkömotorinen voima on yhtä suuri kuin magneettivuon negatiivinen muutos ajan suhteen suljetun johdinsilmukan läpi [18]. Yhdelle kierrokselle johdinta magneettikentässä magneettivuo Φ_M määritellään mille tahansa pinnalle $\Sigma(t)$, jonka rajat johdinsilmukka määrittää. Magneettivuo on pintaintegraali:

$$\Phi_M = \iint_{\Sigma(t)} B(t) \cdot dA, \quad (1)$$

missä dA on pyyhkäisevän pinnan $\Sigma(t)$ elementti. Magneettivuon tiheyttä kuvaa symboli B , ja $B \cdot dA$ on vektoreiden pistetulo, joka esittää magneettivuon elementtiä dA :n läpi. Toisin sanoen magneettivuo johdinsilmukan läpi on verrannollinen siihen määrään magneettivuoviivoja, jotka kulkevat silmukan läpi. Vuo muuttuu, kun B muuttuu tai kun johdinsilmukkaa liikutetaan tai väännetään uuteen muotoon, tai molempia. Tällöin Faradayn induktiolain mukaan silmukkaan syntyy sähkömotorinen voima E_{ind} , joka määritellään yksikkövarauksena, joka on matkustanut yhden kerran silmukan läpi. [19][20]

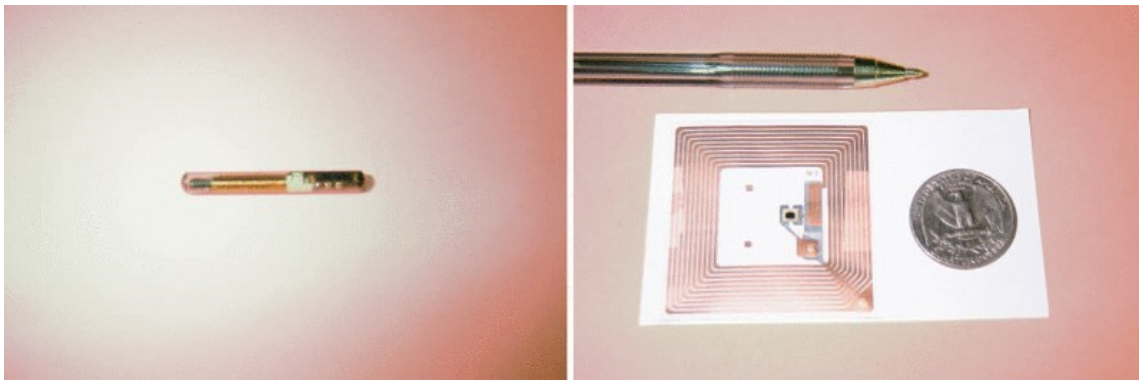
Sähkömotorinen voima on verrannollinen magneettivuon muutosnopeuteen:

$$E_{ind} = -\frac{d\Phi_M}{dt}. \quad (2)$$

Sähkömotorisen voiman suunnan määrittää Lenzin laki, joka on esitetty kaavassa 2 [21].

2.2.1 Lähi- ja kaukokenttä

Faradayn induktiolaki ja sähkömagneettinen säteily mahdollistavat energian keräämisen radioaalloista. On olemassa kaksi erilaista tapaa tehon siirtämiseksi lähettimeltä vastaanottimelle: magneettinen induktio ja sähkömagneettinen säteily. Magneettiseen induktioon perustuvaa tapaa kutsutaan lähikentäksi (engl. Near-Field, NF) ja sähkömagneettiseen säteilyyn perustuvaa tapaa kutsutaan kaukokentäksi (engl. Far-field, FF). Kuvassa 4 on esitetty kaksi erilaista lähikenttään perustuvaa RFID (engl. Radio Frequency Identification) -tunnistetta. [22]



Kuva 4. NFC:hen perustuvia RFID-tunnisteita. Vasemmalla 128 kHz Trovan tag, koteloituna pieneen noin 1 cm pituiseen lasipulloon. Oikealla 13,56 MHz Tiris tag, joka on helppo asettaa tarrapinnan avulla tuotteisiin [22].

Lähikenttä on antennin välittömässä läheisyydessä. Lähikenttä määritetään kaavan 3 mukaan, jossa D on antennin suurin mahdollinen lineaarinen dimensio ja λ on sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus.

$$\text{Lähikenttä} < \frac{2D^2}{\lambda} \quad [23]. \quad (3)$$

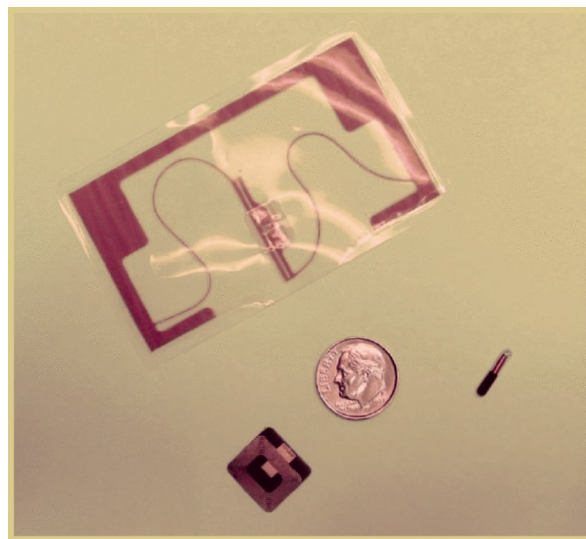
Lähikenttää hyödynnetään NFC:ssä (engl. Near-Field Communication). NFC:ksi kutsutaan joukkoa kommunikaatioprotokollia, jotka mahdollistavat langattoman kommunikoinnin laitteiden ollessa alle 4 cm etäisyydellä toisistaan [24]. Kaukokentäksi kutsutaan aluetta, joka on kauempana kuin lähikentän alue. Kaukokenttä määrittään kaavalla

$$\text{Kaukokenttä} > \frac{2D^2}{\lambda} \quad [23]. \quad (4)$$

Molemmilla tavoilla voidaan siirtää tehoa vastaanottimeen, tyypillisesti $10 \mu\text{W} - 1 \text{ mW}$, riippuen vastaanottimen tyypistä. Erilaisten modulaatiotekniikoiden ansiosta NF ja FF – pohjaiset signaalit voivat myös lähettää ja vastaanottaa dataa. [25]

