

Tero Kaarlela

Energiankeruu teollisuuden sensoriverkon tarpeisiin

Tietotekniikan
pro gradu -tutkielma
26. marraskuuta 2018

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Tekijä: Tero Kaarlela

Yhteystiedot: tero.kaarlela@gmail.com

Puhelinnumero: 040 590 6764

Ohjaaja: Ismo Hakala

Työn nimi: Energiankeruu teollisuuden sensoriverkon tarpeisiin

Title in English: Energy harvesting for industrial WSN

Työ: Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

Sivumäärä: 59

Tiivistelmä: Tässä tutkielmassa perehdytään energiankeruumenetelmiin jotka soveltuvat teollisuuden langattoman sensoriverkon tarpeisiin. Työssä käydään läpi sensoriverkkojen yleisiä käsitteitä, arkkitehtuuria sekä rakennetta, perehdytään yleisiin energiankeruumenetelmiin ja niiden käytännön sovelluksiin sekä energian varastointiin akun tai kondensaattorin avulla. Lopuksi suoritetaan käytännön mittauksia teollisuusympäristössä. Teoriaan perehdytään käymällä läpi tutkimusmateriaalia joka liittyy energiankeruumenetelmiin, sekä tutkimalla langattomien sensoriverkkojen käytännön sovelluksia, joissa tehokas energiankeruu on ollut avainasemassa.

Avainsanat: WSN, sensoriverkko, energiankeruu, teollinen

Abstract: This thesis studies energy harvesting methods suitable for WSN in industrial environment. We will cover common terms, architecture and structure of wireless sensor networks, general energy harvesting methods, first theoretically and after in practice. We will study theory of energy harvesting by concentrating on research material that is based on energy harvesting studies. Energy storing with battery or condensator is also covered. After that we will preview some practical examples of wireless sensor networks, that utilize energy harvesting as important part of operation.

Keywords: WSN, sensor, network, energy, harvesting, industrial

Copyright © 2018 Tero Kaarlela

All rights reserved.

Esipuhe

Valitsin tämän aiheeksi koska minulla on aiempaa kokemusta teollisuuden kunnossapito tehtävistä. Näin koen että voin yhdistää oman työkokemukseni ja sensoriverkkojen maisteriohjelmassa saamani koulutuksen. Haluan kiittää vaimoani Mari-
kaa pitkämielisyydestä opiskeluni ja etenkin tämän tutkielman kirjoituksen aikana. Haluan kiittää myös Elina Mäkitaloa, Ismo Hakalaa ja Jukka Ihalaista kannustamisesta sekä ohjaamisesta opinnoissani.

Sanasto

ADC	Analog To Digital Converter
Arduino	Avoimeen laitteistoon perustuva mikrokontrolleri-alusta
DC	Tasajännite
Eclipse	Avoimeen lähdekoodiin perustuva kehitysympäristö
FFD	Full functionality device
Flash- muisti	Haihtumaton ohjelmamuisti
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Kaksijohtiminen sarjaväylä
IO	Input/Output. Tulo- ja lähtöliitännät
IPv6	Internet protocol version 6
Launchpad	Texas Instrumentsin valmistama mikrokontrolleri-alusta
LoraWAN	Low Range Wide Area Network
MAC	Medium Access Control on IEEE 802. verkoissa verkon varaamisen ja liikennöinnin hoitava osajärjestelmä.
MIPS	Miljoonaa käskyä sekunnissa. Prosessorien tehon laskentatehon vertaamiseen käytetty yksikkö

MSP430	Texas Instrumentsin 16-bittinen mikro-ohjainperhe
PHY	Fyysinen kerros
RAM	Random Access Memory käyttömuisti
RF	Radio frequency
RFD	Reduced functionality device
SPI	Kolme johtiminen, synkroninen sarjaväylä
TV	Televisio
WiFi	Technology for radio wireless local area networking
WSN	Wireless Sensor Network eli Langaton sensoriverkko joka koostuu noodeista jotka mittaavat jotakin fyysistä suuretta kuten esimerkiksi lämpötilaa.
ZigBee	Energiatehokas lyhyen kantaman radioverkkoprotokolla

Sisältö

Esipuhe	i
Sanasto	ii
1 Johdanto	1
2 Langattomat sensoriverkot	3
2.1 Sensorinoodin rakenne	4
2.2 Teollisuuden erityisvaatimukset	4
2.3 Itsejärjestyvyys ja vikasietoisuus	5
2.4 Energiatehokkuus	5
3 Langattomien sensoriverkkojen arkkitehtuuri	7
3.1 Laitteistoarkkitehtuuri	7
3.1.1 Mikrokontrolleri	8
3.2 Ohjelmistoarkkitehtuuri	8
3.2.1 Käyttöjärjestelmä	9
3.3 Verkkoarkkitehtuuri	10
3.3.1 IEEE 802.15.4-standardi	11
3.3.2 ZigBee	11
3.3.3 6LoWPAN	12
3.3.4 WirelessHART	12
3.3.5 LoRa	13
3.3.6 Verkkotopologiat	13
4 Energiankeruu ja -varastointi	15
4.1 Energiankeruuarkkitehtuurit	15
4.2 Valoenergia	16
4.2.1 Valoenergian keruu	16
4.2.2 Valoenergian keruu käytännössä	17
4.3 Tärinä- ja liike-energia	18

4.3.1	Tärinä- ja liike-energian keruu	19
4.3.2	Tärinä- ja liike-energia keruu käytännössä	20
4.4	Termoenergia	21
4.4.1	Termoenergian keruu	21
4.4.2	Termoenergian keruu käytännössä	23
4.5	RF-energia	24
4.5.1	RF-energian keruu	24
4.5.2	RF-energian keruu käytännössä	25
4.6	Energiankeruumenetelmien yhdistäminen	27
4.7	Yhteenvedo energiankeruumenetelmät	28
4.8	Energian varastointi	29
4.8.1	Ladattavat akut	29
4.8.2	Kondensaattorit	30
4.8.3	Yhteenvedo energianvarastointi	31
5	Energiankeruumenetelmien vertailu teollisessa ympäristössä	32
5.1	Toteutusympäristö	32
5.2	Laitteisto	33
5.2.1	Mikrokontrolleri	35
5.2.2	Energiankeruupiirit	36
5.2.3	VLT-9001 piezosähköinen energiankeruulaite	36
5.2.4	Ohjelmointiympäristö	37
5.3	Energiankeruumittaukset	38
5.3.1	Valoenergia	38
5.3.2	Tärinä	40
5.3.3	Termoenergia	42
5.3.4	Yhdistetty tärinä- ja termoenergia	44
5.4	Energiankeruumenetelmien vertailu	46
6	Yhteenvedo	48
	Lähteet	50

