



Open your mind. LUT.

Lappeenranta University of Technology

**KATSAUS TERMISEEN JA PIETSOSÄHKÖISEEN
ENERGIAN LOUHINTAAN 2016**
**Review of Thermoelectric and Piezoelectric
Energy Harvesting in 2016**

Janne Kauppi

TIIVISTELMÄ

Janne Kauppi

LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka
Mikko Kuisma

Katsaus termiseen ja pietsosähköiseen energian louhintaan 2016

2017

Kandidaatintyö.
27 s.

Energian louhinta eli ympäristön energianlähteiden hyödyntäminen laitteiden käyttöenergiana on mahdollinen korvaaja paristoille ja akuille tai pitkille kaapeleille. Energian louhinta on erityisen kiinnostava aihe langattomille antureille, joiden määrä kasvaa koko ajan muun muassa esineiden internetin yleistyessä. Energian louhinta tarjoaa antureille huoltovapaan energiatuotannon jopa kymmenien vuosien ajaksi. Energian louhinta on myös suurimmaksi osaksi ekologinen vaihtoehto, sillä se perustuu pitkälti uusiutuviin energiamuotoihin ja mahdollistaa esimerkiksi teollisuusprosessien hukkalämmön hyödyntämisen. Tässä työssä tutkittiin kirjallisuustutkielman avulla vuonna 2016 saatavilla olleiden kaupallisten lämpösähköisten ja pietsosähköisten generaattoreiden toimintaperiaatteita ja tekniikan tasoa.

Energian louhinta lämpösähköisillä generaattoreilla perustuu tavallisesti lämpötilaeroon generaattorin päiden välillä. Generaattorin hyötysuhde määräytyy suurimmaksi osaksi sen materiaalien ominaisuuksien mukaan, joten tärkein kehityskohde on uusien ja parempien materiaalien löytäminen. Nykyisten kaupallisten ratkaisujen hyötysuhteet ovat parhaimmillaan noin 8 % ja optimaalisissa tilanteissa on mahdollista tuottaa jopa kymmenien wattien teho.

Pietsosähköisillä generaattoreilla voidaan louhia energiaa liikkeestä, tavallisesti värähtelystä. Toiminta riippuu useista tekijöistä, joista tärkeimmät ovat louhittavan värähtelyn taajuus ja amplitudi sekä generaattorin ominaisvärähtelytaajuus. Käyttökohteeseensa optimoitu pietsosähköinen generaattori voi tuottaa tehoa mikrowateista milliwatteihin.

Energian louhinta on pienitehoisille laitteille, kuten langattomille antureille, toimiva ratkaisu käyttöenergian tuottamiselle ja se tarjoaa useita etuja perinteisiin käyttöenergianlähteisiin verrattuna. Energian louhinnan suunnittelu on kuitenkin haastavampaa kuin akkujen tai verkkovirran käyttö ja sen toteutus on usein myös kalliimpi. Se on silti loistava ratkaisu käyttökohteissa, joissa energianlähde on luotettavasti saatavilla ympäristöstä ja laitteen huoltaminen, joka aiheutuisi esimerkiksi paristojen vaihdosta, olisi kallista tai mahdotonta.

Asiasanat: energian louhinta, lämpösähköinen, pietsosähköinen

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Janne Kauppi

Review of Thermoelectric and Piezoelectric Energy Harvesting in 2016

2017

Bachelor's Thesis.

27 p.

Examiner: professor Mikko Kuisma

Energy harvesting means capturing the ambient energy to power small devices and it is an alternative to batteries and long power cables. Energy harvesting is an extremely interesting technology for wireless sensors for which there is a growing demand caused by the Internet of Things. Energy harvesting offers the sensors a maintenance free power source with a lifetime of tens of years. It is also highly ecological technology for it is mostly based on renewing energy forms and can be used to utilize for example the waste heat created in industrial processes. In this Thesis the operating principles as well as the state-of-the-art of commercial thermoelectric harvesters and piezoelectric harvesters available in 2016 were reviewed by literature research.

Energy harvesting with thermoelectric harvesters is usually based on a thermal difference between both ends of the generator. The efficiency of the generator is largely based on its materials and their capabilities, making the research of better materials the most important development aspect. The efficiency of the currently available thermoelectric harvesters is 8 % at best and they can produce tens of watts of power in optimal conditions.

Piezoelectric harvesters are used for harvesting mechanical energy, usually from vibrations. The operation depends on several factors, mainly the frequency and the amplitude of the harvested vibration as well as the natural vibrating frequency of the harvester. In optimized conditions piezoelectric harvesters can produce power in the range of microwatts to milliwatts.

Energy harvesting is a noteworthy power source for low-power devices such as wireless sensors. Designing an energy harvesting system requires considerably more resources than batteries or power cables would and the implementation is often more expensive. It does however provide several advantages over the traditional power sources and it is an excellent option in situations where a reliable ambient energy source is available and the maintenance of the device, caused by changing the batteries for example, would be expensive or impossible.

Keywords: energy harvesting, energy scavenging, thermoelectric, piezoelectric

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
1.1	Tavoite ja tutkimuskysymykset	8
2.	Lämpö- ja liike-energian louhinnan toimintaperiaatteet	10
2.1	Lämpöenergian louhinta	10
2.2	Liike-energian louhinta.....	12
3.	Kaupalliset ratkaisut	14
3.1	Lämpösähköiset generaattorit ja jäähdyttimet.....	14
3.2	Pietsosähköiset generaattorit	17
4.	Johtopäätökset ja yhteenveto	21
4.1	Pohdintaa energian louhinnasta ja mahdollisista jatkotutkimuskohteista	22
	Lähteet	24

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

ATI	Analog Technologies, Inc.
Bi_2Te_3	vismutti-telluridi
CMO	kalsiummangaanioksidi
PVDF	polyvinyylideenidifluoridi
PMN-PT	lyijy-magnesium-niobaatti-lyijy-titanaatti
PZT	lyijy-zirkonaatti-titanaatti
TEC	Thermoelectric cooler, lämpösähköinen jäähdyn
TEG	Thermoelectric generator, lämpösähköinen generaattori
ZnO NW	sinkkioksidi nanoketju

α	Seebeckin kerroin
Δ	muutos
λ	lämmönjohtavuus
ρ	sähköinen resistiivisyys

I	virta
P	teho
T	lämpötila
U	jännite
ZT	lämpösähköinen hyvyysluku

Alaindeksit

cold	TEG-moduulin alemman lämpötilan puoli
hot	TEG-moduulin korkeamman lämpötilan puoli
n	N-tyypin puolijohde
p	P-tyypin puolijohde
out	lähtö

1. JOHDANTO

Yhä useammista laitteista halutaan tehdä älykkäitä, jotta laitteista ja prosesseista saataisiin mahdollisimman itsenäisesti toimivia ja helposti hallittavia. Automatisointia ja itsenäisesti toimimista varten tarvitaan tietoa eli dataa ympäristöstä, jonka perusteella toimintaa ohjataan ja mukautetaan. Saatavalla datalla voidaan esimerkiksi monipuolistaa tuotantoa sekä välttää ongelmia ja seisahduksia, ja siten parantaa kilpailukykyä. Jotta prosessit ja laitteet toimisivat itsenäisesti, systeemiin kuuluvien laitteiden tulee kyetä mittaamaan ja analysoimaan ympäristön tapahtumia, lähettää dataa toistensa välillä, sekä suorittaa määritellyt toimenpiteet saadun datan perusteella (Shaikh 2015). Ilmiöstä käytetään termiä esineiden internet, kun data saatetaan laitteiden ja ihmisten käytettäväksi internetin välityksellä (Shaikh 2015).

Kaiken perustana on datan kerääminen ympäristöstä mittauksilla, joita varten tarvitaan erilaisia antureita. Antureiden energianlähteenä voidaan käyttää verkkovirtaa, mutta monissa tapauksissa kaapeleiden vetäminen pienille antureille ei ole taloudellisesti kannattavaa tai edes mahdollista. Paristoja tai akkuja voidaan käyttää langattomuuden saavuttamiseen, mutta kumpikin ratkaisu aiheuttaa ongelmia pitkällä aikavälillä. Paristojen käyttö langattomien anturien energianlähteenä ei ole ekologista ja rajoittaa laitteen käyttöön pariston tai akun energialatauksen purkautumisaikaan (Ferdous 2016). Lisäksi sekä paristojen että akkujen vaihtaminen ja lataaminen voi joissain käyttökohteissa olla haastavaa tai mahdotonta ja aiheuttaa aina ylimääräisiä huoltotoimenpiteitä (Ferdous 2016). Huoltotöiden kustannukset ja haastavuus voivat kasvaa hyvin suuriksi, etenkin jos kyseessä on lukuisista antureista koostuva anturiverkko.

Yksi ratkaisu langattomien antureiden energiantarpeeseen on energian louhinta, jossa energia kerätään ympäristön energianlähteestä, kuten valosta, lämmöstä tai liikkeestä (Shaikh 2015). Idealisessa tapauksessa energian louhinta mahdollistaa anturien toiminnan jopa kymmenien vuosien ajan täysin ilman käyttöenergian saantiin liittyviä huoltotoimenpiteitä tai käyttökatkoksia, jolloin anturit voidaan niin sanotusti asentaa ja unohtaa (Shaikh 2015; Suh 2014; Wang 2013). Useimmat energian louhinnan menetelmät perustuvat uusiutuviin energianlähteisiin, joten se on pohjimmiltaan myös ekologinen vaihtoehto (Ferdous 2016).

Energian louhintaa on tutkittu jo useita vuosikymmeniä, mutta vasta vähän energiaa tarvitsevat langattomat anturit ovat tarjonneet sille todellisen käyttötarkoituksen ja edistäneet sen tutkimusta. Energian louhinnalla saavutettavissa oleva tyypillinen tehotuotto on kirjallisuuden mukaan mikrowateista milliwatteihin, joten energianlähteen ominaisuuksien huolellinen kartoittaminen ja anturien energiankulutuksen optimoiminen ovat edellytys onnistuneelle toteutukselle (Paradiso 2005; Roundy 2002). Suunnittelun sekä toteutuksen monimutkaisuus paristojen, akkujen tai verkkovirran käyttöön verrattuna on yksi suurimmista rajoitteista energian louhinnan yleistymiselle. Energian louhintaratkaisut ovat suunnittelun ja toteutuksen osalta usein myös kalliimpia kuin muiden energianlähteiden käyttö.