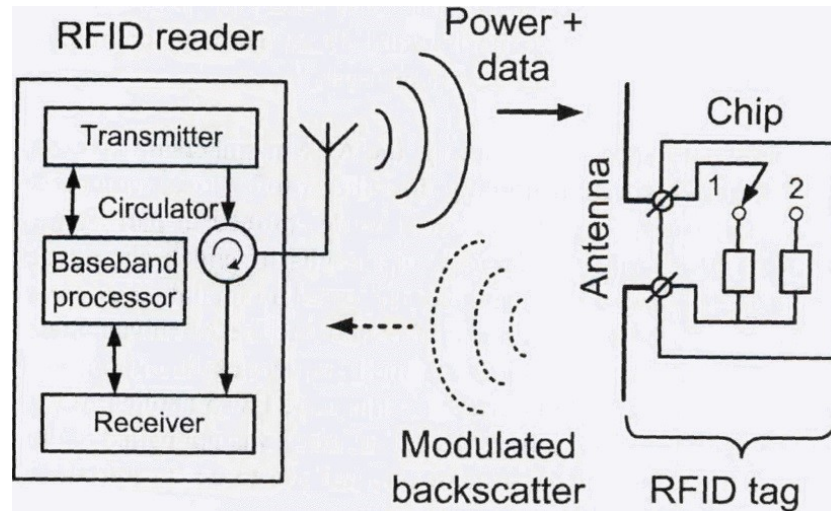
2.2.2 RFID

Radiotaajuinen etätunnistus RFID hyödyntää sähkömagneettisia kenttiä automaattisesti tunnistamaan kohteisiin kiinnitettyjä tunnisteita. Tunnisteet sisältävät sähköisesti tallennettua tietoa. RFID-tunniste voidaan sisällyttää tuotteeseen valmistusvaiheessa tai esimerkiksi liimata siihen jälkikäteen tarralla. RFID-tunnisteet sisältävät antennin voidaan lähettää ja vastaanottaa radiotaajuisia kyselyitä RFID-lähetin-vastaanottimelta. RFID:tä käytetään yhä enemmän esimerkiksi viivakoodin korvaajana, monista käytännön hyödyistä johtuen. RFID ei vaadi suoraa näköyhteyttä lukijan ja tunnisteiden välille ja niitä voidaan lukea suuri määrä kerralla, toisin kuin viivakoodeja voidaan lukea vain yksi kerrallaan [26]. Kuvassa 5 on esitetty erilaisia RFID tunnisteita.



Kuva 5. Kolme erikokoista RFID-tunnistetta, kolikko mittakaavana [22].

On olemassa monia erityyppisiä RFID:itä, mutta korkealla tasolla voimme jakaa RFID:t kahteen selkeään luokkaan: aktiivisiin ja passiivisiin. Aktiiviset tunnisteet vaativat teholähteen – ne ovat joko kiinnitettynä ulkoiseen teholähteeseen tai sitten ne käyttävät sisäistä teholähdettä, kuten paristoa. Sisäisen teholähteen tapauksessa, tunnisteiden elinkaari on rajoitettu varastoituun energiaan, joka vertaantuu siihen kuinka monta lukuoperaatiota laite voi käydä läpi ennen energian loppumista. Yksi esimerkki aktiivisesta tunnisteesta on lentokoneeseen kiinnitetty transponderi. Transponderi lähettää viestin, minkä maalainen lentokone on kyseessä. Passiiviset RFID-tunnisteet keräävät tarvitsemansa energian lähettimen lähettämästä signaalista, eivätkä tarvitse muuta teholähdettä. Passiivisilla RFID-tunnisteilla on määrittelemättömän pitkä elinkaari ja ne voivat olla kooltaan hyvin pieniä. [22][27]



Kuva 6. Passiivisen RFID:n periaatekuva [27].

Kuvassa 6 on esitettyä passiivisen RFID-systeemin toiminta. Systemi koostuu RFID-tunnisteesta ja RFID-lukijasta. Tyypillinen passiivinen tunnistee koostuu antennista ja sovelluskohtaisesta IC (engl. Integrated Circuit) -sirusta (engl. Application-Specific Integrated Circuit, ASIC). Siru saa tehonsa RF signaalista RFID-lukijalta. Tunniste lähettää datan takaisin vaihtamalla sisääntuloimpedanssiaan kahden eri tilan välillä, tuottaen moduloidun signaalin takaisinlähetykseen. [27]

