

Metropolia Ammattikorkeakoulu
Elektroniikan koulutusohjelma

Sampo Uravirta

**Energianlouhintateknologioiden kartoitus ja rajapinta
energianlouhintamoduuleille**

Insinööritö 27.6.2010

Ohjaaja: tutkimusjohtaja Sami Hakulinen
Ohjaava opettaja: lehtori Janne Mäntykoski

Kiitossanat

Kiitän kaikkia niitä, jotka ovat tukeneet minua tehdessäni tätä lopputyötä. Erityiskiitokset Pentti Pohjalaiselle, joka on jaksanut kuunnella ja auttaa minua kaikissa tähän lopputyöhön liittyvissä ongelmissa. Haluan kiittää myös Sami Hakulista, Kaj Schluppia sekä koko Metson Neles Smart Products R&D -tiimiä. Kiitos myös Linear Technologysille ja SCTB Nordille tuestanne tätä tutkimusta kohtaan.

Helsingissä kesällä 2010

Sampo Uravirta

Tekijä Otsikko	Sampo Uravirta Energialouhintateknologioiden kartoitus ja rajapinta energianlouhintamoduuleille
Sivumäärä Aika	55 sivua 27.6.2010
Koulutusohjelma	elektroniikka
Tutkinto	insinööri (AMK)
Ohjaaja Ohjaava opettaja	tutkimusjohtaja Sami Hakulinen lehtori Janne Mäntykoski
<p>Insinööriyössä tutkitaan erilaisia energianlouhintateknologioita ja pyritään kartoittamaan rajapinta energianlouhintamoduulin sekä siitä käyttöenergiansa ottavan sovelluksen välillä. Suurin tutkimus liittyi termosähköiseen generaattoriin ja sen rajapintaan. Lisäksi työssä perehdytään termodynamiikan käsitteisiin sekä termosähkögeneraattorin sovittamiseen lämmönsiirrinten ja jäähdyttimien kanssa.</p> <p>Työssä käydään läpi perusteellisesti termosähköisten ja pietsosähköisten energianlouhinten teoriaa. Työn tarkoitus on antaa perusteet energianlouhintajärjestelmän suunnittelemiseksi sekä perustiedot erilaisista energianlouhintaan liittyvistä teknologioista.</p> <p>Energianlouhinnan avulla pystytään pidentämään langattomien laitteiden ja anturiverkkojen energialähteenä toimivien akkujen elinikää lataamalla niitä uudelleen. Joissain tapauksissa pystytään myös korvaamaan akut kokonaan.</p> <p>Termosähkögeneraattoria testattiin eri lämpötila-alueilla ja havaittiin sen käyttömahdollisuudet langattoman laitteen energialähteenä. Mittaustuloksista ja niiden pohjalta rakennetusta kuvaajasta voidaan havaita, että termosähkögeneraattorit pystyvät tuottamaan varsin suuria tehomääriä pienissäkin lämpötilaeroissa.</p> <p>Termosähkögeneraattori on yksi parhaista vaihtoehdoista teollisuuden tarpeisiin. Sillä voidaan korvata tavallisesti langattomien laitteiden energialähteinä käytetyt akut. Yleensä teollisuusprosessit ovat käynnissä ympäri vuorokauden. Tällöin syntyy suuriakin alueita, joissa on paljon hukkalämpöä. Nämä alueet synnyttävät myös paljon lämpötilaeroja.</p> <p>Lisätutkimuksen tulisi suuntautua termosähkögeneraattorin ulostulojännitteen kasvattamiseen ja teollisuusympäristössä toimivan passiivisen jäähdytysratkaisun suunnittelemiseen. Lisäksi vertaillaessa eri energianvarastointiteknologioita keskenään havaittiin, että parhaiten energianlouhintasovelluksia palvelevat ohutkalvoakut. Niiden uudelleenlatauskertojen määrä on moninkertainen tavallisiin litium-ioniakkuihin verrattaessa.</p>	
Hakusanat	energianlouhinta, energianlouhin, termosähkögeneraattori, pietsosähkögeneraattori, lämpötilaero, ohutkalvoakku

Author Title	Sampo Uravirta Comparing energy harvesting technologies and examining the interface for energy harvesting modules
Number of Pages Date	55 pages 27 June 2010
Degree Programme	Electronics Engineering
Degree	Bachelor of Engineering
Instructor Supervisor	Research manager Sami Hakulinen Lecturer Janne Mäntykoski
<p>The overall objective of this final year project was to compare different energy harvesting technologies, and to create a basic understanding of the interface between the energy harvester and the system using it. Although this project compares many energy harvesting solutions, the main interest is in thermoelectric energy harvesting. This project provides a good understanding of the thermodynamics associated with thermoelectric energy harvesting and examines how to match the hot and cold side heat exchangers with the thermoelectric generator.</p> <p>This final year project aims to give the tools needed for designing a basic energy harvesting system.</p> <p>The thermoelectric generator or TEG was tested in many temperature regimens. A chart was constructed based on the measurement data received from the thermoelectric generator temperature tests. The TEG's potential of power generation is fairly high even in small temperature differences.</p> <p>Furthermore, the TEG can be used to lengthen the life of the conventional batteries used as power supply for many wireless devices. If a large enough temperature gradient is available around the clock, TEG could replace the entire battery, eliminating maintenance issues such as battery replacement.</p> <p>Further research should aim at increasing the voltage output of the thermoelectric generator and at designing the cold-side heat sink that could operate in many industrial environments. Comparing the energy storage devices, it was clearly seen that the most useful energy storage solution for energy harvesting is the thin-film battery. Thin-film batteries offer multiple recharge cycles compared to conventional lithium-ion batteries.</p>	
Keywords	energy harvesting, energy harvester, thermo electric generator (TEG), piezoelectric generator, temperature difference, thin-film battery

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sanasto

Terminologia

Lyhenteet

1	Johdanto	9
2	Energianloughinnan historia	10
2.1	Pietsosähköteorian historia.....	10
2.2	Termosähköteorian historia.....	10
3	Energialouhintatavat ja energiavarastot	11
3.1	Pietsosähköisessä energianloughinnassa käytettävät piirit	11
3.2	Termosähköinen ilmiö	13
3.2.1	Hyvyysluku	14
3.2.2	Termosähköisessä energianloughinnassa käytettävät piirit	14
3.3	Muut energianloughintamenetelmät	14
3.3.1	Elektromagneettinen energianloughinta.....	14
3.3.2	Fotosähköinen energianloughinta	15
3.4	Nykyiset energianvarastointiteknologiat.....	15
3.4.1	Akkuteorian perusteet	15
3.4.2	Ladattava nikkelimetallihydridiakku	16
3.4.3	Ladattava litium-ioniakku	16
3.4.4	Ohutkalvoakut.....	17
3.4.5	Energiavarastoksi soveltuva kondensaattoriteknologia	18
3.4.6	Energiavarastojen vertailu.....	20
4	Termosähkögeneraattorit	23
4.1	Termosähkögeneraattorin toiminta	23
4.2	Termosähköinen hyötysuhde	24

4.3	Lämpöresistanssin sovittaminen	26
4.4	Testatut termosähkögeneraattorit	28
4.5	Termosähkögeneraattorien mittaukset	30
5	Pietsosähkögeneraattori	35
6	ND9000-venttiilinohjain	39
6.1	HART-tiedonsiirto	39
6.1.1	WirelessHART-tiedonsiirto	39
7	Energianlouhintajärjestelmä	41
7.1	ND9000-venttiilinohjaimen+WirelessHART energiankulutus.....	41
7.2	LTC3105-DC/DC-muunnin	43
8	Energianlouhinnan mahdollisuuksien vertailu	45
8.1	Missä louhittavaa energiaa?	45
8.1.1	Termodynamiikan peruslait	45
8.1.2	Entropia	45
8.1.3	Eksergia.....	46
8.2	Energianlouhintakohteet	47
8.3	Energianlouhinnan vertailu	48
8.4	Energianlouhinnan tulevaisuus	49
9	Yhteenveto ja päätelmät	50
9.1	Yhteenveto	50
9.2	Päätelmät	51
10	Lähteet	53

Sanasto

energy harvesting	= energianlouhinta
thermoelectric generator (TEG)	= termosähkögeneraattori
piezoelectric generator	= pietsosähkögeneraattori
equivalent series resistance	= kokonaissisäresistanssi
thin film battery	= ohutkalvoakku
electrochemical double layer capacitor	= sähkökemiallinen kaskikerros-kondensaattori
bismuth telluride	= vismuttitteluridi
heat pipe	= lämpöjohdin

Terminologia

A	= pinta-ala
B	= magneettivuon tiheys
D	= kappaleiden välinen etäisyys
T	= lämpötila
ΔT	= lämpötilaero
S	= Seebeckin kerroin
U	= jännite
I	= virta
P	= teho
E	= energia
C	= kapasitanssi
ZT	= termosähköisen laitteen hyvyysluku
σ	= sähkönjohtavuus
κ	= lämmönjohtavuus
μ_0	= tyhjiön permeabiliteetti
μ_r	= eristeen suhteellinen permeabiliteetti
Q	= sähkövaraus, lämpö

Lyhenteet

TEG	= thermoelectric generator
NiMH	= nickel-metal hydride cell
LSD-NiHM	= low self-discharge nickel-metal hydride cell
Bi_2Te_3	= bismuth telluride
VC	= valve controller
HART	= highway addressable remote transducer protocol

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutkitaan pietsosähköisen ja termosähköisen generaattorin (TEG) käyttömahdollisuutta energialähteenä ND9000-venttiilinohjaimelle. Lisäksi työssä käydään läpi lyhyesti muitakin energianlouhinnan mahdollisuuksia, työssä tutkitaan myös energianlouhintaan soveltuvia energianvarastoinnin teknologioita. Insinööriyön tilaaja on Metso Automation Oy:n Helsingin toimipiste, ja työ tehdään Flow Control-osaston, Neles Smart Products R&D -tiimissä. ”Metso on kestävien teknologioiden ja palveluiden kansainvälinen toimittaja kaivos-, maarakennus-, energia-, metallinkierrätys- sekä massa- ja paperiteollisuudelle.” [2]. ”Flow Control (FC) -liiketoimintalinja kehittää ja toimittaa säätö-, sulku- ja hätäsulkuventtiileitä sekä kenttälaitteiden hallintaratkaisuja useille prosessiteollisuuden aloille.” [3].

Energianlouhinta ei ideana ole mitenkään uusi, vaan sitä on tutkittu jo viime vuosisadan alusta lähtien, kuten Justin R. Farmer viittaa teoksessaan ”History of Power Harvesting” [1, s. 1-4]. Kuitenkin suurimmat harppaukset energianlouhinnan kehityksessä ovat tapahtuneet vasta viime vuosikymmenen aikana.

Työssä on tarkoitus tutkia energianlouhimia ja niiden käyttömahdollisuuksia sekä suunnitella rajapinta, jolla niitä voidaan testata energialähteenä Metson ND9000-venttiilinohjaimelle. Työssä käytetään kaupallisesti saatavilla olevia komponentteja ja energianlouhintamoduuleja.

Tutkimuksessa on monia suuria haasteita ja ongelmia. Suurimpana ongelmana voidaan pitää termosähkögeneraattorista saatavan tehon suhdetta lämpötilaeroon. Termosähkögeneraattorin tulisi pystyä tuottamaan ND9000-venttiilinohjaimen toimintaan tarvittava käyttöteho mahdollisimman pienellä lämpötilaerolla.

Energianlouhimet eivät ole pystyneet aiemmin tuottamaan suuria määriä tehoa. Tämä on suurin syy, miksi ne eivät ole vielä yleistyneet ja niiden tutkimukseen on satsattu merkittävästi vasta viime vuosina. Yksi tämän tutkimuksen tavoitteista on löytää mahdollisimman tehokas energianlouhintamenetelmä.

2 Energianlouhinnan historia

2.1 Pietsosähköteorian historia

Vuonna 1880 Pierre ja Jacques Curie todistivat kokeellisesti, että jotkin kristallityypit, kuten rochellen-suola ja kvartsi, vapauttavat pintavarauksen, kun ne altistetaan mekaaniselle rasitukselle. Tätä ilmiötä alettiin myöhemmin kutsua pietsosähköksi. Pietso tulee kreikkalaisesta sanasta *piezo*, joka tarkoittaa ”painaa tai puristaa”. Ensimmäinen käytännön laite, missä käytettiin pietsosähköistä kidettä, oli kaikuluotain, joka kehitettiin ensimmäisen maailmansodan aikana. Ensimmäisen maailmansodan jälkeen japanilainen Okichi kehitti tiiminsä kanssa ensimmäisenä kvartsipohjaisen painetta ja voimaa mittaavan anturin. Yksi suurimmista vaikuttajista nykyisten pietsosähköisten sovellusten syntyyn oli amerikkalainen Walter Guyton Cady, joka kehitti mm. ensimmäisen kristalloskillaattorin. Cady teki lukuisia muitakin pietsosähkösovelluksiin liittyviä patenteja ja omisti suurimman osan elämästään pietsosähkötutkimukselle. Cady julkaisi kaikki tutkimustuloksensa vuonna 1964 [1, s. 1; 4].

2.2 Termosähköteorian historia

Vuonna 1826 Thomas Johann Seebeck havaitsi ensimmäistä kertaa termosähköisen ilmiön. Hän huomasi, että kahdesta erilaisesta metallista tehdyssä suljetussa virtapiirissä kulkee virta, kun virtapiirin johtimina toimivat metallit altistetaan eri lämpötiloille. Termosähköistä ilmiötä tutkittiin paljon makroskooppisesti seuraavan kolmen vuosikymmenen ajan, ja sen käyttösovellukset lämpömittareissa, energiantuotannossa ja jäädyttimissä todennettiin. [1, s. 2].

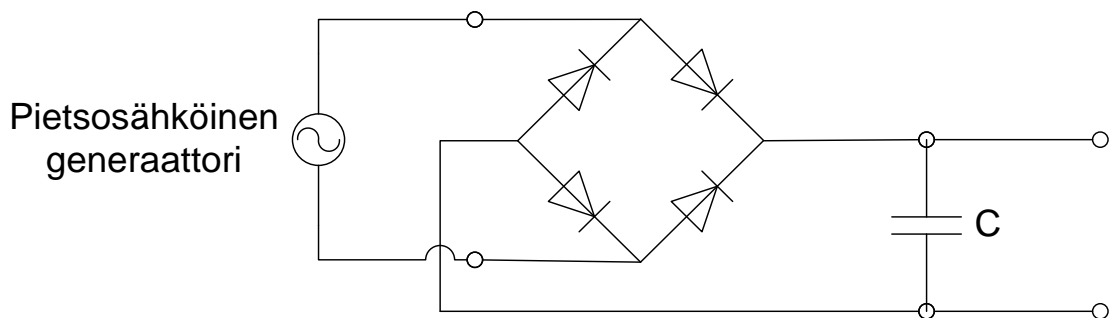
1930-luvulla ja seuraavina vuosikymmeninä termosähköisen ilmiön mikroskooppinen tutkimus johti monien uusien ja kehittyneempien termosähköisten materiaalien syntyyn. Niistä useat ovat käytössä vielä tänäkin päivänä. Kuitenkin termosähköisten materiaalien kehitys hyytyi 1960-luvun loppuun mennessä. 1970-luvun alkupuolella halu kehittää pienitehoisia ja pitkäikäisiä akkuja käynnisti kiinnostuksen kaupallisten termosähköisten energiaratkaisuiden kehitykselle. Merkittävin kaupallinen sovellus oli TEG:n käyttäminen aurinkokunnan ulkopuolelle matkaavien luotainten energialähteenä. Lämpölähteenä käytettiin radioaktiivista materiaalia [1, s. 2].

