

Atte Lanttola

## **Ympäristöstä sähköenergiaa**

Opinnäytetyö

Kevät 2016

SeAMK Tekniikka

Tietotekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU  
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Tutkinto-ohjelma: Tietotekniikan koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Sulautetut järjestelmät

Tekijä: Atte Lantola

Työn nimi: Ympäristöstä sähköenergiaa

Ohjaaja: Seppo Stenberg

Vuosi: 2016

Sivumäärä: 39

---

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, kuinka saadaan pienimuotoisesti ympäristöstä sähköenergiaa. Päädyin tutkimaan termosähköisiä generaattoreita, niiden toimintaperiaatteita sekä termosähkögeneraattoreiden fysikaalista ilmiötä ja ominaisuuksia tutustuen samalla niissä käytettyihin materiaaleihin. Tutkin myös muita mahdollisia sähköenergian tuottotapoja, kuten valo, liike ja sähkömagneettinen värähtely. Työssäni kävi, ilmi että vaihtoehtoisia sähköntuottotapoja pienimuotoisesti ei ole vielä yleistynyt laajaan käyttöön.

Lisäksi selvitin, mitä tarvitaan että ympäristöstä saatua sähköenergiaa voidaan hyödyntää ja varastoida. Hyödyntämisen tapoja ovat esimerkiksi akun lataaminen tai pariston eliniän jatkaminen. Varastoinnissa tutkin akkuja ja erityyppisiä kondensaattoreita. Jokaisessa varastoinnin tavassa on omat hyvät ja huonot puolensa. Suunnittelijan on tehtävä kompromisseja mitä varastointitapaa käyttää kussakin tilanteessa.

Tutkimuksessa kävi ilmi, että kyseisellä tieteenalueella on vielä paljon tutkittavaa ja monet asioista ovat vielä tutkimuksen alla. Esimerkiksi uusia materiaaleja ja vanhojen materiaalien ominaisuuksien parantamista tutkitaan paljon. Tästä huolimatta eri tapoja hyödynnetään jo monipuolisesti eri käyttötarkoituksiin, kuten teollisuuden hukkalämmön hyödyntämisestä sähköenergian tuottamiseksi. Työni perustuu kokonaisuudessaan jo olemassa olevaan tutkimustietoon ja tutkittujen laitteiden datalehtiin.

Avainsanat: termosähköinen generaattori, TEG, energian haalinta, Seebeck ilmiö

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Information Technology

Specialisation: Embedded Systems

Author: Atte Lantola

Title of thesis: Electric power from environment

Supervisor: Seppo Stenberg

Year: 2016

Number of pages: 39

---

The goal of this thesis was to explore different methods to generate electricity in a small scale. The focus was on the thermoelectric generator in specific and its functioning principles, physical theory and materials. Also different methods to generate electricity in a small scale were also studied such as light, movement and electromagnetic vibration. In this study it was discovered that these methods are still not being commonly used in devices.

The thesis investigated what is needed to utilize and storage electric power harvested from the environment. The utilization methods are, for example, charging a battery or extending the life of a primary cell. The storage methods investigated were different kinds of batteries and capacitors. Each of these storage methods has its advantages and disadvantages. The developer must decide on what kind of compromises can be made when selecting a storage type.

The research revealed that this specific field of science is still developing and a lot of research is needed to reach the full potential. For example, new materials are being investigated and the potentials of the known materials are improved. Still these methods are already being used in different kind of technologies. For example, waste heat can be used for electricity generation in industrial plants. The whole thesis is based on the existing research materials and the datasheets of the devices studied.

Keywords: Thermoelectric generator, TEG, energy harvesting, Seebeck effect

## SISÄLTÖ

|   |    |
|---|----|
| Opinnäytetyön tiivistelmä.....                              | 2  |
| Thesis abstract.....  | 3  |
| SISÄLTÖ.....  | 4  |
| Kuvaluettelo .....  | 6  |
| Käytetyt termit ja lyhenteet .....                          | 7  |
| 1 Johdanto.....   | 8  |
| 1.1 Työn tausta .....                                       | 8  |
| 1.2 Työn tavoite .....                                      | 8  |
| 1.3 Työn rakenne.....                                       | 8  |
| 2 Termosähkögeneraattorit .....                             | 10 |
| 2.1 Teoriaa termosähkögeneraattoreihin liittyen .....       | 10 |
| 2.1.1 Ensimmäinen termodynamiikan laki .....                | 10 |
| 2.1.2 Toinen termodynamiikan laki .....                     | 10 |
| 2.1.3 Lämmönjohtuminen .....                                | 11 |
| 2.1.4 Lämpökapasiteetti.....                                | 11 |
| 2.1.5 Konvektio .....                                       | 12 |
| 2.1.6 Lämpösäteily.....                                     | 12 |
| 2.1.7 Lämpövoimakone ja Carnot-hyötysuhde.....              | 12 |
| 2.2 Termosähkögeneraattori.....                             | 13 |
| 2.2.1 Seebeck-ilmiö .....                                   | 13 |
| 2.2.2 Peltier'in ilmiö .....                                | 15 |
| 2.2.3 Bimetallitermoparit .....                             | 16 |
| 2.3 Termosähköisten materiaalien ominaisuudet.....          | 16 |
| 2.4 Termosähkögeneraattoreissa käytettävät materiaalit..... | 18 |
| 2.5 Käyttökohteita termosähkögeneraattoreille .....         | 20 |
| 3 Vaihtoehtoisia keinoja tuottaa sähköenergiaa. ....        | 22 |
| 3.1 Pyroelektrisyys.....                                    | 22 |
| 3.2 Liike-energiageneraattorit .....                        | 22 |
| 3.3 Aurinkokennot.....                                      | 23 |
| 3.4 Radioaaltojen hyödyntäminen energian tuotossa .....     | 24 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4     | Energian varastointi .....               | 25 |
| 4.1   | Yleistä tietoa varastoinnista .....      | 25 |
| 4.1.1 | Nikkelimetallihydridiakut.....           | 25 |
| 4.1.2 | Litium-ioni- ja litiumpolymeeriakut..... | 26 |
| 4.1.3 | Lyijyakku .....                          | 27 |
| 4.1.4 | Superkondensaattori.....                 | 28 |
| 4.1.5 | Tavalliset kondensaattorit .....         | 28 |
| 4.2   | Muita huomioitavia asioita.....          | 29 |
| 5     | Yhteenveto ja pohdinta .....             | 32 |
|       | LÄHTEET .....                            | 34 |
|       | LIITTEET .....                           | 39 |

## Kuvaluettelo

|  |    |
|--|----|
| Kuva 1. Termosähköisen elementin käyttötavat (Li ym. 2010).....  | 14 |
| Kuva 2. Tyypillinen pieni Peltier-elementti .....  | 16 |
| Kuva 3. Eri materiaalien hyvyyslukuja lämpötilan suhteen. (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].) .....                       | 19 |
| Kuva 4. Alphabet energyn rahtikontti (Alphabet Energy, [Viitattu 14.5.2016].).....   | 20 |
| Kuva 5. Termosähkögeneraattori joka liitetään pakokaasujärjestelmään (Meisner, 2011).....  | 21 |
| Kuva 6. enOceanin langaton kytkin (TechHive. 2016) .....   | 23 |
| Kuva 7. Panasonicin nikkelimetallihydridiakkuja (Panasonic [Viitattu 15.5.2016].) .....  | 26 |
| Kuva 8. Panasonicin litium-ioniakkuja (Panasonic [Viitattu 14.5.2016]) .....   | 27 |
| Kuva 9. SLA-akkuja (Mitchell 2014) .....   | 27 |
| Kuva 10. Muratan superkondensaattoreita (DMT series, [Viitattu 13.5.2016].) .....  | 28 |
| Kuva 11. Panasonicin tavallisia kondensaattoreita (Panasonic [Viitattu 13.5.2016]) .....   | 29 |
| Kuva 12. LTC3107-kytkentäkaavio termosähkögeneraattorille (Linear Technology, [Viitattu 9.11.2015]).                                   | 30 |
| Kuva 13. LTC3107 laskennallinen saavutettava primääripariston elinikä suhteessa lämpötilaan (Linear Technology, [Viitattu 9.11.2015]). | 30 |

## Käytetyt termit ja lyhenteet

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>Generaattori</b>      | Tapa muuttaa eri energiatyypeistä sähköenergiaa, kuten termosähkögeneraattori muuntaa lämpöenergiaa sähköenergiaksi                  |
| <b>Peltier-elementti</b> | Puolijohde-elementti, jota käytetään tuottamaan sähköenergialla lämpötila ero tai vaihtoehtoisesti tuottamaan sähköä lämpötilaerolla |
| <b>RFID</b>              | <b>R</b> adio <b>F</b> requency <b>I</b> dentification eli radiotaajuinen etätunnistuspiiri  |
| <b>TEG</b>               | <b>T</b> hermoelectric <b>G</b> enerator eli termosähkögeneraattori  |
| <b>Termopari</b>         | Kahdesta eri sähköä johtavasta materiaalista tehty pari, joka tuottaa jännitepotentiaalin lämpötilan vaikutuksesta                   |
| <b>ZT</b>                | Termosähköisen materiaalin hyvyysluku  |

# 1 Johdanto

## 1.1 Työn tausta

Sähköenergian tuottaminen pienialaisesta ympäristöstä on suhteellisen vähän tunnettua, sille ei vielä ole kehitetty runsaasti arkisia käyttökohteita. Monet sähköenergian tuoton ilmiöistä ovat vähän tunnettuja. Koska sähköenergia on osa jokaisen ihmisen arkielämää ja erilaisten, avustavien ja enemmän tai vähemmän hyödyllisten, laitteiden määrä kasvaa jatkuvasti, halu tutkia ja kehittää uusia innovaatioita ja sähköenergian tuottotapoja on suuri.