Energian louhinta tarjoaa kuitenkin useita etuja ja mahdollisuuksia pitkäikäisyyden, huoltovapauden ja itsenäisen energian tuotannon kautta. Nämä ominaisuudet ovat välttämättömiä kohteissa, joissa verkkovirtaa ei voida käyttää, eikä paristoja tai akkuja voida vaihtaa tai ladata. Erityisesti eristyneissä, vaikeasti saavutettavissa tai vaarallisissa olosuhteissa sijaitsevat anturit hyötyvät energian louhinnasta (Shaikh 2015). Muutamia

energian louhinnan käyttökohteita ovat avaruusteknologia, työkoneiden toiminnan ja kunnan tarkkailu, ympäristön tarkkailu ja lääketiede. Lisäksi kasvava tarve ekologisuudelle on johtanut energian louhinnan hyödyntämiseen hukkalämmön muuttamisessa sähköiseksi energiaksi muun muassa autoteollisuudessa, ilmailuteollisuudessa, sekä teollisuusprosesseissa (Champier 2017). Energian louhinta mahdollistaa myös uusia innovaatioita. Esimerkiksi ihmiskehon lämpöä on käytetty rannekellojen energianlähteenä ja kengän pohjiin asennettuja liike-energiaa louhivia piezoelementtejä sijaintitietojen lähettämiseen (Snyder 2009; Sudevalayam 2010). Lääketieteessä tutkitaan muun muassa energian louhintaa sydämen lyönneistä tai keuhkojen liikkeestä, mitä voitaisiin hyödyntää esimerkiksi sydämentahdistimen energianlähteenä (Karami 2012).

Energian louhinnan toteutus koostuu yleisesti generaattorista, joka muuttaa ympäristön energian sähköksi, sekä energian varastoinnista ja hallinnasta vastaavista piireistä (Ferdous 2016). Jos tuotettava energia on liian vähäinen sitä käyttävän laitteen jatkuvaan toimintaan, ajoittainen toiminta voi kuitenkin olla mahdollista varastoimalla jännitettä esimerkiksi kondensaattoreilla (Ferdous 2016; Shaikh 2015). Ratkaisuissa hyödynnetäänkin usein jännitteen nostajia, sekä paristoja ja superkondensaattoreita energiavarastoina. Tärkein osa toteutusta on kuitenkin itse generaattori, jolla sähköinen energia tuotetaan. Energian louhinnan tapauksessa generaattori ei välttämättä sisällä lainkaan mekaanisia liikkuvia osia, vaan nimitystä käytetään yleisesti kuvaamaan ulkoisen energian sähköksi muuttavaa laitetta.

Energian louhintaan soveltuvat energianlähteet voidaan jakaa lämpöenergiaan, kineettiseen energiaan, sähkömagneettiseen säteilyenergiaan ja bioenergiaan (Shaikh 2015). Mekaaniseen energiaan sisältyy kaikki liikettä aiheuttavat energianlähteet, luokittelutavasta riippuen myös tuulen ja aaltojen energia. Sähkömagneettisen säteilyenergian louhintatavat voidaan jakaa säteilyn taajuuksien mukaan, joista yleisimpiä ovat auringon säteilyenergia ja radiotaajuuksien säteilyenergia.

Auringon sähkömagneettisesta säteilystä maan pintaan saapuva energia on arviolta 198 W/m^2 (IEA 2011). Saatava energiamäärä mahdollistaa antureiden toiminnan ja energian tuotanto valokennoilla onkin energian louhintatavoista kehittynein (Ferdous 2016). Auringon säteilyenergian louhintaan liittyy kuitenkin epävarmuus säteilyn saatavuudesta. Valokennot on myös asennettava säteilyä vastaanottaville paikoille ja niiden on pysyttävä esteettöminä. Lisäksi systeemin louhima energia on varastoitava akkuihin, jotta sitä voitaisiin hyödyntää (Ferdous 2016). Sisätiloissa auringonvalon sijaan voidaan louhia valaisimien tuottamaa säteilyenergiaa, joiden tuottama energia on eri kirjallisuusarvioiden mukaan $0.8 \text{ W/m}^2 - 10 \text{ W/m}^2$ (Carvalho 2013).

Radiotaajuuksisen säteilyenergian louhinta on uusi kehitettävä energian louhintamuoto, joka on erityisen kiinnostava kaupunkialueilla, joissa lukuisat laitteet aiheuttavat säteilyä. Radiotaajuuksien kuljettama säteilyenergia on kuitenkin terveystarpeiden takia lainsäädännöllä rajoitettua, säteilyn tehokantama on lyhyt ja se heikentyy fyysisten esteiden kuten seinien läpi kulkiessaan (Visser 2008). Esimerkiksi GSM-aseman säteilysignaalien tehoitehoisuus 25 m - 100 m etäisyydellä on parhaimmillaankin vain 1 mW/m^2 (Visser 2008). Lisäksi energian louhiminen säteilystä aiheuttaa katvealueita, jotka voivat aiheuttaa ei-toivottuja vaikutuksia säteilevien laitteiden toimintaan.

Langattomille antureille usein käyttökelpoisia ja luotettavia energian louhinnan lähteitä ovat lämpöenergia ja värähtelystä tai paineesta aiheutuva mekaaninen energia, joita on laajasti saatavilla ja helposti hyödynnettävissä. Lämpösähköinen energian louhinta perustuu

lämpötilaeroon tai lämpötilan muutokseen, kun taas mekaanista energiaa voidaan louhia pietsosähköisillä materiaaleilla, sähkömagneettisella generaattorilla, sähköstaattisella generaattorilla sekä perinteisillä pyörivillä ja lineaarisilla moottoreilla (Shaikh 2015). Erityisesti pietsosähköiset materiaalit mahdollistavat anturien toiminnan jatkuvaa värähtelyä sisältävissä käyttökohteissa.

Valokennojen toiminta on jo hyvin tunnettua ja ne ovat laajasti käytössä. Lämpösähköinen ja pietsosähköinen energian louhinta ovat kuitenkin erittäin hyviä vaihtoehtoja erityisesti langattomille antureille. Tässä työssä tutkitaan lämpösähköisten generaattoreiden ja mekaanista energiaa louhivien pietsosähköisten generaattoreiden tekniikan nykytasoa kaupallisissa ratkaisussa, jotta niiden käyttömahdollisuuksia voitaisiin arvioida paremmin. Myös generaattoreiksi sopivia, mutta muihin käyttötarkoituksiin suunniteltuja tai markkinoituja tuotteita huomioidaan kokonaiskuvan hahmottamiseksi.

1.1 Tavoite ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on suorittaa kirjallisuustutkielma vuonna 2016 kaupallisesti saatavilla olleiden lämpö- ja pietsosähköisten energian louhintaratkaisujen tekniikan tasosta ja toimintaperiaatteista. Tutkimus keskittyy lämpö- ja pietsosähköisiin generaattoreihin langattomien antureiden energianlähteinä.

Tutkimus pyrkii vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Mitä kaupallisia lämpö- ja pietsosähköisiä energian louhintaratkaisuja on saatavilla vuonna 2016 langattomien antureiden energianlähteiksi?
- Mitkä ovat löydettyjen ratkaisujen toimintaperiaatteet ja tärkeimmät tekniset ominaisuudet?
- Mitä voidaan todeta energian louhinnan nykytasosta ja mitä voidaan odottaa sen tulevaisuuden kehitykseltä?

Tässä kirjallisuustutkielmassa käytetään materiaalina tieteellisiä artikkeleita sekä energian louhintaratkaisujen valmistajien tarjoamia materiaaleja, kuten data-lehtiä, tuote-esitteitä ja käyttöoppaita. Kirjallisuustutkielma on paljon käytetty menetelmä teknisten laitteiden toimintaperiaatteiden ja tekniikan tason tutkimiseen. Erityisesti kaupallisten ratkaisujen tekniikan tason arviointi kirjallisuustutkielman avulla on kuitenkin hyvin riippuvainen informaatiosta, jota valmistajat tarjoavat. Saatu informaatio voi joissain tapauksissa olla puutteellista, epätieteellisesti esitettyä tai epätarkkaa. Tarkimpia tuloksia saataisiin todennäköisesti testaamalla tuotteita, mutta yleisen tekniikan tason arviointiin tarvittaisiin suuri määrä testattavia tuotteita, ja testien suunnitteluun ja toteuttamiseen tarvittavat lähtötiedot vaatisivat silti kirjallisuustutkielman suorittamista.

Tutkielmassa kerätään yhteen tietoa eri energian louhintavaihtoehtoista, joita yrityksille ja yksityishenkilöille on tutkimusajankohtana tarjolla. Lämpö- ja pietsosähköisen energian louhinnan toimintaperiaatteita tutkitaan tieteellisten artikkeleiden avulla ja tekniikan tasoa pyritään selvittämään laitteiden valmistajien ilmoittamien teknisten ominaisuuksien, erityisesti tuotettavan tehon, jännitteen ja virran perusteella. Samalla selvitetään ratkaisujen suunnitteluun liittyviä tärkeimpiä toimenpiteitä. Lisäksi pyritään selvittämään generaattoreiden hintatietoja ja saatavuutta eri valmistajilta ja jälleenmyyjiltä.

Kappaleessa kaksi on esitelty lämpö- ja liike-energian louhintamenetelmiä, keskittyen erityisesti lämpötilaeroon perustuvan lämpösähköisen sekä pietsosähköisen energian

louhinnan toimintaperiaatteisiin. Kolmannessa kappaleessa on esitelty kaupallisia ratkaisuja ja niiden teknisiä ominaisuuksia. Lisäksi on kartoitettu eri valmistajia sekä suuntaa antavia hintatietoja. Lopuksi on tehty yhteenveto tuloksista ja pohdittu energian louhinnan nykytasoa, mahdollista tulevaisuuden kehitystä ja mahdollisia jatkotutkimuskohteita. Työn perusteella lukija saa yleiskäsityksen kaupallisten lämpö- ja pietsosähköisten energian louhintaratkaisujen tekniikan nykytasosta ja toiminnasta.

2. LÄMPÖ- JA LIIKE-ENERGIAN LOUHINNAN TOIMINTAPERIAATTEET

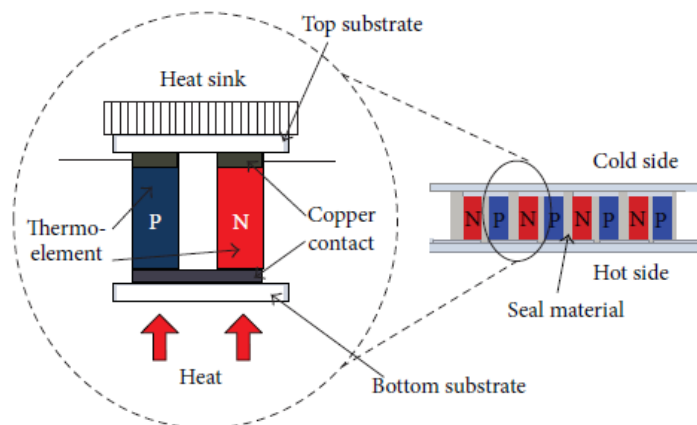
Lämpö- ja liike-energian louhintaan tunnetaan muutamia tapoja, joista eniten käytetään ja tutkitaan Seebeckin ilmiöön perustuvaa lämpöenergian louhintaa ja pietsosähköiseen ilmiöön perustuvaa liike-energian louhintaa. Molemmat menetelmät hyödyntävät tiettyjen materiaalien ominaisuutta tuottaa sähköinen potentiaali niihin kohdistuvasta ympäristön energiasta. Molemmat menetelmät ovat erityisen kiinnostavia myös siksi, että syntyvä jännite on mahdollista käyttää suoraan sähköisessä piirissä ilman erillisiä muuntoprosesseja.