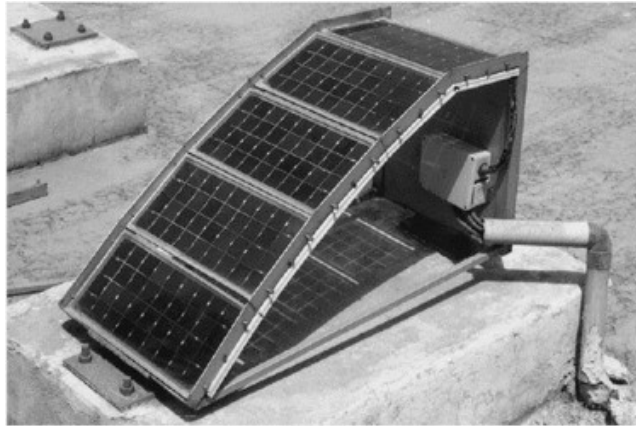
2.3 Aurinkoenergian kerääminen

Aurinkoenergian keräämisellä on paljon hyötyjä verrattuna muihin energiankeräysmenetelmiin. Vuodessa auringonvaloa osuu maan pintaan 122 PW:n edestä – lähes 10 000 kertaa enemmän kuin ihmiskunnan energiantarve vuonna 2005, mikä oli 12 TW [28]. Aurinkoenergian voidaan siis katsoa olevan lähes rajatonta ja sitä on saatavilla joka maailmankolkassa. Lisäksi sillä ei ole huonoja ympäristövaikutuksia, ellei oteta huomioon aurinkopaneelien valmistuksesta aiheutuvia päästöjä. Kun aurinkoenergialla toimiva laite on saatu valmiiksi, se voi toimia itsenäisesti aurinkoenergialla vuosia. Aurinkoenergia on hyvä vaihtoehto monessa tapauksessa, sillä se pystyy tuottamaan korkean tehon verrattuna muihin energiankeräysmenetelmiin. Aurinkoenergia tuottaa myös paljon tehoa suhteessa pinta-alaan, noin 100 mW/cm² päivällä, aurinkopaneelien tyypillisellä 30%:n hyötysuhteella laskettuna. [29][30]

2.3.1 Valosähköinen ilmiö

Valosähköinen muunnos (engl. Photovoltaics, PV) on valon muunnos sähköenergiaksi käyttämällä puolijohdemateriaaleja, jotka hyödyntävät valosähköistä ilmiötä. Valosäh-

köistä ilmiötä tutkitaan fysiikassa, valokemiassa ja sähkökemiassa. Valosähköinen systeemi hyödyntää aurinkomoduuleja, joista jokainen koostuu tietyistä määrästä soluja, jotka tuottavat energiaa. Aurinkosähköpaneelit voivat olla asennettuina esimerkiksi maahan, talojen katoille tai seinille. Ne voivat myös kellua veden päällä. Kiinnitysalusta voi olla kiinteä, tai se voi vaihtaa asentoaan auringon liikettä seuraten. [31] Kuvassa 7 on esitetty PV-systeemi kiinteällä alustalla. Aurinkosähköpaneelit ovat kiinnitettynä alustaan eri kulmissa auringon liikkeistä johtuen [32].



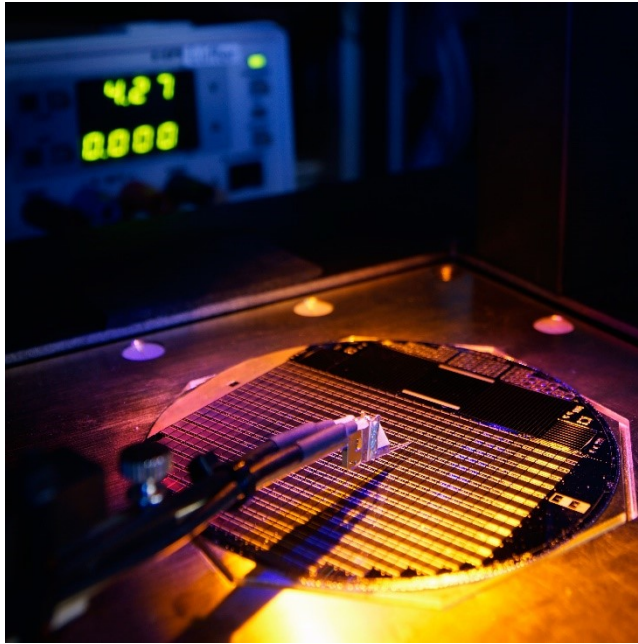
Kuva 7. PV-systeemi, kiinteällä alustalla [32].

Aurinkoenergialla on useita hyötyjä energialähteenä. Kun se on kerran asennettu, sen toiminta ei tuota yhtään saasteita eikä kasvihuonekaasuja. Energiankeräystä on helppoa skaalata ylöspäin paneelien määrää lisäämällä, ja niiden tekemiseen tarvittavaa alkuaineita, kuten piitä, löytyy paljon maanperästä. [33]

2.3.2 Aurinkokennon hyötysuhde

Aurinkopaneelin hyötysuhde viittaa siihen osaan auringonvalon energiaa, joka voidaan muuntaa valosähköisellä muunnoksella sähköksi aurinkopaneelin avulla. Aurinkokennon hyötysuhde määräytyy useiden eri tekijöiden summasta. Leveyspiiri ja ilmaston koostumus määrittelevät maksimitehon, jonka valosähköinen systeemi voi tuottaa. Esimerkiksi aurinkopaneeli 20% hyötysuhteella ja 1 m² pinta-alalla tuottaa 200 W tehon normaaleissa testiolosuhteissa (engl. Standard Test Conditions, STC), mutta se voi tuottaa korkeamman tehon auringon ollessa lakipisteessään, ja se tuottaa pienemmän tehon pilvisellä säällä, tai auringon ollessa matalalla. Coloradon osavaltiossa, jossa auringon säteily määrä on keskimäärin 2000 kWh/m² vuodessa, edellä mainittu paneeli tuottaa 400 kWh energiaa vuodessa. Toisaalta, Michiganissa, jossa auringon säteily määrä on vain 1400 kWh/m², vuosittainen energiamäärä putoaa vain 280 kWh:n tasolle samalla paneelilla. Pohjois-Euroopassa auringon säteilyannokset ovat huomattavasti pienempiä,

175 kWh vuosittainen energiamäärä Etelä-Englannissa vastaavanlaisella paneelilla. [34][35]



Kuva 8. Aurinkokenno 100 mm piikiekolla, saanto noin 500:lle keskitetylle aurinkopaneelille [36].