1 Johdanto

Langattomien sensoriverkkojen hyödyntäminen teollisuudessa lisääntyy kiihtyvää tahtia. Langattomia sensoriverkkoja käytetään automaatiossa, valvontajärjestelmissä sekä erilaisten tietoverkkojen toteuttamisessa. Langattomien ratkaisujen etuja ovat edullisuus, asennuksen helppous, liikuteltavuus ja muunneltavuus. Laitteiden fyysisen koon, virrankulutuksen ja hinnan pienentyessä, prosessorien ja radiolähettimien suorituskyvyt kasvavat. Laitteet muuttuvat siis koko ajan energia- ja kustannustehokkaammiksi, mutta samalla prosessointi- ja lähetystehot kasvavat. Tämän vuoksi niiden soveltaminen teollisuuden eri aloilla kasvaa kiihtyvää tahtia. Teollinen internet on jo nykypäivää: robotit, CNC-koneet, kulunvalvonta ja automaatio on kytketty internet-verkkoon monissa tehtaissa [7]. Näillä laitteilla on yhteys pilveen ja sitä kautta niiden data on hyödynnettävissä toiminnanohjausjärjestelmissä, tuotannosuunnittelussa sekä reaaliaikaisessa tuotannon seurannassa. Monista tehtaista on olemassa niin sanottu virtuaalinen kaksonen, jota voidaan hyödyntää monin eri tavoin. Esimerkiksi tuotantosolujen virtuaalisella mallilla, voidaan simuloida tietyn työn vaiheita ennen työn aloitusta ja näin suunnitella tuotantoa etukäteen. Laitteet kommunikoivat myös keskenään, ohjatakseen tuotantoa reaaliaikaisesti ja saavuttaakseen optimaalisen tuotantovirran.

Useimmiten sensorinoodien virtalähteenä on paristo. Pariston käyttö virtalähteenä johtaa usein noodin suurempaan fyysiseen kokoon, nostaa valmistuskustannuksia, lyhentää käyttöikää sekä asettaa rajoituksia tiedonsiirrolle. Kun toimitaan ehtyvän pariston varassa, tiedonsiirto pyritään pitämään mahdollisimman vähäisenä energian säästämiseksi. Vaihtoehtona paristolle on energiankeruu sensorinoodien toimintaympäristöstä. Jos noodin toimintaan tarvittava energia saadaan kerättyä toimintaympäristöstä, seurauksena on kustannustehokkaampi, pienempi ja suorituskykyisempi sensoriverkko. Laitteet ovat myös ympäristöystävällisempiä koska ne eivät sisällä ongelmajätteenä luokiteltavaa paristoa.

Tehdas on monessa suhteessa elektronisille laitteille haastava toimintaympäristö. Suuret lämpötilojen vaihtelut, tärähtelyt, pöly, lika sekä elektromagneettiset häiriöt asettavat langattomille laitteille kovat vaatimukset. Toisaalta tämä ympäristö antaa myös mahdollisuuksia energiankeruun suhteen. Monissa teollisuuden tuo-

tantokoneissa on paljon osakokoonpanoja, joissa pyörivä liike aiheuttaa värinöitä. Esimerkkinä poltto- ja sähkömoottorit, joiden pyörivä liike ja epätahtisuus tai -tasapaino johtaa värinään. Koneissa on usein myös pintoja, jotka ovat huomattavasti ympäristöä kuumempia tai kylmempiä. Tässä työssä keskitymme näiden värinöiden ja lämpötilaerojen hyödyntämiseen energianlähteinä. Tavoitteenamme on selvittää voidaanko teollisuusympäristössä kerätä tarpeeksi energiaa langattoman sensoriverkon noodien tarpeisiin. Tutkimme energiankeruumenetelmiä kuten valoenergia, RF-energia, termoenergia, liike-energia ja värinäenergia. Jokin näistä tekniikoista tai näiden tekniikoiden yhdistelmästä, voi mahdollistaa sensorinoodien toiminnan ilman paristoa teollisessa ympäristössä.

Työn tavoitteena on selvittää käytännön mittauksilla, mitkä energiankeruumenetelmät ovat sopivia teollisen sensoriverkon noodin tarpeisiin. Toisin sanottuna mitkä ovat ne energiankeruumenetelmät, jotka tuottavat tarpeeksi energiaa sensorinoodin tarpeisiin. Työ etenee siten, että aluksi perehdytään langattomien sensoriverkkojen periaatteeseen ja käsitteisiin. Käydään läpi yleisiä vaatimuksia langattomille sensoriverkoille, sekä teollisuusympäristöjen asettamia erityisvaatimuksia. Tarkastellaan sensoriverkkojen laitteisto-, verkko- ja ohjelmistoarkkitehtuuria. Tavoitteena on luoda lukijalle kokonaiskuva langattomista sensoriverkoista, niiden tarpeellisuudesta ja teollisuuden vaatimuksista. Seuraavaksi käsitellään yleisiä energiankeruumenetelmiä, viimeaikaisia energiankeruuseen liittyviä tutkimuksia sekä käytännön sovelluksia joissa langattomat sensoriverkot hyödyntävät energiankeruuta. Luvussa 5 keskitytään mittauksiin käytännössä ja lopuksi niiden yhteydessä tehtyjen havaintojen pohtimiseen.