Sähköenergian tuotto ilman, että laiteessa tarvitaan virtajohtoja tai vaihdettavia paristoja saavutetaan käyttömukavuutta ja käyttövarmuutta. Nykyisin internetiin yhdistettyjen laitteiden määrä kasvaa ja laitteille keksitään uusia käyttökohteita jatkuvasti, joten sähköenergian tuottaminen voi mahdollistaa täysin itsenäisten langattomien laitteiden valmistamisen ja suunnittelun.

## 1.2 Työn tavoite

Opinnäytetyön tavoitteena on tutustua erilaisiin tapoihin tuottaa sähköenergiaa eri energianlähteitä hyödyntäen. Samalla käydään läpi taltiointitavat, mitä kaikkea vaaditaan tehokkaaseen energian hyödyntämiseen, ja tarkastellaan, kuinka jännite sovitetaan järjestelmään. Tässä työssä on tarkoituksena paneutua muuta sähköenergian tuottotapoja enemmän termosähkögeneraattoreiden toimintaan ja tarkastella siihen liittyviä ilmiöitä.

## 1.3 Työn rakenne

Luvussa 2 käsitellään tarkemmin termosähkögeneraattoreita, niiden ominaisuuksia, materiaaleja ja mahdollisia käyttökohteita.

Luvussa 3 käydään lyhyesti läpi muita keinoja tuottaa sähköenergiaa.



Luvussa 4 käydään läpi, miten haalittua energiaa voidaan varastoida tulevaa käyttöä varten, ja erilaisia tapoja muuttaa sähköjännite käyttökohteeseen sopivaksi.

Luvussa 5 käydään läpi työn tuloksena tulleita pohdintoja ja tulevaisuuden näkymiä.

## 2 Termosähkögeneraattorit

### 2.1 Teoriaa termosähkögeneraattoreihin liittyen

#### 2.1.1 Ensimmäinen termodynamiikan laki

Ensimmäisen termodynamiikan lain mukaan järjestelmän sisäenergian määrä pysyy vakiona, ellei siihen ei vaikuta ulkopuoliset tekijät. Järjestelmän sisäenergian määrä riippuu siitä, kuinka paljon järjestelmästä poistuu tai kuinka paljon järjestelmään tulee ulkopuolelta lämpöä tai työtä. Mikroskooppisesti tarkasteltuna järjestelmän sisäenergia on järjestelmän rakenneosasten potentiaali- ja liike-energiaa, ja makroskooppisesti tarkasteltuna sisäenergian muutokset ilmenevät olomuodon, paineen, tilavuuden tai lämpötilan muutoksina. (Hatakka ym. 2011, 138–139.)

Järjestelmän sisäenergia kasvaa, kun järjestelmään tuodaan ulkopuolelta lämpöä tai työtä. Vastaavasti järjestelmän sisäenergia pienenee, kun järjestelmä tuottaa työtä tai järjestelmästä vapautuu lämpöenergiaa. Tämä laki myös takaa sen, että ikiliikkuja ei ole teoriassa mahdollinen, koska työtä ei tapahdu, mikäli järjestelmässä ei tapahdu energian muutosta. (Hatakka ym. 2011, 139.)

#### 2.1.2 Toinen termodynamiikan laki

Termodynamiikan toisen lain mukaan järjestelmän entropia pyrkii luonnollisissa prosesseissa kasvamaan. Entropia kuvaa järjestelmän järjestystä. Jos järjestelmän entropia halutaan pienentää, joudutaan tekemään järjestelmän ulkopuolista työtä. Lämpötilaerojen tasoittuessa on kyse entropian kasvusta, jolloin lämpöliikkeessä olevat hiukkaset pyrkivät tasoittumaan tilaan tasaisesti. Sen sijaan lämpötilaerojen luominen, esimerkiksi huoneessa, vaatii ulkopuolista työtä, eli entropian pienentäminen vaatii työtä. (Hatakka ym. 2011, 149–151.)

Lämpövoimakoneessa tapahtuu aina häviöitä, joten lämpövoimakone ei pysty muuttamaan kaikkea lämpöenergiaa työksi. Tämä takaa sen, että toisen lajin iki-

liikkuja on mahdoton johtuen siitä, että järjestelmän energian kokonaismäärä pysyy samana, vain energian olomuoto muuttuu. (Hatakka ym. 2011, 149.)

### 2.1.3 Lämmönjohtuminen

Lämmönjohtumisessa lämpötilaero johtuu materiaalin sisällä. Kuumen materiaalin molekyylit liikkuvat nopeammin ja vuorovaikuttavat kylmemmän materiaalin molekyylien kanssa tasaten molekyylien liike-energian eroja, jolloin lämpötilaerot taasaantuvat. Lämmönjohtumisen tehokkuuteen vaikuttavat, lämpötilaero, materiaalin paksuus ja materiaalin pinta-ala. Lämmön johtumisen teho  $P$  saadaan kaavalla (1). (Hatakka ym. 2011, 48,168.)

$$P = \lambda A \frac{\Delta T}{l} \quad (1)$$

missä

$\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuuskerroin

$\Delta T$  on lämpötilaero

$l$  on materiaalin paksuus

$A$  on materiaalin pinta-ala

### 2.1.4 Lämpökapasiteetti

Lämpökapasiteetti on materiaalin ominaisuus, joka kuvaa materiaalin kykyä sitoa ja luovuttaa lämpöenergiaa. Kappaleen lämpökapasiteetti saadaan aineen ominaislämpökapasiteetista kerrottuna aineen massalla. Kokeellisesti mitattua lämpökapasiteettiä käytetään ominaislämpökapasiteetin sijasta, kun ei tiedetä varmasti mistä aineista, tai missä suhteessa tiettyjä aineita, kappale koostuu. (Hatakka ym. 2011, 112–115.)

Kappaleen lämpökapasiteetti voidaan laskea mittaamalla kappaleen luovuttama tai vastaanottama lämpömäärä ja jakamalla se lämpötilan muutoksella, jonka voi laskea kaavalla (2). (Hatakka ym. 2011, 115.)

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (2)$$

missä

$C$  on kappaleen lämpökapasiteetti

$Q$  on energiamäärän muutos

$\Delta T$  on lämpötilamuutos Kelvineinä

### 2.1.5 Konvektio

Konvektiolla tarkoitetaan lämpötilaerosta johtuvaa lämpöenergian siirtymistä kaassussa tai nesteessä, mikä johtuu aineeseen syntyneistä tiheyseroista. Esimerkiksi lämmin ilma on kylmää ilmaa kevyempää, joten lämmin ilma pyrkii nousemaan ylöspäin kylmän ilman yläpuolelle. Konvektion tehokkuus riippuu lämpötilaeroista ja aineen pinta-alasta. (Harsia, 2005.)

### 2.1.6 Lämpösäteily

Lämpöenergia voi siirtyä myös lämpösäteilyn kautta infrapunasäteilynä, joka voi edetä ilman väliainetta tyhjiössä. Infrapunasäteily muuttuu lämpöenergiaksi kohdattessaan materiaalia. Siihen kuinka hyvin kiinteä materiaali ottaa lämpöenergiaa vastaan riippuu sen heijastavuudesta. (Harsia, 2005.)

### 2.1.7 Lämpövoimakone ja Carnot-hyötysuhde

Lämpövoimakone tuottaa työtä lämmön siirtymisellä, eli lämpövoimakone ottaa lämpöenergiaa kuumasta säiliöstä siirtäen sitä kylmempään säiliöön, muuttaen samalla osan energiasta työksi. Ensimmäisen termodynamiikan lain mukaan laitteen sisäenergian muutos on sama kuin laitteen ottama ja luovuttama lämpöenergia, ja koneen tekemä työ. Lämpövoimakoneen tehokkuus kasvaa mitä suurempi lämpötilaero on kuuman ja kylmän säiliön välillä, kylmäsäiliön viilennys onkin edellytys lämpövoimakoneen tekemän työn jatkumiselle. (Etälukio, 2001; Hatakka ym. 2011, 144–145.)