Kuvassa 8 on esitetty piikiekko, josta saadaan valmistettua keskitettyjä aurinkopaneeleja. Joulukuussa 2014 aurinkokennolle saavutettiin maailmanennätyshyötysuhde. 46,0%:n hyötysuhde saavutettiin keskitetyillä monijuotos-aurinkopaneeleilla (engl. Concentrator Photovoltaics, CPV). Tulos on huomattavasti korkeampi kuin standardihyötysuhde 37,0% monikiteisille valosähköisille systeemeille tai ohutkalvo-aurinkokennoille. [36]

2.3.3 Aurinkoenergian sovelluskohteita

Valosähköinen systeemi on tehosysteemi, joka on suunniteltu tuottamaan kerättyä aurinkoenergiaa sähköenergiaksi valosähköisen muutoksen kautta. Se koostuu useiden eri komponenttien kokonaisuudesta. Aurinkopaneeleista, jotka vastaanottavat auringonvaloa ja muuttavat sen suoraan sähköenergiaksi. Muuntajasta, joka muuntaa sähkövirran tasavirrasta vaihtovirraksi. Systeemiin kuuluvat myös kiinnitystelineet, kaapeloinnit ja muut sähköiset oheislaitteet. [33] PV-systeemien koot vaihtelevat pienistä suuriin, katolle asennetuista paneeleista rakennukseen itseensä integroituihin systeemeihin, joiden kapasiteetti vaihtelee useista kymmenistä kilowateista laajoihin voimalaitostyyppisiin aurinkovoimaloihin, joiden teho on satoja megawatteja. Nykyään useimmat PV-systeemit ovat yhdistettynä jakeluverkkoon, yksittäisiä erillisiä systeemejä on vain hyvin pieni osa systeemien kokonaismäärästä. [34]

2.3.4 Talon katolle sijoitetut ja rakennuksiin integroidut aurinkopaneelisysteemit

Aurinkopaneelit ovat usein yhdistettyinä rakennuksiin, joko niihin integroituina, tai asennettuna niiden katolle, tai pihamaalle. Rakennusten katoilla sijaitsevat aurinkopaneelit on usein asennettu jälkikäteen talon rakentamisen jälkeen. Vaihtoehtoisesti paneelit voivat olla sijoitettuna erikseen rakennuksesta, mutta yhdistettynä kaapelilla rakennuksen sähköjärjestelmään. Rakennuksiin integroituja valosähköisiä systeemejä (engl. Building-Integrated Photovoltaics, BIPV) rakennetaan yhä suuremmissa määrin uusiin teollisuuden tarpeisiin tuleviin rakennuksiin. Rakennukseen rakennetaan PV-systeemi integroituna rakennuksen kattorakenteisiin, ja sitä voidaan käyttää joko pää- tai tukevana energialähteenä rakennukselle. [37] Kuvassa 9 on esitetty BIPV.



Kuva 9. BIPV, toimistorakennuksen kattoelementit koostuvat kokonaan aurinkopaneeleista. Applen päärakennus Apple Park Cupertinoissa, Californian osavaltiossa [38].

Talon katolle rakennetuissa aurinkopaneeleissa voi olla myös muita hyötyjä sähköenergian tuottamisen lisäksi. Olettaen, että katolle asennetuissa paneeleissa on rako, josta ilma pääsee kiertämään, niin paneelit voivat tuottaa myös passiivista jäähdytystä rakennukselle päivällä ja toimia lämpöä tasaavana elementtinä yöllä [39]. Tyypillisesti katolle asennetuilla aurinkopaneelisysteemeillä on melko pieni tehokapasiteetti, noin 5–10 kW, kun taas teollisuuden käytössä olevien rakennusten systeemeillä jopa useita satoja kilowatteja. Vaikka katolle sijoitetut aurinkopaneelit ovat kooltaan paljon pienempiä kuin maahan sijoitetut pienet aurinkovoimalat, ne vastaavat silti suurimmasta osasta maailman aurinkopaneeleista. [40]

2.3.5 Keskitetyt valosähköiset systeemit ja hybridikeräimet

Keskitetty valosähköinen systeemi (engl. Concentrator Photovoltaics, CPV) on teknologia, joka luo sähköenergiaa auringonvalosta. Toisin kuin perinteisessä aurinkopaneelissa, teknologiassa käytetään linsejä ja kaarevia peilejä keskittämään auringonvalo pienelle, mutta hyvin tehokkaalle monijuotos-aurinkopaneelille. CPV-systeemeissä käytetään usein auringon asemaa seuraavia teknologioita ja jäähdytysjärjestelmiä hyötysuhteen parantamiseksi. [41] Kuvassa 10 on esitetty CPV. Paneeli koostuu tuhansista pienistä linseistä, joista jokainen keskittää auringonvalon n. 500-kertaisella intensiteetillä pienelle, erittäin korkeahyötysuhteiselle monijuotos-aurinkopaneelille [42].



Kuva 10. Amonix-yrityksen kehittämä CPV [42].

Valo- ja lämpösähköiset hybridikeräimet (engl. Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collector, PVT) ovat systeemejä, jotka muuttavat auringon säteilyä sähkö- ja lämpöenergiaksi. Nämä systeemit yhdistävät aurinkokennoon aurinkolämpökeräimen, joka kerää jäljelle jäävän lämpöenergian ja samalla poistaa paneelista aiheutuvan haittalämmön. Molempien sähkö- ja lämpöenergian kerääminen mahdollistaa sen, että näillä systeemeillä on hyvin korkea hyödynnettävässä oleva kokonaisenergia eli eksergia. PV- tai aurinkolämpösähköiset systeemit eivät yksinään kykene yhtä korkeaan hyötysuhteeseen verrattuna hybridisysteemiin. [43][44]