Seuraavaksi käsitellään lämpö- ja liike-energian louhinnan toimintaperiaatteita, painottaen Seebeckin ilmiöön ja pietsosähköiseen ilmiöön perustuvia louhintamenetelmiä.

2.1 Lämpöenergian louhinta

Lämpö on laajasti saatavilla oleva energian muoto, jonka hyödyntämiseen ei tarvita liikkuvia osia. Lämpöenergian louhinnassa voidaan hyödyntää joko lämpötilaeroja tai lämpötilan muutoksia.

Huomattavasti yleisempi ja kehittyneempi tapa energian louhintaan lämmöstä perustuu lämpötilaeroon eli Seebeckin ilmiöön, jossa lämpötilaero kahden yhteenliitetyn eri puolijohdemateriaalin päiden välillä synnyttää niiden välille jännitteen (Wang 2013). Syntyvän jännitteen suuruus riippuu pääasiassa termoparin materiaaleista, koosta ja lämpötilaeron suuruudesta ja on tyypillisesti yhdelle termoparille 0.2 mV/K (Snyder 2009). Lämpösähköiset energianlouhimet koostuvat useista termopareista saavuttaakseen suuremman jännitteen. Kuvassa 2.1 on havainnollistettu lämpöenergian louhinnan perusmalli Seebeckin ilmiöön perustuen.



Kuva 2.1 Lämpöenergian louhinta termoparilla Seebeckin ilmiöön perustuen (Wang 2013). PN-termoelementtien päiden välinen lämpötilaero synnyttää jännitteen. Kytkemällä useita termopareja sarjaan voidaan kasvattaa jännitettä. Jäähdytuselementtien käyttö on tärkeää, jotta lämpötilaero ei pääse tasaantumaan päiden välillä.

Seebeckin ilmiölle päinvastaista ilmiötä kutsutaan Peltier-ilmiöksi. Peltierin ilmiössä puolijohdepariin johdetaan tasajännite, jolloin parin päiden välille syntyy lämpötilaero. Siten pari toimii lämpöpumpuna ja sitä voidaan hyödyntää lämpösähköisenä jäähdytuselementtinä (Thermo Electric Cooler, TEC). Seebeckin ja Peltierin ilmiöiden

käänteisyydestä johtuen lämpösähköisiä jäähdytyslementtejä voidaan käyttää myös generaattoreina energian louhintaan.

Seebeckin ilmiö on energialouhinnan kannalta erityisen kiinnostava, sillä sen tuottama potentiaali voidaan hyödyntää suoraan kuormassa. Usein on kuitenkin tarpeen käyttää erillistä piiriä jännitteen nostamiseksi (Wang 2013). Lisäksi lämpösähköisen generaattorin (Thermo Electric Generator, TEG) laajat käyttökohteet kaikissa ympäristöissä, joissa esiintyy lämpötilaeroja, sekä sen äänettömyys ja koostuminen vain passiivisista komponenteista tekevät lämpöenergian louhinnasta mielekäästä (Shaikh 2015).

Suurin vaikutus TEG:n toimintaan on sen materiaalilla. Materiaalien sekä itse laitteiden vertailuun käytetään tavallisesti lämpösähköistä hyvyyslukua ZT , joka kuvaa materiaalin termodynaamista hyötysuhdetta (Wang 2013). Hyvyysluku Z saadaan yhtälöstä

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2}, \quad (2.1)$$

missä α_p ja α_n ovat termoparin materiaalien Seebeckin kertoimet, λ_p ja λ_n materiaalien lämmönjohtavuudet ja ρ_p ja ρ_n materiaalien sähköiset resistiivisyydet (Champier 2017). Hyvyysluvusta saadaan dimensioton ja helposti vertailtava kertomalla se generaattorin keskilämpötilalla T .

Yleisin lämpösähköisessä energian louhinnassa käytetty materiaali on pitkään ollut vismuttiteelluridi (Bi_2Te_3), jonka lämpösähköinen hyvyysluku ZT on tavallisesti välillä 0.5 - 0.8 ja mahdollistaa noin 5 % hyötysuhteen, parhaimmillaan 8 % (Champier 2017; Wang 2013). Vismutin ja telluridin harvinaisuus on pitkään rajoittanut TEG:n kehitystä, mutta uusia materiaaleja on jatkuvasti kehityksessä ja saapumassa myös kaupallisiin tuotteisiin (Champier 2017). Nykyiset laboratoriotutkimukset pyrkivät kehittämään materiaaleja, joiden $ZT = 2$, mahdollistaen 10 % hyötysuhteen (Champier 2017).

Lämpöenergian louhintaa rajoittaa, kuten kaikkia lämpövoimakoneita, Carnot'n hyötysuhde. Lisäksi on huomioitava termodynamiikan pääsääntö, jonka mukaan eri lämpöiset kappaleet pyrkivät termodynaamiseen tasapainoon. Jotta lämpötilaero generaattorin päiden välillä säilyisi, kylmän päädyn lämmönjohtumista tulee tehostaa jäähdytyslementillä, kuten kuvassa 2.1 on esitetty.

Suurin teho saavutetaan, kun lämpösähköisen generaattorin sähköinen resistanssi on sovitettu kuorman resistanssiin ja generaattorin ja jäähdytyslementin termiset resistanssit on sovitettu (Bierschenk 2009; Snyder 2009). Sähköisen resistanssin sovituksella voidaan jopa kaksinkertaistaa lämpösähköisen generaattorin hyötysuhde (Bierschenk 2009). Edelleen sähköisen resistanssin ollessa sovitettu, termisen resistanssin sovitus voi tuottaa nelinkertaisen tehon (Bierschenk 2009).

Seebeckin ilmiöön perustuvan lämpösähköisen energian louhinnassa tärkeimmät huomioitavat kohdat ovat siis generaattorin materiaali, lämpötilaeron säilyttäminen jäähdytyslementeillä, jäähdytyslementin ja generaattorin termisten resistanssien sovittaminen, sekä generaattorin ja kuorman sähköisten resistanssien sovittaminen.

Toinen tapa lämpöenergian louhintaan on pyrosähköiset materiaalit. Pyrosähköiset materiaalit, kuten lyijy-zirkonaatti-titanaatti (PZT), polarisoituvat spontaanisti lämpötilan

muuttuessa, mikä saa aikaan sähkövirran (Dalola 2010). Pyrosähköiseen ilmiöön perustuvalla energian louhinnalla saatava jännite ja virta ovat kuitenkin hyvin pieniä, tavallisesti alle 0.1 V ja alle 1 nA, joten sille ei ole vielä juurikaan kaupallisia ratkaisuja (Yang 2012). Tutkimuksissa on kuitenkin onnistuttu kasvattamaan tuotettua jännitettä: muun muassa 45 K suuruisella lämpötilan muutoksella ja 0.2 K/s muutosnopeudella pystyttiin käyttämään LCD-näyttöä 60 sekunnin ajan (Yang 2012). Pyrosähköisen energian louhinnan kehittyessä se voi mahdollistaa lämpöenergian louhinnan myös silloin, kun perinteisesti käytetyn Seebeckin ilmiön vaatimaa lämpötilaeroa ei ole saatavilla.

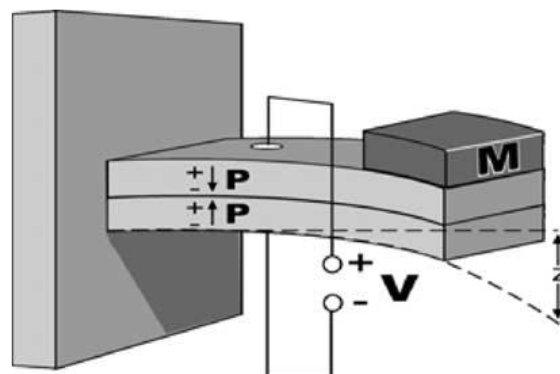
2.2 Liike-energian louhinta

Mekaanisesta liike-energiasta voidaan louhia energiaa pietsosähköisillä materiaaleilla, sähkömagneettisella generaattorilla, sekä sähköstaattisella generaattorilla (Elvin 2013). Energian louhinta liike-energiasta on ollut jo pitkään kiinnostava tutkimuskohde liike-energian saatavuuden ansiosta.

Sähkömagneettinen generaattori perustuu Faradayn induktiolakiin: muuttuva magneettikenttä indusoi sähkövirran kentässä olevaan johtimeen. Mekaaninen energia, kuten värähtely, saattaa magneetin ja sen ympärillä olevan johtimen liikkeeseen toisiinsa nähden samalla synnyttäen sähkövirran johtimeen (Elvin 2013).

Energian louhinta sähköstaattisella eli kapasitiivisella generaattorilla perustuu kondensaattoriin. Alkutilassa kondensaattori saatetaan korkeaan kapasitanssiin pienellä jännitteellä. Kondensaattorin levyt saatetaan erkanemaan toisistaan liike-energialla, jolloin kapasitanssi laskee ja synnyttää suuren jännitteen (Elvin 2013; Mitcheson 2007). Menetelmä mahdollistaa jopa satojen volttien jännitteen tuottamisen, mutta vaatii ulkoisen jännitelähteen kondensaattorin varaamiseen (Mitcheson 2007). Korkeaa jännitettä joudutaan tavallisesti muuntamaan pienemmäksi komponenttien suojelemiseksi.

Värähtelyä ja puristavaa voimaa voidaan muuttaa sähköiseksi energiaksi (ja toisin päin) pietsosähköisten materiaalien avulla. Pietsosähköisiin materiaaleihin syntyy potentiaaliero, kun niihin kohdistuu materiaalia muokkaava voima, kuten puristava tai vääntävä voima (Elvin 2013). Pietsosähköisen elementin toimintaperiaatetta on havainnollistettu kuvassa 2.2.