Carnotin-hyötysuhde on teoreettinen maksimi sille, kuinka paljon lämpöenergiaa voidaan muuntaa mekaaniseksi työksi. Carnotin mukaan lämpövoimakone ei pysty olemaan hyötysuhteeltaan parempi kuin mitä lämpövoimakoneen säiliöiden lämpötila ero on. Carnot-hyötysuhde saadaan kaavasta (3). (Sainio, [Viitattu 12.5.2016]; Lachish, 2014.)

$$e = \frac{Q_l}{Q_h} = 1 - \frac{T_l}{T_h} \quad (3)$$

missä

$Q_l$  on lämpövoimakoneen tekemä työ

$Q_h$  on lämpövoimakoneeseen laitettu energia

$T_l$  on kylmän puolen lämpötila

$T_h$  on kuuman puolen lämpötila

$e$  on Carnot-hyötysuhde

## 2.2 Termosähkögeneraattori

### 2.2.1 Seebeck-ilmiö

Seebeck ilmiössä termosähköisen materiaalin vapaat elektronit tai elektroniaukot kuljettavat sähkövirtaa ja lämpöenergiaa. Lämpöenergian johtuessa materiaalin lävitse syntyy sähkövirtaa (kuva 1, a-kohta). Materiaalissa vapaita elektroneita kutsutaan p-tyypin puolijohteeksi. Tällöin positiivinen jännite muodostuu materiaalin kylmälle puolelle. Jos materiaalissa on elektroniaukkoja, materiaali on n-tyypin puolijohde, tällöin kylmälle puolelle muodostuu negatiivinen jännite. Jännitteen suuruus riippuu materiaalin Seebeckin kertoimesta ja lämpötilaerosta sekä virran aiheuttamasta jännitehäviöstä sekä materiaalin sisäisestä vastuksesta jonka voi laskea kaavalla (4). (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].)

$$U = \alpha \Delta T - IR_{TEG} \quad (4)$$

missä

$\alpha$  on materiaalin Seebeck kerroin

$\Delta T$  on lämpötilaero

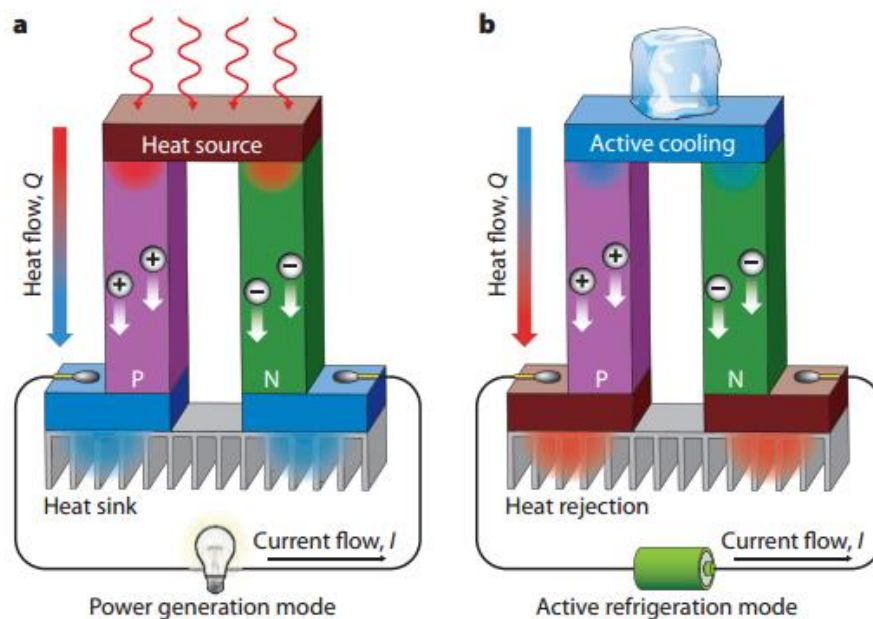
$U$  on jännite

$I$  on virta

$R_{TEG}$  on materiaalin sisäinen vastus

Termopari koostuu p- ja n-typin materiaaleista, joita termosähkögeneraattorissa on kytketty useita termopareja sarjaan suuremman jännitteen aikaansaamiseksi. Samoin termoparien rinnakkaiskytkentä on mahdollista suuremman virran aikaansaamiseksi. Lämpöpuolien vaihtaminen aiheuttaa samalla jännitteen polariteetin muuttumisen. (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].)

Termoparin tuottamaa sähköenergiaa Seebeck-ilmiön avulla voidaan tarkastella kuvan 1 a-kohdasta. Lämmönsiirtyminen Seebeck-materiaalissa tuottaa sähkövirtaa. Lämmönsiirtymisen suuntaa kääntämällä, termopari tuottaisi yhtäläillä sähkövirtaa, mutta jännitteellä olisi käänteinen polariteetti. (Lachish, 2014.)



Kuva 1. Termosähköisen elementin käyttötavat (Li ym. 2010)

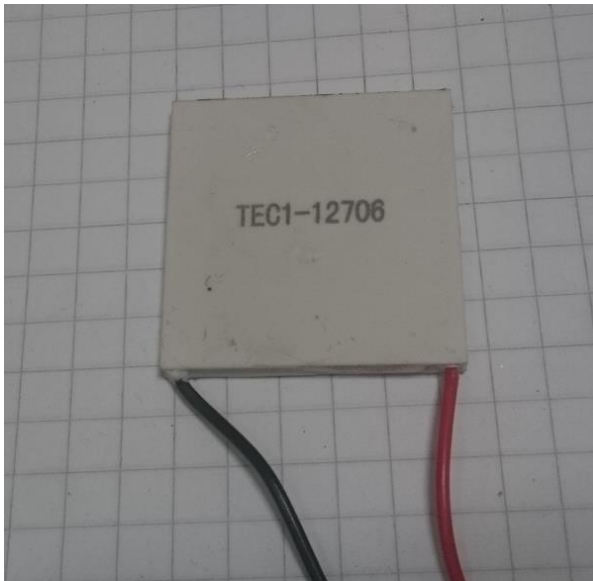
Seebeck-ilmiö tarvitsee materiaalin, joka johtaa hyvin sähköä, mutta huonosti lämpöä. Tällä hetkellä Seebeckin ilmiössä käytetään hyväksi puolijohteita, joilla on suhteellisen hyvä sähkönjohtavuus, mutta lämmönjohtokyky on heikompi kuin me-

talleilla. Tämän hetkisillä menetelmillä ei ole kuitenkaan pystytty kehittämään ihan-teellista materiaalia, joka vastaisi täysin ilmiön tarpeita. Tästä syystä elementin sähköenergian tuotto jää vähäiseksi ja hyötysuhde heikoksi. (Korpela, 2012.)

### **2.2.2 Peltier'n ilmiö**

Peltier'n ilmiössä termopariin johdetaan sähkövirtaa, jolla tuotetaan lämpötilaero päinvastoin kuin Seebeckin ilmiössä, jossa tuotetaan lämpötilaeron avulla sähkö-energiaa. Kuvan 1 b-kohdassa havainnollistetaan, kuinka termoparilla voidaan tuottaa aktiivinen jäähdytys. Kuvasta 1 huomataan, että kyseessä on samanlainen termopari kuin Seebeck-ilmiössä. Peltier'n ilmiössä, samoin kuin Seebeckin ilmiössä, vaihtamalla sähkövirran suunta voidaan saada aikaan aktiivinen lämmitys samalla termoparilla. Jännitteestä riippuva saavutettava lämpötilaero riippuu materiaalin hyvyysluvusta. Hyvyyslukuun palataan myöhemmin luvussa 2.3 Termosähköisten materiaalien ominaisuudet. (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].)

Ilmiötä hyödynnetään kohteissa, joissa pyritään saavuttamaan mahdollisimman stabiili, tarvittaessa säädettävissä oleva lämpötila. Tätä pystytään hyödyntämään esimerkiksi matkajääkaappien jäähdyttämiseen (kuva 2). (Lachish, 2014.)



Kuva 2. Tyypillinen pieni Peltier-elementti

### 2.2.3 Bimetallitermoparit

Termoparin voi muodostaa myös kahdesta erilaisesta sähköä johtavasta metallista. Näiden metallien välille muodostuu jännite, joka riippuu lämpötilasta. Valitut metallit määräävät jännitteen ja sen, kuinka herkkä yhdistelmä on lämpötilan muutokselle. Eri metalleja voidaan käyttää eri käyttötarkoituksiin lämpötilan seuraamisessa, mutta metalliset termoparit ovat harvinaisia suurempien energiamäärien tuottamisessa, johtuen niiden huonosta sähköenergian tuottokyvystä. Esimerkiksi K-tyypissä käytetään metalleina kromi-nikkeliseosta ja alumiinia. Näillä antureilla saavutetaan laajat mittauslämpötilat, joita hyödynnetään teollisuudessa ja laboratorio olosuhteissa. (Omega [Viitattu 2.6.2016].)

### 2.3 Termosähköisten materiaalien ominaisuudet

Termosähkömateriaaleilla on erilaiset potentiaaliominaisuudet, jotka määräävät kyseisen yhdisteen jännitteen ja materiaalin ominaisuuksista riippuvan hyvyysluvun  $ZT$  jonka voi laskea kaavalla (5). Hyvyysluku ilmaisee materiaalin kyvyn muuttaa lämpöenergiaa sähköenergiaksi. Mitä suurempi hyvyysluku on, sitä parempi on materiaalin hyötysuhde. (Korpela, 2012.)