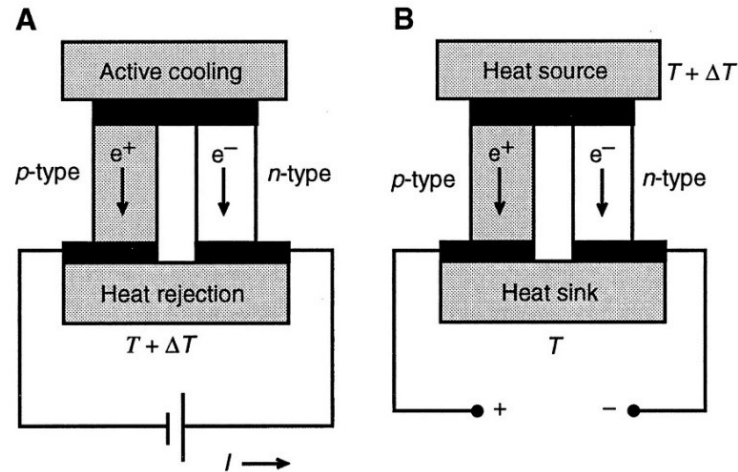
2.3.6 Aurinkosähkön käyttö ajoneuvoissa

Aurinkopaneeleita on perinteisesti käytetty teholähteinä avaruudessa [45]. Aurinkoenergiaa käytetään harvoin ajoneuvojen päätoimisena voimanlähteenä, mutta on kehitetty systeemejä, joissa aurinkoenergia toimii sekondäärisenä teholähteenä autoille ja veneille. Esimerkiksi joissain autoissa auton ilmastointijärjestelmää voidaan käyttää aurinkopaneelien avulla, rajoittamaan auton sisälämpötilaa kuumina päivinä [46]. Omavaraisesti toimivalla, aurinkoenergian keräämisellä perustuvalla autolla olisi hyvin rajoitettu toimintamatka, sillä se saa kaiken energiansa auringosta. Sähköautot, jotka yhdistävät aurinkopaneelit ja akun lataamisen sähköverkosta ratkaisevat tämän ongelman. Tällaiset ratkaisut mahdollistavat aurinkoenergian keräämisen hyödyntämisen autoissa. [47]

2.4 Lämpösähkö

Lämpösähköisessä ilmiössä tapahtuu suora muunnos lämpötilaerosta sähköiseksi potentiaalieroksi. Lämpösähköinen ilmiö voidaan toteuttaa käytännössä lämpöparin avulla. Lämpösähköinen laite luo potentiaalieron, kun laitteen eri puolilla on lämpötilaero. Ilmiö toimii myös käänteisesti, kun lämpösähköinen laite altistetaan jännite-erolle, se kuljettaa lämpöä laitteen toiselta puolelta toiselle. Ilmiötä voidaan käyttää tuottamaan sähköä, mittaamaan lämpötilaa tai muuttamaan lämpötilaa. Koska lämmityksen ja jäähtymisen suunta riippuu altistetun jännitteen polariteetista, lämpösähköisiä laitteita voidaan käyttää myös lämpötilaa säätelevinä laitteina. [48]

Kuvassa 11 on esitettyä lämpösähköisen (engl. Thermoelectric, TE) piirin kaksi eri toimintatapaa. Lämpösähköinen pari koostuu kahdesta eriseosteisesta puolijohdemateriaalista. Toinen materiaaleista on p-seostettu ja toinen n-seostettu. Ne ovat yhdistettynä metallipalalla liitoksen tekemiseksi. Kun virta etenee piirissä kuten (A)-kohdassa on esitetty, negatiiviset varauksenkuljettajat n-typin puolijohteessa virtaavat kohti pohjaa, samalla kun positiiviset varauksenkuljettajat p-typin puolijohteessa virtaavat myös kohti pohjaa. Molemmat varauksenkuljettajat kuljettavat mukanaan lämpöä, ja liitoksen lämpötila ylhäällä laskee. Kaupallisilla markkinoilla olevissa tuotteissa on useita lämpöpärejä yhdessä tuotteessa, lämpöparien määrä vaihtelee 20-130:n välillä. [48]



Kuva 11. Lämpösähköisen piirin kaksi eri toimintatapaa [48].

Kuvan 11 (B)-kohdassa, kun juotosta lämmitetään lämpötilalla $+\Delta T$, molemmat varauksenkuljettajat johtavat lämpöä kohti kylmää pohjaa ja kahden elektrodin välille syntyy potentiaaliero. Tämän tyyppistä lämpösähköistä generaattoria käytetään mm. avaruudessa generoimaan energiaa radioaktiivisen plutoniumin toimiessa lämpölähteenä. Maanpäällisissä sovelluskohteissa lämpölähteenä voidaan käyttää mitä tahansa lämpölähdettä. [48][49]

2.4.1 Seebeckin ilmiö

Seebeckin ilmiöksi kutsutaan suoraa muutosta lämmöstä sähköenergiaksi johtavissa langoissa. Ilmiö on nimetty baltiansaksalaisen fyysikon Thomas Johann Seebeckin mukaan, joka havaitsi ilmiön vuonna 1821. Seebeckin ilmiölle käänteistä ilmiötä kutsutaan Peltierin ilmiöksi, missä jännite-ero luo lämpötilaeron. [50] Seebeckin ilmiö on klassinen esimerkki sähkömotorisesta voimasta (engl. Electromagnetic Force, EMF), mikä johtaa samoihin mitattaviin jännitearvoihin samalla tavalla kuin mitä tahansa muuta sähkömotorista voimaa mitattaessa. Paikallinen tiheys sähkövirralle ilmoitetaan

$$J = \sigma(-\nabla V + E_{EMF}) \quad (5)$$

Missä σ on paikallinen sähkönjohtavuus ja $-\nabla V$ paikallinen jännite. Yleisesti, Seebeckin ilmiö kuvataan paikallisesti luodulla sähkömotorisella voimalla

$$E_{EMF} = -S\nabla T, \quad (6)$$

missä $-S$ on Seebeckin vakio, eli materiaalille ominainen arvo, ja ∇T on lämpötilagradientti. [50] Seebeckin vakion arvo muuttuu tyypillisesti lämpötilan funktiona, ja on vahvasti sidoksissa juotteen rakenteeseen. Tavallisille materiaaleille huoneenlämmössä Seebeckin vakion arvo vaihtelee $-100 \mu\text{V/K}$:stä $+1000 \mu\text{V/K}$:iin. Esimerkiksi johtimina

käytettäville metalleille kuten kupari, hopea ja kulta, Seebeckin vakion arvo on $1,5 \mu\text{V/K}$ huoneenlämpötilassa. [51][52]