3 Energialouhintatavat ja energiavarastot

Tämä luku käsittelee energialouhintatapoja ja louhitun energian hyödyntämiseen tarvittavia komponentteja. Energialouhintaan tarvittavien piirien periaatteiden ymmärtämiseksi, tarkastellaan niitä pietsosähköisen ja termosähköisen energialouhinnan tarpeiden mukaan. Luvussa käydään läpi aktiivisia ja passiivisia energialouhintapiirejä sekä energianvarastointiteknologioita.

3.1 Pietsosähköisessä energialouhinnassa käytettävät piirit

Yksinkertaisimmillaan pietsosähköinen tai elektromagneettinen generaattori toimii kuten vaihtovirtalähde. Generaattorin ulostuloa ei kuitenkaan pystytä suoraan hyödyntämään monissakaan elektronisissa sovelluksissa. Generaattori on kytkettävä kokoaaltotasasuuntaajaan, jotta ulos tulevaa vaihtojännitettä pystytään hyödyntämään tasavirtasovelluksissa. Kokoaaltotasasuuntaaja koostuu neljästä normaalista diodista, jotka kytetään siten, että kuormaan siirtyvä jännite pysyy molemmilla siniaallon puoliskoilla positiivisena [1, s. 15]. Kyseinen piiri ja sen toiminta on esitelty kuvassa yksi.



Kuva 1. Yksinkertaistettu pietsosähkögeneraattorin kytkentäpiiri.

Jotta saadaan vakaa tasavirtajännite elektroniikalle, kondensaattori on kytkettävä tasasuuntaajan ulostuloon. Kondensaattorin tulee olla tarpeeksi pieni, jotta se latautuu täyteen jo ensimmäisessä jännitepiikissä. Virran ja jännitteen suhdetta kondensaattorissa voidaan tarkastella seuraavalla kaavalla.

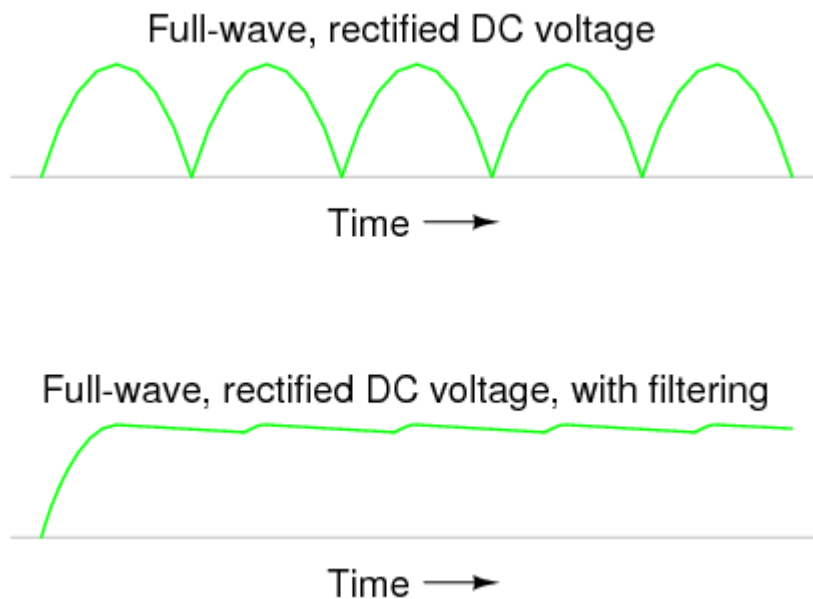
$$i(t) = C \frac{dU(t)}{dt} \quad (1)$$

Virta on kaavan mukaan suoraan verrannollinen kondensaattorin yli olevan jännitteen muutosnopeuteen sekä kondensaattorin kapasitanssiarvoon [1, s. 15].

Sisäänmenojännitteen pudotessa kondensaattoriin varastoidun jännitteen alle kondensaattori purkautuu hitaasti, kunnes seuraava jännitepiikki saapuu. Kondensaattorin koko voidaan laskea seuraavalla kaavalla, jotta saadaan saavutettua riittävän tasainen tasajännite kuormalle.

$$C = \frac{I_L T}{2U_r} \quad (2)$$

Kaavassa I_L on kuormaan menevän virran keskiarvo, T on tasasuuntaajan sisäänmenojännitteen jaksonaika ja U_r on huipusta huippuun mitattu sykkeisyysjännite [1, s. 15].



Kuva 2. Kokoaalto- ja tasasuunnattu jännite ilman kondensaattoria sekä kondensaattorin suodattamana [5].

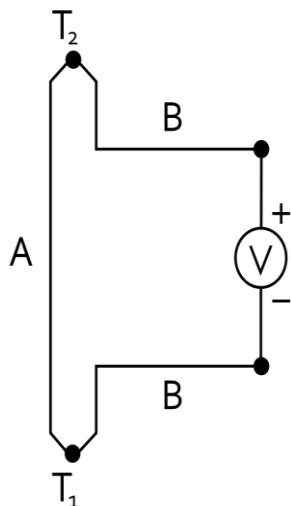
Yleensä kondensaattori mitoitetaan syöttämään dc-jännitettä kuormaan. Pietsosähköinen generaattori kuitenkin tuottaa hyvin pieniä määriä virtaa, joten ennen käyttöä on latausta kasvatettava kondensaattorissa tai uudelleenladattavassa akussa. Jos ensimmäinen kaava muotoillaan uudelleen ja oletetaan samalla, että I on tasaista DC:tä sekä kondensaattorin lähtöjännite on nolla voltia aika ΔT , joka kuluu kondensaattorin lataamiseen täyteen jännitteeseen U_F , on [1, s. 16].

$$\Delta T = \frac{CU_F}{I} \quad (3)$$

3.2 Termosähköinen ilmiö

Termosähköinen ilmiö on lämpötilaeron suora muunnos jännitteeksi ja päinvastoin. Termosähköinen laite synnyttää jännitteen, kun sen molemmilla puolilla on eri lämpötila (Seebeck-ilmiö). Kääntäen taas kun termosähköisen laitteen puolten väliin kytketään jännite, syntyy laitteen pintojen välille lämpötilaero (Peltier-ilmiö). Termosähköisen generaattorin toiminta perustuu termopareihin, joiden toiminta taas perustuu Seebeckin ilmiöön. Jännitteen kehitys saadaan kaavasta:

$$U = \int_{T_1}^{T_2} (S_B(T) - S_A(T)) dT \quad (4)$$



Kuva 3. Termopari [6].

Kaavassa S_A ja S_B ovat metallien A ja B Seebeckin kertoimia. T_1 ja T_2 ovat metalliliitosten lämpötilat. Materiaalin S eli Seebeckin kerroin (saatetaan käyttää myös symbolia α) riippuu materiaalin lämpötilasta ja kiderakenteesta. Lämpötilaeron ΔT ollessa vähäinen materiaalin päiden välillä Seebeckin kerroin materiaalille on:

$$S = \frac{\Delta U}{\Delta T} \quad (5)$$

Seebeckin kertoimen yksikkönä käytetään (V/K) [6].

3.2.1 Hyvyysluku

Hyvyysluku termosähköiselle laitteelle on

$$Z = \frac{\sigma S^2}{\kappa}, \quad (6)$$

jossa σ on sähkönjohtavuus, κ on lämmönjohtavuus ja S on Seebeckin kerroin. Z ilmaistaan yleensä dimensiottomana hyvyyslukuna ZT , joka saadaan kertomalla Z keskilämpötilalla $\frac{T_2+T_1}{2}$. Mitä suuremmaksi hyvyysluku ZT kasvaa, sitä suurempi on laitteen termodynaaminen hyötysuhde. ZT on siis erittäin hyvä keino vertailla eri termosähköisten laitteiden tehokkuutta. Termosähköisen laitteen hyvyysluku voidaan antaa myös muodossa $Z_e T$, jossa on otettu ZT :n lisäksi huomioon kaikki laitteen sisäiset passiiviset häviöt [6; 7, s. 341-343].

3.2.2 Termosähköisessä energianlouhinnassa käytettävät piirit

Termosähkögeneraattorin tuottama jännite on tasavirtaa, joka on luokkaa $50 \text{ mV} - 1 \text{ V}$. Elektroniset laitteet vaativat yleensä toimiakseen vähintään 3 V jännitteen, joten termosähkögeneraattorin tuottamaa jännitettä on nostettava vähintään 3 V tasolle. Jännitteen nosto tehdään DC/DC-muuntimella. DC/DC-muuntimen hyötysuhde ei koskaan ole 100% , minkä takia osa tuotetusta energiasta hävitään aina muunnoksessa.

3.3 Muut energianlouhintamenetelmät

3.3.1 Elektromagneettinen energianlouhinta

Elektromagnetismia on käytetty tuottamaan sähköä jo 1800-luvun lopulta lähtien. Suurin osa nykyisin käytetyistä elektromagneettisista generaattoreista tuottaa sähköä pyörivän liikkeen ja elektromagneettisen induktion avulla. Elektromagneettista generaattoria käytetään yleensä suurten tehomäärien tuottamiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös energianlouhintaan. Energianlouhinnassa käytetty elektromagneettinen generaattori pystyy tuottamaan tehoa muutamasta mikrowatista muutamaan milliwattiin käyttäen pyöri-

vää tai lineaarista liikettä. Elektromagneettinen kuten pietsosähköinenkin generaattori muuntaa kineettistä energiaa sähköksi [7, s. 129-130].

3.3.2 Fotosähköinen energianlouhinta

Aurinkokennot ovat tehokkain tunnettu tapa muuttaa auringosta tulevaa säteilyä sähköksi. Aurinkokennot tuottavat auringonvalosta tasavirtaa, jota voidaan hyödyntää laitteiden käyttämiseen tai akun lataamiseen. Aurinkokennot pystyvät tuottamaan suuriakin määriä energiaa, riippuen kennon koosta. Ulkona auringon valon energiatiheys on noin $15000 \mu W/cm^2$, mutta sisälle tultaessa aurinkoenergia ei ole enää varteen otettava vaihtoehto, koska energiatiheys tippuu niinkin alas kuin $10 - 20 \mu W/cm^2$ [7, s. 4; 15].

3.4 Nykyiset energianvarastointitekniikat

Akut ovat yksi vaihtoehto latauksen keräämiseen ja energianlouhimesta tulevan energian varastointiin. Koska monet energianlouhimet sieppaavat vain pieniä määriä ympäristön energiaa, riittää energiavarastoksi yleensä hyvin pieni akku. Tyypillisiä akuilla toimivia sovelluksia ovat langattomat anturit ja itsenäiset toimilaitteet.

3.4.1 Akkuteorian perusteet

Akku koostuu kahdesta tai useammasta sähkökemiallisesta kennosta, joita käytetään muuntamaan varastoitua kemiallista energiaa sähköenergiaksi. Akun varaukseton kapasiteetti ilmoitetaan yleensä milliampeeritunteina (mAh). Yksi mAh on 3,6 coulombia (C) ja yksi coulombi puolestaan on:

$$1C = 1A \cdot 1s \quad (7)$$

$$1C = 1F \cdot 1V \quad (8)$$

Kaavassa F kuvastaa kondensaattorin kapasitanssia.

Vaikka akkuteknologiat ovat jääneet muusta elektroniikkakehityksestä jälkeen, uusi valmistusteknologia on mahdollistanut entistä luotettavampien ja pienempien akkujen valmistamisen. Nykypäivänä lähes kaikki kannettavat elektroniset laitteet toimivat ladattavilla akuilla, jotka on valmistettu nikkelimetallihydridi tai litium-ioni/polymeeri-materiaaleista. Tavallisesti akkujen energiatehokkuuteen ei juuri kiinnitetä huomiota, koska pistorasia on yleensä aina saatavilla. Kuitenkin energianlouhinnan sovelluksissa, joissa laite sijoitetaan kohteeseen, sen tulee toimia määräämättömän ajan. Tällöin energiatehokkuudesta tulee kriittinen osa toimintaa [1, s.17].

3.4.2 Ladattava nikkelimetallihydridiakku

Nikkelimetallihydridiakut (NiMH) käyttävät negatiivisena elektrodina vetyä, joka on absorboituneena metalliseokseen. Tyypillisin lataustapa NiMH-akuille on vakiovirtalataus, mutta akku ylikuumenee, ellei virtaa rajoiteta. Vaikka nikkelimetallihydridiakut ovat varsin yleisiä, niiden käyttö energianlouhinnassa pienien energiamäärien varastointiin on kyseenalaista erittäin suuren itsepurkautumisnopeuden takia. Normaalit NiMH-akut purkautuvat itsestään noin 10–15 % ensimmäisen 24 h aikana. Sen jälkeen purkautuminen jatkuu noin 10–15 % per kuukausi [1, s.18].

Vuonna 2005 Sanoy esitteli alhaisen itsepurkautumisnopeuden NiMH-akkuja, jotka nimettiin LSD-NiMH:si (low self-discharge nickel-metal hydride cell). Sanoy lupaa, että uudet LSD-NiMH-akut pystyvät säilyttämään 75 % varauksestaan kolmen vuoden säilytyksen jälkeen 20 °C lämpötilassa, kun normaalit NiMH-akut purkautuvat yli 50 % jo ensimmäisen vuoden jälkeen [9].

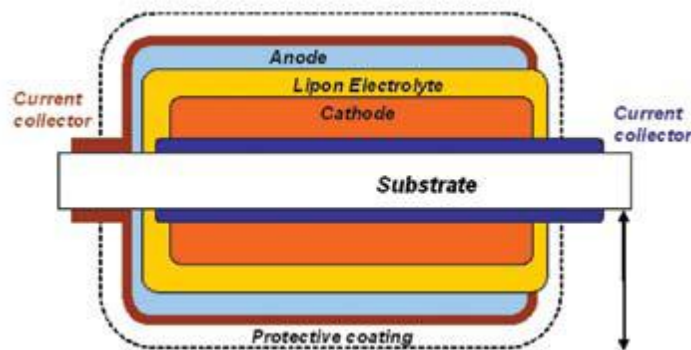
3.4.3 Ladattava litium-ioniakku

Nikkelimetallihydridiakut ovat nopeasti korvautumassa litium-ioniakuilla, koska niissä on vielä suurempi energiatiheys ja alhaisempi itsepurkautumisnopeus. Litium-ionit liikkuvat akkua ladattaessa positiiviselta elektrodilta negatiiviselle elektrodille ja purettaessa päinvastoin. Nimellinen tyhjäkäyntijännite kaupallisesti saatavilla oleville litium-ioniakuille on 3,7 V. Litium-ioniakkujen huono puoli on niiden kapasiteetin pieneminen jokaisella uudelleenlatauskerralla. Vaikka litium-ioniakuille usein luvataan 500–

1000 uudelleenlatauskertaa teoreettiseksi iäksi, on akun todellinen ikä yleensä paljon teoreettista ikää pienempi. Lisäksi litium-ioniakun alhainen sulamispiste 180 °C ja räjähdysvara yliladattaessa/ylikuumentuessa tekevät siitä kyseenalaisen vaihtoehdon energianlouhintaa ajatellen [1, s. 18-19].