Kuva 2.2 Periaatekuva energian louhinnasta taipuvalla pietsoelementillä vaaka-asennossa (Roundy 2002). Pietsoelementin taipuessa tasapainoasemaansa nähden materiaali kokee muutoksia, jotka synnyttävät jännitteen. Elementin taipuessa toiseen suuntaan jännitteen napaisuus vaihtuu. Elementin vapaaseen pätyyn lisätyllä massalla voidaan vaikuttaa elementin värähtelytaajuuteen.

Pietsosähköisten materiaalien tutkimussuosio johtuu paitsi liike-energian saatavuudesta, myös niiden ominaisuudesta muuttaa materiaaliin kohdistunut voima suoraan sähköksi, mikä mahdollistaa systeemin erittäin yksinkertaisen rakenteen (Wang 2012). Tasasähköllä toimiva anturi tarvitsee yksinkertaisimmillaan vain tasasuuntauksen pietsoelementin tuottaman potentiaalin hyödyntämiseksi.

Pietsosähköiset materiaalit ovat joko keraamisia tai kiteitä (Elvin 2013). Tällaisia materiaaleja ovat muun muassa paljon käytetty lyijy-zirkonaatti-titanaatti (PZT), lyijy-magnesium-niobaatti-lyijy-titanaatti (PMN-PT) sekä polyvinyyliideenidifluoridi (PVDF) (Elvin 2013). Myös muilla materiaaleilla on pietsosähköisiä ominaisuuksia, joista esimerkiksi ihmisille turvallisia sinkkioksidin nanoketjuja (ZnO NW) on tutkittu lääketieteessä näkökulmasta (Wang 2012).

Pietsosähköisten materiaalien tehon tuottoon vaikuttaa pietsomateriaalin ominaisresistiivisyys, kuorman resistiivisyys, värähtelyn ominaistajuus sekä louhittavan systeemin värähtelyn amplitudi ja taajuus (Erturk 2009). Värähtelyn amplitudi ja taajuus vaikuttavat suoraan tuotettavan tehon suuruuteen ja suurin teho saavutetaan systeemin ja pietsokappaleen värähdellessä niiden ominaistajuuksillaan (Gatti 2016; Kim 2009). Värähtelyn taajuus vaikuttaa myös optimaaliseen kuorman resistanssiin: jokaisella värähtelytaajuudella on oma optimaalinen kuorman resistanssi (Erturk 2009).

Pietsosähköisen kappaleen ja ulkoisen värähtelyn taajuuksien sovittamista varten pietsokappaleen ominaisvärähtelytaajuutta voidaan vaimentaa lisäämällä sen massaa. Pietsokappaleen kiinnitys käyttökohteeseen vaikuttaa myös värähtelytaajuuteen, koska se määrittää vapaaksi jäävän värähtelevän osuuden pituuden.

Pietsosähköisten generaattoreiden arvioiminen on haastavaa, sillä generaattoreiden toiminta riippuu hyvin paljon louhittavasta värähtelystä. Suunnittelussa on ensin selvitettävä saatavilla olevan värähtelyn taajuudet ja amplitudi ja valittava taajuus, jolle pietsogeneraattori optimoidaan. Värähtelyn louhinta pietsogeneraattorilla on vaikeaa, jos värähtelyn taajuus vaihtelee, eikä sillä ole selvää eniten esiintyvää taajuutta.

Pietsosähköisen energian louhinnan yleinen suunnitteluprosessi koostuu siten energian lähteen identifioinnista, pietsogeneraattorin muodon ja toimintaperiaatteen valinnasta (puristuva tai vääntävä, suorakulmion tai muun muotoinen), generaattorin värähtelytaajuuden sovittamisesta louhittavassa värähtelyssä eniten esiintyvään taajuuteen, sekä generaattorin ja kuorman sähköisten resistanssien sovittamisesta.

3. KAUPALLISET RATKAISUT

Kaupallisten lämpösähköisien ja pietsosähköisien generaattoreiden tekniikan tasoa pyrittiin tutkimaan erityisesti niiden tehotuoton näkökulmasta. Generaattoreiden tehotuoton avulla energian louhinnan soveltuvuutta tiettyyn käyttökohteeseen voidaan helposti arvioida, kun tunnetaan kuormana toimivan laitteen tarvitsema teho. Tehotuottoa ja generaattoreiden muita teknisiä ominaisuuksia arvioitiin generaattoreiden valmistajien ilmoittamien tietojen perusteella.

Generaattoreiden tehotuottoa on kuitenkin vaikea arvioida yleisellä tasolla, sillä se riippuu hyvin paljon käytettävissä olevasta energianlähteestä. Sen takia myös valmistajilta on saatavilla rajoitetusti tietoa odotettavasta tehotuotosta, mikä korostuu erityisesti pietsosähköisien generaattoreiden arvioinnissa. Lisäksi on muistettava, että kaupallisten tuotteiden tekniset tiedot esitetään usein tuotteiden parhaita ominaisuuksia korostavilla tavoilla ja testaukset suoritetaan mahdollisimman optimaalisissa olosuhteissa. Saatuja tuloksia voidaan kuitenkin pitää luotettavina tekniikan tason yleiseen arviointiin, kunhan huomioidaan, ettei todellisissa käyttökohteissa välttämättä päästä vastaaviin tuloksiin.

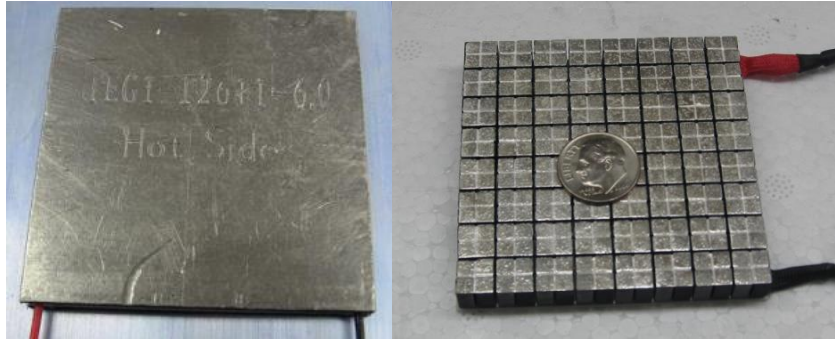
Tehotuoton lisäksi lämpö- ja pietsosähköisien generaattoreiden malleja ja niiden rakenteita pyrittiin havainnollistamaan lyhyesti muun muassa kuvien avulla. Myös tuotteiden saatavuutta pyrittiin arvioimaan kartoittamalla eri valmistajia sekä tarkastamalla muutamien suurimpien elektroniikkajälleenmyyjien katalogeja. Tutkittaviksi jälleenmyyjiksi valittiin Farnell, Mouser sekä Digi-Key.

Koska energian louhinnalla tuotettava energia on usein vähäinen, monia tuotteita ei myydä generaattoreina, vaan esimerkiksi antureina. Pietsosähköistä levyä voidaan käyttää esimerkiksi liikeanturina, joka ilmaisee kappaleeseen kohdistuvan liikkeen tuottamallaan jännitteellä. Samalla tavalla tuotettua jännitettä käytetään myös energian louhinnassa. Muiden kuin energian louhintaan suunniteltujen tuotteiden vertailu on usein mahdotonta pelkällä kirjallisuustutkimuksella, sillä valmistajat eivät tavallisesti ilmoita generaattorikäytön arviointiin tarvittavia tietoja odotettavan tehon, jännitteen tai virran tuotosta.

3.1 Lämpösähköiset generaattorit ja jäädyttimet

TEG-moduulien sopivuus käyttökohteeseen määräytyy ensisijaisesti käyttökohteessa esiintyvän maksimilämpötilaeron sekä maksimi- ja minimikäyttölämpötilojen mukaan (generaattorin kylmän ja kuumen puolen lämpötilat). Moduulit ovat tavallisesti suorakulmion muotoisia ja pienikokoisia, kokoluokkaa 50mm x 50mm x 5mm, kuten kuvassa 3.1 esitetyt Thermal Electronics Corporationin TEG-moduulit. TEG-moduulit tarvitsevat kuitenkin kokoonsa nähden suuren jäädytys-elementin varmistamaan termoparin päiden lämpötilaeron säilymisen (poikkeuksena asennus kahden pysyvästi selvästi eri lämpöisen elementin väliin, jossa kylmä elementti poistaa lämmön nopeasti).

Kuvassa 3.1 vasemmalla puolella esitetyn kaltaisia Bi_2Te_3 TEG-moduuleja on kaupallisesti saatavilla eri kokoisina ja tehoisina kymmeniltä eri valmistajilta. Useimmat ovat tilattavissa helposti suoraan valmistajilta, mutta jälleenmyyjiltä vain hyvin rajoitetusti. Sen sijaan jälleenmyyjiltä on saatavilla useita satoja erilaisia TEC-moduuleja (Peltier-elementtejä), joita voidaan hyödyntää myös energian louhinnassa. TEC-moduulien käytöstä energian louhinnassa on kerrottu kappaleen lopussa.



Kuva 3.1 Lämpösähköisiä generaattoreita havainnollistettuna. Vasemmalla on Thermal Electronics Corporationin TEG1-12611-6.0 TEG-moduuli (Thermal Electronics Corp. 2016a). Oikealla on Thermal Electronics Corporationin CMO-32-62S (Thermal Electronics Corp. 2016d). Lähes kaikki kaupalliset TEG:t ovat kuvan neliön muotoisen mallien kaltaisia.

Taulukossa 3.1 on esitetty eri valmistajien kaupallisesti saatavilla olevien $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ toiminta-alueen Bi_2Te_3 TEG-moduulien ominaisuuksia. Jokaiselta valmistajalta valittiin sekä pienin että suurin saatavilla oleva moduuli vertailukohteiksi. Taulukko 3.1 ei ole kattava katsaus kaikista markkinoilla olevista tuotteista tai yhtiöistä, vaan on tarkoitettu suuntaa antavaksi Bi_2Te_3 TEG-moduulien ominaisuuksista. Taulukossa 3.1 mainittujen yhtiöiden lisäksi vastaavia kaupallisia Bi_2Te_3 -moduuleja valmistavat useat yritykset, joista muutamia ovat European Thermodynamics Limited, Ferrotec, Hi-Z, Lairdtech, QuickOhm ja Kryotherm. Bi_2Te_3 TEG-moduulien saatavuus ja kilpailutilanne valmistajien kannalta on siten erittäin hyvä.

Taulukko 3.1 Otos eri valmistajien Bi_2Te_3 TEG-moduulien ominaisuuksista¹. Kaikki arvot on ilmoitettu optimaalisessa toimintatilanteessa eli maksimilämpötilaerolla ja sovitetulla sisäisellä ja kuorman resistanssilla.