2.4.2 Lämpösähköinen generaattori

Seebeckin ilmiötä käytetään lämpösähköisissä generaattoreissa (engl. Thermoelectric Generator, TEG), jotka toimivat kuten lämpökoneet, mutta ovat kevyempirakenteisia, niissä ei ole liikkuvia osia ja ne ovat tyypillisesti kalliimpia ja toimivat matalemmalla hyötysuhteella. Tyypillinen hyötysuhde lämpösähköiselle generaattorille on noin 5–8%. Vanhemmat generaattorit käyttivät kaksoismetallisia liuskoja ja olivat suurikokoisia. Uudemmat generaattorit käyttävät korkeasti seostettuja puolijohdemateriaaleja kuten vismuttiteelluridi (Bi_2Te_3), lyijyteelluridi (PbTe) ja kalsiummangaanioksidi ($\text{Ca}_2\text{Mn}_3\text{O}_8$) tai näiden yhdisteitä, riippuen käyttölämpötilasta. [53]

Yleisesti lämpösähköisillä generaattoreilla voidaan parantaa systeemin hyötysuhdetta monissa eri sovelluksissa. Autot ja muut ajoneuvot tuottavat paljon hukkalämpöä, mm. pakokaasun ja moottorin hukkalämmön muodossa. Käyttämällä lämpösähköistä generaattoria tuon lämpöenergian keräämiseen, voidaan parantaa autojen polttoaineenkulutusta. Kun auton laturi korvattiin lämpösähköisellä generaattorilla, saavutettiin 3,45% pienempi polttoaineenkulutus. [54] Lisäksi on arvioitu, että tulevaisuudessa voitaisiin säästää 10% pidempi toimintamatka hybridikäyttöisillä autoilla, joihin on asennettu TEG:ejä [55]. Kuvassa 12 on esitettyä TEG, joka hyödyntää pakoputken hukkalämpöä. Kuvan TEG pystyy tuottamaan 180W:n tehon [56].



Kuva 12. Auton pakoputken päälle sijoitettu TEG [56].

Lämpösähköiset generaattorit ovat osoittaneet hyviä tuloksia polttomoottoreiden yhteydessä, parantaen hyötysuhdetta 33%:sta 57%:iin. Lisäksi tarjoten 6% mahdollisen lisätehon autolle. Lisäksi lämpösähköiset generaattorit ovat suosittuja ilmailuun liittyvissä

sovelluksissa, koska ilmailussa on tärkeää saada paras mahdollinen hyöty käytettävissä olevasta polttoaineesta. [56]

3. YHTEENVETO

Työssä käytiin läpi erilaisia tapoja kerätä energiaa ympäristön energiapotentiaaleista. Eri teknologioilla on erilaisia vahvuuksia ja heikkouksia, ja ei ole olemassa yhtä teknologiaa, joka sopisi parhaiten jokaiseen käyttötarkoitukseen. Siispä on tärkeää valita oikea teknologia sovelluskohteesta riippuen. Energiankeräysteknologiat ovat monella tavalla vasta kehityskaarensa alkuvaiheessa. Tekniikalla on paljon tilaa kehittyä, ja todennäköisesti energian kerääminen ympäristöstä tulee tulevaisuudessa saamaan lisää painoarvoa tapana tuottaa tehoa sähköisille laitteille. Tällä hetkellä sähköisen laitteiden teho tuotetaan vielä hyvin pitkälti akuilla.

Taulukko 1. Ympäristöstä saatavilla olevien energiapotentiaalien vertailua [57].

	Aurinkoenergia	Lämpöenergia	RF energia	Pietsosähköinen, tärinä	Pietsosähköinen, napinpainallus
Tehotiheys	100 mW/cm ²	60 μW/cm ²	0,0002 – 1 μW/cm ²	200 μW/cm ³	50 μJ/N
Ulostulo	0,5 V (Si solu) 1,0 V (a-Si solu)	-	3 – 4 V (avoin piiri)	10 – 25 V	100 – 10000 V
Toiminta-aika	Päiväsaika (4-8 tuntia)	Jatkuva	Jatkuva	Aktiivisuudesta riippuvainen	Aktiivisuudesta riippuvainen
Paino	5 – 10 g	10 – 20 g	2 – 3 g	2 – 10 g	1 – 2 g
Edut	- Suuri energiamäärä - Kehittynyt teknologia	- Aina saatavilla	- Antenni voidaan integroida laitteeseen - Aina saatavilla	- Kehittynyt teknologia - Kevyt rakenne	- Kehittynyt teknologia - Kevyt rakenne
Haitat	- Tehontuotto riippuu auringonpaisteesta - Tarvitsee suuren pinta-alan - Paneeli tulee olla oikein suunnattu	- Matala teho - Kiinteä rakenne - Tarvitsee suuren pinta-alan	- Toiminta riippuu saatavissa olevasta tehosta - Riippuvainen etäisyydestä	- Suuri vaihtelu ulostulossa - Tarvitsee suuren pinta-alan	- Matala muuntohyötysuhde (korkea jännite/matala virta) - Ulostulon suuri vaihtelu

Taulukossa 1 on esitetty erilaisten ympäristön energian keräysmenetelmien eroja. Keräämällä saatava energian tehotiheys on yleisesti huomattavasti pienempi kuin muilla teholähteillä, kuten esim. litiumionakuilla. Kerätyllä energialla voidaan kuitenkin tyypillisesti tuottaa käyttöteho pienille sähköisille laitteille, kuten langattomalle sensorille ja saavuttaa itse itseään ylläpitävä toiminta. Suurin etu ympäristön energiankeräyksellä on se, että energiaa on saatavilla aina ja joka paikassa, mikä on kriittinen tekijä jatkuvan toiminnan laitteissa, kuten itsenäisissä sensoreissa.