3.4.4 Ohutkalvoakut

Ohutkalvoakut valmistetaan kerros kerrokselta höyrypäälystämällä. Syntynyt akku koostuu useista rinnakkaislevyistä. Kuvassa 4 on ohutkalvoakku, missä kalvot on sijoitettu identtisesti tukialustan molemmiin puolin. Teoriassa ohutkalvoakku voisi peittää neliömetrinkin kokoisen pinnan, mutta käytännössä valmistettavat akut ovat kokoluokkaa 1 mm² – 25 cm². Kapasiteetit vaihtelevat välillä 1 – 10 mAh. Ohutkalvoakun aktiivisena katodi ja anodi rakenteena voidaan käyttää useita eri materiaaleja. Kun materiaalit sovitetaan kerroksittain rakenteeseen, pystyvät ne varastoimaan tai vapauttamaan litiumatomeja, kun ohutkalvoakkuja ladataan tai puretaan. Valittu elektrodimateriaali määrittää kennon jännitteen ja jossain määrin myös kapasiteetin, energian ja tehon.



Kuva 4. Kaksipuolisen ohutkalvoakun rakenne [16, s. 44].

Ohutkalvoakut valmistetaan käyttäen vain kiinteitä aineita ja epäorgaanisia elektrolyyttejä, kuten lasia. Tästä johtuen ohutkalvoakut ovat luontaisesti turvallisia, eikä niihin liity tavallisten akkujen riskejä kuten liuosten läpätunkeutumista, kiehumista tai kaasuuntumista. Ohutkalvoakun elinikä on myös moninkertainen verrattaessa tavallisiin akkuihin. Ohutkalvoakut kestävät yli 10 000 lataussykliä ja pystyvät silti säilyttämään yli 90 % alkuperäisestä kapasiteetistaan. Ohutkalvoakun itsepurkautumisnopeus on

myös erittäin pieni, sillä ne pystyvät säilyttämään varauksen yli 20 vuotta [16, s. 44-47; 19].

3.4.5 Energiavarastoksi soveltuva kondensaattoriteknologia

Tavallinen kondensaattori koostuu kolmesta oleellisesta osasta: kahdesta metallilevystä, jotka toimivat elektrodeina, ja niitä erottavasta eristeestä. Eriste voi olla kiinteässä, nestemäisessä tai kaasumaisessa muodossa. Kondensaattorin kapasitanssi lasketaan seuraavan kaavana mukaan.

$$C = \mu_0 \mu_r \frac{A}{D} \quad (9)$$

Kaavassa μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, μ_r on eristeen suhteellinen permeabiliteetti, A on kummankin elektrodin pinta-ala ja D on elektrodien välinen etäisyys. Kondensaattori varastoi energiaa ja sen yhtälöt ovat:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (10)$$

$$E = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (11)$$

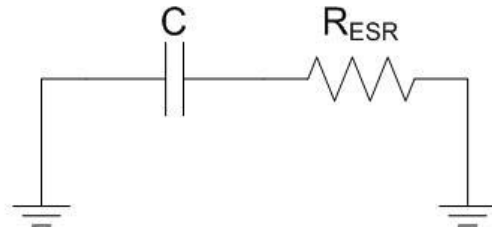
Kaavoissa C on kondensaattorin kapasitanssi, U on kondensaattorin yli oleva jännite, Q on sähkövaraus ja E kuvaa kondensaattoriin varastoitunutta energiaa.

Superkondensaattorit, joista käytetään myös nimeä ultrakondensaattorit tai sähkökemialliset kaksikerros-kondensaattorit, eroavat perinteisistä elektrostaatti- ja elektrolyytti-kondensaattoreista, koska ne sisältävät erilaisen elektrolyytin.

Superkondensaattoreiden elektrolyytti mahdollistaa elektrostaattisen varauksen varastoitumisen myös ionien muodossa. Superkondensaattoreiden suuri kapasitanssiarvo saavutetaan suurentamalla elektrodien pinta-alaa ja ohentamalla niiden välistä eristettä.

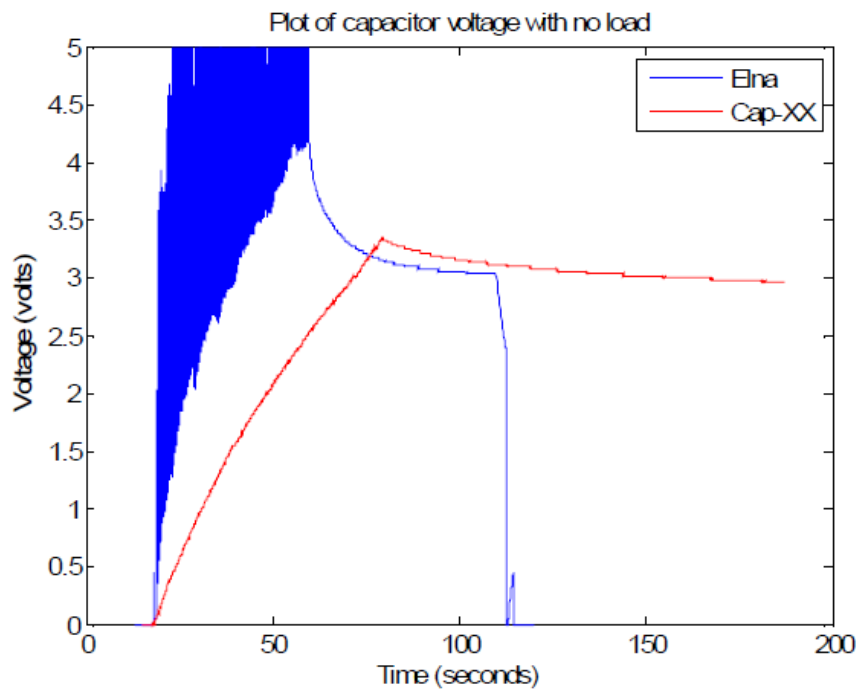
Todellisen kondensaattorin malli esitetään yleensä sarjassa kokonaissisäresistanssin ESR (equivalent series resistance) kanssa. ESR:ää käytetään kuvaamaan kondensaattorin sisäisiä häviöitä. Sovelluksesta riippuen ESR:llä voi olla suuri vaikutus jännitteen

vaihteluille kondensaattorin yli sekä varauksen purkautumisnopeuteen pitkinä toimittomuusaikoina.



Kuva 5. Todellisen kondensaattorin virtapiiri, jossa on otettu huomioon ESR.

ESR:n vaikutus voidaan osoittaa vertailemalla kahta eri ESR-arvon omaavaa kondensaattoria. Ensimmäinen on Elnan valmistama $0,22\text{ F}$ ja $5,5\text{ V}$ superkondensaattori, jonka ESR on $75\ \Omega$. Toinen kondensaattori on CAP-XX GS 211D merkkinen $0,3\text{ F}$ ja $4,5\text{ V}$ superkondensaattori, jonka ESR on $34\text{ m}\Omega$.



Kuva 6. Jännitemittaus kummastakin kondensaattorista ilman kuormaa [1, s. 22].

Edellisestä kuvasta nähdään selvästi ESR:n suuri vaikutus superkondensaattorin latautus- ja vuotojännitteeseen. CAP-XX ei kärsi latauksen yhteydessä käytännössä lainkaan jännitepiikeistä toisin kuin Elna, jonka jännitepiikit ovat jopa yli 3 V nimellisjännitettä suurempia. Yleensä myös kondensaattorit, joiden ESR on suuri, purkautuvat no-

peasti. Kuten kuvasta nähdään, CAP-XX superkondensaattorin vuotojännite on varsin vähäinen, kun taas Elnan jännite putoaa todella nopeasti. ESR vaikuttaa myös tehoon, joka kondensaattorista voidaan ottaa. Maksimitehon kaava kondensaattorille on:

$$P_{MAX} = \frac{U^2}{4 \cdot ESR} \quad (12)$$

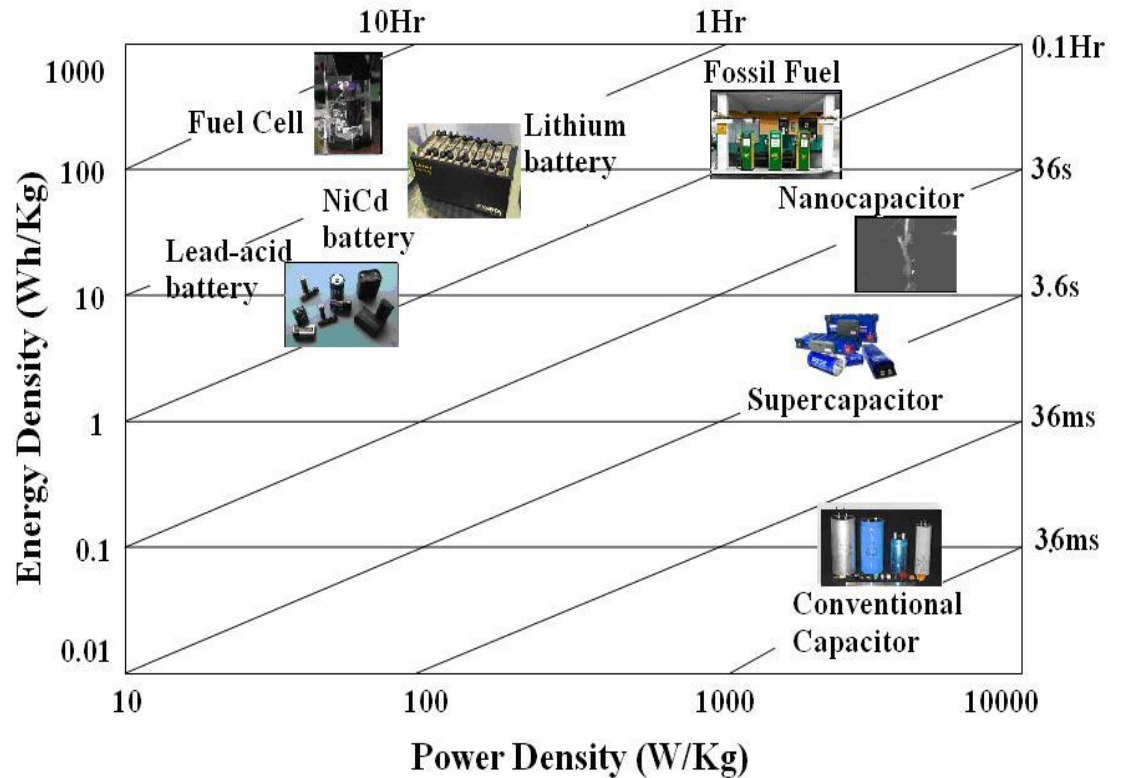
Kaava pohjautuu sovitettuun impedanssiin, jossa $R_{LOAD} = ESR$. Pitämällä ESR mahdollisimman pienenä superkondensaattorit pystyvät saavuttamaan suuriakin tehotiheyksiä. Vaikka superkondensaattoreiden kapasitanssi on paljon normaaleja kondensaattoreita suurempi, superkondensaattorit eivät vielä pysty kilpailemaan energiatheydessä akkujen kanssa [1, s. 20-23].

3.4.6 Energiavarastojen vertailu

Jotta pystytään vertailemaan monia eri energianvarastointilaitteita, on siihen käytettävä termejä energiatheys ja tehotiheys. Akuilla on suuri energiatheys mutta alhainen tehotiheys. Päinvastoin, superkondensaattoreilla on suuri tehotiheys, mutta pieni energiatheys verrattaessa akkuihin. Tämän takia superkondensaattorit eivät pysty varastoimaan yhtä suuria energiamääriä kuin akut, mutta suuren tehotiheydensä vuoksi ne pystyvät siirtämään energiaa ajan funktiona tehokkaammin kuin akut. Toinen tärkeä muuttuja energiavarastoja vertailtaessa on niiden elinikä. Energiavarastojen elinikä määritellään lataussykleinä. Lataussykli tarkoittaa sitä määrää, kuinka monta lataus-/purkusykliä ne kestävät. Kaikille elektrokemiallisille energianvarastointisovelluksille, lukien mukaan niin akut kuin kondensaattorit, itsepurkautuminen on niiden oleellinen ominaisuus. Näin ollen, jos ympäröivää energiaa on saatavilla vain pieninä aikoina päivästä, voi superkondensaattoreiden suuri itsepurkautumisnopeus olla ongelma, eivätkä ne näin välttämättä sovellu langattomiin sovelluksiin. Toisaalta, jos ympäröivää energiaa on saatavilla suurimman osan toiminta-ajasta tai sitä louhitaan monista eri kohteista, voi superkondensaattori olla parempi vaihtoehto energiavarastoksi [1, s. 23-25].

Energiavarastoja vertaillaan yleensä käyttäen ns. Ragone-karttaa, jossa vertaillaan energiavarastojen energiatheyttä (Wh/kg) niiden tehotiheyteen (W/kg). Ragone-kartan

periaate perustuu tietoon, että sähkövirran ladatessa tai purkaessa energiavarastoa täytyy sen kulkea energiavaraston sisäisen resistanssin (ESR) ja kuormaresistanssin läpi [18].



Kuva 7. Energiavarastojen vertailu Ragone-kartalla, molemmat akselit ovat logaritmisia [17].

Ragone-taulukkoa luetaan seuraavasti: X-akselilla on ilmoitettu energiavaraston tehotehiheys ja y-akselilla on puolestaan ilmoitettu energiavaraston energiatehiheys. Aika-asteikko kuvastaa tietyn energiavaraston purkautumisaikaa, kun sitä kuormitetaan tietyllä teholla. Otetaan esimerkiksi litiumakku. Yhden Kg painoisen litiumakun kapasiteetti on $100 Wh$. Kun sitä kuormitetaan $100 W$ teholla, riittää siinä virtaa yhden tunnin ajaksi.