Valmistaja	Tuotenumero	Max ΔT [$^{\circ}\text{C}$]	Käyttö T [$^{\circ}\text{C}$]	P_{out} [W]	U_{out} [V]	I_{out} [A]	Mitat [mm]	Hinta [USD]
ATI	ATEG-127-3R1-1R4	100	50...200	1.38	1.83	0.76	30x30x3.1	-
ATI	ATEG-199-3R2-2R5	100	50...200	2.49	2.19	1.14	40x40x3.2	-
Marlow	TG12-2.5-01LS	180	50...230	2.71	5.33	1.14	30x34.01x3.94	33.93
Marlow	TG12-8-01L	180	50...230	7.95	5.25	3.38	40.13x44.7x3.53	41.13
Tellurex	G2-30-0313	300	30...330	5.1	5.4	1.0	30x30x3.3	35
Tellurex	G3-56-0419	300	30...330	19.3	4.2	4.6	56x56x3.2	110
TEC	TEG1-1263-4.3	300	30...300	5.2	5.3	1.0	30x30	25
TEC	TEG1-12611-6.0	300	30...300	14.6	4.2	3.4	56x56x3.2	50

Taulukosta 3.1 nähdään Bi_2Te_3 TEG-moduulien ominaisuuksien, kuten käyttölämpötilojen ja tehotuoton, olevan hyvin samankaltaisia keskenään, mikä osoittaa käytettävän materiaalin suuren merkityksen lämpösähköisessä energian louhinnassa. Moduulien kestävät maksimilämpötilaerot ΔT vaihtelevat $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ välillä. Suurimmat moduulien kestävät jatkuvat käyttölämpötilat T ovat $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tavallisesti kylmän puolen kestävä maksimilämpötila on vähintään $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ pienempi kuin kuumen puolen.

¹ Vertailtujen moduulien lähdeviittaukset:

Analog Technologies, Inc. (ATI) ATEG-127-3R1-1R4 (Analog Technologies, Inc. 2014).

Analog Technologies, Inc. (ATI) ATEG-199-3R2-2R5 (Analog Technologies, Inc. 2014).

Marlow TG12-2.5-01LS (Marlow 2016a). Marlow TG12-8-01L (Marlow 2016b).

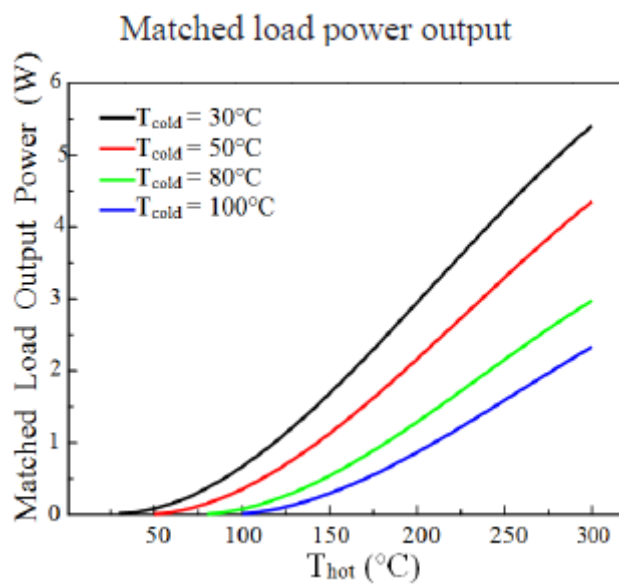
Tellurex G2-30-0313 (Tellurex 2016a). Tellurex G3-56-0419 (Tellurex 2016b).

Thermal Electronics Corp. (TEC) TEG1-1263-4.3 (Thermal Electronics Corp. 2016b).

Thermal Electronics Corp. (TEC) TEG1-12611-6.0 (Thermal Electronics Corp. 2016a).

Suurimmalla mahdollisella lämpötilaerolla ja sovitetuilla sisäisellä ja kuorman resistansseilla tuotettu teho P_{out} on useiden wattien luokkaa ja taulukon 3.1 otoksessa parhaimmillaan 19.3 W Tellurexin G3-56-0419-moduulilla. Vertaamalla tehoja moduulien ulkomittoihin nähdään suurempien moduulien kykenevän tuottamaan suuremman tehon, koska ne koostuvat useammista termopareista. Lisäksi moduulit, kuten ATI:n ATEG-moduulit, joiden maksimi ΔT on pienempi kuin otoksen muilla moduuleilla, eivät kykene tuottamaan vastaavaa tehoa kuin saman kokoiset suuremman lämpötilaeron kestävät moduulit.

Taulukosta 3.1 on nähtävissä kuitenkin vain maksimiarvot optimaalisissa tilanteissa. Muun muassa Thermal Electronics Corporation ja Tellurex tarjoavat tuotteidensa datalehdissä kuvan 3.2 kaltaisia kuvaajia eri lämpötilojen ja lämpötilaerojen vaikutuksien havainnollistamiseen, joista saadaan kattavampi kuvaus moduulien toiminnasta.



Kuva 3.2 Tellurex G2-30-0313 TEG-moduulin tuottama teho kuuman puolen lämpötilan T_{hot} funktiona, laskettuna eri kylmän puolen lämpötilan T_{cold} arvoilla (Tellurex 2016a).

Kuvasta 3.2 nähdään tyypillinen Bi_2Te_3 -moduulin tuottaman tehon käyrämuoto eri lämpötiloissa. Pienillä lämpötilaeroilla ($\Delta T < 20\text{ °C}$) tuotettu teho on korkeintaan milliwattien luokkaa ja suurilla ($\Delta T > 100\text{ °C}$) useita watteja. On myös huomioitava, että kuvan 3.2 kuvaaja on saatu taulukon 3.1 arvojen tavoin optimaalisissa olosuhteissa, joissa vain lämpötilaeroa on muutettu. Todellisuudessa tuotettu teho voi olla pienempi.

Ilmoitetut maksimitehotuotot ovat kuitenkin huomattavasti suurempia kuin tieteellisissä tutkimuksissa ilmoitetut tulokset, ja kirjallisuudessa on myös aiemmin esitetty epäilyjä valmistajien ilmoittamien tehojen todellisuudesta. Belleville et al. on esittänyt, että joidenkin valmistajien tehotuotolle käyttämä laskentatapa ei huomioi itse generaattorin yli olevaa lämpötilaeroa, joka on pienempi kuin koko systeemin yli oleva lämpötilaero (Belleville 2009). Tämä virhe ei estäisi useiden wattien tehotuottoa suurilla lämpötilaeroilla, mutta voi silti aiheuttaa eroavaisuuksia valmistajien ilmoittamien arvojen ja todellisuudessa saatavien arvojen välille. Toisaalta tutkimuksissa keskitytään usein tiettyjen käyttökohteiden energian louhinnan tutkimiseen, joissa riittävän suurta lämpötilaeroa ei ole saatavilla, mikä osittain selittää useiden wattien suuruisien tehotuottojen harvinaisuuden kirjallisuudessa.

Tuotteiden hinnat vaihtelevat suuresti kokoluokasta, tehon tuotosta ja käyttölämpötiloista riippuen. Halvimmat moduulit ovat \$30/kappale hintaluokassa ja kalleimmat yli \$100/kappale. Kaikki taulukossa 3.1 vertailut valmistajat Marlowia lukuunottamatta tarjoavat kuitenkin alempia kappalehintoja suuremman tilausmäärän mukaan.

Bi_2Te_3 -moduulien lisäksi kaupallisesti saataville on ilmestynyt myös muihin materiaaleihin perustuvia TEG:tä. Thermal Electronics Corporationin uusimpia tuotteita ovat vismuttiteelluridi-lyijytelluridi (BiTe-PbTe) hybridi, kalsiummangaanioksidi (CMO) puolijohdemateriaali, sekä kalsiummangaanioksidi yhdistettynä vismuttiteelluridiin (CMO- BiTe , kaskadi-malli). BiTe-PbTe -hybridimallin maksimilämpötila on $360\text{ }^\circ\text{C}$, eli hieman korkeampi kuin Bi_2Te_3 -mallien, mutta lisäksi hybridin hyötysuhteen ja toiminnan luvataan olevan parempia lämmönkestävyyden ylärajoissa (Thermal Electronics Corp. 2016c). Kalsiummangaanioksidia sisältävät TEG:t kestävät huomattavasti suurempia lämpötiloja kuin perinteiset Bi_2Te_3 -moduulit: CMO-moduuli kestää jopa $800\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilan ja kaskadimalli $600\text{ }^\circ\text{C}$ ja ne mahdollistavat 12.3 W ja 11 W tehotuotot maksimilämpötilaeroillaan (Thermal Electronics Corp. 2016d). Tuotteiden kappalehinnat olivat 9.2.2017 tarkistettaessa useita satoja dollareita, mutta muiden valmistajien tuodessa vastaavia tuotteita markkinoille, sekä materiaalien hyvän saatavuuden vuoksi tulevaisuudessa ne voivat olla edullisempia.

Muita uusia kehitettäviä materiaaleja ovat tetraedriitti, skutteridiitti ja Half-Heusler (Champier 2017). Näitä kehittävät muun muassa Alphabet Energy, Evident Thermoelectric sekä Tagma. Uudet materiaalit mahdollistavat perinteisiä Bi_2Te_3 -moduuleja korkeammat käyttölämpötilat, hyötysuhteet sekä alemmat valmistamiskustannukset, johtuen raaka-aineiden suuremmista esiintymistä maaperässä.

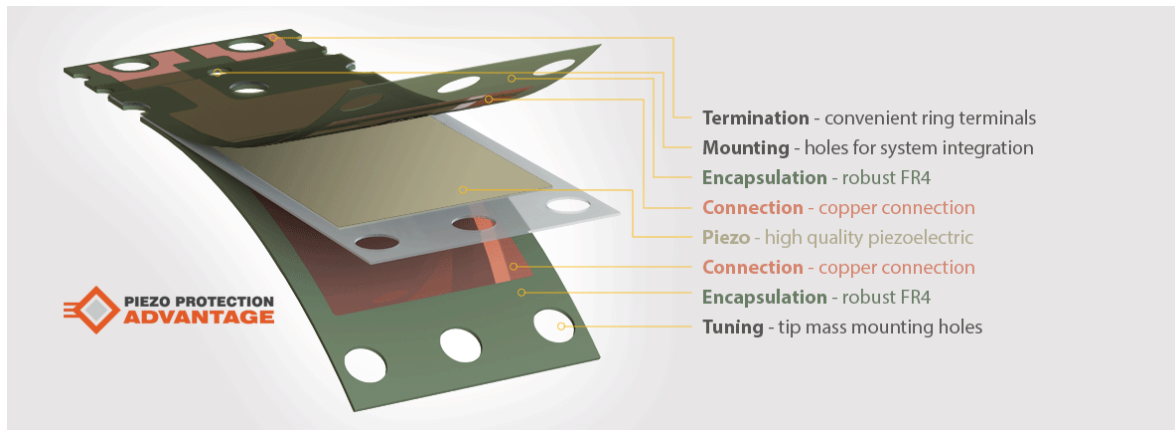
Energian louhintaan tarkoitettujen moduulien lisäksi energian louhinnassa voidaan käyttää TEC-moduuleja, mikä kasvattaa lämpösähköisen energian louhinnan saatavuutta. TEC-moduuleja on saatavilla elektroniikkajälleenmyyjiltä paljon enemmän kuin TEG-moduuleja. Tavallisesti sekä TEG- että TEC-moduulit toimivat molemmissa käyttökohteissa, riippuen yksinkertaisesti siitä, johdetaanko moduuliin ulkoinen jännite (TEC) vai synnyttääkö lämpötilaero jännitteen (TEG) (Salerno 2014; Tuley 2015). TEC-moduuleja ei kuitenkaan välttämättä ole suunniteltu energian tuottamiseen, joten ne kestävät heikommin suuria virtoja (Salerno 2014). TEC:lle ei tavallisesti myöskään ilmoiteta lukuarvoja sen tehon, jännitteen tai virran tuotolle, joten valittaessa TEC:tä energian tuottamiseen on valinnassa hyödynnettävä suuntaa antavasti tuotteelle ilmoitettujen tulojännitteen ja -virran maksimi-arvoja (Salerno 2014).