$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\lambda \rho} \quad (5)$$

missä

- T on kuumanpuolen lämpötila kelvinasteina
- $\alpha$  on Seebeckin kerroin
- $\rho$  on materiaalin resistiivisyys
- $\lambda$  on materiaalin lämmönjohtavuus
- ZT on materiaalin hyvyysluku

Carnot hyötysuhteen mukaan termosähköisen materiaalin maksimi hyötysuhde voidaan laskea kaavalla (6). (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].)

$$e_{Maks} = \frac{\Delta T}{T_h} * \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT}+1} \quad (6)$$

missä

- ZT on materiaalin hyvyysluku
- $e_{Maks}$  on maksimaalinen hyötysuhde
- $\Delta T$  on lämpötilaero
- $T_h$  on kuuman puolen lämpötila

Termosähkömateriaaleilla on ominaistoimintalämpötila, jossa materiaalien hyvyysluku on suurimmillaan. Tällöin materiaali antaa eniten tehoa suhteessa lämpötilaeroon. (Lachish, 2014.) Lämpötilan käyttäytyminen on aineesta riippuvainen ominaisuus. Jokaisella aineella on optimaalinen maksimilämmönhyötysuhde, jossa materiaalin tuottama sähköenergia on suurimmillaan. (Douglas, [Viitattu 9.4.2015].)

## 2.4 Termosähkögeneraattoreissa käytettävät materiaalit

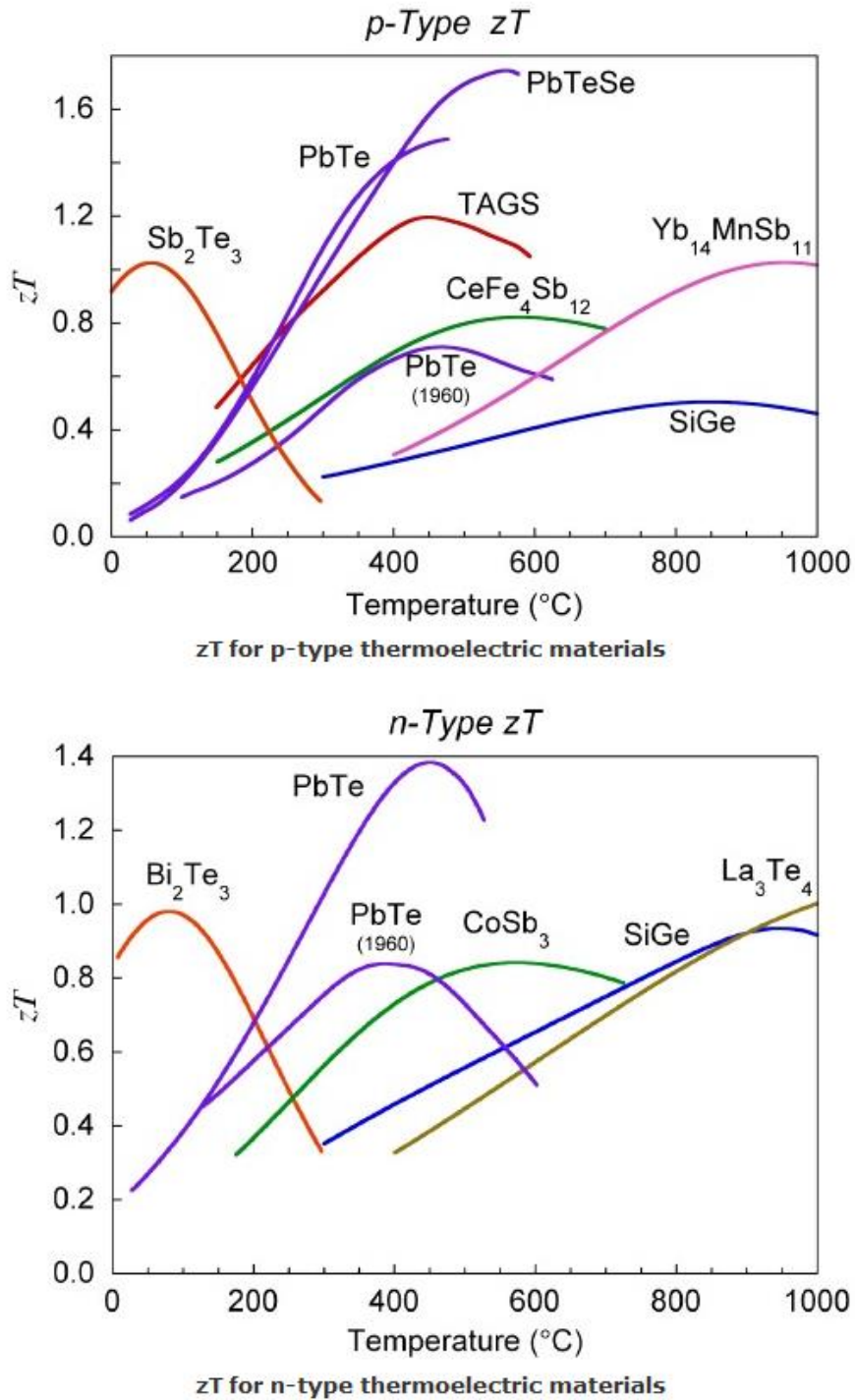
**Vismuttitelluuri.** Vismuttitelluuri, kemialliselta kaavaltaan  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ , on nykyisin termosähkögeneraattoreissa käytössä olevista materiaaleista yksi tunnetuimpia n-tyypin termosähköisiä materiaaleja. Sen ominaisuuksia pyritään parantamaan erilaisilla yhdisteillä, kuten esimerkiksi piikarbidilla sekä mahdollisilla nanorakenteilla. Näiden avulla voidaan yhdisteen hyvyyslukua parantaa merkittävästi. (Li ym. 2010.)

Vismuttitelluuri soveltuu käytettäväksi alle  $500\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilassa, koska sen sulamispiste on  $586\text{ }^\circ\text{C}$  (Meisner, 2011).

**Lyijytelluuri.** Lyijytelluuri, kemialliselta kaavaltaan  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ , on pitkään tunnettu p-tyypin yhdiste, jota on tutkittu paljon. Lyijytelluuri on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen vismuttiteelluurin kanssa. (Institute for Basic Science, 2015.)

**Magnesiumsilikaatti tetraedriitti -yhdistelmä.** Magnesiumsilikaatti tetraedriitti-yhdistelmä on tutkinnan alla oleva lupaava materiaali. Se parantaa termosähkögeneraattorin kaupallisia mahdollisuuksia, koska kyseiset mineraalit ovat huomattavasti yleisempiä luonnossa kuin vismutti- tai lyijytelluuri. Tästä johtuen yhdistelmä on halvempaa valmistaa, ja koska se ei ole raskasmetallimyrkky, se on myös ympäristöystävällisempi vaihtoehto. Kyseisen materiaalin hyvyysluku on suurempi, kuin nykyisin yleisessä käytössä olevilla materiaaleilla. (Jacoby, 2015; Jacobs, 2014.)

Kuvasta 3 pystytään havaitsemaan erilaisten materiaalien hyvyysluku sekä mahdollinen käyttölämpötila-alue. Toiset materiaalit pysyvät stabiilina korkeammissa lämpötiloissa, siinä missä toiset muuttuvat jo epästabiileiksi. Puolijohteiden lämmönjohtavuus heikkenee alhaisissa lämpötiloissa. Kuvassa on esiteltyinä erikseen p- ja n-tyypin materiaalit. (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].)



Kuva 3. Eri materiaalien hyvyyslukuja lämpötilan suhteen. (Northwestern University, [Viitattu 27.5.2016].)

## 2.5 Käyttökohteita termosähkögeneraattoreille

**Teollisuus.** Teollisuudessa tutkitaan keinoja muuntaa hukkalämpöä takaisin sähköenergiaksi. Tätä on hyödynnetty valmistaja Alphabet Energy:n suunnittelemassa rahtikontissa (kuva 3). Rahtikonttiin johdetaan teollisuuden pakokaasut, jossa laitteisto muuntaa termosähkögeneraattorilla lämpöenergian sähköenergiaksi. Vaadittava lämpötilaero pakokaasuista termosähkögeneraattorille tehdään ilmaan tai meriveteen. (Alphabet Energy, [Viitattu 13.5.2016]; LaMonica, 2014.)

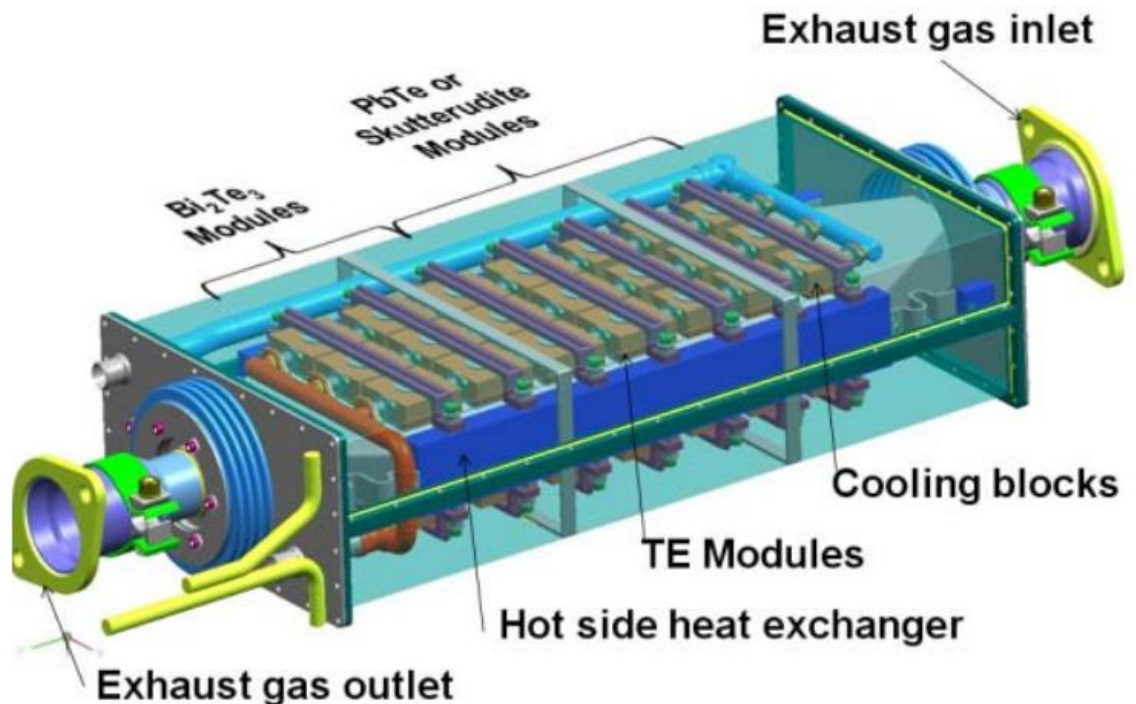


Kuva 4. Alphabet energy:n rahtikontti (Alphabet Energy, [Viitattu 14.5.2016].)