Käytännössä havaittiin, että useista eri vaihtoehdoista termoenergia on tällä hetkellä toimivin ratkaisu teollisuuden sensoriverkkojen tarpeisiin. Lähteitä termoneergian keruulle on teollisuudessa runsaasti ja ne tuottavat tarpeeksi energiaa sensoriverkon noodin tarpeisiin.

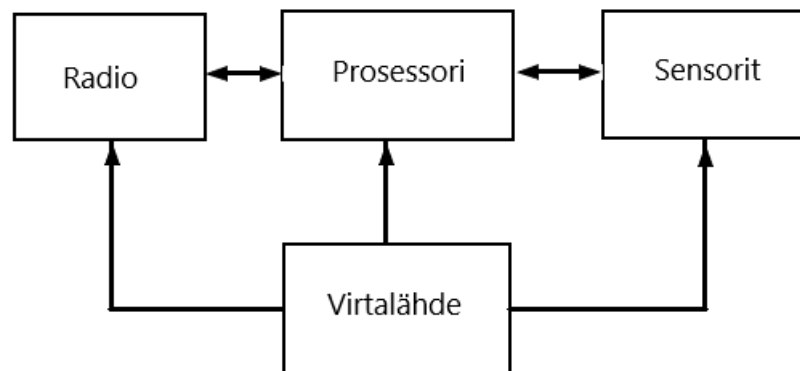
2 Langattomat sensoriverkot

Langaton sensoriverkko (Wireless Sensor Network) koostuu sensorinoodista, jotka integroituvat ympäristöönsä ja mittaavat yhtä tai useampaa fyysistä suuretta. Sensorinoodit on sijoitettu fyysiseen ympäristöönsä hajautetusti, ne muodostavat verkon toistensa kanssa ja välittävät tietoa toistensa kautta. Niiden mittaama suure voi olla esimerkiksi lämpötila, valoisuus tai ilmankosteus. Voidaan ajatella, että sensoriverkon kaikki noodit suorittavat yhtä yhteistä tehtävää, esimerkiksi tietyn alueen ympäristöolosuhteiden seuranta. Mittaustulos muunnetaan digitaaliseen muotoon ja lähetetään kerääjänoodille joko suoraan tai toisten sensorinoodien kautta. Kerääjänoodi on erityinen noodi, jonka tehtävänä on kerätä sensoriverkon mittaustiedot ja välittää ne käyttäjän saatavilla olevaan järjestelmään. Järjestelmä prosessoi tiedot ja sen jälkeen ne ovat käyttäjien saatavilla, esitettynä käyttötarkoituksen mukaisessa selkeässä muodossa.

Langattomille sensoriverkoille merkittäviä ominaisuuksia ovat energiatehokkuus, nopea käyttöönotto, itsejärjestyvyys ja vikasietoisuus. Sovellukset voivat olla yleisluontoisia ympäristön olosuhteita mittaavia tai hyvin kapeasti tiettyyn tarkoitukseen räätälöityjä ratkaisuja. Kaivosteollisuuden tarpeisiin kehitetty seulontaverkkojen kunnonseuranta [13], on hyvä esimerkki räätälöidystä sovelluksesta. Edellä mainitut ovat vain esimerkkejä mahdollisista käyttökohteista, teoriassa langattomien sensoriverkkojen käyttömahdollisuudet ovat lähes rajattomat. Käytäntö asettaa rajoituksia käytölle esimerkiksi käyttölämpötilan ja mekaanisten rasitusten suhteen. Langaton sensoriverkko on tutkimusaiheena suhteellisen tuore, joten uusia sovellusmahdollisuuksia löytyy edelleen jatkuvasti. Tekniikat ja protokollat kehittyvät jatkuvasti ja mahdollistavat tulevaisuudessa soveltamisen uusille osa-alueille. Näitä ovat esimerkiksi vedenalaiset sensoriverkot (UWSN), biolääketieteen sensoriverkot (BWSN), sekä aikakriittiset sovellukset, joissa tarvitaan reaaliaikaista tiedonsiirtoa ja prosessointia [22]. Langattomat sensoriverkot muodostavat teollisen internetin ja IoT:n ruohonjuuritason ja siksi ne ovatkin näiden alustojen tärkeimpiä rakennuspalikoita [7]. Tämän vuoksi langattomien sensoriverkkojen rooli on tärkeä IoT:n ja teollisen internetin kannalta.

2.1 Sensorinoodin rakenne

Sensorinoodi on fyysisesti pieni ja edullinen laite, joka toimii ohjelmoitavana laitealustana. Se sisältää yleensä neljä päälohkoa: virtalähde, radio, sensori(t) ja prosessori [1]. Virtalähde koostuu paristosta ja/tai energiankeruuyksiköstä. Virtalähde vastaa yksikön energiantarpeesta, joten laitteen saatavilla olevan energian määrä on siitä riippuvainen. Radio sisältää lähettimen ja vastaanottimen. Radion tehtävänä on lähettää sensorien ympäristöstä mitaama data järjestelmälle, ja/tai välittää toisilta noodeilta tuleva data eteenpäin. Sensorit mittaavat ympäristöstä haluttuja parametreja ja välittävät ne joko suoraan tai ADC-muuntimen kautta prosessorille. Prosessorilla on käytössään tarvittava määrä pysyväis- ja käyttömuistia sovelluksen suorittamista ja säilyttämistä varten. Sensorinoodin rakennetta on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 2.1.