LÄHTEET

- [1] Sangkil Kim, R. Vyas, J. Bitto, K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, M.M. Tentzeris, Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms, Proceedings of the IEEE, Vol. 102, Iss. 11, 2014, pp. 1649–1666. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6922609>.
- [2] S. Sudevalayam, P. Kulkarni, Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications, IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, Iss. 3, 2011, pp. 443–461. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5522465>.
- [3] Holler, F. James; Skoog, Douglas A. & Crouch, Stanley R. Principles of Instrumental Analysis (6th ed.). Cengage Learning, 2007, p. 1056. [ISBN 978-0-495-01201-6](https://www.cengage.com/books/9780495012016).
- [4] Manbachi, A. & Cobbold, R.S.C. Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection, 2011, Ultrasound 19 (4), pp. 187–96. Saatavissa: [doi:10.1258/ult.2011.011027](https://doi.org/10.1258/ult.2011.011027).
- [5] Gautschi, G. Piezoelectric Sensorics: Force, Strain, Pressure, Acceleration and Acoustic Emission Sensors, Materials and Amplifiers. Springer, 2002, p. 264. Saatavissa: [doi:10.1007/978-3-662-04732-3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-04732-3).
- [6] C. E. Yang, What is the Piezoelectric Effect, Sep 16, 2016. Saatavissa: <https://www.electronicdesign.com/power/what-piezoelectric-effect>. (viitattu 14.11.2019)
- [7] J. Krautkrämer, H. Krautkrämer, Ultrasonic Testing by Determination of Material Properties. In: Ultrasonic Testing of Materials. Springer, 1990, p. 677, Saatavissa: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-662-10680-8_34
- [8] A. Manbachi & R.S.C Cobbold, Development and Application of Piezoelectric Materials for Ultrasound Generation and Detection, 2011, Ultrasound. 19 (4), pp. 187–96. Saatavissa: [doi:10.1258/ult.2011.011027](https://doi.org/10.1258/ult.2011.011027).
- [9] G. Binnig & H. Rohrer, Scanning tunneling microscopy, 1986, IBM Journal of Research and Development 30 (4), pp. 355–69.
- [10] A. Safari & E. K. Akdoğan. Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications, 2008, New York: Springer, p. 482. [ISBN 978-0-387-76538-9](https://www.springer.com/9780387765389).
- [11] R. Repas, Sensor Sense: Piezoelectric Force Sensors, 2008, Machine-design.com. Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20100413205918/http://machinedesign.com/article/sensor-sense-piezoelectric-force-sensors-0207>, (viitattu 21.11.2019)
- [12] M. Minary-Jolandan & M. Yu, Nanoscale characterization of isolated individual type I collagen fibrils: Polarization and piezoelectricity, 2009, Nanotechnology. 20 (8): 085706. [doi:10.1088/0957-4484/20/8/085706](https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/8/085706), [PMID 19417467](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19417467/). Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-4484/20/8/085706>

- [13] R. Lakes, Electrical Properties of Bone: A Review. University of Wisconsin–Madison. Saatavissa: <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/BoneElectr.html>. (viitattu 13.1.2020)
- [14] S. R. Pollack, E. Korostoff, W. Starkebaum, W. Lannicone, Micro-Electrical Studies of Stress-Generated Potentials in Bone, 1979, In Brighton, C. T.; Black, J.; Pollack, S. R. (eds.). Electrical Properties of Bone and Cartilage. New York, NY: Grune & Stratton. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/jbm.820130506>
- [15] D. I. Fotiadis, G. Foutsitzi, C. V. Massalas, Wave propagation modeling in human long bones, 1999, Acta Mechanica. **137** (1–2): 65–81. Saatavissa: <doi:10.1007/BF01313145>.
- [16] M.J. Harnisch, I. Uitz, Near Field Communication (NFC), Informatik-Spektrum, Vol. 36, Iss. 1, 2013, pp. 99-103.
- [17] K. Sangkil, R. Vyas, J. Bito, K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, M.M. Tentzeris, Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms, Proceedings of the IEEE, Vol. 102, Iss. 11, 2014, pp. 1649–1666. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6922609>.
- [18] E. Jordan, K. G. Balmain, Electromagnetic Waves and Radiating Systems (2nd ed.), Prentice-Hall; First Edition, 1968, p. 710.
- [19] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. L. Sands, The Feynman Lectures on Physics, Basic Books, 2015, p. 594
- [20] D. J. Griffiths, Introduction to Electrodynamics (3rd edition), Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999, p. 576.
- [21] H. D. Young & R. A. Freedman, University Physics with Modern Physics, Global Edition, Vol. 14, 2015, p. 640
- [22] R. Want, An introduction to RFID technology, IEEE Pervasive Computing, Vol. 5, Iss. 1, 2006, pp. 25-33. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1593568>.
- [23] <https://www.everythingrf.com/community/what-are-near-field-and-far-field-regions-of-an-antenna> (viitattu 11.11.2019)
- [24] NFC as Technology Enabler, NFC Forum, 2013. Saatavissa: https://web.archive.org/web/20131222014541/http://members.nfc-forum.org/about-nfc/tech_enabler/, (viitattu 28.2.2020),
- [25] R. Want, An introduction to RFID technology, IEEE Pervasive Computing, Vol. 5, Iss. 1, 2006, pp. 25-33. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1593568>.
- [26] I. Angell, J. Kietzmann, RFID and the end of cash, Communications of the ACM. 49, 2006, pp. 90–96.