3.2 Pietzosähköiset generaattorit

Pietzosähköisiä materiaaleja voidaan valmistaa lähes minkä tahansa muotoisina ja kokoisina. Suurin ero on toimintatapa, eli materiaalin regointi siihen kohdistuvaan voimaan: kappaleet voivat taipua, laajentua tai puristua. Valmistajien verkkokaupoista on saatavilla pietsomateriaaleja muun muassa levyinä, nappeina, sylintereinä, putkina, palloina ja nauhoina. Yksilöllisiä, halutun mallisia kappaleita voi suunnitella ja tilata erikseen. Energian louhintaan parhaiten sovellettavia ovat kuitenkin levy- ja tornimalliset kappaleet, muiden muotojen soveltuessa paremmin esimerkiksi antureiksi.

Kuvassa 3.3 on nimetty Mide Technologyn PPA-sarjan pietzosähköisien energian louhimien rakenteen kerrokset. Miden pietsoelementtien rakenne oli tutkimuksessa käsitellyistä

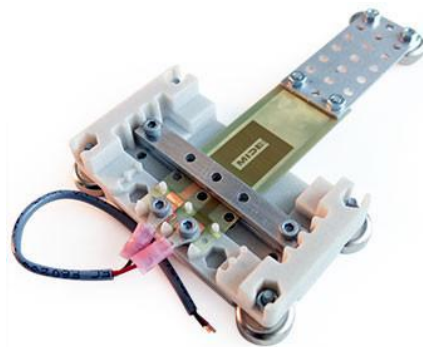
kaupallisista piezoelementeistä vakuuttavin, mutta lähes kaikki kaupalliset ratkaisut käyttävät suurimmaksi osaksi vastaavanlaista rakennetta.



Kuva 3.3 Mide Technologyn PPA-sarjan energian louhimien eri kerrokset esiteltynä (Mide Technology 2017a). Pietzosähköinen materiaali tarvitsee johdinlevyt, suojaavat kerrokset sekä kiinnityksen mahdollistavat poraukset. Optimointia varten levyihin voidaan porata reiät myös vapaaksi jäävään pätyyn lisäpainojen asentamiseksi.

Kuten kuvasta 3.3 nähdään, piezomateriaaliin on käyttöä varten asennettava johtimet. Koska pietzosähköiset materiaalit ovat hauraita, kaupallisissa tuotteissa on usein asennettuna myös suojaava eristyskerros. Lisäksi monissa levyissä on kuvan 3.3 tavoin valmiiksi poratut reiät sekä kiinnitystä varten että lisäpainojen asentamiseksi, joilla piezomateriaalin värähtelytaajuutta voidaan muuttaa.

Kappaleiden kiinnitystä varten, erityisesti testausvaiheessa, on saatavilla erityisiä puristimia, joissa on pyritty estämään puristimen vaikutus värähtelyyn sekä värähtelyn aiheuttama kiinnityksen löystyminen. Ainakin Mide Technology tarjoaa kuvan 3.4 puristinta testikäyttöön. Puristimen asennuskohdan valinnalla voidaan helposti muuttaa kappaleen vapaata pituutta ja siten värähtelytaajuutta.



Kuva 3.4 Mide Technologyn PPA-9001 puristin ja siihen asennettu pietzosähköinen taipuva generaattori (Mide Technology 2017b).

Pietzosähköisten energialouhimien vertailu keskenään on haastavaa, sillä niiden toiminta riippuu monesta käyttökohteen mukaan määräytyvästä tekijästä, kuten kappaleessa 2.2 on selvitetty. Ensin pietsogeneraattori on valittava toimimaan käyttökohteen mukaan joko

puristavalla, venyttävällä tai taivuttavalla voimalla. Louhija tulee säätää värähtelemään siten, että sen ominaisvärähtelytaajuus vastaa louhittavassa värähtelyssä eniten esiintyvää taajuutta. Jokaisella louhimella on myös oma optimaalinen kuorman resistanssi. Louhijan koko, paksuus ja materiaali vaikuttavat taipumiseen, joka on huomioitava erityisesti tilan käytön kannalta.

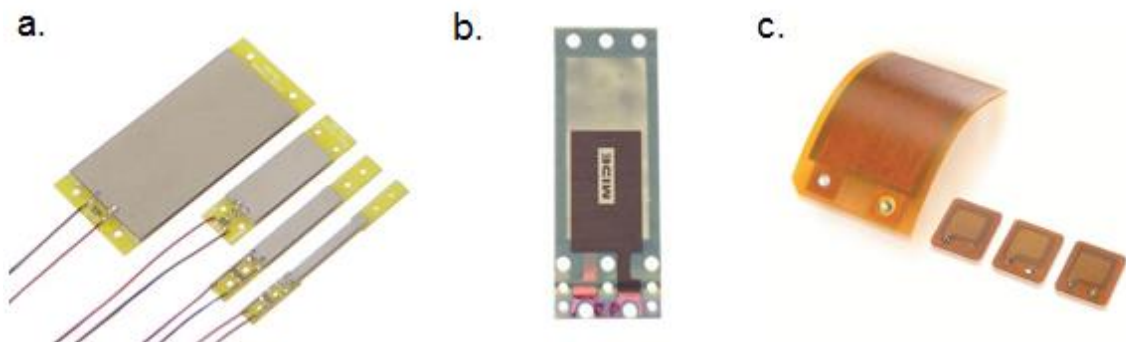
Edellä mainituista syistä johtuen valmistajat ilmoittavat vain vähän tietoa pietsogeneraattoreiden tehotuotosta. Generaattoreiden tuottamaa tehoa voidaan kuitenkin arvioida tapauskohtaisesti ja seuraavaksi esitellään muutaman generaattorin ominaisuuksia ja suuntaa antavaa suorituskykytietoa valmistajien ilmoittamissa testiolosuhteissa.

Kuvassa 3.5 b-kohdassa olevalla Mide Technologyn PPA-1011 pietsosähköisellä generaattorilla voidaan saavuttaa 60 Hz värähtelytaajuudella ja 2.0 g kiihtyvyydellä 9 mW teho (Mide Technology 2017d). PPA-1011 ulkomitat ovat 71 mm x 25.4 mm x 0.71 mm ja sen kappalehinta oli 3.2.2017 tarkistettaessa \$200, joka laskee tilausmäärän mukaan alimmillaan \$13.55 kappalehintaan (10000 kappaleen tilauksessa).

Tehotuottoa on parannettu Miden PPA-4011-mallissa, joka koostuu neljästä PPA-1011-mallin pietsokerroksesta ja on vain 0.61 mm paksumpi. PPA-4011:n tuottama teho aiemmin kuvatuissa olosuhteissa on Miden mukaan 60 mW (Mide Technology 2017d). PPA-4011:n kappalehinta oli 3.2.2017 tarkistettaessa \$300 - \$30.15 tilausmäärästä riippuen. Koko Mide Technologyn PPA-sarjan toiminta perustuu pietsosähköisten generaattoreiden taipumiseen.

Piezo Systems Incorporated myy kaksikerroksisia taipuvia ja laajenevia pietsosähköisiä generaattoreita valmiiksi kiinnitetyillä johtimilla ja porauksilla. Taipuvan, kuvan 3.5 a-kohdan suurimman pietsogeneraattorin, D220-A4-503YB-mallin tuottamaksi tehoksi ilmoitetaan 52 Hz taajuudella ja ± 2.6 mm taivutuksella 6.4 mW (Piezo Systems, Inc. 2016a). D220-A4-503YB ulkomitat ovat 69.9 mm x 31.8 mm x 1.5 mm. Generaattorin kappalehinta oli 3.2.2017 tarkistettaessa \$301 - \$138 tilausmäärästä riippuen (suurin tilausmäärä 100 kappaletta).

Laajenevien mallien suorituskyky on ilmoitettu suurilla taajuuksilla ja venytyksillä: edellisen taipuvan mallin kanssa saman kokoisen D220-A4-503XE-mallin tehotuotoksi ilmoitetaan 750 Hz taajuudella ja kahden tuuman venytyksellä 630 mW (Piezo Systems, Inc. 2016b). D220-A4-503XE kappalehinta oli 3.2.2017 tarkistettaessa \$301 - \$138 tilausmäärästä riippuen.



Kuva 3.5 Pietsosähköisiä taipuvia generaattoreita. A-kohdassa on Piezo Systems Incorporatedin taipuvia, molemmista päistä valmiiksi porattuja ja pikaliitettäviä generaattoreita (Piezo Systems, Inc. 2017). B-kohdassa on Mide Technologyn PPA-1011 (Mide Technology 2017c). C-kohdassa on PI Ceramicin DuraAct pietsosähköisiä levyjä (PI Ceramic 2017).

Energian louhintaan sopivia pietsosähköisiä materiaaleja valmistavat muun muassa PI Ceramic, Smart Material Corporation, The Face® Companies sekä Noliac. Pietsosähköisiä generaattoreita on lämpösähköisien generaattoreiden tavoin saatavilla useilta eri valmistajilta, mutta jälleenmyyjiltä niitä löytyy vain rajoitetusti. Mide Technologyn pietsosähköisiä generaattoreita on saatavilla Mouserin ja Digi-Keyn tuotevalikoimista.