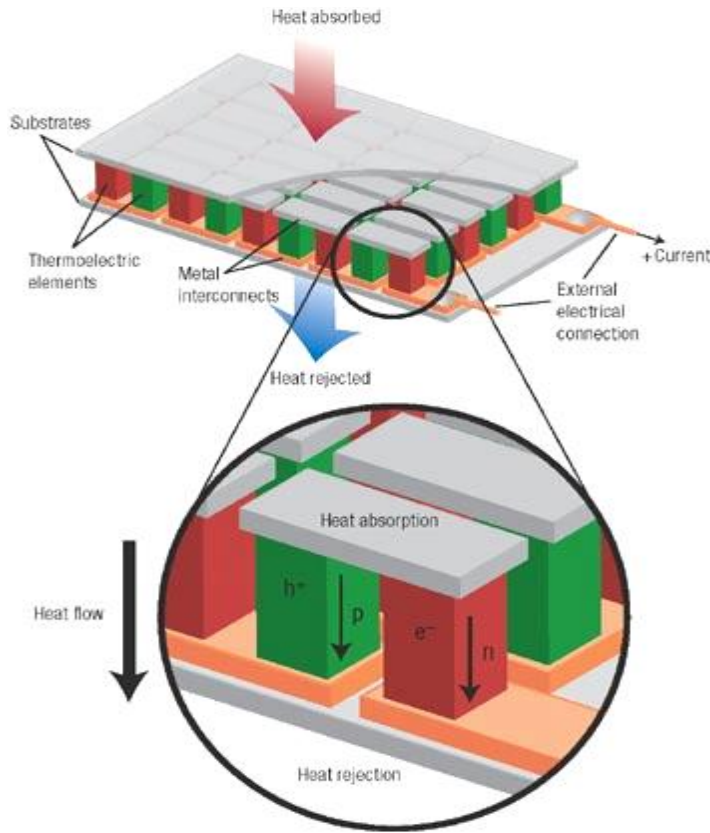
Kuvasta 7 puuttuvat ohutkalvoakut. Ohutkalvoakun energia- ja tehotehiheydet ilmoitetaan yleensä akun aktiivisen pinta-alan mukaan mWh/cm^2 ja mW/cm^2 . Tämä johtuu siitä, että akun energia- ja tehotehiheyden arvot eivät ole riippuvaisia valituista tukieristemateriaaleista tai akun koteloinnista. Jos kotelo ja eristettä ei huomioida, voidaan aktiiviselle materiaalille laskea teho/painosuhte. Ohutkalvoakun materiaalit painavat karkeasti arvioiden noin $3 - 7 mg/cm^2$. Ohutkalvoakun energiatehiheys puolestaan on

noin $2 - 3 \text{ mWh/cm}^2$, joten 1 mWh akku painaisi vain $2,5 \text{ mg}$. Näiden tietojen perusteella ohutkalvoakun energiatiheys lähentelee 400 Wh/kg . Kun akkuun lisätään eriste ja pinnoite, voidaan arvioida, että akun paino tulee kasvamaan vielä kaksiviisikertaisesti [16, s. 46].

4 Termosähkögeneraattorit

4.1 Termosähkögeneraattorin toiminta

Termosähkögeneraattori on kiinteä laite, joka ei sisällä mitään liikkuvia osia. Termosähköiset generaattorit ovat luotettavia, hiljaisia ja helposti eri käyttötarkoituksiin soveltuvia. Tämä tekee niistä ideaalisia pienten energiamäärien tuottamiseen ja energianlouhintaan. Termosähköinen generaattori sisältää suuren määrän termopareja, jotka koostuvat n-tyypin (sisältää vapaita elektroneja) ja p-tyypin (sisältää vapaita aukkoja) termosähköisistä elementeistä. Elementit on sähköisesti kytketty sarjaan ja termisesti rinnan. Parhaita termosähköisiä materiaaleja ovat vahvasti seostetut puolijohteet. Termosähkögeneraattori käyttää lämpövirtaa lämpötilaeron yli tuottaakseen tehoa. Lämpötilaero tuottaa jännitteen $U = S\Delta T$, jossa S on Seebeckin kerroin. Lämpövirta puolestaan tuottaa kuormaan kulkevan sähkövirran, määrittäen myös ulostulevan tehon. Ylimääräistä lämpöä, jota ei pystytä muuntamaan sähkövirraksi, kutsutaan poistolämmöksi. Poyistolämpö tulee johtaa pois jäähdytyslevyn kautta [7, s. 326]. Termosähkögeneraattorin rakenne on esitelty kuvassa 8.



Kuva 8. Termosähkögeneraattori [24, s. 105].

4.2 Termosähköinen hyötysuhde

Termosähköinen generaattori muuntaa lämpöä (Q) sähköksi (P) hyötysuhteella η .

$$P = \eta Q \quad (13)$$

Vaikka lämpö onkin puhdasta energiaa, työtä, jonka lämpö pystyy tuottamaan, rajoittaa Carnot-kerroin.

$$\eta_{Carnot} = \frac{\Delta T}{T_h}, \Delta T = T_h - T_c \quad (14)$$

Kaavassa ΔT on kylmänpinnan T_c ja kuumenpinnan T_h välinen lämpötilaero.

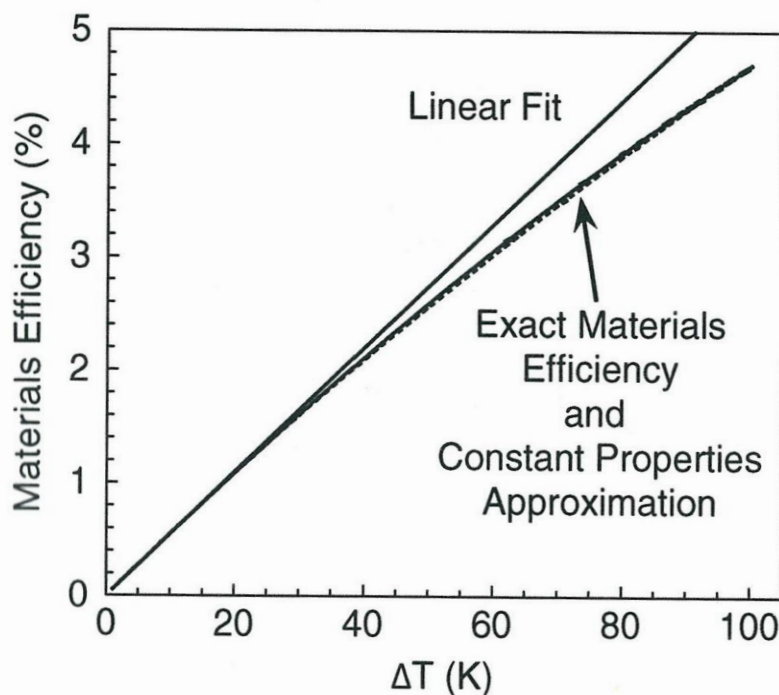
Maksimihyötysuhde termosähköisessä laitteessa riippuu todella paljon laitteen yli olevasta lämpötilaerosta ΔT . Tämä johtuu siitä, että termosähkögeneraattorissa, kuten muissakaan lämpökoneissa, ei voida saavuttaa suurempaa hyötysuhdetta kuin Carnotin kiertoprosessi sallii.

$$\eta = \Delta T \frac{\eta_r}{T_h} \quad (15)$$

Kaavassa η_r on pienennetty hyötysuhde, joka vastaa Carnotin hyötysuhdetta. Tarkan hyötysuhteen määrittäminen termosähköiselle materiaalille on vaikeaa, koska moni muuttuja on riippuvainen lämpötilasta. Kuitenkin jos tämä lämpötilariippuvuus arvioidaan pieneksi, voidaan hyötysuhde laskea likiarvoisesti:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_h} \cdot \frac{\sqrt{1+ZT}-1}{\sqrt{1+ZT+T_c/T_h}}. \quad (16)$$

Kaavassa ZT on termosähköisen laitteen hyvyysluku. Kyseisestä kaavasta saadaan laskettua hyvä arvio kaupallisesti saatavilla olevien termosähköisten laitteiden hyötysuhteelle. Termosähköisen laitteen hyötysuhde nousee suhteessa lämpötileroon melkein lineaarisesti. Tämä viittaa siihen, että $\frac{\eta_r}{T_h}$ pysyy lähes vakiona. Tapauksissa, missä lämpötilaero ΔT on pieni, hyötysuhde on suoraan verrannollinen termosähkögeneraattorin yli olevaan ΔT :hen. Hyvän Bi_2Te_3 -termosähkögeneraattorin hyötysuhde kasvaa noin 0,05 prosenttiyksikköä jokaista yhden kelvinin muutosta lämpötilassa ΔT [7, s. 328-329].



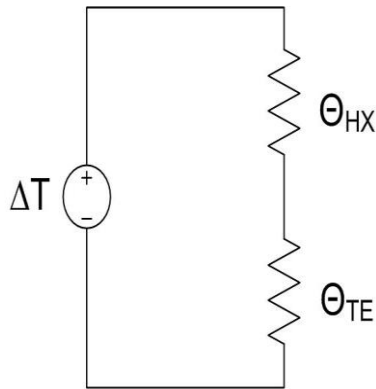
Kuva 9. Tyypillisen Bi_2Te_3 -termosähkögeneraattorin hyötysuhde [7, s. 329].

$$\eta = \eta_1 \cdot \Delta T \quad (17)$$

$$\eta_1 = 0,05 \% / K$$

4.3 Lämpöresistanssin sovittaminen

Mikäli lämpötilaero ΔT_{TE} termosähköisen generaattorin yli pystyttäisiin pitämään täysin vakiona, voitaisiin ulostulevaa tehoa P kasvattaa mielivaltaisesti suunnittelemalla louhin, joka johtaisi enemmän lämpöä. Valitettavasti useat todelliset lämpölähteet eivät kuitenkaan pysty tuottamaan loputtoman suuria lämpövirtoja ilman lämpötilan alenemista.



Kuva 10. Tyypillinen lämpöpiiri termosähkögeneraattorille.

Kuvassa ΔT on kokonaislämpötilaero lämpölähteen ja ympäröivän viileän aineen välillä. θ_{TE} on termosähkögeneraattorin lämpöresistanssi. θ_{HX} on termosähkögeneraattorin kuuman ja kylmän pinnan lämmönsiirrinten kokonaislämpöresistanssi, sarjassa termosähkögeneraattorin lämpöresistanssin kanssa. Lämmönsiirtiminä käytettävät lämpölähteet ja jäähdytyslevyt kuvataan yleensä lämpöresistiivisyydeltään θ_{HX} seuraavan kaavan mukaan:

$$\Delta T_{HX} = Q \theta_{HX}. \quad (18)$$

Kaavan mukaan termosähkögeneraattorille tuotu lämpöteho on verrannollinen lämmönsiirrinten yli olevaan lämpötilaeroon ΔT_{HX} . Jos kaikki käytössä oleva lämpötilaero ΔT

on termosähkögeneraattorin θ_{TE} yli ja mikään osa lämpötilaerosta ei ole lämmönsiirrinten yli ($\Delta T_{HX} = 0$), niin silloin lämmönsiirtimet eivät siirrä yhtään lämpöä ($Q = \Delta T_{HX}/\theta_{HX}$) eikä termosähkögeneraattori tuota yhtään tehoa. Lämpötilaeron lisääminen lämmönsiirrinten yli lisää lämpövirtaa, mikä puolestaan kasvattaa ulostulevaa tehoa. Lämpötilaeron lisääminen lämmönsiirrinten yli pienentää taas puolestaan lämpötilaeroa termosähkögeneraattorin yli ($\Delta T_{TE} = \Delta T - \Delta T_{HX}$) huonontaen hyötysuhdetta. Vaikka lämmönjohtimien lämpöresistanssi olisi todella pieni, jonkin verran ΔT :tä tarvitaan silti niiden yli, jotta lämpöä saadaan johdettua lämpölähteestä termosähkögeneraattorin läpi ympäröivään aineeseen. Tämän takia $\Delta T_{TE} < \Delta T$ [7, s. 330].

Suurin teho saadaan aikaiseksi, kun lämpölähteen ja jäähdytyslevyn lämpöresistanssit vastaavat toisiaan. Kuvan 10 piiristä voidaan osoittaa, että lämpötilaero termosähkögeneraattorin yli on

$$\Delta T_{TE} = \Delta T \frac{\theta_{TE}}{\theta_{HX} + \theta_{TE}} \quad (19)$$

ja lämpövirta piirin läpi on

$$Q = \frac{\Delta T}{\theta_{HX} + \theta_{TE}}. \quad (20)$$

Yhdistämällä nämä kaksi kaavaa sekä hyötysuhteen ja ΔT_{TE} välisen lineaarisuuden (kaava 17), mikä esiteltiin termosähköinen hyötysuhde osiossa, saadaan tehoksi:

$$P = \eta_1 \Delta T^2 \frac{\theta_{TE}}{(\theta_{HX} + \theta_{TE})^2} \quad (21)$$

Tämän kaavan pohjalta voidaan havaita, että suuremmat jäähdytyslevyt (joissa on pieni lämpöresistanssi θ_{HX}) tuottavat enemmän tehoa. Kun suurin mahdollinen jäähdytyslevy on valittu, tulee termosähkögeneraattori mitoittaa niin, että $\theta_{HX} = \theta_{TE}$.

$$P_{MAX} = \frac{\eta_1 \Delta T^2}{4\theta_{HX}} \quad (22)$$

Kun lämpöresistanssit on sovitettu yhteen, lämpötilaero termosähkögeneraattorin yli on noin puolet kokonaislämpötilaerosta.

$$\Delta T_{TE} \approx \frac{\Delta T}{2} \quad (23)$$

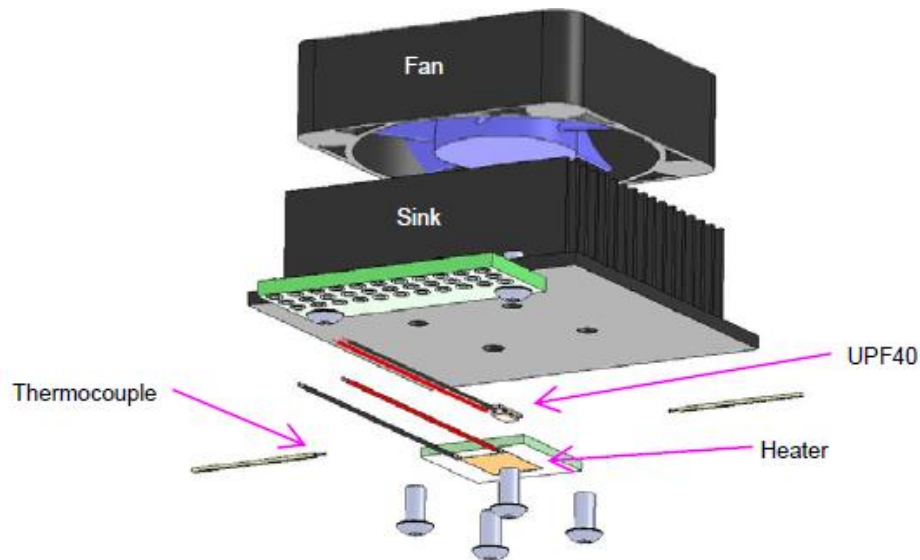
$$\eta \approx \frac{\eta_1 \Delta T}{2}$$

Koska energianlouhinnassa teho ja koko merkitsevät enemmän kuin hyötysuhde, tulisi termosähkögeneraattorin lämpöresistanssin vastata lämmönsiirtimien lämpöresistanssia [7, s. 330-331].

4.4 Testatut termosähkögeneraattorit

Tutkimusta varten hankittiin kaksi termosähkögeneraattoria: Nextremen ohutkalvotekniikalla valmistama UPF40-termosähkögeneraattori ja SCTB Nordin valmistama Bi_2Te_3 -termosähkögeneraattori. Nextremen ja SCTB Nordin termosähkögeneraattorit eroavat toisistaan varsin paljon. Nextremeltä hankittiin valmis evaluointipaketti ja SCTB Nordilta pelkkä termosähkögeneraattori.

Nextremen evaluointipaketti koostuu termosähkögeneraattorista, lämmitysvastuksesta, jäähdytyslevy-/tuuletinasetelmasta ja kahdesta termoparista.



Kuva 11. UPF40-termosähkögeneraattorin evaluointipaketti [23].