**Moottoriteollisuus.** Moottoriteollisuus on kiinnostunut korvaamaan laturin termosähkögeneraattorilla. Tämä ei ole nykyisellä teknologialla kannattavaa, koska termosähkögeneraattorin tulisi olla suhteellisen kookas ja painava, jotta se pystyisi tuottamaan tarpeeksi sähköenergiaa nykyisten autojen virran tarpeisiin. Todennäköisintä on, että korvaus tehtäisiin ensimmäisenä isoissa kuorma-autoissa. Niissä on tarvittava tila kookkaalle termosähkögeneraattorille, kuorma-auton lämmöntuotto on suurempaa ja elementistä saa enemmän virtaa suhteessa kokoon. Virrankulutus ei ole merkittävästi suurempi verrattuna henkilöautoon, joten mahdollinen

muutoksen tuoma säästö realisoituu helpommin. (Green Car Congress, 2015; Smith & Thornton, 2009.)

Kuvassa 4 esitellään pakoputkistoon liitettävän termosähkögeneraattorin rakennetta. (Meisner, 2011)



Kuva 5. Termosähkögeneraattori joka liitetään pakokaasujärjestelmään (Meisner, 2011).

Huomattava etu termosähkögeneraattoreissa tavallisiin mekaanisiin sähköntuotantoihin verrattuna on vähäisempi huollon tarve. Termosähkögeneraattori on puoli-johde, jossa ei ole liikkuvia tai kuluvia osia. (Meisner, 2011.)

**Kotiautomaatio.** Elektroniset anturit ovat yleinen kohde kotiautomaatiossa, jossa energian vaihtoehtoisista tuotantotavoista on hyötyä. Tällä tavoin voidaan välttää vetämästä verkkosähköä laitteelle, ja laite on mahdollista sijoittaa mahdollisimman lähelle kohdetta, johon tarvitaan anturia. Tästä esimerkkinä on lämmitysjärjestelmän etäsäädettävä säätötermostaatti, jonka ohjauksen vaatima virta voidaan toteuttaa lämpöputkiston ja huoneilman välisen lämpötilaeron avulla. (EnOcean, [Viitattu 15.5.2016]; EnOcean, [Viitattu 16.5.2016]; greenTEG AG. [Viitattu 29.5.2016].)

### **3 Vaihtoehtoisia keinoja tuottaa sähköenergiaa.**

#### **3.1 Pyroelektrisyys**

Pyroelektrisyiden toiminta perustuu lämpötilan vaihteluun. Pyroelektrisiä generaattoreita voidaan käyttää myös jatkuvan sähköenergian tuottoon luomalla jatkuva lämpötilaero materiaaliin, kuten Peltier-elementissä. Pyroelektrisyydellä on huomattavasti parempi hyötysuhde kuin Peltier-elementillä, ja pyroelektrinen generaattori pystyy toimimaan laajalla lämpötila-alueella. Pyroelektrisyys ei myöskään vaadi huomattavaa lämpötilan muutosta tuottaakseen pientä määrää sähköenergiaa. (Sebald, Guyomar & Agbossou, 2009.)

Pyroelektrisyttä hyödynnetään muun muassa passiivisissa infrapunatunnistimissa. Liikkuvan ihmisen säteilemä lämpöenergia luo riittävän eroavaisuuden ympäristössä tunnistusta varten. (Mathas, 2012.)

Pyroelektrisyydellä voi olla tulevaisuudessa mahdollista tuottaa jopa watteja sähköenergiaa, mutta tällä hetkellä ei ole tiedossa toteutettuja kaupallisia ratkaisuja (Sebald, Guyomar & Agbossou, 2009).

#### **3.2 Liike-energiageneraattorit**

Liike-energian hyödyntämistä pienten mukana kulkevien sähkölaitteiden virransyötöksi on tutkittu kauan. Kehitystä ei ole vielä kuitenkaan tapahtunut tarpeeksi, jotta voitaisiin luottaa pelkästään liike-energiaan jatkuvan energian tarpeissa. Tästä huolimatta on suunniteltu esimerkiksi kaukosäätimiä sekä langattomia valokatkaisimia, joissa lähettimen vaatima sähköenergia tuotetaan kuvan 6 kaltaisen kytkimen tuottamasta liike-energiasta. (TechHive, 2016.)



Kuva 6. enOceanin langaton kytkin (TechHive. 2016)

Liike-energiageneraattorilla tuotetun sähköenergian määrä voi vaihdella mikrowatteista milliwatteihin (Vullers ym. 2009; Beeby, Tudor & White 2006).

### 3.3 Aurinkokennot

Aurinkokennot ovat kehittyneet huomattavasti viime vuosina, ja samaan aikaan ne ovat yleistyneet eri puolilla maailmaa sähköenergian tuottamisessa niin suuressa mittakaavassa kuin pienissä yksittäistenkin talouksien tarpeissa.

Haasteita aurinkokennoissa luo se, missä kulmassa auringon säteet osuvat paneeliin. Mitä suurempi säteiden kulma on, sitä huonompaa on kennon sähköntuotto. Aurinkokennot ovat myös hauraita ja ne vaativat suojausta vääntymiseltä ja kolhiintumiselta. (Vullers ym. 2009.)

Aurinkokennoja on helppo ketjuttaa saavuttaakseen suuremman tehon järjestelmää varten. Tämän ansiosta järjestelmää voi kasvattaa helposti suuremmaksi. (Vullers ym. 2009.)

### **3.4 Radioaaltojen hyödyntäminen energian tuotossa**

Sähköenergian muodostaminen radioaalloista on vanha, mutta suhteellisen vähän käytetty keino, koska sillä on pieni virranantokyky. Siitä syystä tätä menetelmää on mahdollista hyödyntää vain erittäin pienivirtaisissa laitteissa, kuten etäluettavissa korteissa, erittäin yksinkertaisissa radiovastaanottimissa sekä kehoon upotettavissa mikrosiruissa. (Vullers ym. 2009.)

Teollisuudessa on käytössä jo tavaroiden seurantaan tarkoitettuja etäluettavia tietolappuja, jotka perustuvat RFID-tekniikkaan. Niissä vastaanotin lähettää radioenergiaa, jonka tarrassa oleva antenni muuntaa käyttösähkökseen, ja saa siitä tarvittavan energian viestin lähettämistä varten. Antennin avulla energiaa ympäristöstä keräävä laite voi tuottaa tehoa pikowateista mikrowatteihin. (Vullers ym. 2009.)



## 4 Energian varastointi

### 4.1 Yleistä tietoa varastoinnista

Kaikkien energian keräysmuotojen haasteena on se, että mahdollinen energian saanti on paikoittaista ja sitä on varastoitava. Varastointi ei ole häviötöntä ja se tuo mukanaan omia haasteita, kuten jännitteiden ja latausvirtojen yhteensovittamista sekä optimointia. Monesti eri energian keräysmuodot eivät anna satoja millivoltteja enempää jännitettä ja virta voi jäädä muutamasta mikroampeerista milliampeeriin. Mahdollisen energian taltioimisen muoto voi olla 1 – 10 voltin luokkaa ja tarvittava latausvirta on milliampeereja. (Drew, 2010.)

Akuissa on ominaisuutena se, että lataaminen vaatii huomattavasti enemmän energiaa, kuin mitä siitä saa irti latauksen purkautuessa. Tietyissä akkutyypeissä on parempi latauksen hyötysuhde kuin toisissa. Hyötysuhde muuttuu myös akun varausasteen mukaan. Varaukseltaan tyhjempi akku ottaa varausta paremmin vastaan, kuin varaukseltaan lähes täysi akku. Tästä syystä esimerkiksi litiumakkujen kanssa voidaan säätää tarvittaessa latausastetta hyötysuhteen ja eliniän kasvattamisen vuoksi. (Battery University, 2016d.)