Kuva 2.1: Sensorinoodin rakenne [1]

2.2 Teollisuuden erityisvaatimukset

Teollisuus asettaa laitteistolle kovemmat vaatimukset kuin toimisto- tai kotiympäristö. Tämä johtuu pääosin siitä, että ympäristö on fyysisesti vaativa. Lämpötilojen vaihtelut ovat suuria ja äkillisiä esimerkiksi nosto-ovien auetessa talvella. Työstökoneet aiheuttavat jatkuvia ja hetkellisiä tärähtelyitä. Lika, pöly ja ilmankosteus tuovat omat haasteensa, esimerkiksi koteloinnin suhteen. Ilmassa voi olla haitallisia kemikaaleja. Teollisessa ympäristössä esiintyy myös enemmän elektromagneettisia häiriöitä, jotka haittaavat langatonta tiedonsiirtoa, tai voivat jopa aiheuttaa laitteen vaurioitumisen. Nämä olosuhteet aiheuttavat kovia vaatimuksia noodian

suunnittelun ja valmistuksen kannalta. Toisaalta nämä olosuhteet ovat energiankeruun kannalta mahdollisuuksia. Lämpötilaerot, värinät ja mahdollisesti myös elektromagneettiset emissiot voivat toimia energiankeruun lähteinä. Teollisuudessa asetetaan usein myös kovat vaatimukset luotettavuuden ja aikakriittisyyden suhteen. Näillä vaatimuksilla turvataan koneiden parissa työskentelevien ihmisten turvallisuus. Näihin käyttökohteisiin langattomien sensoriverkkojen sovellukset eivät ainakaan vielä ole sopivia. Langattomien sensoriverkkojen sovellukset ovatkin hakenneet paikkansa teollisuuden sovelluksissa, joissa aikakriittisyys ei ole ratkaisevassa asemassa. Tällaisia ovat esimerkiksi tuotannon mittarointi ja datan kerääminen kunnossapidon tarpeisiin. Näissä käyttökohteissa helposti asennettavat langattomat laitteet ovat usein hyvä ratkaisu.

2.3 Itsejärjestävyys ja vikasietoisuus

Laajan maantieteellisen alueen tai suuren teollisen tuotantolaitoksen tarkkailemiseen vaadittava sensorinoodien määrä voi helposti olla tuhansia kappaleita. Tällaisen määrän hallinta ja konfigurointi manuaalisesti on vähintäänkin haastavaa, käytännössä jopa mahdotonta. Tämän vuoksi noodien ja koko verkon on oltava itsejärjestäytyvä ja konfiguroituva. Uusien noodien täytyy pystyä liittymään olemassa olevaan verkkoon automaattisesti, sekä noodien vioittuessa naapurinoodien on havaittava muutos ja järjestäydyttävä uudelleen [13]. Ensiarvoisen tärkeään asemaan tässä nousevat reititysalgoritmit. Niiltä vaaditaan paljon varsinkin fyysisesti lähikään olevien useiden naapurinoodien tapauksessa. Algoritmien avulla noodien on kyettävä laskemaan paras reitti monista lähes samanlaisista vaihtoehdoista.

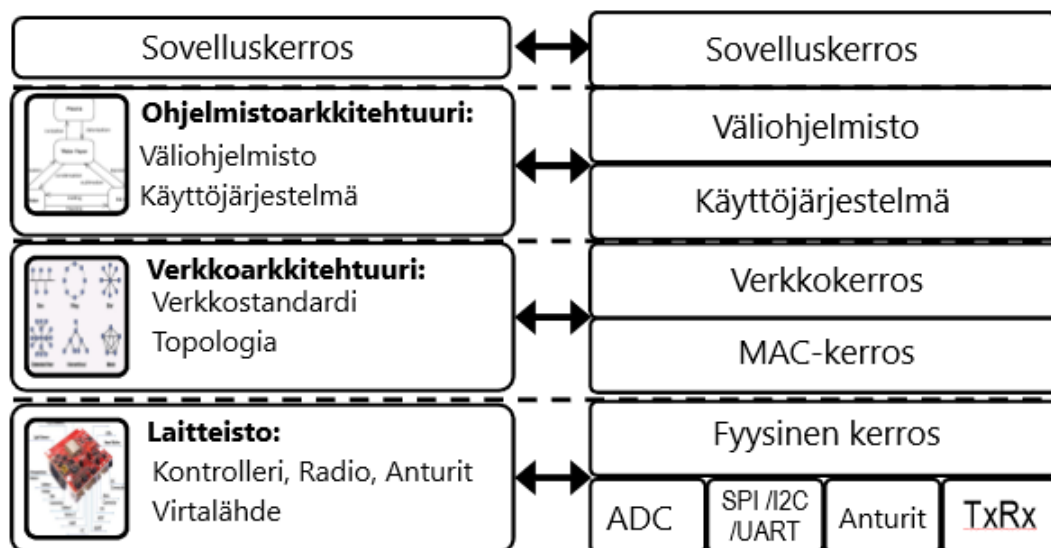
2.4 Energiatehokkuus

Langattomissa ratkaisuissa sensorinoodin energiatehokkuus on ollut pitkään merkittävässä asemassa [2]. Tämä on johtunut virtalähteenä toimivan pariston rajallisesta energiamäärästä. Käytännössä paristojen vaihtaminen laajan sensoriverkon noodeihin on kallis ja työläs toimenpide, joten noodit on suunniteltu toimimaan vuosia pienen pariston varassa. Jossain kohtaa pariston vaihto on kuitenkin ajankohtainen, ja se nostaa langattoman sensoriverkon ylläpitokuluja huomattavasti. Energiankeruun avulla tältä voidaan välttyä, koska paristoa ei enää tarvita energianlähteenä [13]. Johtuen radiopiirin suhteessa suuresta virrankulutuksesta, sovellukset on py-

rittä suunnittelemaan niin, että lähetyksiä tulee mahdollisimman vähän. Suurimman osan ajasta noodit ovat lepotilassa, jolloin virrankulutus on minimaalista. Energiankeruu ympäristöstä mahdollistaa laitteet, jotka toimivat ilman rajoituksia datan lähetyksen ja virran ehtymisen suhteen. Kun uusiutuvaa ja ilmaista energiaa on saatavilla runsaasti, laitteet voidaan suunnitella enemmän laadun kuin energiatehokkuuden näkökulmasta. Datan määrää lisäämällä saadaan väistämättä enemmän tietoa ympäristöstä ja laitteilla on silti rajoittamaton määrä energiaa käytössään.