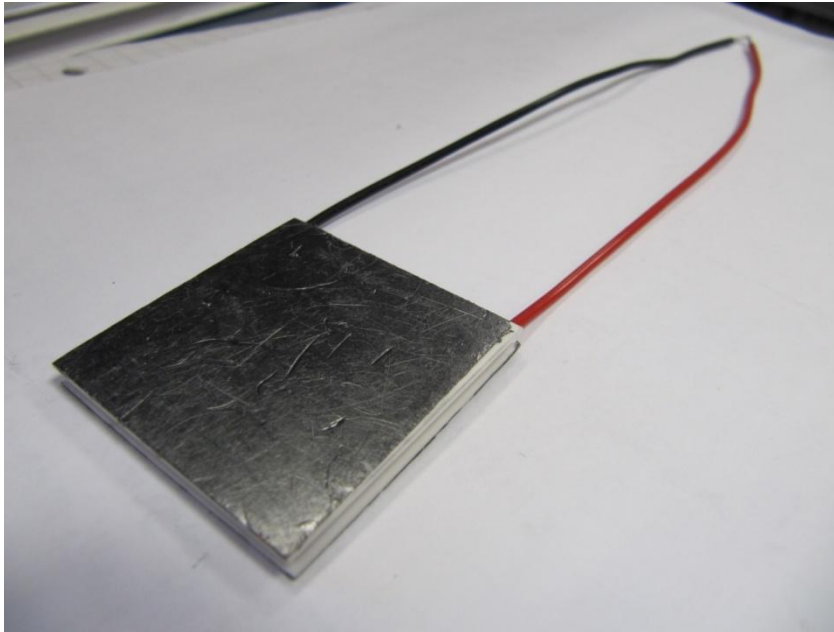
Nextreme lupaa evaluointipaketille taulukon 1 mukaiset suorituskykyarvot.

Taulukko 1. UPF40-termosähkögeneraattorin suorituskykyarvot. P_{out} on termosähkögeneraattorin ulostuloteho mitattuna $0,67\Omega$ kuormavastuksen yli, V_{oc} termosähkögeneraattorin tyhjäkäyntijännite ja R_{int} on generaattorin sisäinen resistanssi [23].

Typical Performance Values:			
Parameter		$\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$	$\Delta T = 60^{\circ}\text{C}$
Output Power (to 0.67Ω resistor)	P_{out}	18 mW	61 mW
Open Circuit Voltage	V_{oc}	200 mV	389 mV
Internal Resistance	R_{int}	580 m Ω	640 m Ω

Testattujen termosähkögeneraattoreiden suorituskykyä on vaikea verrata keskenään, koska ne on valmistettu eri materiaaleista, ne ovat erikokoisia ja niiden testausalustat ovat täysin erilaisia. Nextremeltä hankittu UPF40-termosähkögeneraattori on kooltaan $2,5\text{ mm} \cdot 5,1\text{ mm}$. UPF40 toimitettiin valmiissa testausalustassa, joka koostui lämmityslevystä sekä aktiivisesta jäädytyksestä. Aktiivisen jäädytyksen takia ei pystytty tekemään haluttuja UPF40 -testejä, joten lisäksi hankittiin SCTB Nordilta pelkkä termosähkögeneraattori. SCTB Nordin valmistama termosähkögeneraattori on mitoiltaan selvästi UPF40 isompi, sillä se on $40\text{ mm} \cdot 40\text{ mm}$ kokoinen.

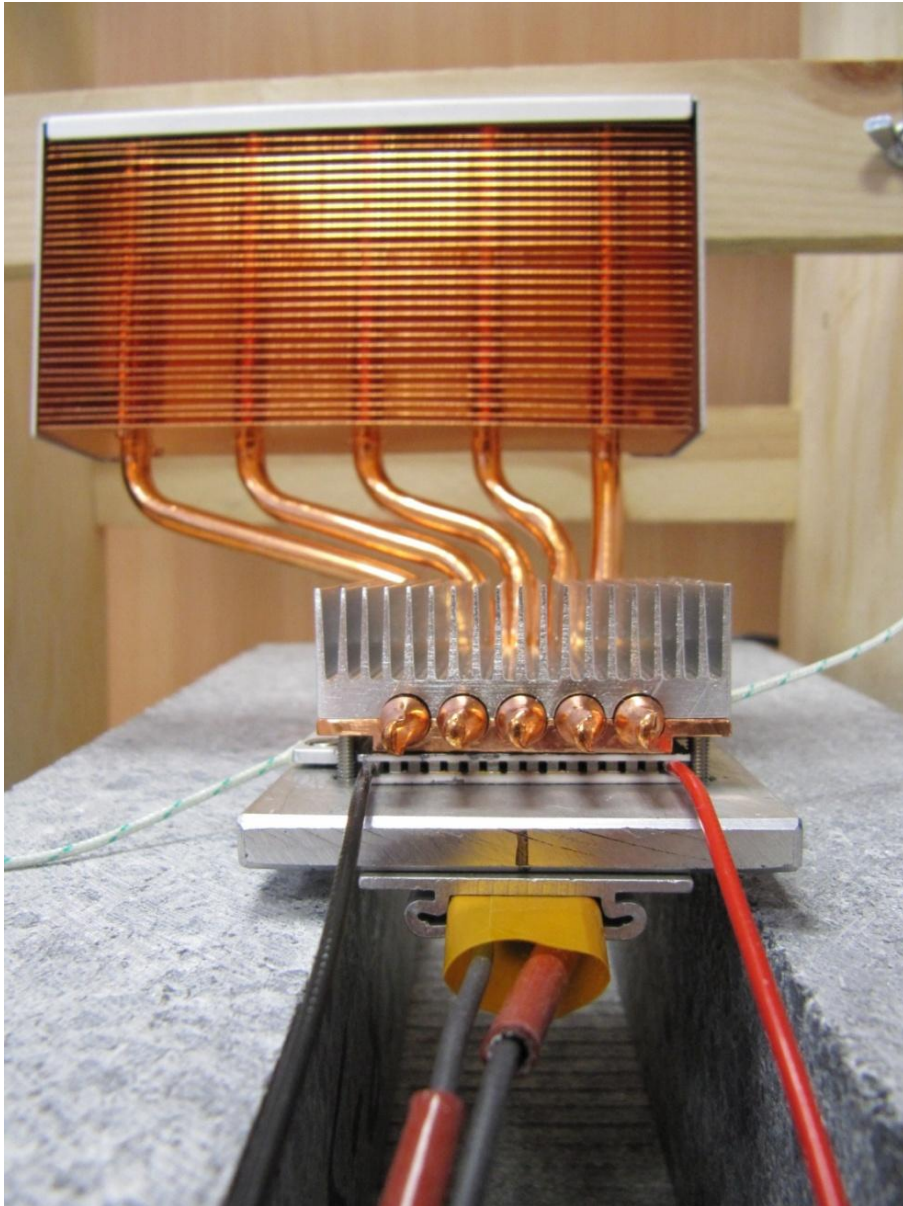
SCTB Nordin valmistama termosähkögeneraattori on tyypiltään TMG-127-1.4-1.2. TMG:n tyyppimerkinnässä olevat numerot kertovat termosähkögeneraattorin fyysiset ominaismitat. Ensimmäinen numero kertoo termoparien lukumäärän, toinen ja kolmas numero kertovat termoparin neliön muotoisen jalan halkaisijan ja korkeuden. Kyseisessä TMG:ssä on siis 127 termoparia, termoparin jalan halkaisija on $1,4\text{ mm}$ ja korkeus $1,2\text{ mm}$.



Kuva 12. SCTB Nordin valmistama TMG-127-1.4-1.2-termosähkögeneraattori.

4.5 Termosähkögeneraattorien mittaukset

TMG-127-1.4-1.2:n mittaamiseksi rakennettiin testausalusta. Testausalusta koostui 6 mm paksuisesta alumiinilevystä, jonka pohjaan kiinnitettiin 200 W lämpövastus. Näin alumiinilevyn lämpötilaa pystyttiin muuttamaan säätämällä lämpövastuksen lämmitystehoa. Alumiinilevyn päälle kiinnitettiin SilverStonelta hankittu NT01-E-mallinen passiivijäähdytin, jonka jäähdytysteho perustui lämpöjohdinrakenteeseen. Termosähkögeneraattori puristettiin jäähdyttimen ja alumiinilevyn väliin ruuveilla. Lisäksi termosähkögeneraattorin yli olevan lämpötilaeron mittaamiseksi alumiinilevyn pintaan ja jäähdyttimen pohjaan kiinnitettiin termoparit, jotka kytkettiin lämpömittariin. Lämpömittarin käytettiin Teston valmistamaa 922-mallista kaksikanavaista lämpömittaria, jonka tarkkuus on $\pm(0.5\text{ }^{\circ}\text{C} + 0.3\text{ }\%)$ mitatusta arvosta lämpötila-alueella $-40 \rightarrow +900\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Kuva 13. TMG-127-1.4-1.2- termosähkögeneraattorin testausalusta.

TMG-127-1.4-1.2-termosähkögeneraattorin mittaustulokset on esitelty taulukossa 2.

Taulukko 2. TMG-127-1.4-1.2-termosähkögeneraattorin mittaustulokset.

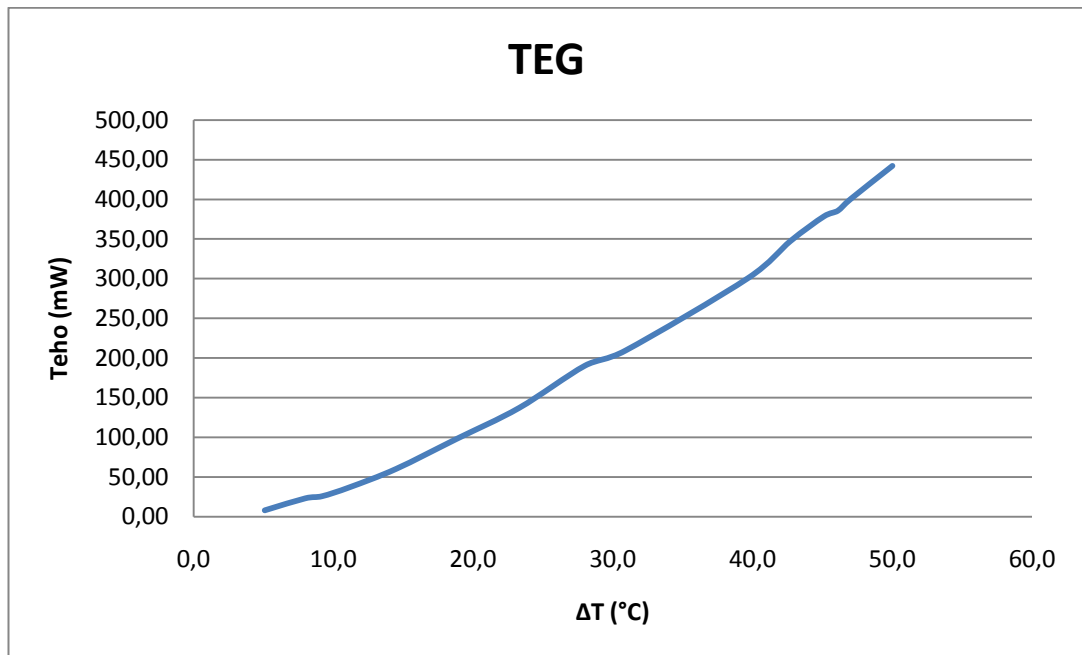
Malli: TMG-127-1.4-1.2			Valmistaja: SCTB NORD		
Hot, (°C)	Cold, (°C)	ΔT , (°C)	U(out), V	Aika, (min)	P(out), mW
179,3	129,3	50,0	1,03	15-20	442,04
174,0	127,0	47,0	0,980	15-20	400,17
172,5	126,4	46,1	0,962	15-20	385,60
169,7	124,6	45,1	0,953	15-20	378,42
165,5	122,8	42,7	0,913	15-20	347,32
156,2	116,5	39,7	0,850	15-20	301,04
136,0	105,1	30,9	0,709	15-20	209,45
115,0	87,0	28,0	0,676	15-20	190,41
107,0	83,7	23,3	0,574	15-20	137,28
86,5	67,7	18,8	0,485	15-20	98,01
74,2	59,7	14,5	0,381	15-20	60,48
62,0	50,8	11,2	0,300	15-20	37,50
55,1	45,9	9,2	0,250	15-20	26,04
49,0	41,0	8,0	0,237	15-20	23,40
39,0	33,9	5,1	0,141	15-20	8,28

Mittaukset suoritettiin säätämällä lämpövastuksen tehoa (kuumanpuolen lämpötilaa, ”Hot”) säädettävällä teholähteellä. Näin pystyttiin muuttamaan 6 mm alumiinilevyn lämpötilaa, joka toimi puolestaan termosähkögeneraattorin lämpölähteenä. Mittauksessa käytettiin 2,4 Ω kuormavastusta, jonka yli ulostulojännite U(out) mitattiin. Jännite mitattiin käyttämällä digitaalista Protek 506 -yleismittaria. Tämän jälkeen ulostuloteho P(out) laskettiin kaavasta

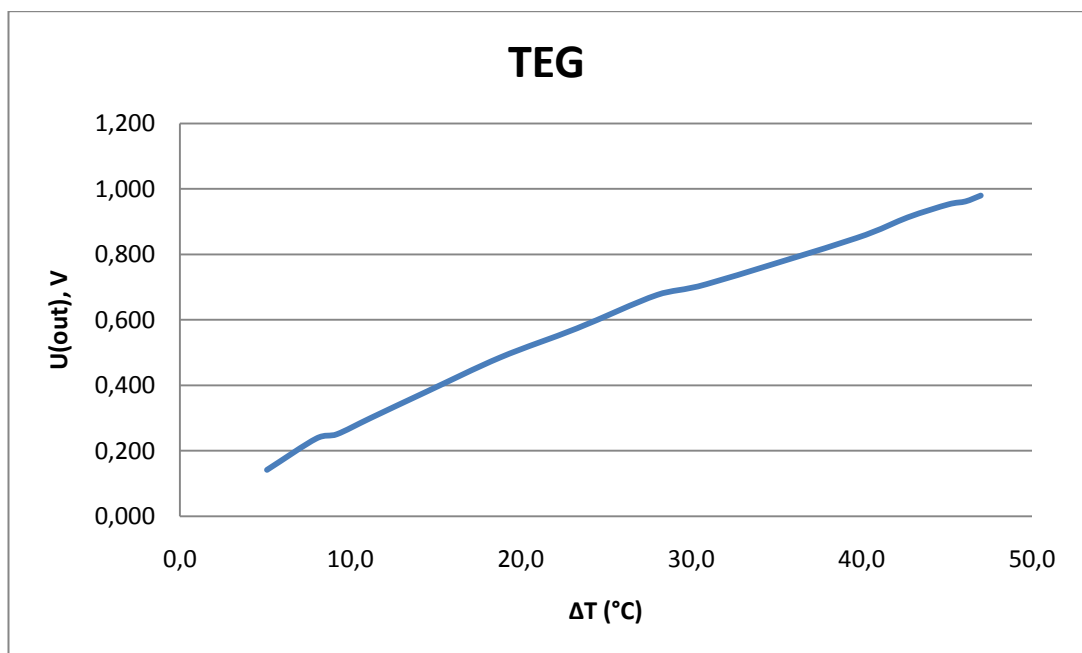
$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (24)$$

Ennen tulosten kirjaamista taulukkoon lämpötilaeron annettiin tasaantua noin 15-20 min, kunnes saavutettiin ns. stabiili tila (lämpötilaero termosähkögeneraattorin yli ei juurikaan enää muuttunut).

Kun mittaustulokset syötetään taulukkoon ja taulukon pohjalta luodaan kuvaaja, saadaan ulostulotehon ja -jännitteen kuvaajiksi seuraavanlaiset kuvaajat.