#### 4.1.1 Nikkelimetallihydridiakut

Nikkelimetallihydridiakukennon tyypillinen jännite on noin 1,2 voltia. Täyteen ladattuna jännite on 1,35 voltia ja purkautuneena 0,9 voltia. Nikkelimetallihydridi on kohtuullisen stabiili kemiallinen koostumus, joka sietää melko hyvin väärin käyttöä. Purkautumisnopeus on 5 – 15 % kuukaudessa. Nikkelimetallihydridi kemialla on kohtalaisen suuri energiatiheys verrattuna litiumpolymeeriin ja lyijyakkuihin. Nikkelimetallihydridiakut kestävät jopa 2000 lataus- ja purkusykliä. (Battery University, 2016b; Panasonic, 2014.)



Kuva 7. Panasonicin nikkelimetallihydridiakkuja (Panasonic [Viitattu 15.5.2016].)

#### 4.1.2 Litium-ioni- ja litiumpolymeeriakut

Litiumpolymeeriakkukennon tyypillinen jännite on noin 3,6 – 3,8 voltia, täyteen ladattuna 4,2 – 4,3 voltia ja purkautuneena 3,0 – 3,3 voltia. Rajoituksia tuottaa akun herkkä kemiallinen koostumus, joka rajaa latauskertoja, aiheuttaa rajoitteita lataukselle ja akun syväpurkautuminen tuhoaa kennon. Purkautumisnopeus on 1 – 5 % kuukaudessa. Litiumiin perustuvilla akkuteknologioilla on suhteellisen suuri energiatiheys verrattuna muihin käytössä oleviin teknologioihin. (Battery University, 2016c&d.)

Litiumpolymeeriakut voidaan tehdä lähes minkä muotoisiksi hyvänsä. Tämän vuoksi akku voidaan suunnitella käyttötarkoituksen mukaisesti käytettävissä olevan tilan puitteissa ja siten maksimoida akun kapasiteetti. Litiumakut kestävät noin 500 – 2000 lataus- ja purkusykliä riippuen niiden käyttötavasta. (Battery University, 2016c&d.)



Kuva 8. Panasonicin litium-ioniakkuja (Panasonic [Viitattu 14.5.2016])

### 4.1.3 Lyijyakku

Lyijyakut ovat jo pitkään käytössä ollutta tekniikkaa. Ne ovat poistumassa käytöstä lyijyn myrkyllisyyden ja lyijyakkujen massan vuoksi. Lyijyakulla on kuitenkin omat hyvät ominaisuutensa, jotka ovat vielä nykyäänkin joissain käyttökohteissa tarpeellisia. Lyijyakun hyvinä puolina muihin akkuihin verrattuna ovat hyvä kylmäkäyttäytyminen ja mahdollisuus syväpurkautumiseen toteutuksissa, jotka sietävät syväpurkausta ilman, että tapahtuisi kemiallista hajoamista. Lyijyakkuja ei nykyään esiinny pienemmissä elektroniikkalaitteissa sen suuren massan ja myrkyllisyyden vuoksi. SLA-lyijyakut kestävät käyttötavasta riippuen noin 200 - 300 lataus- ja purkukykliä. (Battery University, [Viitattu 13.5.2016].)



Kuva 9. SLA-akkuja (Mitchell 2014)

#### 4.1.4 Superkondensaattori

Kondensaattorityypeistä on yleistynyt erityisesti superkondensaattori. Sen hyvänä puolena on suuri latausvirta, joka takaa lähes viiveettömän latautumisen järjestelmän siihen kyetessä. Se omaa myös erinomaisen purkautumisvirran. Haittapuolelta on yleensä kallis hinta, heikko energiatiheys ja itsepurkautumisen nopeus. (Battery University, 2016a.)

Kondensaattorien hyvänä puolena verrattuna tavallisiin akkuihin on niiden lataus-  
sykliä määrän kesto, joka on miljoonien syklien tasoa. Lisäksi kondensaattorit voidaan huoletta ladata koko käyttölämpötila-alueella ilman, että sillä olisi vaikutusta sen keston. (Battery University, 2016a.)

Superkondensaattorin tyypillinen jännite on noin 1.5 – 6 voltia, ja sen voi purkaa täysin tyhjäksi ilman haittavaikutuksia. Myös purkuvirta voi olla erittäin suuri, >10 ampeeria. (DMT series, [Viitattu 13.5.2016]; Farmer 2007).



Kuva 10. Muratan superkondensaattoreita (DMT series, [Viitattu 13.5.2016].)

#### 4.1.5 Tavalliset kondensaattorit

Tavallisia kondensaattoreita voidaan käyttää myös energian varastointiin. Niiden huonoina puolina on nopea itsepurkautuminen ja pieni energiatiheys. Hyvinä puolina on niiden hyvä tarjonta, edullisuus ja mahdollisuus korkeisiin jännitteisiin ilman sovittamista useiden komponenttien sarjaan. Myös keraamisia kondensaattoreita

voidaan käyttää varastointiin, mutta niillä on suhteellisen pieni kapasitanssi verrattuna perinteisiin elektrolyyttisiin kondensaattoreihin. (Electronic Tutorials, 2016a.)

Joissain elektrolyyttisissä kondensaattoreissa voi olla kemiasta riippuen huonona puolena se, että kondensaattorin elektrolyytti voi jäätyä noin  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötilassa. Tästä syystä niitä ei voida käyttää, jos käyttökohteelta vaaditaan pakkasen kestävyyttä. (Electronic Tutorials, 2016b.)



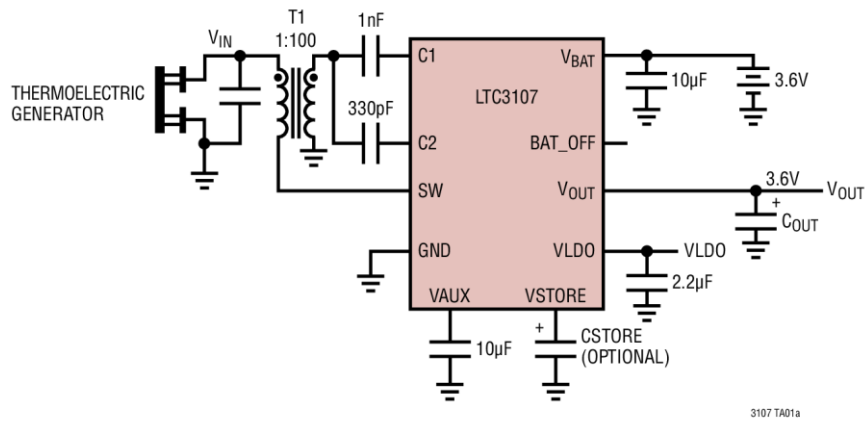
Kuva 11. Panasonicin tavallisia kondensaattoreita (Panasonic [Viitattu 13.5.2016])

## 4.2 Muita huomioitavia asioita

Akut vaativat tehokasta käyttöä varten oman latauspiirinsä, jonka avulla muunnetaan jännite ja sähkövirta akkukennolle sopivaksi. Myös itse kuorma voi vaatia oman virtalähteensä, joka muuntaa kuormalle akkujännitteestä sopivan jännitteen. (Texas Instruments, [Viitattu 8.2.2016].)

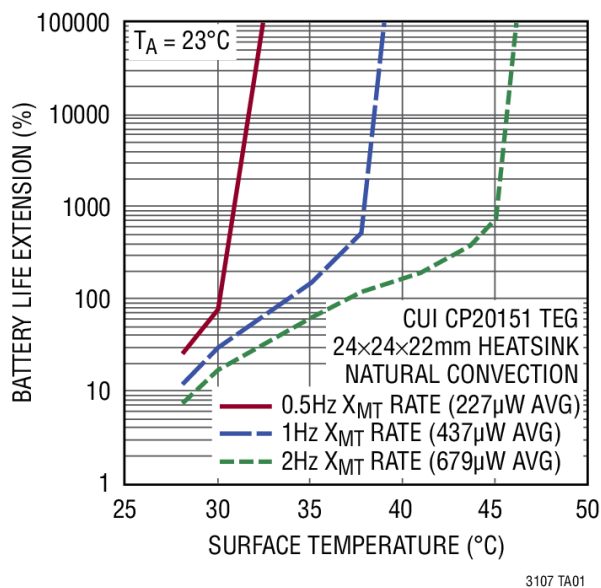
Markkinoille on saapunut viime vuosien aikana valmiita vaihtoehtoja virranhallintaa varten. Nw eivät käytä perinteistä ladattavaa akustoa. Sen sijaan ne on suunniteltu lisäämään primääripariston elinikää hyödyntämällä eri energian haalimismenetelmiä, esimerkiksi Linear Technologies valmistaa piiriä LTC3107, joka on tarkoitettu jatkamaan alkaliparistojen ja ei-ladattavien litiumparistojen elinikää pidemmäksi, kuin mikä olisi mahdollista pariston omalla energialla. Tämä mahdollistaa pidemmän käyttöiän ilman pariston vaihtoa tuotteen eliniän aikana (kuva 12 ja kuva 13). (Linear Technology, [Viitattu 9.11.2015].)

TEG Powered Thermal Harvester with Primary Cell Life Extender



Kuva 12. LTC3107-kytkentäkaavio termosähkögeneraattorille (Linear Technology, [Viitattu 9.11.2015]).

**Percentage of Added Battery Life  
vs TEG Surface Temperature**



Kuva 13. LTC3107 laskennallinen saavutettava primääripariston elinikä suhteessa lämpötilaan (Linear Technology, [Viitattu 9.11.2015]).