- [27] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, Theory and measurement of backscattering from RFID tags, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, Vol. 48, Iss. 6, 2006, pp. 212-218. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4118038>.
- [28] V. Smil, *Energy at the Crossroads*, oecd.org, 2006, Saatavissa: http://home.cc.umanitoba.ca/~vsmil/pdf_pubs/oecd.pdf, (viitattu 9.10.2019).
- [29] P. Jaffe, J. McSpadden, Energy conversion and transmission modules for space solar power, *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1424–1437, Jun. 2013.
- [30] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, and W. Warta, Solar cell efficiency tables (version 38), *Progr. Photovoltaics, Res. Appl.*, vol. 19, pp. 565–572, Aug. 2011.
- [31] W. Palz, *Solar Power for the World: What You Wanted to Know about Photovoltaics*, 2013, pp. 131–.
- [32] M.R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M.A. Radzi, M.I. Rezadad, S. Hajighorbani, Power loss due to soiling on solar panel: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, 2016, pp. 1307-1316. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116000745>, (viitattu 9.10.2019).
- [33] S. Lo Piano, M. Kozo, Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic systems for electricity generation. *Applied Energy*. 186 (2), 2017, pp. 167–74.
- [34] B. Roberts, *Photovoltaic Solar Resource of the United States*. National Renewable Energy Laboratory, 2008
- [35] D. J. C. MacKay, *Sustainable Energy - without the hot air*, Solar photovoltaics: data from a 25-m² array in Cambridgeshire in 2006, 2006, Saatavissa: http://www.inference.org.uk/withouthotair/c6/page_40.shtml, (viitattu 9.10.2019)
- [36] I. Fraunhofer, New world record for solar cell efficiency at 46.0% French-German cooperation confirms competitive advantage of European photovoltaic industry, 2014. Saatavissa: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>, (viitattu 13.1.2020).
- [37] *Building Integrated Photovoltaics*, Wisconsin Public Service Corporation, 2007, Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20070202193559/http://www.building-solar.com/technology.asp>, (viitattu 9.10.2019).
- [38] <https://www.nytimes.com/2019/06/04/us/apple-headquarters-earthquake-preparedness.html>, (viitattu 9.10.2019).
- [39] I. Patringenaru, Solar panels keep buildings cool, University of California, San Diego, Saatavissa: http://jacobsschool.ucsd.edu/news/news_releases/release.sfe?id=1094, (viitattu 9.10.2019).
- [40] *Global Market Outlook for Photovoltaics 2014–2018*, EPIA – European Photovoltaic Industry Association. p. 45.

- [41] IEA, Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy, 2014. Saatavissa: https://web.archive.org/web/20141001012612/http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf.
- [42] <https://web.archive.org/web/20181229172944/http://arzonSolar.com/technology/> (viitattu 13.1.2020).
- [43] A. Mojiri, R. Taylor, E. Thomsen, G. Rosengarten, Spectral beam splitting for efficient conversion of solar energy — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 28: pp. 654–663, 2013, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005662?via%3Dihub>.
- [44] M. J. M. Pathak, P. G. Sanders, J. M. Pearce, Optimizing limited solar roof access by exergy analysis of solar thermal, photovoltaic, and hybrid photovoltaic thermal systems, pp. 115–124, 2014, Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914000609?via%3Dihub>.
- [45] J. Perlin, *Late 1950s – Saved by the Space Race, Solar Evolution – The History of Solar Energy*, 2005, The Rarus Institute. Retrieved 25 February 2007.
- [46] R. Miller, Next-gen Prius now official, uses solar panels to keep car cool, *engadget.com*. Saatavissa <https://www.engadget.com/2009/01/13/next-gen-prius-now-official-uses-solar-panels-to-keep-car-cool/?guccounter=1>, (viitattu 27.11.2019).
- [47] [SolidWorks Plays Key Role in Cambridge Eco Race Effort](http://www.cambridgenetwork.co.uk), *cambridgenetwork.co.uk* (viitattu 27.11.2019)
- [48] S. H. Price, The Peltier Effect and Thermoelectric Cooling. Saatavissa: http://ffden-2.phys.uaf.edu/212_spring2007.web.dir/sedona_price/phys_212_webproj_peltier.html, (viitattu 27.11.2019).
- [49] F. J. Disalvo, Thermoelectric Cooling and Power Generation, 1999, *Science*. 285 (5428), pp. 703–6, Saatavissa: <https://science.sciencemag.org/content/285/5428/703>.
- [50] T. Seebeck, Magnetische Polarisation der Metalle und Erze durch Temperatur-Differenz, *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1822, pp. 265–373. Saatavissa: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=osu.32435055147011&view=1up&seq=311>.
- [51] K. M. Blundell & S. J. Blundell, *Concepts in Thermal Physics*, 2006, Saatavissa: https://www.academia.edu/36089704/Concepts_in_Thermal_Physics-Blundell.pdf, (viitattu 27.11.2019).
- [52] J. P. Moore, Absolute Seebeck coefficient of platinum from 80 to 340 K and the thermal and electrical conductivities of lead from 80 to 400 K, *Journal of Applied Physics*, 44 (3): 1174–1178, 1973, Saatavissa: [doi:10.1063/1.1662324](https://doi.org/10.1063/1.1662324).
- [53] K. Biswas, J. He, I. D. Blum, C-I Wu, T. P. Hogan, D. N. Seidman, V. P. Dravid, M. G. Kanatzidis, High-performance bulk thermoelectrics with all-scale hierarchical architectures, 2012, *Nature*. 489 (7416), pp. 414–418. Saatavissa: [doi:10.1038/nature11439](https://doi.org/10.1038/nature11439).

- [54] J. Fairbanks, Automotive Thermoelectric Generators and HVAC, Department of Energy, 2014, Saatavissa: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f13/ace00e_fairbanks_2013_o.pdf, (viitattu 10.10.2019).
- [55] K. Fehrenbacher, A startup is finally bringing heat-to-power tech in a big way for vehicles, Fortune, 2015, Saatavissa: <https://fortune.com/2015/06/24/heat-power-tech-cars/>, (viitattu 27.11.2019).
- [56] O.H. Ando Junior, A.L.O. Maran, N.C. Henao, A review of the development and applications of thermoelectric microgenerators for energy harvesting, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, 2018, pp. 376–393. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118301394>.
- [57] K. Sangkil, R. Vyas, J. Bito, K. Niotaki, A. Collado, A. Georgiadis, M.M. Tentzeris, Ambient RF Energy-Harvesting Technologies for Self-Sustainable Standalone Wireless Sensor Platforms, Proceedings of the IEEE, Vol. 102, Iss. 11, 2014, pp. 1649–1666. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6922609>.