3 Langattomien sensoriverkkojen arkkitehtuuri

Langattoman sensoriverkon arkkitehtuuri (Kuva 3.1) voidaan jakaa kolmeen osaluueeseen, eli laitteisto-, ohjelmisto- ja verkkoarkkitehtuuriin [13]. Nämä kaikki osaluueet limittyvät ja liittyvät toisiinsa, mutta niitä voidaan käsitellä erillisinä osina. Laitteistoarkkitehtuuri käsittää sensorinoodien ja kerääjänoodien laitteistotason. Usein kerääjänoodi on hyvin samankaltainen sensorinoodin kanssa. Sensorinoodista poiketen se sisältää liityntätavan toiseen verkkoon. Verkkoarkkitehtuuri käsittää topologian ja käytetyn langattoman standardin. Ohjelmistoarkkitehtuuri käsittää käyttöjärjestelmän, väliohjelmiston ja sovelluskerroksen.



Kuva 3.1: Langattoman sensoriverkon arkkitehtuuri, mukailten lähdettä [13]

3.1 Laitteistoarkkitehtuuri

Laitteistoarkkitehtuuriin kuuluvat mikrokontrolleri, radio, virtalähde ja sensorit. Virtalähteen tehtävänä on tuottaa noodin toimintaan tarvittava energia. Virtalähde voi olla paristo, verkkovirta tai energiankeruupiiri joka kerää energiaa ympäristöstä.

Sensorit mittaavat fyysistä suuretta kuten lämpötilaa tai valoisuutta. Radiota käytetään tiedonvälitykseen toisten nooidien kanssa. Mikrokontrollerin tehtävänä on koordinoita noodin toimintaa, kerätä sensorin mittaustietoa sekä ohjata radion lähetystä ja vastaanottoa.

3.1.1 Mikrokontrolleri

Käytännössä langattomien sensoriverkkojen mikrokontrollerien markkinoita hallitsevat Atmelin ATmega-sarja sekä Texas Instrumentsin MSP430. El Kouche [13] kertoo syynä olevan näiden laitteiden pieni virrankulutus, GNU perustaiset ilmaiset kääntäjät, hyvä tukiyhteisö ja niitä tukevat ilmaiset käyttöjärjestelmät kuten TinyOS. Näille molemmille mikrokontrollereille on myös saatavilla runsaasti esimerkki-sovelluksia ja kytkentäohjeita. Edellä mainitut seikat helpottavat kehitystyön aloittamista näille mikrokontrollereille.

ATmega perustuu 8-bittiseen RISC-ytimeen, jolla saavutetaan 1 MIPS:n laskentateho 1MHz kellotaajuudella [4]. Virrankulutus lepotilassa on 1.8 voltin jännitteellä 0.75 μ A ja aktiivisena samalla jännitteellä 1MHz taajuudella 0.2 mA. Pienin hyväksyttävä käyttöjännite on 1.8 V, mutta tällä jännitteellä maksimi kellotaajuus on 4 MHz [4].

MSP430 on Texas Instrumentsin valmistama 16-bittinen mikrokontrolleriperhe. Se perustuu Von Neumann arkkitehtuuriin ja kuten ATmega se on erittäin vähävirtaisen. Ytimellä saavutetaan sama teho kuin ATmegallakin eli 1 MIPS 1MHz taajuudella [4]. Virrankulutus lepotilassa 2.2 V jännitteellä on 0.5 μ A [37]. MSP430- ja ATmega-mikrokontrollerien eri versiot sisältävät yleensä samat oheislaitteet eli AD-muuntimet, UART, SPI ja I2C-väylät, ajastimet ja IO:t. RAM- ja flash-muistien määrät vaihtelevat versioittain.

3.2 Ohjelmistoarkkitehtuuri

Ohjelmistoarkkitehtuuri koostuu sensoriverkon käyttöjärjestelmästä ja väliohjelmistosta (Middleware). Käyttöjärjestelmä on matalimman tason ohjelmisto, joka on yhteydessä laitteistoon ja tarjoaa sen resurssit väliohjelmiston käyttöön. Väliohjelmisto toimii nimensä mukaisesti käyttöjärjestelmän ja sovelluskerroksen välissä. Se tarjoaa sovelluskerrokselle sen tarvitsemat palvelut, muuntamalla sovelluskerroksen pyynnöt matalan tason käyttöjärjestelmäkutsuiksi. Voidaankin ajatella että, välioh-

jelmisto sitoo yhteen korkean tason sovelluskerroksen ja matalan tason käyttöjärjestelmä- verkko- ja laitteistokerrokset.

3.2.1 Käyttöjärjestelmä

Käyttöjärjestelmän tehtävä on käytettävissä olevien resurssien hallinta ja jakaminen sovelluksille [16], jaettavista resursseista tärkeimpiä ovat muisti ja prosessori. Sovelluksen käynnistyessä käyttöjärjestelmä varaa sille tarvittavan alueen muistia, sekä jakaa osan prosessorin ajasta tälle sovellukselle. Näin useat eri sovellukset voivat toimia samaan aikaan yhdellä laitealustalla. Moniajo on käytännössä sitä, että prosessorin suoritusaikaa jaetaan sovellusten kesken vuorotellen. Käyttöjärjestelmän ydin on laiteajurien kautta yhteydessä laitteistoon ja tarjoaa sovelluksille laitteistoriippumattoman toimintaympäristön. Se tarjoaa joukon järjestelmäkutsuja, joilla sovellukset ovat yhteydessä laitteisiin, näin käyttöjärjestelmä jakaa myös IO-resurssit sovellusten kesken.

TinyOS [23] ja Contiki [11] kuuluvat ei-reaaliaikaisten käyttöjärjestelmien joukkoon. Näistä molemmat ovat avoimen lähdekoodin ohjelmistoja. TinyOS oli ensimmäinen langattomille sensoriverkoille suunnattu käyttöjärjestelmä, joten se edustaa lähes sensoriverkkojen standardikäyttöjärjestelmää. Se on hyvin dokumentoitu ja tuettu vaihtoehto. Suurimmat erot näiden kahden välillä ovat luultavasti käyttäjän kannalta siinä, että TinyOS on nimensä mukaisesti erittäin pieni ja kevyt käyttöjärjestelmä, joka sisältää peruskomponentit verkkoprotokollien sensorien ja datan keruun tarpeisiin. Contiki voidaan asentaa huomattavasti laajempaan sisältäen peruskomponenttien lisäksi TCP/IP-pinon, graafisen käyttöliittymä ja tarvittaessa webpalvelimen. Ohjelmointikielenä Contiki käyttää C-kieltä, TinyOS C-kielestä laajenuksella johdettua NesC:tä [16].