Pietsosähköisiksi generaattoreiksi soveltuvia tuotteita löytyy myös liikesensoreiksi listatuista tuotteista. Kuten aiemmin on todettu, monien pietsosähköisten tuotteiden ensisijaiseksi käyttökohteeksi on suunniteltu liikkeen tunnistaminen siitä syntyvän jännitteen perusteella. Tällaisten tuotteiden toimintaperiaate generaattorina on täysin sama kuin varsinaisilla generaattoreillakin, mutta valmistajilta ei ole saatavissa tehotuotolle odotettavissa olevia vertailtavia arvoja. Sensoreiksi suunniteltuja tuotteita on saatavilla kaikilta tutkimukseen valituilta jälleenmyyjiltä.

Energian louhintaan sopivia pietsosähköisiä materiaaleja valmistaa useita yhtiötä, mutta materiaalien toiminnan ja tehotuoton riippuvuus käyttökohteesta vaikeuttaa niiden arviointia pelkillä kirjallisuustutkielman menetelmillä. Tutkimuksessa saaduista tapauskohtaisista tuloksista voidaan kuitenkin yleistäen todeta louhintaan hyvin soveltuvan energian lähteen mahdollistavan sille optimoitujen kaupallisten pietsosähköisten generaattoreiden tuottavan tehoa milliwatin kymmenesosasta useisiin kymmeneen tai jopa satoihin milliwatteihin.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET JA YHTEENVETO

Työssä tutkittiin kirjallisuustutkielman avulla vuonna 2016 saatavilla olleiden kaupallisten lämpösähköisten ja pietsosähköisten generaattoreiden toimintaperiaatteita ja tekniikan tasoa. Tuloksista voidaan todeta, että nykyisiä kaupallisia lämpö- ja pietsosähköisiä energian louhintaratkaisuja voidaan käyttää pienitehoisten anturien energianlähteinä, mahdollistaen antureiden energiatänsäisyyden, pitkäikäisen huoltovapaan toiminnan ja sijoittamisen vaikeasti saavutettaviin kohteisiin.

Energian louhinnan optimaalinen toiminta vaatii sekä luotettavasti saatavilla olevan energianlähteen että energiaa käyttävän kuorman tarkkaa identifiointia. Lämpösähköinen Seebeckin ilmiöön perustuva generaattori tarvitsee lämpötilaeron toimiakseen ja se on valittava vallitsevan maksimilämpötilan ja lämpötilaeron mukaan. Lisäksi on huomioitava generaattorin, lämmönlähteen, sekä jäähdytys-elementin materiaalien termiset resistanssit. Pietsosähköinen generaattori sen sijaan mahdollistaa värähtelevän liikkeen tai puristavan voiman energian louhimisen. Pietsosähköinen generaattori on valittava siten, että sen ominaisvärähtelytaajuus saadaan sovitettua energianlähteenä toimivan värähtelyn taajuuteen. Lisäksi molemmissa energian louhintamenetelmissä on tärkeää sovittaa generaattorin sisäinen resistanssi kuorman resistanssiin.

Tutkittujen generaattoreiden perusteella voidaan todeta, että nykyisten kaupallisten lämpösähköisten generaattoreiden on mahdollista tuottaa optimaalisissa tilanteissa kymmenien wattien teho ja pietsosähköisten generaattoreiden on mahdollista tuottaa satojen milliwattien teho. Tyypillisissä käyttökohteissa tuotettu teho on kuitenkin lämpösähköisillä generaattoreilla kymmenistä milliwateista wattiin ja pietsosähköisillä muutamia milliwatteja.

Lämpösähköisen energian louhinnan suuri tehotuotto ylitti kirjallisuustutkielmassa käytettyjen tieteellisten tutkimuksien ilmoittamat tulokset. Tieteellisessä kirjallisuudessa syyksi on jo aiemmin esitetty joidenkin valmistajien käyttämän laskentatavan olevan liian teoreettinen lämpötilaeron suhteen, sillä todellisuudessa generaattorin yli oleva lämpötilaero on pienempi kuin koko systeemin yli oleva lämpötilaero. Virhe ei kuitenkaan ole niin suuri, ettei suurella lämpötilaerolla olisi mahdollista tuottaa useita watteja. Toinen syy kirjallisuudessa esitettyjen tehotuottojen pienuudelle voi olla useimpien tutkimuksien keskittyminen käyttökohteisiin, joissa ei esiinny riittävän suuria lämpötilaeroja useiden wattien tehotuottoa varten.

Kaupallisia lämpösähköisiä ja pietsosähköisiä generaattoreita valmistaa ja kehittää kymmeniä yhtiötä maailmanlaajuisesti. Tuotteiden tilaaminen onnistuu helposti valmistajien verkkosivuilta, mutta elektroniikan jälleenmyyjiltä on saatavilla vain muutamia malleja. Lämpösähköisien generaattoreiden hinnat vaihtelevat muutamasta kymmenestä Yhdysvaltain dollarista useisiin satoihin dollareihin kappaleelta ja pietsosähköisten generaattoreiden hinnat alkavat yli sadasta dollarista kappaleelta. Useimmat valmistajat tarjoavat kuitenkin huomattavasti alennettuja hintoja erityisesti suurille tilausmäärille. Energian louhinnassa käytettävien generaattoreiden saatavuuden voidaan todeta olevan hyvä, mutta niiden hankintahinnat ovat antureille soveltuvia pieniä paristoja tai akkuja suuremmat.

Lisäksi energian louhintatekniikoiden toimintaperiaatteiden kaksisuuntaisen luonteen ansiosta monia muihin käyttötarkoituksiin suunniteltuja tuotteita on mahdollista käyttää

energian louhinnassa. Esimerkiksi jäädytykseen tarkoitettuja Peltier-moduuleja ja pietsosähköisiä liikeantureita löytyy jälleenmyyjiltä satoja erilaisia ja usein niitä voidaan käyttää myös energian louhintaan.

Sekä lämpö- että pietsosähköinen energian louhinta perustuu pitkälti generaattoreiden materiaalien ominaisuuksiin. Suurimmat kehityskohteet molemmissa menetelmissä ovat nykyisten materiaalien kehittäminen ja uusien materiaalien löytäminen. Lämpösähköisessä energian louhinnassa on lähitulevaisuudessa saatavilla useita uusia materiaaleja, jotka parantavat erityisesti moduulien lämmönkestävyyttä ja hyötysuhdetta sekä todennäköisesti laskevat moduulien valmistuskustannuksia.

4.1 Pohdintaa energian louhinnasta ja mahdollisista jatkotutkimuskohteista

Toteutetun kirjallisuustutkielman tuloksien perusteella energian louhinnan teknikan taso mahdollistaa sen käyttämisen langattomien anturien energianlähteenä. Työn aikana huomattiin kuitenkin muutamia jatkotutkimuskohteita tuloksiin ja energian louhinnan kehittämiseen liittyen.

Toteutetun kirjallisuustutkielman tuloksien luotettavuuteen liittyvien epäilyjen vuoksi nykyistä tekniikan tasoa tulisi tutkia lisää. Muutamille generaattoreille voitaisiin toteuttaa käytännön testejä, jotta nykyisten kaupallisten ratkaisujen todelliset tehotuotot voitaisiin selvittää. Vertaamalla todellisia tehotuottoja kirjallisuustutkielmalla saatuihin tuloksiin voitaisiin arvioida kirjallisuustutkielman tulosten ja valmistajien ilmoittamien tietojen luotettavuutta ja tarkkuutta.

Energian louhinnan saatavuutta voitaisiin lisätä selvittämällä TEC-moduulien ja pietsosähköisten liikeantureiden toimivuutta energian louhinnassa, muun muassa tutkimalla voidaanko Peltier-moduulien tehotuottoa energian louhinnassa arvioida riittävän tarkasti niiden syöttöjännitteille ja -virroille ilmoitetuista maksimiarvoista.

Kirjallisuustutkielman perusteella energian louhinta on huomattavasti monimutkaisempi suunnitella kuin paristojen ja akkujen käyttö. Myös hankintahinnat ovat tavallisesti suurempia kuin paristoilla tai akuilla. Jos laitteessa on sen toiminnan kannalta mahdollista käyttää paristoja tai akkua, energian louhinnan suunnittelu ja toteutus tulisivat todennäköisesti huomattavasti kalliimmiksi investoinneiksi. Erityisesti anturit, joiden haluttu toiminta-aika ei ole useita vuosia, eivät todennäköisesti hyötyisi taloudellisesti energian louhinnasta.

Energian louhinnalla saavutettavia pitkän aikavälin taloudellisia hyötyjä ja sen suunnittelun ja toteutuksen kustannuksia tulisi selvittää, jotta voitaisiin arvioida paremmin energian louhinnan kannattavuutta paristojen ja akkujen korvaamisessa. Jos energian louhinta on taloudellisesti kilpailukykyinen tai lähes kilpailukykyinen paristoihin ja akkuihin verrattuna, sitä voitaisiin hyödyntää yhä useammassa uusissa innovaatioissa ja energiantuotannon ekologisuutta voitaisiin kehittää huomattavasti.

Teknitaloudelliset syyt kalliiden ja harvinaisten raaka-aineiden lisäksi ovat suurimmat esteet energian louhinnan yleistymiselle. Energian louhinnan hyödyt ovat kuitenkin kiistatta tekniikan kehittämisen ja lisätutkimusten arvoisia. Lisäksi tarve ekologisuudelle lisää kiinnostusta energian louhintaan. Esimerkiksi teollisuusprosessien hukkalämmön louhinta sopii loistavasti kiertotalous-malliin, jossa tavoitellaan tuotteiden uudelleenkäytettävyyden

ja kierrätettävyyden parantamisen ohella uusiutuvien energianlähteiden käyttöä. Kiertotalous on myös kirjattu Suomen hallitusohjelmaan vuonna 2015 ”tavoitteeksi nousta kiertotalouden kärkimaaksi vuoteen 2025 mennessä”, joten energian louhinnan kehitys voisi olla kiinnostuksen kohde myös valtiollisella tasolla (Sitra 2016).

Energian louhinta tulee todennäköisesti pysymään vielä pitkään erityisratkaisuna käyttökohteissa, joissa perinteiset energianlähteet eivät ole kannattavia tai mahdollisia tai joissa taloudelliset kustannukset eivät ole rajoite. Energian louhinnan tarjoamat mahdollisuudet ja sitä tarvitsevien laitteiden yleistymisen tekevät siitä kuitenkin tärkeän tutkimus- ja kehityskohteen.