Kuva 14. TMG-127-1.4-1.2-termosähkögeneraattorin ulostuloteho lämpötilaeron funktiona.

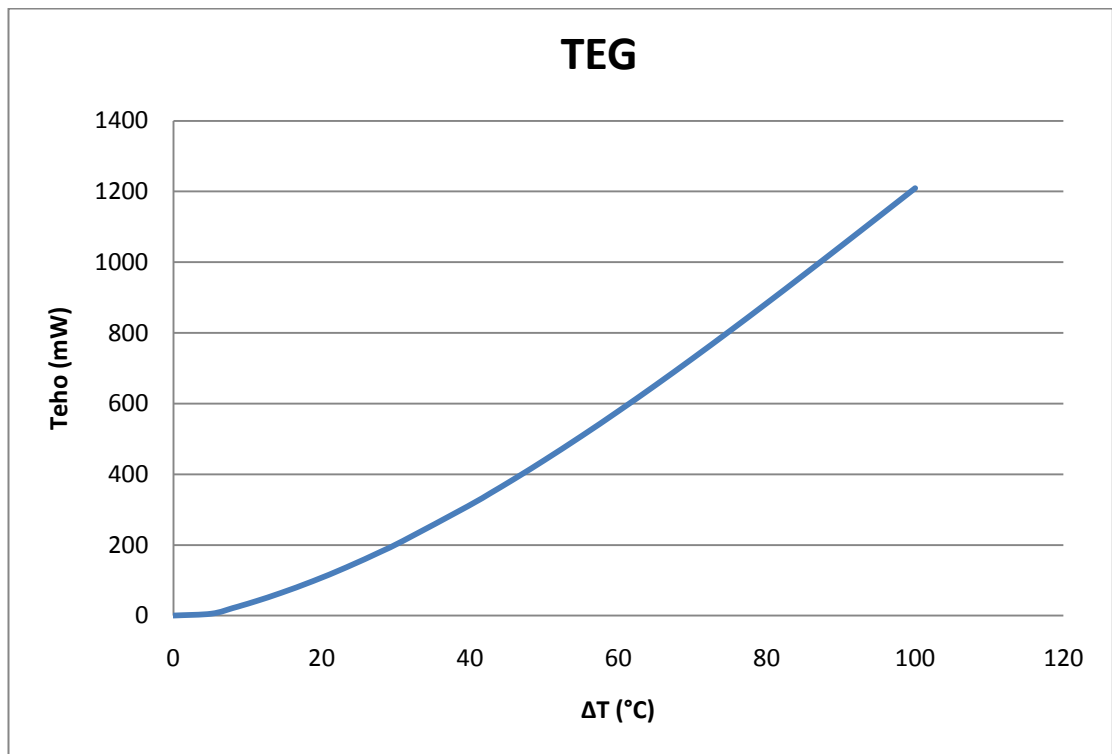


Kuva 15. TMG-127-1.4-1.2-termosähkögeneraattorin ulostulojännite lämpötilaeron funktiona.

Ympäristön lämpötila mittauksissa oli 23 °C. Tehon kuvaajaan tehtiin polynomi-ekstrapolointi, jolla kuvaajaa saatiin jatkettua yli mittausalueen. Polynomikertoimiksi saatiin taulukossa 3 näkyvät arvot.

Taulukko 3. Polynomikertoimet.

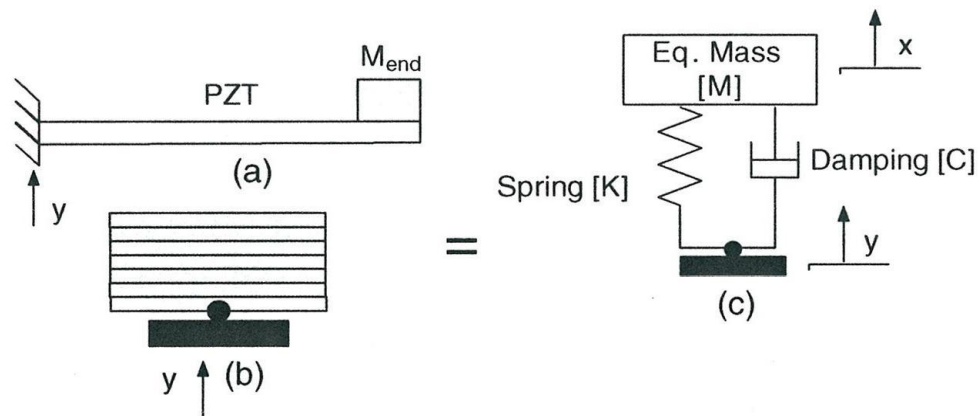
a0	-18,032127
a1	3,93218901
a2	0,12538255
a3	-0,0004196



Kuva 16. TMG-127-1.4-1.-termosähkögeneraattorin ulostuloteho lämpötilaeron funktiona, polynomi-ekstrapoloinnilla.

5 Pietsosähkögeneraattori

Pietsosähköisessä energianlouhinnassa energiaa saadaan jäykkien kappaleiden värähtelystä. Värähtely voi johtua epätasaisesta massasta järjestelmässä tai materiaalien kulumisesta. Tärinää esiintyy kaikissa dynaamisissa järjestelmissä, ja se on erilaista jokaisessa järjestelmässä. Sitä voidaan kuvata kahdella ominaisuudella: vaimennuskertoimella ja resonanssitaajuudella. Tutkittaessa kappaleen tärinää energianlouhinnan näkökulmasta käytetään yleensä mallina yhden vapausasteen keskitettyä massajousijärjestelmää.



Kuva 17. (a) Ulokepalkki-tyyppinen pietsosähköinen energianlouhin kärkimassalla, (b) monikerroksinen pietsosähköinen energianlouhin, (c) yhden vapausasteen jousi-massa-vaimennin malli [7, s. 5].

Ulkopalkki säädettävällä kärkimassalla on yleisin pietsosähköisissä energianlouhimissa käytetty rakenne. Tärinälähteen suunta on piirretty nuolella ja merkitty kiinnityskohdan kantaan. Hallitseva yhtälö kappaleen liikkeelle kuvan 17 (c) järjestelmässä saadaan energian tasapainoyhtälöstä. Se pätee kuvan 17 molemmille energianlouhinta järjestelmille (a) ja (b). Jousi-massavaimenninmallin hallitseva liikkeen yhtälö voidaan esittää muodossa:

$$M\ddot{z} + C\dot{z} + Kz = -M\ddot{y} \quad (25)$$

Edellisessä kaavassa $z = x - y$, joka on massan kokonaissiirtymä. Edellä mainittu kaava voidaan myös kirjoittaa ominaisuuureilla vaimennuskertoimen ja resonanssitaajuus. Vaimennuskertoimen (ξ) on dimensioton luku, joka määritetään järjestelmän vaimennuksen (C) ja kokonaisvaimennuksen (C_c) suhteella.

$$\xi = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{MK}} \quad (26)$$

Jousi-massajärjestelmän resonanssitaajuus saadaan kaavasta:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}} \cdot \left(\frac{rad}{s}\right). \quad (27)$$

Ulokepalkin tapauksessa M on ulokepalkin massa M_b ja palkin päässä oleva kärkimassa M_{end} . Järjestelmän jäykkyys K tulisi laskea jokaiselle kuormitustilalle erikseen. Ulokepalkin tapauksessa jäykkyys $K = 3EI/l^3$, jossa E on kimmoisuuskerroin, I on hitausmomentti ja l on ulokkeen pituus. Hitausmomentti suorakaiteen muotoiselle ulokepalkille saadaan yhtälöstä:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (28)$$

jossa b ja h ovat ulokepalkin poikittaisleveys ja -paksuus. Pietsosähköisen järjestelmän ulostuloteho on suurimmillaan, kun järjestelmä toimii resonanssitaajuudella. Resonanssitaajuus määrittelee materiaalivalinnat ja järjestelmän mitat. Ulkopalkki-tyyppisessä järjestelmässä resonanssitaajuutta pystytään säätämään muuttamalla palkin päässä olevaa kärkimassaa [7, s. 4-6].

Järjestelmän siirtofunktio saadaan laskettua ulostulon $z(t)$ ja sisäänmenon $y(t)$ Laplace-muunnoksella. Laplace-muunnos hetkellä $t = 0$ on:

$$\left|\frac{Z(s)}{Y(s)}\right| = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}. \quad (29)$$

Vaste aikatasossa saadaan käänteis-Laplace-muunnoksella. Muunnoksessa oletetaan, että kappaleen värähtely on sinimuotoista, $y = Y \sin(\omega t)$.

$$z(t) = \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\xi\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} Y \sin(\omega t - \phi) \quad (30)$$

Vasteen vaihekulma voidaan ilmaista $\phi = \tan^{-1} \left(\frac{C\omega}{K - \omega^2 M} \right)$. Pietsosähköisen muuntimen arvioitu mekaaninen teho sen värähdellessä yllämainituilla ehdoilla, voidaan laskea massan liikenopeuden ja -voiman tulosta.

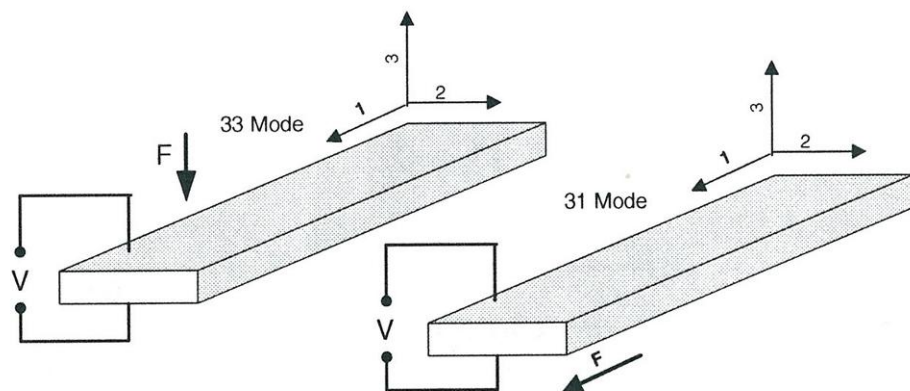
$$P(t) = \frac{M\xi Y^2 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^3 \omega^3}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 \right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n} \right)^2}} \quad (31)$$

Maksimiteho saadaan, kun toimintataajuus asetetaan samaksi kuin resonanssitaajuus.

$$P_{MAX} = \frac{MY^2 \omega_n^3}{4\xi} \quad (32)$$

Edellä mainitusta yhtälöstä nähdään, että tehoa voidaan kasvattaa pienentämällä vaimenemista ja kasvattamalla resonanssitaajuutta, massaa sekä värähtelyn amplitudia [7, s. 6].

On olemassa kaksi yleistä toimintatapaa, miten pietsosähköistä energianlouhinta käytetään: 33-tyyppinen (pinotoimilaite) ja 31-tyyppinen (bimorph-toimilaite). 33-tyypin toimilaitteessa vaikuttavan jännityksen (voiman) suunta on sama kuin tuotetun jännitteen. 31-tyyppisessä toimilaitteessa vaikuttava jännitys on pitkittäissuuntaista, kun taas tuotettu jännite saadaan kohtisuorasta suunnasta.



Kuva 18. Pietsosähköisen energianlouhimen toimintatavat [7, s. 7].

Ulokepalkkityylisessä ratkaisussa, jossa palkin pituus on hyvin pitkä, yhden vapausasteen malli (jousi-massavaimenninmalli) ei välttämättä anna tehotuotosta järkevää arviota. Toisin kuin yhden vapausasteen mallissa, todellisessa järjestelmässä on loputon mää-

rä massoja kiinnittyneenä toisiinsa. Kaikilla massoilla on oma vapausasteensa ja resonanssitaajuutensa [7, s. 6-7].

6 ND9000-venttiilinohjain

Venttiilinohjainta käytetään ohjaamaan toimilaitetta, joka puolestaan liikuttaa prosessi-



Kuva 19. ND9000-venttiilinohjain [27].

putkessa olevaa venttiiliä. Venttiilinohjain ohjaa toimilaitetta säätämällä toimilaitteen syöttöpainetta, joka on luokkaa 5 baaria. ND9000-venttiilinohjain on 4-20 mA virtaviestistä käyttöjännitteensä saava mikroprosessorilla varustettu älykäs venttiilinohjain. ND9000-venttiilinohjain koostuu kahdesta piirilevystä VC (Valve Controller) ja HART (Highway Addressable Remote Transducer). VC-piirikortti sisältää venttiilinohjaimen mikroprosessorin sekä venttiilin ohjaamiseen liittyvät piirit.

HART-piirikortti puolestaan sisältää HART-kommunikointiin liittyvät piirit sekä venttiilinohjaimen käyttöjännitteen reguloinnin [26].

6.1 HART-tiedonsiirto

HART-kommunikaatioprotokolla (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) on maailmanlaajuinen standardi, joka mahdollistaa digitaalisen tiedon lähettämisen ja vastaanottamisen analogista johdinta pitkin. HART-kommunikointia käytetään erilaisien älykkäiden laitteiden ja niiden seurantajärjestelmien välillä. HART-protokolla pystyy kommunikoimaan 4 – 20mA analogisen virtaviestin yli. HART-protokollassa toimitaan isäntä-orjaperiaatteella. Isäntälaitteina voivat toimia automaatiojärjestelmät tai PC-tietokoneet. Orjalaitteet esim. venttiilinohjaimet toimivat isäntälaitteesta tulevien komentojen mukaan. HART-protokolla on laajin käytössä oleva kommunikaatioprotokolla prosessiteollisuudessa. Sitä käyttäviä laitteita on asennettu maailmanlaajuisesti jo yli 30 miljoonaa kappaletta [10;11].

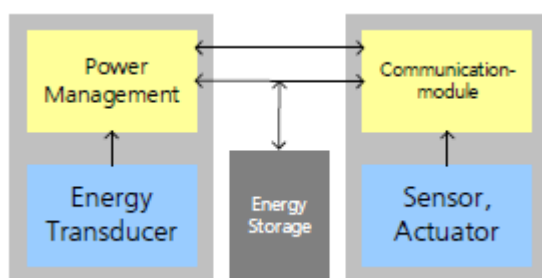
6.1.1 WirelessHART-tiedonsiirto

WirelessHART on uusi langatonta kommunikointia hyödyntävä HART-protokolla. WirelessHART toimii 2,4 GHz ISM-taajuusalueella ja se käyttää IEEE 802.15.4

-standardin mukaista radiota. WirelessHART-protokollan avulla vanhat HART-laitteet pystyvät kommunikoimaan langattomasti käyttäen samoja vanhoja kommunikaatiokomponentteja ja työkaluja [10].

7 Energianlouhintajärjestelmä

Toimintakykyisen energianlouhintajärjestelmän täytyy pystyä päihittämään akkusovellukset energiatiheudessa, tehotiheydessä ja/tai hinnassa. Todellisuudessa energianlouhintajärjestelmä soveltuu parhaiten pitkäikäisiin sovelluksiin, joissa energiatiheys on kriittinen osa sovelluksen toimintaa eikä säännöllinen huolto (akkujen vaihto) ole mahdollista. Yksi varten otettava vaihtoehto on käyttää energianlouhintaa energiavarojen esim. ladattavien akkujen uudelleen lataamiseen. Edellä mainitussa tapauksessa akku luovuttaa suuren määrän tehoa (mW tai W) hetkellisesti, esim. kommunikoidakseen radiolähetimellä, kun taas suurimman osan ajasta energianlouhin lataa akkua (μW tai mW) [7, s. 328]. Mahdollinen energianlouhintajärjestelmä koostuu energianlouhimesta, energiavaroista sekä niiden hallintapiireistä. Kuvassa 22 on esitelty yksinkertaistetun energianlouhintajärjestelmän blokkidiagrammi.