Nano-RK [15] poikkeaa edellä mainituista siinä, että se on reaaliaikainen käyttöjärjestelmä. Eli sitä voidaan käyttää aikakriittisissä sovelluksissa, kuten esimerkiksi langattomien multimediasensoriverkkojen sovelluksissa [16]. Aikakriittisiä sovelluksia ovat esimerkiksi turva-, kiinteistö- ja liikennevalvonnan ratkaisut [15]. Nano-RK ei tarjoa tiedostojärjestelmää, tietoturvaratkaisua tai muita palveluita. Mutta se tarjoaa moniajon, verkkopinon ja reaaliaikaisuuden.

Käyttöjärjestelmää ei ole pakko käyttää, sovelluksen voi rakentaa alusta alkaen tyhjästä. Saatavilla olevat käyttöjärjestelmät kuitenkin tarjoavat hyvän ohjelmistoaustan ja usein tarvittavat peruspalvelut, joten niiden käyttäminen helpottaa kehitystyötä. Nano-RK tarjoaa reaaliaikaisuuden, TinyOS ja Contiki taas tarjoavat laajan

palvelu- ja sovellusvalikoiman. Kaikki esitellyt käyttöjärjestelmät sisältävät virranhallinta ominaisuudet, jotka ovat tarpeen energiankeruusovelluksissa. Taulukossa 3.1 verrataan näiden käyttöjärjestelmien ominaisuuksia. Taulukosta selviää tukeeko käyttöjärjestelmä reaaliaikaisuutta ja/tai virranhallintaa, mitä palveluita se tarjoaa sekä kuinka paljon kyseinen käyttöjärjestelmä varaa flash-muistia.

Taulukko 3.1: Käyttöjärjestelmät [16]

Käyttöjärjestelmä	Reaaliaik.	Virranhal.	Muistin tarve	Palvelut
TinyOS	Ei	Kyllä	15 kilotavua	tiedostojärjestelmä simulointi turvallinen kommunikointi
Contiki	Ei	Kyllä	40 kilotavua	tiedostojärjestelmä simulointi turvallinen kommunikointi
Nano-RK	Kyllä	Kyllä	18 kilotavua	

Yksikään saatavilla oleva käyttöjärjestelmä ei ole optimaalinen kaikkiin sovelluksiin, vaan käyttöjärjestelmää valitessa täytyy vertailla niiden ominaisuuksia. Edellä esitetyistä kolmesta Nano-RK soveltuu parhaiten reaaliaikaisuutta vaativiin sovelluksiin kuten liikennevalvonta. TinyOS tarjoaa pienet resurssivaatimukset ja laajan tuen eri laitealustoille, Contiki taas tarjoaa laajan palvelu ja sovellusvalikoiman. Jokaisella käyttöjärjestelmällä on siis vahvuutensa ja heikkoutensa, joten valinta on hyvä kohdistaa sellaiseen, jonka hyvät puolet sopivat kehitettävään sovellukseen.

3.3 Verkkoarkkitehtuuri

Verkkoarkkitehtuuri määrittelee käytettävän verkkostandardin ja topologian. Verkkoarkkitehtuurin näkökulmasta langaton sensoriverkko käsittää kolme eri noodityyppiä: sensorinoodi, kerääjänoodi ja reititysnoodi [13]. Sensorinoodin tehtävänä on mitata fyysistä suuretta ja aika ajoin välittää mitattu tieto eteenpäin. Reititysnoodin tehtävänä on välittää sensorinoodien lähetykset kerääjänoodille. Kerääjänoodin tehtävänä on joko tallentaa tieto paikallisesti saatavaksi tai toimia yhdyskäytävä-

nä toisiin verkkoihin kuten Wifi. Kerääjänoodi voi myös lähettää datan suoraan pilvipalveluun. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään IEEE 802.15.4-standardi ja sitä täydentäviä standardeja, sekä LoRa joka ei perustu IEEE 802.15.4-standardiin. Suurimpana erona näiden välillä on että, Lora on laajaverkko (WAN) ja IEEE 802.15.4-standardiin perustuvat verkot ovat likiverkkoja (WPAN). Tällä viitataan siihen kuinka laaja sensoriverkko voi olla maantieteellisesti.

3.3.1 IEEE 802.15.4-standardi

IEEE 802.15.4-standardi kattaa langattoman verkon siirtoyhteyden eli MAC-kerroksen ja fyysisen kerroksen (PHY). Standardi esiteltiin vuonna 2003 ja sitä päivitettiin 2006 lisäämällä uusi modulointikaava sekä korjaamalla verkkoyhteyserroksen ongelmia [41]. 802.15.4-standardi määrittelee perustan vähävirtaisille ja kustannustehokkaille toteutuksille. Sen kohderyhmänä ovat juuri langattomat sensoriverkot, ja standardin lähtökohtana onkin ollut pieni virrankulutus ja pieni tiedonsiirtomäärä [13]. Standardi toimii pohjana esimerkiksi ZigBee, 6LoWPAN ja WirelessHART standardeille, jotka laajentavat 802.15.4-standardia lisäämällä siihen verkkoyhteyks- ja kuljetuskerrokset. 802.15.4-standardi määrittelee noodeille kaksi eri roolia: FFD:n (Full function device) ja RFD:n (Reduced function device) [41]. Näistä FFD voi toimia sekä sensorinoodina että kerääjänoodina. RFD:n rooli on pelkistetty, joten se voi toimia vain sensorinoodina. FFD käyttää kaikkia 802.15.4-standardin ominaisuuksia, vaatii sen vuoksi kuitenkin paljon muistia käyttöönsä. Se voi viestiä verkon kaikkien laitteiden kanssa, jotka ovat sen kantoalueen sisällä. FFD voi toimia verkon koordinaattorina, mutta tarvitsee enemmän tehoa kuin RFD. RFD käyttää vain 802.15.4-standardin vähimmäisominaisuuksia. Sen vuoksi sen muistin tarve on pieni. RFD voi viestiä vain FFD-laitteiden kanssa, sen vuoksi se ei voi toimia koordinaattorina. RFD on suurimman osan ajasta virransäästötilassa energian säästämiseksi.