Myös pelkällä energian haalinnalla toimivia piirejä on olemassa, mutta niiden olennainen ongelma on se, että kyseiset piirit vaativat alkulatauksen ennen kuin ne aloittavat toimintansa. Jos energiavarausto ehtyy, uudelleen latautumiseen voi mennä useita minuutteja ennen kuin piiri pystyy jatkamaan toimintaansa ja tarjoamaan energiaa. (Drew, 2010.)

Suuri hyöty, mitä saavutetaan kyseisellä menetelmällä, on suuremman virran saatavuus verrattuna pelkkään energian haalintaan. Laitteella voi olla pitkäkestoisempia jaksoja, joissa se voi kuluttaa energiaa. Tällöin energian haalinnan avulla sen elinikää voidaan jatkaa kohtuullisen pienellä tilankulutuksella ja hinnan nousulla. Tätä voitaisiin hyödyntää jopa hintakriittisemmissä kohteissa (Texas Instruments, [Viitattu 8.2.2016].)

Mikrokontrollerit tyypillisesti toimivat noin 1.2 – 5 voltin jännitteellä. On olemassa myös erittäin pienellä sähkövirralla toimivia mikrokontrollereita, jotka eivät vaadi aktiivisessa moodissa kuin mikroampeereja sähkövirtaa toimiakseen. Esimerkiksi Texas Instrumentsin MSP430 tarvitsee tyypillisesti noin 300  $\mu\text{A}$  1 MIPS:in suorituskykyyn 3 V jännitteellä. (Albus, Valenzuela & Buccini, 2009.)

## 5 Yhteenveto ja pohdinta

Termosähkögeneraattorit ovat vielä melko vähän käytössä oleva menetelmä, mutta niiden käyttökohteet lisääntyvät sitä mukaan, kun sähköenergian määrän tuotto suhteessa termosähkögeneraattorin kokoon kasvaa materiaalien kehityksen myötä. Halvempien materiaalien löytyminen mahdollistaa termosähkögeneraattoreiden käytön kiinteiden asennuksien energiatehokkuuden parantamisessa, esimerkiksi teollisuuden parissa. Kotioloissakin voi tulla pienimuotoisia tarpeita sähköenergian tuottoon, vaikkapa sähkökatkon yhteydessä tai sähköttömässä kesämökissä, miksipä ei myös kehittyvissä maissa, joissa ei ole kaikille tarjolla sähkönjakelua. On esimerkiksi olemassa puulämmitykseen lisättävä termosähkögeneraattori, jolla voidaan ladata kännyköitä tai kannettavia, pienen virrankulutuksen omaavia laitteita.

Energian varastointiin on monia tapoja, joista jokaisella on omat hyvät ja huonot puolensa. Varastointitavan valintaan vaikuttaa merkittävästi ympäristö, jossa laitetta pitäisi käyttää. Litiumakut ovat monessa käyttökohteessa hyvä valinta niiden hyvän energiatiheuden vuoksi, mutta niiden rajallinen kyky sietää kylmää ja kuumaa rajoittavat toimintaa ulkoympäristössä. Lyijyakut taas vaativat paljon enemmän tilaa ja painavat huomattavasti enemmän kuin litiumakut, mutta niillä on kyky toimia erittäin kylmissä lämpötiloissa, ja ne sietävät myös kuumaa ympäristöä litiumakkuja paremmin. Tämän vuoksi myös varastointikeinot paranevat, kun ympäristöstä saatavan energian hyödyntäminen helpottuu.

Termosähkögeneraattorin lisäksi muita vaihtoehtoisia menetelmiä sähköenergian tuottamiseen tutkitaan jatkuvasti. Magneettirestriktiiviset generaattorit perustuvat magneettisten kappaleiden väliseen värähtelyyn. Niiden värähtely synnyttää magneettisten kappaleiden välille potentiaalieron, jota voidaan hyödyntää sähköenergian tuottamiseen. Tämä menetelmä ei ole vielä laajassa käytössä, mutta se on tutkinnan alla. Sen tuottotapaa voidaan skaalata taskukokoiseksi meressä kelluvaksi poijuksi, joka tuottaisi meren aalloista energiaa.

Hybridigeneraattorit ovat myös mahdollisuus, joilla voidaan kattaa energiatarpeita monimuotoisissa ympäristöissä, jos tiedetään että laitetta ei voida tehdä vain yhdelle sähköntuottotavalle. Aurinkosähkö vaatii toimiakseen auringon säteilyenergi-



aa, termosähkögeneraattori lämpötilaeron, liikegeneraattorit liikettä ja näitä yhdistämällä voidaan tulevaisuudessa kattaa ehkä useampien pienisähköisten laitteiden koko energian tarve. Samalla saavutetaan vähäisempi huollon tarve käyttöiältään rajattujen akkujen puuttuessa.

Tulevaisuuden näkymiä termosähkögeneraattoreiden parantamisesta voivat olla mahdolliset nanorakenteet, joiden avulla voitaisiin yhdistää sähköä hyvin johtavaa materiaalia ja hyvin eristävää materiaalia yhdeksi, jolloin hyötysuhde paranee huomattavasti verrattuna nykyisiin toteutuksiin (Douglas, [Viitattu 9.4.2015]; Seibald, Guyomar & Agbossou 2009).

Tämä työ opetti sen, että tällä saralla on vielä paljon kehitettävää ja tutkittavaa. Yhdelläkään energiantuottotavalla ei ole mahdollista kattaa kaikkia käyttötilanteita. Lämpimurtojen saavuttamiseksi jokaisen hyötysuhteessa on roimasti kehitettävää. Hyötysuhteen parantumisen myötä monet näistä menetelmistä yleistyisivät merkittävästi. Energian varastointi on kompromissien kanssa tasapainoilua ja eri tapojen kompastuskiviä, mutta silti täynnä mahdollisuuksia.

## LÄHTEET

- Albus, Z., Valenzuela, A., & Buccini, M. 2009. Ultra-Low Power Comparison: MSP430 vs. Microchip XLP Tech Brief. [www-dokumentti]. Texas Instruments. [Viitattu 22.2.2016]. Saatavissa: <http://www.ti.com/cn/lit/pdf/slay015>
- Alphabet Energy. Ei päiväystä. How Thermoelectric Generators Work. [www-dokumentti]. Alphabet Energy. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <https://www.alphabetenergy.com/how-thermoelectrics-work/>
- Alphabet Energy. Ei päiväystä. Alphabet Energy E1™. [www-dokumentti]. Alphabet Energy. [Viitattu 14.5.2016]. Saatavissa: <https://www.alphabetenergy.com/product/e1/>
- Battery University. 2016a. BU-209: How does a Supercapacitor Work? [www-dokumentti]. Battery University. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/whats\\_the\\_role\\_of\\_the\\_supercapacitor](http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor)
- Battery University. 2016b. BU-203: Nickel-based Batteries. [www-dokumentti]. Battery University. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries)
- Battery University. 2016c. BU-206: Lithium-polymer: Substance or Hype? [www-dokumentti]. Battery University. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/the\\_li\\_polymer\\_battery\\_substance\\_or\\_hype](http://batteryuniversity.com/learn/article/the_li_polymer_battery_substance_or_hype)
- Battery University. 2016d. BU-205: Types of Lithium-ion. [www-dokumentti]. Battery University. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- Battery University. Ei päiväystä. Can the Lead-acid Battery Compete in Modern Times? [www-dokumentti]. Battery University. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: [http://batteryuniversity.com/learn/article/can\\_the\\_lead\\_acid\\_battery\\_compete\\_in\\_modern\\_times](http://batteryuniversity.com/learn/article/can_the_lead_acid_battery_compete_in_modern_times)
- Beeby, S, Tudor, M. & White, N. 2006. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. [www-dokumentti]. . [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <http://trove.nla.gov.au/work/21590307>
- Carmo, J. Gonçalves, L. & Gonçalves, J. 2010. Thermoelectric Microconverter for Energy Harvesting Systems. [www-dokumentti]. IEEE. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=5290158](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5290158)