Kuva 22. Energianlouhintajärjestelmä [25].

7.1 ND9000-venttiilinohjaimen + WirelessHARTin energiankulutus

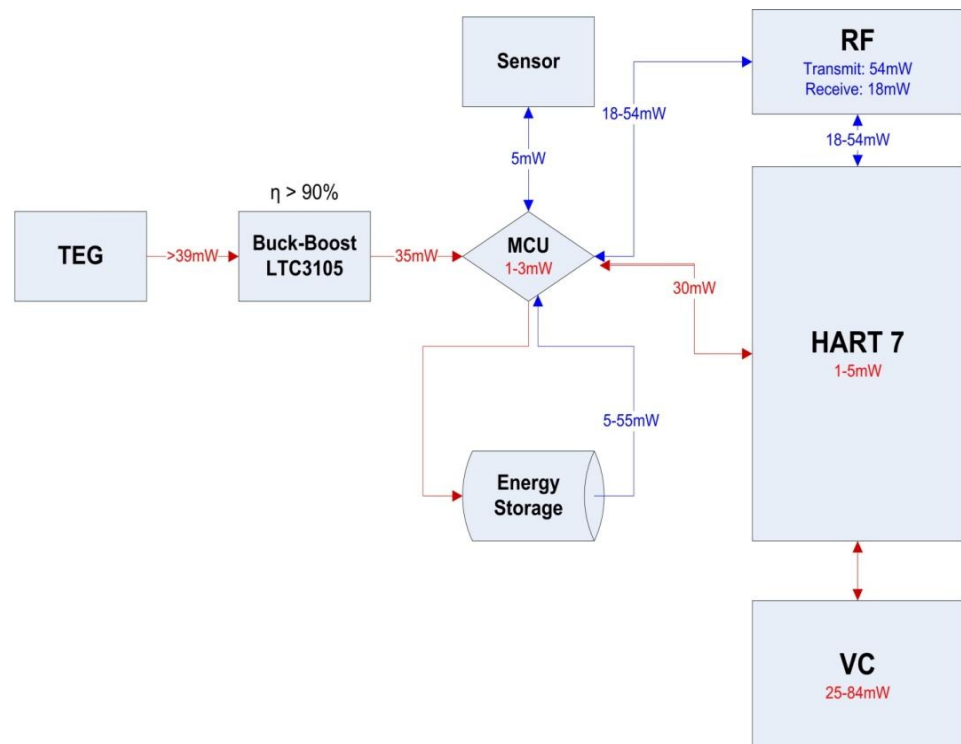
ND9000-venttiilinohjain saa käyttöjännitteensä $4 - 20 mA$ virtaviestistä. Metsolta saatujen tietojen mukaan VC-kortti kuluttaa virtaa keskimäärin $8,3 mA$ ja enimmillään $28 mA$. WirelessHART-kortti käyttää Dust Networksin valmistamaa langatonta lähentä, malliltaan M2510. M2510:n virrankulutus vaihtelee sen mukaan, vastaanotetaanko vai lähetetäänkö signaalia. Virrankulutus signaalia vastaanotettaessa on $6 mA$. Virrankulutus signaalia lähetettäessä kasvaa riippuen siitä, käytetäänkö sisäistä lähetysvahvistinta vai ei. Lähetysvahvistimen ollessa pois päältä virtaa kuluu lähetyksessä $7 mA$. Jos

lähetyshävitin on päällä, virtaa kuluu lähetyksessä 17 mA . Dust Networks arvioi M2510:n kantaman taulukon 4 mukaan [12;13].

Taulukko 4. M2510:n kantama [7, s. 7].

Etäisyys	
Lähetyshävitin päällä:	
Sisätiloissa:	100m
Ulkona:	400m
Lähetyshävitin pois päältä:	
Sisätiloissa:	25m
Ulkona:	200m

Pienin käyttöjännite, jolla ND9000-venttiilinohjain toimii, on 3 V . Kyseisellä 3 V :n käyttöjännitteellä VC-kortti kuluttaa keskimäärin $8,3\text{ mA} \cdot 3\text{ V} \approx 25\text{ mW}$. WirelessHART-kortin virrankulutukseksi voidaan arvioida $7\text{ mA} \cdot 3\text{ V} = 21\text{ mW}$. Yhteensä ND9000-venttiilinohjain, jossa on WirelessHART-kommunikointikortti, kuluttaa keskimäärin noin 46 mW . Tehon kulutus voi kuitenkin nousta järjestelmässä hetkellisesti jopa 140 mW :n tasolle [12; 13]. Jos edellisten tehonkulutuslaskelmien pohjalta rakennetaan blokkimalli, voidaan sen avulla helposti havainnollistaa, minkälaisia tehotarpeita järjestelmällä on.



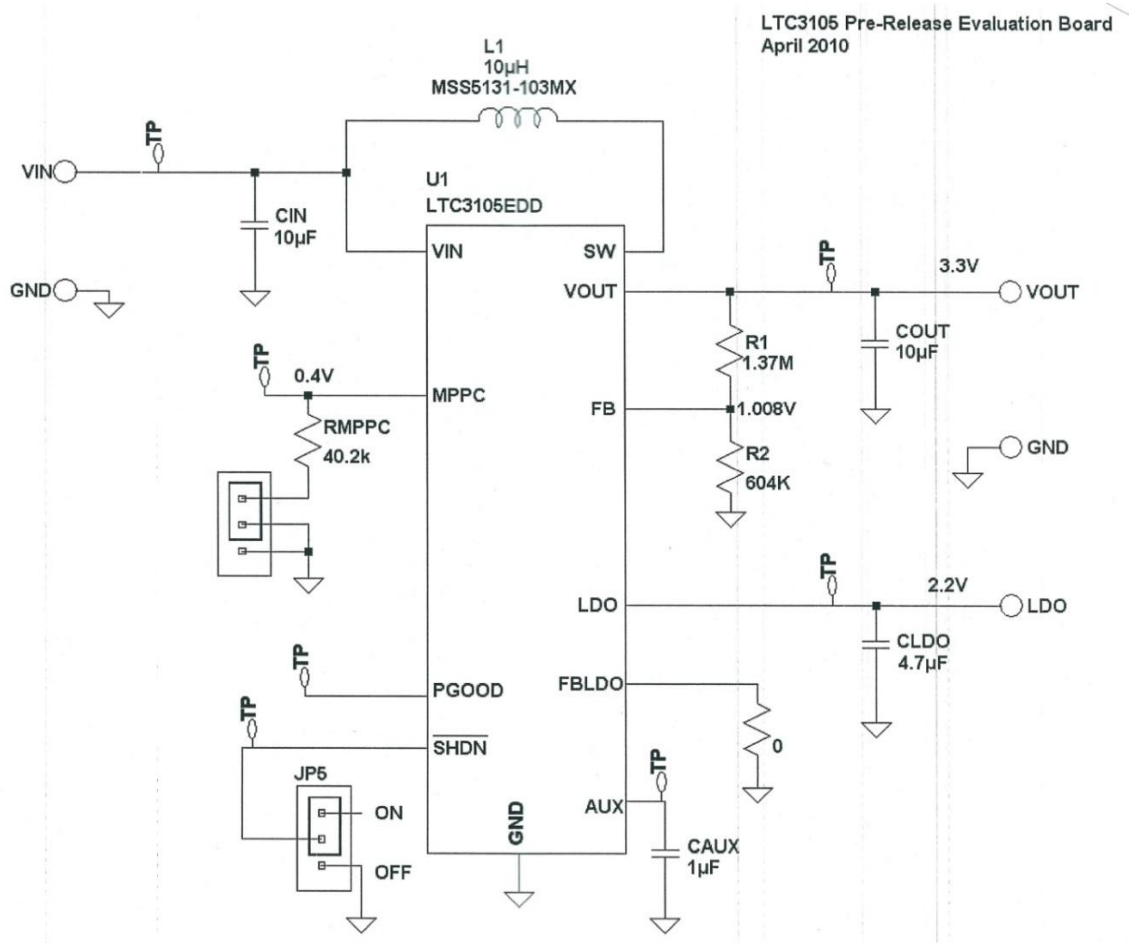
Kuva 20. Energianlouhintajärjestelmän blokkikuva. *Punainen* kuvastaa järjestelmän jatkuvaa tehonkulutusta, jotta järjestelmä pysyy käynnissä. *Sininen* kuvastaa hetkellistä tehonkulutusta, joka lisätään ajoittain jatkuvan tehonkulutuksen päälle.

Blokkidiagrammi koostuu termosähkögeneraattorista (TEG), joka syöttää tehoa järjestelmään. Termosähkögeneraattorilta tuleva teho muunnetaan DC/DC-muuntimessa haluttuun jännitetasoon, jolloin osa tehosta kuluu DC/DC-muuntimen häviöihin. Blokkikuvan MCU kuvaa energiavarastojen, ulkoisten sensorien ja termosähkögeneraattorin hallintapiiriä. MCU:n toimintaan on varattu $1 - 3 \text{ mW}$. Tämän lisäksi on arvioitu ulkoisten sensorien energiankulutukseksi noin 5 mW /sensori. Kyseinen järjestelmä toimii niin, että TEG syöttää jatkuvasti tehoa järjestelmään. Järjestelmän MCU jakaa tehoa tarpeen mukaan järjestelmän eri osiin ja ohjaa ylimääräisen tehon energiavarastoon. Energiavarasto puolestaan pitää järjestelmän hengissä niissä tilanteissa, kun TEG:n syöttämä tehotaso putoaa alle järjestelmän tehotarpeen.

7.2 LTC3105 DC/DC-muunnin

LTC3105 on Linear Technologysin valmistama step-up-DC/DC-muunnin. Muuntimen käynnistysjännite on vain 200 mV ja se pystyy käsittelemään tulojännitteitä aina 5 V

asti. LTC3105:n tarkoitus on nostaa termosähkögeneraattorin $0,1 - 5 V$:n antojännite tasolle $3 - 5 V$.



Kuva 21. LTC3105-testilevyn kytkentäkaavio.

Kun V_{IN} tuloon kytketään yli $200 mV$:in jännite, LTC3105 menee käynnistystilaan. Käynnistystilassa LTC3105 pyrkii ensin lataamaan AUX-liitännän $1,4 V$ jännitteeseen. AUX-liitännän saavutettua $1,4 V$ jännitteen LTC3105 siirtyy normaaliin toimintatilaan. Normaali toimintatilassa LTC3105 jatkaa AUX-liittimen lataamista, kunnes LDO-ulos tulo on reguloitu $2,2 V$ jännitteeseen. Kun LDO-ulos tulo on reguloitu, alkaa LTC3105 ladata OUT-liitintä [14].

8 Energianlouhinnan mahdollisuuksien vertailu

8.1 Missä louhittavaa energiaa?

Edellä on käsitelty paljon energianlouhintateknologioita sekä niiden toimintaa. Toinen suuri kysymys on kuitenkin, missä on vapaata energiaa. Jos tarkastellaan asiaa termosähkögeneraattorin tapauksessa, joka on ollut suurimman mielenkiinnon kohteena läpi tutkimuksen, on hyvä perehtyä hieman enemmän termodynamiikkaan, sekä käsitteisiin entropia ja eksergia.

8.1.1 Termodynamiikan peruslait

Nollas termodynamiikan laki: tasapaino. Suljetussa systeemissä erilämpöiset kappaleet asettuvat aikaa myöten lopulta samaan lämpötilaan [29, s. 188].

Ensimmäinen termodynamiikan laki: energian säilyminen. Energiaa ei voida luoda tyhjästä, eikä sitä häviä mihinkään. Se vain muuttaa muotoaan [29, s. 189].

Toinen termodynamiikan laki: entropian kasvu. Entropia kasvaa aina suljetussa järjestelmässä, joten energiaa ei voi muuttaa muodosta toiseen ja palata takaisin samalle tasolle ilman entropian kasvua [29, s.195].

Kolmas termodynamiikan laki: entropian nollapiste. Täydellisen kiteen entropia on nolla, ja kaikki liike lakkaa absoluuttisessa nollapisteessä. Tämän takia absoluuttista nollapistettä ei voida saavuttaa [30].

8.1.2 Entropia

Entropia on tärkeä osa termodynamiikan toista lakia. Termodynaaminen järjestelmä koostuu kappaleista, esim. atomeista ja molekyyleistä, jotka sisältävät liike-energiaa. Energianlouhin on periaatteessa vain laite, joka muuttaa energiaa muodosta toiseen. Sellaista laitetta pystytään käyttämään vain, jos on saatavilla muunnettavaa energiaa. Termodynamiikan toinen laki sanoo, että kokonaisentropia missä tahansa järjestelmässä ei voi pienentyä ilman, että entropia kasvaa jossain toisessa järjestelmässä. Tästä johtu-

en lämpö ei voi virrata kylmästä pinnasta kuumaan pintaan ilman, että kylmällä puolella tehdään työtä. Toiseksi, mikään jaksollisesti toimiva laite ei voi tuottaa työtä yhdestä lämpövarastosta. Työn tuottamiseksi tarvitaan lämpövirta kuumemmasta varastosta kylmempään varastoon. Mikäli järjestelmään ei syötetä jatkuvasti lisää lämpöä, ajautuu se entropian kasvaessa lopulta väistämättä lämpötasapainoon ympäristönsä kanssa. Termodynaamisen entropian yksikkö on J/K . Termodynamiikassa entropian muutos ΔS määritellään kaavalla:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}, \quad (33)$$

missä δQ on järjestelmään tuleva lämpövirta ja T on se lämpötila, jossa lämpö tulee järjestelmään [20].

8.1.3 Eksergia

Termodynamiikassa järjestelmän eksergia on hyödynnettävän energian maksimimäärä prosessissa, joka ajaa järjestelmän lämpötasapainoon ympäristönsä kanssa. Termosähköisen generaattorin tapauksessa eksergia on se energia, joka on saatavilla kahden lämpötilan välisestä lämpötilaerosta ΔT . ΔT :n pienentyessä kohti nollaa menee eksergia myös kohti nollaa. Eksergiaa häviää aina, kun prosessiin liittyy lämpötilan muutosta. Tämä häviäminen on verrannollinen entropian kasvuun järjestelmässä ja sen ympäristössä. Eksergian suhde energiaan kertoo, kuinka laadukasta energia on. Energiamuodot kuten kineettinen energia, sähköinen energia sekä kemiallinen energia ovat kaikki 100-prosenttisesti muunnettavissa työksi, sillä niiden energia ja eksergia ovat yhtä suuret. Sellaisia energiamuotoja kuten säteilyä ja termistä energiaa ei voida muuntaa täysin työksi, sillä niissä on eksergiaa vähemmän kuin energiaa. Eksergiaa voidaan käyttää hyödyksi, kun selvitetään energianmuuntoprosessin hyötysuhdetta. Eksergian hyötysuhde saadaan laskettua jakamalla sisään menevä eksergia ulostulevalla eksergialla. Työksi muunnettavaa energiaa on saatavilla myös ympäristöä kylmemmistä kohteista. Niissä työtä saadaan energiasta, joka virtaa ympäristöstä kylmään kohteeseen [21].