3.3.2 ZigBee

ZigBee-standardin tämän hetkinen versio on 3, sitä kehittää yrityksistä koostuva ZigBee Alliance [7]. ZigBee täydentää 802.15.4-standardia lisäämällä siihen verkkoyhteyks- ja kuljetuskerrokset. Topologiat ovat ZigBee verkon vahvuus, vaihtoehtoina ovat tähti-, puu- ja hajautettu-topologia [7]. Näistä tärkein on dynaaminen hajautettu-topologia, jossa tietoliikenne voi kulkea usean noodin kautta. Tämän topologian

etuna on myös uudelleenreititys, eli jonkin noodin vikaantuessa liikenne ohjataan kulkemaan toista reittiä [7], tämä parantaa verkon luotettavuutta. ZigBeen huonona puolena on kuitenkin hitaus ja rajallinen yhteensopivuus muiden protokollien kanssa [7].

3.3.3 6LoWPAN

6LoWPAN (IPv6 Over Low power Wireless Personal Area Network) laajentaa 802.15.4-standardia lisäämällä sen MAC-kerroksen päälle adaptaatiokerroksen, joka purkaa ja pakkaa IPv6 paketit sopiviksi lähetystä ja vastaanottoa varten. IPv6 on uudempi versio vanhasta IPv4 standardista, jonka ongelmaksi muodostuivat 32-bittiset verkko-osoitteet [7]. Tämä rajoittaa osoitteiden määrän noin 4.3 biljoonaan, tämä on suhteellisen pieni määrä verkottuneessa yhteiskunnassamme. IPv6 ratkaisee muun muassa tämän ongelman 128-bittisellä verkko-osoitteella. IPv6:n sovittaminen langattoman sensoriverkon käyttöön sopivaksi ei ole helppoa, koska se tarvitsee 40-tavun otsikon ja 1280-tavun kokoiset paketit [13]. Verrattuna 802.15.4-standardin mukaiseen 127-tavun maksimi pakettikokoon tämä on yli kymmenkertainen. Tämän vuoksi tarvitaan tehokasta pakkaustekniikkaa, jotta IPv6 paketit saadaan liikumaan langattomassa sensoriverkossa [13]. 6LoWPAN:n etuna on, että se on internet-yhteensopiva. Noodeilla on toimivat IP-osoitteet, jotka mahdollistavat kommunikoinnin suoraan internet-verkon yli [7].

3.3.4 WirelessHART

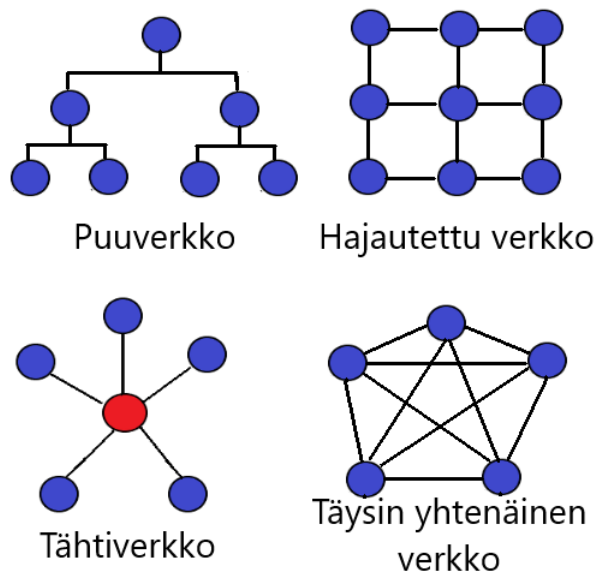
WirelessHART lisää langattomat ominaisuudet ja parannuksia aikaisempaan HART-tekniikkaan. WirelessHART on monessa suhteessa ZigBeen kanssa samankaltainen. Sen kehitykseen osallistuvat useat kaupalliset yritykset, se on rakennettu 802.15.4-standardin päälle ja se tarjoaa samat topologiat [13]. WirelessHART verkko on täysin aikasykronoitu, joten se mahdollistaa myös kerääjänoodien virransäästötilat [13]. Sen vuoksi kerääjänoodit voivat myös toimia pienellä virtamäärällä kuten paristolla. WirelessHART yhdistää aikajakaisen ja taajuusjakaisen monipääsytekniikan, eli jos yhdellä taajuudella on häiriöitä vaihdetaan toiselle taajuudelle. Tämä parantaa yhteyden luotettavuutta [7]. WirelessHART on teollisuuden tarpeisiin kehitetty langaton vaihtoehto HART-tekniikalle. WirelessHART on myös käyttäjätasolla taaksepäin yhteensopiva HART:n kanssa, joten yhteistoiminta vanhojen asennusten kanssa on mahdollista.

3.3.5 LoRa

LoRa eli LoRaWAN (Low Range Wide Area Network) on kaksisuuntainen tiedonsiirtoverkko, joka tarvitsee vähän tehoa [10]. Se on tarkoitettu pienien tietomäärien lähettämiseen pitkien välimatkojen päähän [7]. Sen kehitystä hallinnoi useista yrityksistä koostuva LoRa Alliance-järjestö. Suomessa LoRa-verkon tarjoaa käytännössä Digita, jolla on maassamme hyvin kattava LoRa-verkko. 802.15.4-yhteensopivista verkoista poiketen LoRa on tarkoitettu sensoriverkoille, joiden sensorinoodit ovat maantieteellisesti kaukana toisistaan. Esimerkiksi levittäytyneenä koko suomen alueelle. LoRa-verkot voivat olla myös mobiileja, eli kiinni liikkuvassa kalustossa. LoRa-verkossa lähetystiheydet ovat yleensä harvoja, lähetyksiä on noin 15 - 60 minuutin välein [10]. LoRan lisäksi Sigfox ja Weightless ovat myös vähävirtaisia laajan alueen WAN-verkkoja [7].