LÄHTEET

Analog Technologies, Inc. 2014. TEG Modules. [verkkodokumentti]. [viitattu: 26.11.2016]. Saatavilla: <http://www.analogtechnologies.com/document/TEG.pdf>

Belleville, M., Cantatore, E., Fanet, H., Fiorini, P., Nicole, P., Pelgrom, M., Piguet, C., Hahn, R., Van Hoof, C., Vullers, R., Tartagni, M. 2009. Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems. CATRENE – Report on Energy Autonomoys Systems. ISBN: 978-88-904-399-0-2

Bierschenk, J. L. 2009. “Thermoelectric Energy Harvesting” teoksessa Priya, S., Inman, D. J. Energy Harvesting Technologies. s. 337-351. New York: Springer Science+Business Media. ISBN: 978-0-387-76464-1. DOI: 10.1007/978-0-387-76464-1

Carvalho, C., Paulino, N. 2013. On the Feasibility of Indoor Light Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks. Conference on Electronics, Telecommunications and Computers 2013. Procedia Technology, vol. 17, 2014, s. 343-350. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.206>

Champier, D. 2017. Thermoelectric generators: A review of applications. Energy Conversion and Management, vol. 140, s. 167-181. Elsevier Ltd. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>

Dalola, S., Ferrari, V., Marioli, D. 2010. Pyroelectric Effect in PZT Thick Films for Thermal Energy Harvesting in Low-Power Sensors. Elsevier Ltd. Eurosensory XXIV Conference. Vol. 5: 685-688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2010.09.202>

Elvin, N., Erturk, A. 2013. Advances in Energy Harvesting Methods. New York: Springer Science+Business Media. ISBN 978-1-4614-5704-6. DOI 10.1007/978-1-4614-5705-3.

Erturk, A., Inman, D., J. 2009. “Electromechanical Modeling of Cantilevered Piezoelectric Energy Harvesters for Persistent Base Motions” teoksessa Priya, S., Inman, D. J. Energy Harvesting Technologies. s. 41-77. New York: Springer Science+Business Media. ISBN: 978-0-387-76464-1. DOI: 10.1007/978-0-387-76464-1

Ferdous, R. Md., Reza, A. W., Siddiqui, M. F. 2016. Renewable energy harvesting for wireless sensors using passive RFID tag technology: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 58, s. 1114-1128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.332>

Gatti, G., Brennan, M. J., Tehrani, M. G., Thompson, D. J. 2016. Harvesting energy from the vibration of a passing train using a single-degree-of-freedom oscillator. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 66-67, s. 785-792. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.06.026>

IEA. 2011. Solar Energy Perspectives. Pariisi: OECD Publishing. DOI: 10.1787/9789264124585-en

Karami, M. A., Inman, D. J. 2012. Powering pacemakers from heartbeat vibrations using linear and nonlinear energy harvesters. Applied Physics Letters, vol. 100, issue 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3679102>

Kim, H., Tadesse, Y., Priya, S. 2009. "Piezoelectric Energy Harvesting" teoksessa Priya, S., Inman, D. J. Energy Harvesting Technologies. s. 3-39. New York: Springer Science+Business Media. ISBN: 978-0-387-76464-1. DOI: 10.1007/978-0-387-76464-1

Marlow. 2016. Viitemerkintä a. TG12-2.5 TECHNICAL DATA SHEET. [verkkodokumentti]. [viitattu: 27.11.2016]. Saatavilla: http://www.marlow.com/downloads/dl/file/id/256/product/44/tg12_2_5.pdf

Marlow. 2016. Viitemerkintä b. TG12-8 TECHNICAL DATA SHEET. [verkkodokumentti]. [viitattu: 27.11.2016]. Saatavilla: http://www.marlow.com/downloads/dl/file/id/259/product/285/tg12_8.pdf

Mide Technology. 2017. Viitemerkintä a. Piezo Protection Advantage. [kuva]. [viitattu: 28.4.2017]. Saatavissa: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0964/1872/files/piezo-protection-advantage-graphic.png?17598999921567012953>

Mide Technology. 2017. Viitemerkintä b. PPA-9001 Clamp Kit. [kuva]. [viitattu: 28.4.2017]. Saatavissa: http://cdn.shopify.com/s/files/1/0964/1872/products/piezo-product-ppa-9001-clamp-kit-345x345_grande.jpg?v=1477498630

Mide Technology. 2017. Viitemerkintä c. PPA-1011. [kuva]. [viitattu: 28.4.2017]. Saatavissa: http://cdn.shopify.com/s/files/1/0964/1872/products/piezo-ppa-1011-345x345_grande.jpg?v=1477498782

Mide Technology. 2017. Viitemerkintä d. PPA PRODUCTS Datasheet & User Manual. [verkkodokumentti]. [viitattu: 3.2.2017]. Saatavissa: <http://info.mide.com/hubfs/ppa-piezo-product-datasheet.pdf>

Mitcheson, P. D., Green, T. C., Yeatman, E. M. 2007. Power processing circuits for electromagnetic, electrostatic and piezoelectric inertial energy scavengers. *Microsystem Technologies*. 2007, vol. 13, issue 11. S. 1629-1635. DOI: 10.1007/s00542-006-0339-0.

Paradiso, J. A., Starner, T. 2005. Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics. *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, issue 1. DOI: 10.1109/MPRV.2005.9

PI Ceramic. 2017. DuraAct Patch Transducer. [kuva]. [viitattu: 28.4.2017]. Saatavissa: https://www.piceramic.com/fileadmin/_processed_/a/6/csm_PI_P-876_bea6837aee.jpg

Piezo Systems, Inc. 2016. Viitemerkintä a. Standard Double Quick-Mount Bending Sensors (Generators). [verkkosivu]. [viitattu: 28.12.2016]. Saatavissa: <http://www.piezo.com/prodbg8dqm.html>

Piezo Systems, Inc. 2016. Viitemerkintä b. Standard Double Quick-Mount Extension Sensors (Generators). [verkkosivu]. [viitattu: 28.12.2016]. Saatavissa: <http://www.piezo.com/prodexg8dqm.html>

Piezo Systems, Inc. 2017. Standard Quick-Mount Piezoelectric Bending Sensors (Generators). [kuva]. [viitattu: 28.4.2017]. Saatavissa: <http://www.piezo.com/prodbm7qmpict760.jpg>

Roundy, S., Wright, P. K., Rabaey, J. 2002. A study of low level vibrations as a power source for wireless sensor nodes. *Computer Communications*, vol. 26, issue 11, 2003, s. 1131-1144. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-3664\(02\)00248-7](https://doi.org/10.1016/S0140-3664(02)00248-7)

Salerno, D. 2014. Frequently Asked Questions: Thermoelectric Energy Harvesting with the LTC3108 & LTC3109. Linear Technology. [verkkodokumentti]. [viitattu: 27.11.2016]. Saatavissa: <http://www.linear.com/solutions/5443>

Sitra. 2016. Kierrolla kärkeen – Suomen tiekartta kiertotalouteen 2016-2025. Sitran selvityksiä 117. ISBN 978-951-563-972-1. [verkkodokumentti]. [viitattu: 4.5.2017]. Saatavissa: <https://media.sitra.fi/2017/02/24032626/Selvityksia117-2.pdf>

Shaikh, F. K., Zeadally, S. 2015. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, vol. 55. S.1041–1054. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.010>

Snyder, G. J. 2009. “Thermoelectric Energy Harvesting” teoksessa Priya, S., Inman, D. J. *Energy Harvesting Technologies*. s. 325-336. New York: Springer Science+Business Media. ISBN: 978-0-387-76464-1. DOI: 10.1007/978-0-387-76464-1

Sudevalayam, S., Kulkarni, P. 2010. Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2011, vol. 13, issue 3, s. 443-461. DOI: 10.1109/SURV.2011.060710.00094

Suh, I.-S., Cho, H., Lee, M. 2014. Feasibility study on thermoelectric device to energy storage system of an electric vehicle. *Energy*, vol. 76, s. 436-444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.08.040>

Thermal Electronics Corp. 2016. Viitemerkintä a. Specifications TEG Module TEG1-12611-6.0. [verkkodokumentti]. [viitattu: 9.12.2016]. Saatavissa: <http://tecteg.com/wp-content/uploads/2014/09/SpecTEG1-12611-6.0TEG-POWERGENERATOR-new.pdf>

Thermal Electronics Corp. 2016. Viitemerkintä b. Specifications TEG Module TEG1-1263-4.3. [verkkodokumentti]. [viitattu: 9.12.2016]. Saatavissa: <http://tecteg.com/wp-content/uploads/2014/09/SpecTEG1-1268-4.3-Thermoelectric-generator.pdf>

Thermal Electronics Corp. 2016. Viitemerkintä c. BiTe-PbTe Hybrid Thermoelectric Power Modules. [verkkosivu]. [viitattu: 15.12.2016]. Saatavissa: <http://tecteg.com/hybrid-thermoelectric-power-modules-pbte-bite/>

Thermal Electronics Corp. 2016. Viitemerkintä d. CMO Oxide & CMO Cascade 800 °C Hot Side Thermoelectric Power Modules. [verkkosivu]. [viitattu: 15.12.2016]. Saatavissa: <http://tecteg.com/cmo-oxide-cmo-cascade-800c-hot-side-thermoelectric-power-modules/>

Tellurex. 2016. Viitemerkintä a. G2-30-0313 Thermoelectric Power Generation Module Specifications. [verkkodokumentti]. [viitattu: 9.12.2016]. Saatavissa: <https://tellurex.com/wp-content/uploads/pdf/G2-30-0313-Specifications.pdf>

Tellurex. 2016. Viitemerkintä b. G3-56-0419 Thermoelectric Power Generation Module Specifications. [verkkodokumentti]. [viitattu: 9.12.2016]. Saatavissa: https://www.tellurex.com/media/uploads/product_pdfs/g3-56-0419-specifications.pdf

Tuley, R. 2015. The key difference between a thermoelectric cooler (TEC) module and a thermoelectric generator (TEG) module. European Thermodynamics Limited. [verkkodokumentti]. [viitattu: 27.11.2016]. Saatavissa: <http://www.europeanthermodynamics.com/news/difference-between-TEC-and-TEG>

Visser, H. J., Reniers, A. C. F., Theeuwes, J. A. C. 2008. Ambient RF Energy Scavenging: GSM and WLAN Power Density Measurements. 38th European Microwave Conference, Amsterdam, 2008. S. 721-724. DOI: 10.1109/EUMC.2008.4751554

Wang, W., Cionca, V., Wang, N., Hayes, M., O'Flynn, B., O'Mathuna, C. 2013. Thermoelectric Energy Harvesting for Building Energy Management Wireless Sensor Networks. International Journal of Distributed Sensor Networks. Vol 9: 232438. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/232438>.

Wang, Z. L., Wu, W. 2012. Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for Self-Powered Micro-/Nanosystems. Angewandte Chemie International Edition. Vol. 51. S. 11700–11721. DOI:10.1002/anie.201201656.

Yang, Y., Wang, S., Zhang, Y., Wang, Z. L. 2012. Pyroelectric Nanogenerators for Driving Wireless Sensors. Nano Letters, 2012, vol. 12. S. 6408-6413. DOI: 10.1021/nl303755m