Maksimimäärä, jolla lämpöä pystytään muuntamaan työksi (tai lämmön eksergian määrä), riippuu lämpölähteen lämpötilasta sekä lämpölähteen ympäristön lämpötilasta.

Muunnoksen maksimihyötysuhde tunnetaan Carnotin hyötysuhteena, joka on esitelty jo aikaisemmin tässä työssä.

Carnotin hyötysuhde on:

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (34)$$

jossa T_H on korkeampi lämpötila ja T_C on alhaisempi lämpötila. Lämmön eksergian laskemiseksi tietyssä lämpötilassa täytyy ottaa huomioon kaksi tapausta: kohteen lämpötila on suurempi kuin sitä ympäröivän aineen tai kohteen lämpötila on ympäristön lämpötilaa alhaisempi.

Siirtyvä eksergian määrä B on:

$$B = Q \left(1 - \frac{T_o}{T_{source}} \right) \quad (35)$$

jossa T_o on ympäristön lämpötila ja T_{source} on lämpölähteen lämpötila [21].

8.2 Energianlouhintakohteet

Teollisuuslaitokset tarjoavat monenlaisia paikkoja, mistä louhia energiaa. Useat paikat joissa on käynnissä korkeanlämpötilan prosesseja, vaikka ne olisivatkin eristettyjä, luovat suuria alueita, joissa on vähintään $10\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaeroja suhteessa ympäristön lämpötilaan. Tällaisia prosesseja ovat esimerkiksi

- sulattamot
- masuunit
- pasutusprosessit
- louhintaprosessit
- tislausprosessit
- höyrystys- ja haihdutusprosessit
- kaasulaitokset
- kylmälaitokset.

Suurin osa teollisuuden prosesseista ja laitteista toimii yötä päivää huomattavasti ympäristöä korkeammassa lämpötiloissa, luoden jatkuvan lämpötilaeron josta louhia energiaa [7, s. 279-282].

Lämpötilaerojen lisäksi myös värähtelyä on saatavilla monista eri paikoista tehdasymppäristössä. Putkistot, moottorit, kuljetushihna sekä muut mekaaniset laitteet synnyttävät yleensä mekaanista värähtelyä. Värähtelyä voidaan muuntaa sähköenergiaksi pietsosähköisellä tai elektromagneettisella generaattorilla [7, s. 283].

8.3 Energianlouhinnan vertailu

Energianlouhimia vertaillaan yleensä niiden tehottiheydellä ($\mu W/cm^2$). Taulukossa 5 on listattu yleisimpiä energianlouhintasovelluksia sekä niiden tehottiheydet.

Taulukko 5. Yleisimmät energianlouhintasovellukset ja niiden tehottiheydet [22].

Energy Harvesting Source	Maximum power ($\mu W/cm^2$)
Vibration/Motion:	
Human activity	~4
Industrial—Piezoelectric generation	1000
—Electrostatic (electret moving plate)	~100
—Eletromechanical (moving magnet)	1000
Thermal: (Thermoelectric Seebeck effect)	15/10°C ΔT
—Human activity	~25
—Industrial (engine cylinder heads, exhaust pipes)	10,000
Light/Solar:	
—Indoor photovoltaic cell (typ.)	~10
—Outdoor photovoltaic cell (bright sun)	15,000
RF Radiation:	
—Cell-phone tower radiation	~0.1
—WiFi radiation	~1

Taulukosta nähdään, että ylivoimaisesti eniten energiaa on saatavilla auringonvalosta ja lämpötilaeroista. Mikäli auringonvaloa ja lämpötilaeroja ei ole saatavilla, on värähtely seuraavaksi paras energialähde.

8.4 Energianlouhinnan tulevaisuus

Vaikka nykypäivänä kannettavat laitteet ja langattomat anturit ovat pienentyneet valtavasti, vievät akut ja kondensaattorit, jotka tuottavat käyttövoiman laitteelle, silti suuren osan laitteen koosta. Energianlouhinta on varteenotettava vaihtoehto, jolla pystytään joissain sovelluksissa korvaamaan perinteiset energiavarastot kokonaan. Energianlouhintaa voidaan myös käyttää pidentämään energiavarastojen elinikää lataamalla niitä uudelleen.

Tulevaisuudessa langattomien anturiverkkojen yleistymisen kannalta on erittäin tärkeää, että erinäisistä huoltovaatimuksista, kuten akkujen vaihtamisesta päästään eroon. Anturiverkot voivat käsittää tuhansia yksittäisiä antureita, jolloin akkujen vaihtaminen tai anturin uusiminen muutaman vuoden välein on vaikea ja erittäin kallis operaatio. Energianlouhinnan avulla on mahdollista valmistaa huoltovapaita antureita, joiden elinikä mitataan vuosikymmenissä [28].

Termosähkögeneraattori osoitti olevansa erittäin hyvä vaihtoehto akkujen korvaamiseen kiinteissä langattomissa tehdassovelluksissa, joissa prosessista tulevaa hukkalämpöä on riittävästi saatavilla. Tarvitaan kuitenkin vielä kehitystyötä termosähkögeneraattorin materiaalien ja jäähdytysjärjestelmän osalta, jotta pystytään kehittämään teollisuuden vaatimukset täyttävä termosähkögeneraattori.

Suurin mahdollisuus energianlouhinnan kehitystyössä on monia eri energialähteitä hyödyntävät energianlouhimet, niin sanotut hybridienergialouhimet. Hybridilouhimiin liittyy kuitenkin monia ongelmia, jotka täytyy ratkaista. Ongelmia ovat rajapinnan suunnitteleminen eri energialähteitä hyödyntäville energialouhimille ja energiavaraston kehittäminen, joka pystyy käsittelemään erilaisia tehosyöttöjä [1, s. 90].

9 Yhteenveto ja päätelmät

9.1 Yhteenveto

Luku 2 käsittelee energianlouhinnan pohjana olevan teorian historiaa. Luvussa käydään läpi vain pietsosähkö- ja termosähköteorian historia. Muiden energianlouhinnan pohjana olevat teorit jätettiin pois, koska niiden merkitys tässä lopputyössä on minimaalinen.

Kolmas luku käsittelee energianlouhintatapoja ja energiavarastoja. Luvussa esitellään pietsosähköisen ja termosähköisen generaattorin liittämiseen tarvittavat komponentit. Termosähköistä ilmiötä käsittelevä kappale käy läpi termosähköisen ilmiön perussuureita ja yhtälöitä sekä kertoo hyvyysluku ZT :n merkityksen termosähkögeneraattorien tehokkuuden mittarina. Muut energianlouhintasovellukset -osiossa käsitellään lyhyesti elektromagneettinen ja fotosähköinen energianlouhinta. Kolmannen luvun viimeisessä luvussa käydään läpi erilaisia energianvarastointitekniikoita.

Luku 4 esittelee termosähkögeneraattorin toimintaa ja keinoja, joilla voidaan maksimoida termosähkögeneraattorin tuottama teho. Lisäksi luvussa esitellään lopputyössä testatut termosähkögeneraattorit ja niiden mittaustulokset.

Viides luku kertoo pietsosähkögeneraattorin toiminnasta. Luvussa käydään läpi peruskaavat, joilla voidaan teoreettisesti mallintaa pietsosähkögeneraattorin toimintaa ja sitä, kuinka saadaan laskettua yksinkertaisen pietsosähkögeneraattorin tuottama teho.

Kuudennessa luvussa selvitetään energianlouhinnan ja ND9000-venttiilinohjaimen välisiä rajapintoja sekä LTC3105-DC/DC-muuntimen toimintaa.

Seitsemäs luku esittelee lyhyesti energianlouhintajärjestelmän koostumuksen ja sen toiminnan perusperiaatteet.

Viimeisessä luvussa selvitetään, minkälaisissa kohteissa on mahdollisimman paljon louhittavaa energiaa ja miten hyödyntää tätä vapaata energiaa mahdollisimman tehokkaasti. Lopuksi vertaillaan eri energianlouhintamahdollisuuksia niistä saatavan energiati-

heyden perusteella ja pohditaan, miten energianlouhinta tulee kehittymään tulevaisuudessa.

9.2 Päätelmät

Vaikka termosähkögeneraattoreita on tutkittu jo vuosikymmenien ajan, ovat vasta äskettäiset harppaukset niiden kehityksessä mahdollistaneet käytön alhaisella lämpötila-alueella (20 – 200 °C) [1, s. 88]. Suurin syy tähän on termosähkögeneraattoreissa käytettyjen materiaalien kehittyminen. Myös termosähkögeneraattoreiden kehitykseen on panostettu merkittävästi viimeisen viiden vuoden aikana. Koko energianlouhinta-ala on varsin tuore ja tusinan energianlouhinvalmistajan lisäksi markkinoilla on vain muutama yritys, jotka valmistavat tuotteita loppukäyttäjille tai teollisuudelle.

Tämän tutkimuksen suurin tavoite oli löytää vaihtoehtoinen/lisäenergialähde ND9000-venttiilinohjaimelle ja suunnitella rajapinta sen liittämiseksi. Tutkimuksen päämäärä saavutettiin ja tutkimustuloksista voidaan nähdä, että termosähkögeneraattori pystyy tuottamaan venttiilinohjaimen toimintaan tarvittavan energiamäärän edellyttäen, että tarpeeksi suuria lämpötilaeroja on saatavilla. Termosähkögeneraattori tarvitsee kuitenkin vielä paljon lisätutkimusta, ennen kuin se on valmis käytettäväksi vaativissa tehdasoloissa.

Suurin kehitystyö tulisi suunnata sopivan jäähdytysjärjestelmän kehittämiseen. Testissä käytetty SilverStonen NT01-E-passiivijäähdytin ei sovellu sellaisenaan käytettäväksi tehdasolosuhteissa. Lisäksi DC/DC-muunninten hyötysuhde on parantunut merkittävästi viimeisten vuosien aikana, ja niiden kyky toimia yhä pienemmillä syöttöjännitteillä tekee niistä houkuttelevan vaihtoehdon termosähkögeneraattorin ulostulojännitteen regulointiin. Kuitenkin vielä tällä hetkellä ne syövät merkittävän osan termosähkögeneraattorin tuottamasta tehosta. Jatkotutkimuksen tulisikin selvittää, onko mahdollista valmistaa sellainen termosähkögeneraattori, joka pystyisi tuottamaan suoraan lämpötilaerosta tarpeeksi suuren ulostulojännitteen. Tällöin DC/DC-muuntimen käyttötarve poistuisi.

Ohutkalvoakut ovat merkittävä kehitysaskel akkujen saralla. Ne pärjäävät litium-ioniakuille energiatiheydessä, mutta tarjoavat 10–100-kertaisen määrän lataussyklejä verrattuna litium-ioniakkuhiin. Lisäksi ohutkalvoakkujen valmistustekniikka mahdollistaa niiden muotoilemisen käytännössä melkein mihin tahansa muotoon. Tämän takia on mahdollista pienentää entisestään kannettavien langattomien laitteiden kokoa.

10 Lähteet

- [1] Justin R. Farmer. 2007. Thesis - A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues. Blacksburg, Virginia Tech.
- [2] Metson kotisivut – Metso lyhyesti. [Online] [Viitattu 20.12.2009].
http://www.metso.com/fi/corporation/about_fin.nsf/WebWID/WTB-041026-2256F-55957?OpenDocument.
- [3] Metso Automation sisäiset nettisivut. 2009. Kattavampi-ABL-kuvaus.doc. Metso Automation Oy. <http://intra.metsoautomation.com>.
- [4] Wikipedia – Piezoelectricity. [Online] [Viitattu 10.3.2010].
<http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>.
- [5] All About Circuits. [Online] [Viitattu 10.3.2010].
http://www.allaboutcircuits.com/vol_6/chpt_5/6.html.
- [6] Wikipedia – Thermoelectric effect. [Online] [Viitattu 10.3.2010].
http://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect.
- [7] Shashank Priya, Daniel J. Inman. 2009. Energy Harvesting Technologies. Blacksburg, Virginia Tech. Springer, ISBN 978-0-387-76463-4.
- [8] Wikipedia – Coulomb. [Online] [Viitattu 7.4.2010].
<http://en.wikipedia.org/wiki/Coulomb>.
- [9] Wikipedia – Low self-discharge NiMH battery. [Online] [Viitattu 7.4.2010]. http://en.wikipedia.org/wiki/Low_self-discharge_NiMH_battery.
- [10] HART Communication Protocol. [Online] [Viitattu 23.4.2010].
<http://www.hartcomm.org>.

- [11] Analog Services, Inc. About HART. [Online] [Viitattu 23.4.2010].
http://www.analogservices.com/about_part0.
- [12] EmSyS. Wireless HART Development Design Documents. Metso Automation Oy.
- [13] Dust Networks. WirelessHART Mote, M2510-datasheet.
- [14] Linear Technology. LTC3105-datasheet.
- [15] Wikipedia – Photovoltaics. [Online] [Viitattu 28.4.2010].
<http://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaics>.
- [16] Nancy J. Dudney. Syksy 2008. Thin Film Micro-Batteries. The Electrochemical Society Interface.
- [17] iMechanica – Revision of Journal Club Theme of March 2009: Mechanics Issues in Nanocapacitors and Ramifications for Energy Storage. [Online] [Viitattu 14.5.2010].
<http://imechanica.org/node/4939/revisions/11120/view>.
- [18] Gramanage – Ragone plot. [Online] [Viitattu 14.5.2010].
http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Energy_storage&B&Ragone.
- [19] Excellatron – Advantage of Thin Film Batteries. [Online] [Viitattu 14.5.2010]. <http://www.excellatron.com/advantage.htm>.
- [20] Wikipedia – Entropy. [Online] [Viitattu 24.5.2010].
<http://en.wikipedia.org/wiki/Entropy>.

- [21] Wikipedia – Exergy. [Online] [Viitattu 24.5.2010].
<http://en.wikipedia.org/wiki/Exergy>.
- [22] Randy Frank – Energy Harvesting: A Game Changing Technology. [Online] [Julkaistu 10.4.2009]. <http://www.sensormag.com/sensors-mag/energy-harvesting-a-game-changing-technology-5836>.
- [23] Nextreme. eTEG UPF40 -datasheet.
- [24] G. Jeffrey Snyder & Eric S. Toberer. 2008. Nature Materials 7.
- [25] Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS. 08/2008. Integration of Energy Harvesting Systems.
- [26] ND9000-venttiilinohjaimen datalehti.
- [27] Metso. [Online] [Viitattu 4.6.2010].
http://www.metso.com/Automation/valve_prod.nsf/WebWID/WTB-041120-2256F-51B79.
- [28] The Brainstorm: Future Of Energy Harvesting. [Online] [Viitattu 6.6.2010]. <http://www.pddnet.com/news-bs-print-08-the-brainstorm-future-of-energy-harvesting-082709/>.
- [29] Mikko Hautala ja Hannu Peltonen. 2007. Insinööri (AMK) FYSIIKKA OSA I. Saarijärven OFFSET OY, Saarijärvi. ISBN 978-952-5191-18-9.
- [30] Wapedia – Lämpöoppi. [Online] [Viitattu 6.6.2010].
<http://wapedia.mobi/fi/Lämpöoppi>.