- DMT Series. . Ei päiväystä. [www-dokumentti]. Murata. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://www.murata.com/en-us/products/capacitor/edlc/dmt>
- Douglas, P. Thermoelectric Energy Harvesting. [www-dokumentti]. University of Glasgow. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <http://www.niplab.org/files/Paul.pdf>
- Drew, J. 2010. Energy Harvester Produces Power from Local Environment, Eliminating Batteries in Wireless Sensors. [www-dokumentti]. Linear Technology. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavissa: <http://www.linear.com/docs/29710>
- Electronic Tutorials. 2016a. Types of Capacitor. [www-dokumentti]. Basic Electronics Tutorials. [Viitattu 23.5.2016]. Saatavissa: [http://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap\\_2.html](http://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_2.html)
- Electronic Tutorials. 2016b. Capacitor Characteristics. [www-dokumentti]. Basic Electronics Tutorials. [Viitattu 23.5.2016]. Saatavissa: [http://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap\\_3.html](http://www.electronicstutorials.ws/capacitor/cap_3.html)
- EnOcean. Ei päiväystä. How EnOcean makes the Smart Home smarter. [www-dokumentti]. EnOcean GmbH. [Viitattu 15.5.2016]. Saatavissa: <https://www.enocean.com/en/internet-of-things-applications/smart-home-and-home-automation/>
- EnOcean. Ei päiväystä. Energy Harvesting. [www-dokumentti]. EnOcean GmbH. [Viitattu 16.5.2016]. Saatavissa: <https://www.enocean.com/en/technology/energy-harvesting/>
- Etälukio. 2001. 5. Lämpökoneet. [www-dokumentti]. Opetushallitus. [Viitattu 12.5.2016]. Saatavissa: <http://www02.oph.fi/etalukio/opiskelumodulit/fysiikka/fysiikka4/>
- Farmer, J. 2007. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues. [www-dokumentti]. Virginia Polytechnic Institute. [Viitattu 15.5.2016]. Saatavissa: <http://vtechworks.lib.vt.edu/handle/10919/33072?show=full>
- Green Car Congress. 2015. Alphabet Energy introduces PowerModules for modular thermoelectric waste heat recovery; partnership with Borla for heavy-duty trucks. [www-dokumentti]. Green Car Congress. [Viitattu 10.11.2015]. Saatavissa: <http://www.greencarcongress.com/2015/06/20150624-alphabet.html>
- greenTEG. Ei päiväystä. Autonomous Heating Valve. [www-dokumentti]. greenTEG AG. [Viitattu 29.5.2016]. Saatavissa: <http://www.greenteg.com/thermoelectric-generator/autonomous-heating-valve/>

- Harsia, P. 2005. Lämmön siirtyminen. [www-dokumentti]. AMK-verkosto. [Viitattu 12.5.2016]. Saatavissa: <http://www2.amk.fi/digma.fi/www.amk.fi/opintojaksot/0505015/1119948180490/1119952720312/1119956668414/1119956734686.html>
- Hatakka, J., Saari, H., Sirviö, J., Viiri, J. & Yrjänäinen, S. 2011. Physica 2, Lämpö. 4. painos. WSOY.
- Institute for Basic Science. 2015. New breakthrough in thermoelectric materials. [www-dokumentti]. Science X network. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://phys.org/news/2015-04-breakthrough-thermoelectric-materials.html>
- Jacobs, S. 2014. Thermoelectric Material to Hit Market Later This Year. [www-dokumentti]. MIT Technology Review. [Viitattu 1.10.2015]. Saatavissa: <http://www.technologyreview.com/news/528841/thermoelectric-material-to-hit-market-later-this-year/>
- Jacoby, M. 2015. Thermoelectrics Rise Again. [www-dokumentti]. American Chemical Society. [Viitattu 1.10.2015]. Saatavissa: <http://cen.acs.org/articles/93/i19/Thermoelectrics-Rise-Again.html?h=-1666598150>
- Korpela, A. 2012. SMG-4050 Energian varastointi ja uudet energialähteet. [www-dokumentti]. Tampereen teknillinen yliopisto. [Viitattu 23.5.2016]. Saatavissa: [https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4050/seminarit10/ryhma4\\_desertec.pdf](https://www.tut.fi/smg/tp/kurssit/SMG-4050/seminarit10/ryhma4_desertec.pdf)
- Lachish, U. 2014. Thermoelectric Effect Peltier Seebeck and Thomson. [www-dokumentti]. Guma science. [Viitattu 16.4.2015]. Saatavissa: <http://urila.tripod.com/Thermoelectric.pdf>
- LaMonica, M. 2014. A Thermoelectric Generator That Runs on Exhaust Fumes. [www-dokumentti]. IEEE Spectrum. [Viitattu 1.10.2015]. Saatavissa: <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/conservation/a-thermoelectric-generator-that-runs-on-exhaust-fumes>
- LeBlanc, S., Yee, S., Scullin, M., Dames, C. & Goodson, K. 2013. Material and manufacturing cost considerations for thermoelectrics. [www-dokumentti]. Elsevier. [Viitattu 3.2.2014]. Saatavissa: [http://www.leblanclab.com/uploads/2/6/4/3/26439896/material\\_and\\_manufacturing\\_cost\\_considerations\\_for\\_thermoelectrics\\_leblancyee.pdf](http://www.leblanclab.com/uploads/2/6/4/3/26439896/material_and_manufacturing_cost_considerations_for_thermoelectrics_leblancyee.pdf)
- Li, J., Liu, W., Zhao, L. & Zhou, M. 2010. High-performance nanostructured thermoelectric materials. [www-dokumentti]. Tokyo Institute of Technology. [Viitattu 13.5.2015]. Saatavissa: <http://www.nature.com/am/journal/v2/n4/full/am2010112a.html>

Linear Technology. Ei päiväystä. LTC3107 - Ultra-Low Voltage Energy Harvester and Primary Battery Life Extender. [www-dokumentti]. Linear Technology. [Viitattu 9.11.2015]. Saatavissa: <http://www.linear.com/product/LTC3107>

Liu, C., Chen, P. & Li, K. 2014. A 1 KW Thermoelectric Generator for Low-temperature Geothermal Resources. [www-dokumentti]. China University of Geosciences, Beijing. [Viitattu 20.4.2016]. Saatavissa: <https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2014/Li.pdf>

Meisner, G. 2011. Advanced Thermoelectric Materials and Generator Technology for Automotive Waste Heat at GM. [www-dokumentti]. General Motors. [Viitattu 19.4.2016]. Saatavissa: [https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics\\_app\\_2011/monday/meisner.pdf](https://www1.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/pdfs/thermoelectrics_app_2011/monday/meisner.pdf)

Mitchell, C. 2014. Battery Charger for 12v SLA. [www-dokumentti]. Talking Electronics. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://www.talkingelectronics.com/projects/BatteryCharger-12vSLA/BatteryCharger-12vSLA.html>

Northwestern University. Ei päiväystä. The Science of Thermoelectric Materials. Northwestern University. [Viitattu 27.5.2016]. Saatavissa: <http://thermoelectrics.matsci.northwestern.edu/thermoelectrics/index.html>

Omega. Ei päiväystä. Thermocouples. [www-dokumentti]. OMEGA Engineering inc. [Viitattu 2.6.2016] Saatavissa: <http://www.omega.com/prodinfo/thermocouples.html>

Panasonic. Ei päiväystä. Aluminum Electrolytic Capacitors. [www-dokumentti]. Panasonic Corporation. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://industrial.panasonic.com/ww/products/capacitors/aluminum-capacitors>

Panasonic. Ei päiväystä. Rechargeable Batteries: Lithium Ion Batteries (Li-Ion) [www-dokumentti]. Panasonic Corporation. [Viitattu 14.5.2016]. Saatavissa: <https://na.industrial.panasonic.com/products/batteries/rechargeable-batteries/lithium-ion>

Panasonic. Ei päiväystä. Nickel Metal Hydride Batteries. Ei päiväystä. [www-dokumentti]. Panasonic Corporation. [Viitattu 15.5.2016]. Saatavissa: <http://industrial.panasonic.com/ww/products/batteries/secondary-batteries/nickel-metal>

Panasonic. 2014. Batteries Catalog for OEM customers. [www-dokumentti]. Panasonic Corporation [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://industrial.panasonic.com/cdbs/www-data/pdf/ACG4000/ACG4000PE16.pdf>

- Sainio, J. Ei päiväystä. LÄMPÖVOIMAKONE. [www-dokumentti]. Aalto Yliopisto. [Viitattu 12.5.2016]. Saatavissa: <http://viesti.physics.aalto.fi/pub/kurssit/Tfy-3.15xx/materiaali/11.pdf>
- Sebald, G., Guyomar, D. & Agbossou, A. 2009. On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting. [www-dokumentti]. IOP Publishing Ltd. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <https://www.ikhebeenvraag.be/mediastorage/FSDocument/135/Pyroelectric+energy+harvesting.pdf>
- Smith, K. & Thornton, M. 2009. Feasibility of Thermoelectrics for Waste Heat Recovery in Conventional Vehicles. [www-dokumentti]. National Renewable Energy Laboratory. [Viitattu 16.3.2015]. Saatavissa: <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/44247.pdf>
- TechHive. 2016. These Zigbee home automation devices need no batteries or wires. [www-dokumentti]. TechHive. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://www.techhive.com/article/3020254/these-zigbee-home-automation-devices-need-no-batteries-or-wires.html>
- Texas Instruments. Ei päiväystä. [www-dokumentti]. Texas Instruments. [Viitattu 8.2.2016]. Saatavissa: <http://www.ti.com/product/BQ25570>
- Vullers, R., van Schaijk, R., Doms, I., Van Hoof, C. & Mertens, R. 2009. Micropower energy harvesting. [www-dokumentti]. Elsevier. [Viitattu 9.4.2015]. Saatavissa: <http://web.eecs.umich.edu/~prabal/teaching/eecs598-w10/readings/VSD+09.pdf>
- Mathas, C. 2012. Sensing Motion with Passive Infrared (PIR) Sensors. [www-dokumentti]. Electronic Products. [Viitattu 15.5.2016]. Saatavissa: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2012/jun/sensing-motion-with-passive-infrared-pir-sensors>
- Williams, J. 2006. Lead Free Solder Reflow for Semiconductor Power Devices. [www-dokumentti]. IXYS. [Viitattu 13.5.2016]. Saatavissa: <http://www.ixys.com/Documents/DesignResource/LEADFREE.pdf>

# LIITTEET