3.3.6 Verkkotopologiat

Langattomissa sensoriverkoissa käytetään yleisiä verkkotopologioita kuten kuvassa 3.2 esitetyt tähti, rengas, puu, hajautettu ja täysin yhdistetty. Sensoriverkko voi koostua myös eri topologioiden yhdistelmistä hierarkisesti järjestettynä. Sensorinoodilla on yleensä yhteys lähimpään noodinsa, joka välittää viestin eteenpäin seuraavalle noodille.



Kuva 3.2: Verkkotopologiat

Hajautetulla-topologialla toteutetut verkot voivat jakaantua erittäin laajalle alueelle ja niissä voi olla suuri määrä noodeja. Hajautetun-topologian etuna on viestien uudelleen reitityksen mahdollisuus jonkin noodin ollessa toimintakyvytön. Hajautetussa-topologiassa voi olla useita juurinoodeja, joten yhden vaurioituessa toinen juurinoodi voi ottaa sen tehtävät. Hajautetussa-topologiassa juurinoodia fyysisesti lähellä olevien noodien eheys ei ole verkon toiminnan kannalta kriittisempää kuin fyysisesti kauempana olevien. Tätä topologiaa käytetään yleensä silloin kun halutaan kattaa fyysisesti suuri alue sensoriverkolla.

Tähtitopologialla toteutetut verkot soveltuvat pienten alueiden verkkoihin, kuten kotiautomaation tarpeisiin. Tähtiverkko on haavoittuva koska keskusnoodin vikaantuessa koko verkko on toimintakyvytön. Tehokkuus, nopeus ja keskitetty hallinta ovat tähtiverkon etuja.

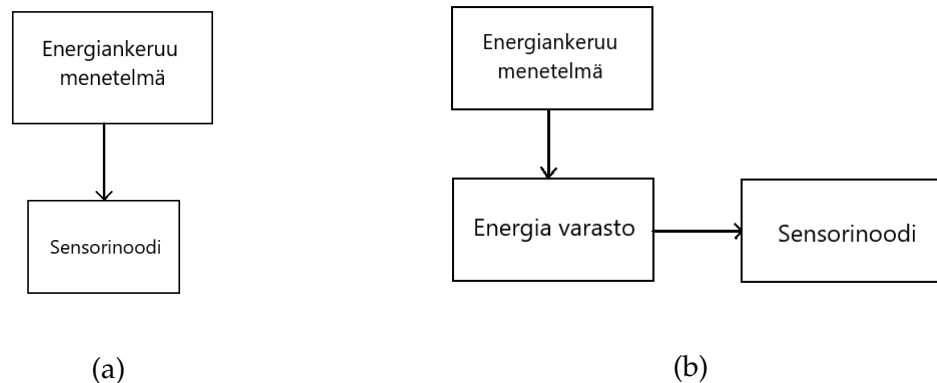
Puutopologia on tähtitopologiaa edistyneempi. Siinä juurinoodi toimii myös kerääjänoodina, toisten noodien ollessa yhteydessä toisiinsa suorien linkkien välityksellä

Usein etenkin laajojen verkkojen yhteydessä käytetään kahden tai useamman topologian yhdistelmää. Käytännössä silloin on kyseessä hybridiverkko, jossa eri topologioiden muodostamat aliverkot on yhdistetty.

4 Energiankeruu ja -varastointi

4.1 Energiankeruuarkkitehtuurit

Energiankeruuarkkitehtuurit voidaan jakaa kahteen pääkategoriaan: suora käyttö ja epäsuora käyttö [34]. Suoralla käytöllä tarkoitetaan sitä, että sensorinoodi käyttää energian heti keruun jälkeen. Tässä tapauksessa noodi toimii vain silloin kun energiaa on saatavilla, muina aikoina noodi ei ole toiminnassa. Esimerkiksi ulkona valosähköisellä energiankeruulla, noodi voi toimia vain silloin kun aurinko paistaa [5]. Tämä on täysin toimiva ratkaisu silloin, jos dataa halutaan kerätä vain näinä aikoina. Kun käytössä on energiankeruu mekaanisesta lähteestä esimerkiksi tärinästä, tämä voi olla käytännöllistä, koska sensorinoodi käynnistyy samalla kun laite jonka toimintaa valvotaan käynnistyy. Tässä tapauksessa energiankeruuelementin täytyy olla kiinnitettynä prosessiin, josta tietoa mitataan. Epäsuorassa käytössä energiankeruu tehdään varastoon, myöhempää käyttöä varten [34]. Vaihtoehtoja energian varastointiin ovat pääasiassa akut ja kondensaattorit [5]. Epäsuora käyttö on toimiva ratkaisu silloin, jos halutaan varmistaa sensorinoodin toiminta silloinkin, kun energiaa ei ole saatavilla ympäristöstä. Erilaisia energianvarastointi ratkaisuja käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.8. Kuvissa 4.1a ja 4.1b on esitetty suoran ja epäsuoran energiankeruun periaatteellinen ero.



Kuva 4.1: a) Suora energiankeruu b) Epäsuora energiankeruu

4.2 Valoenergia

Valosähköinen ilmiö mahdollistaa energiankeruun sekä luonnon valosta eli auringosta että keinotekoisesta valaistuksesta kuten loisteputkista. Auringonsäteily voidaan muuttaa sähköenergiaksi. Ulkoilmaan asennettavissa laitteissa tämä on ilmeinen energiankeruutekniikka [6]. Tekniikkana se on vanha, ranskalainen fyysikko Alexandre-Edmond Becquerel teki ilmiöstä ensimmäisen havainnon 1839 [40]. Vuosikymmeniä myöhemmin Yhdysvaltalainen Charles Fritts valmisti ensimmäisen toimivan valopaneelin vuonna 1883 [31]. Ensimmäinen nykyaikainen P-N-liitokseen perustuva ratkaisu saatiin aikaan 1954 Bell Laboratoriesin toimesta Yhdysvalloissa [28].

4.2.1 Valoenergian keruu

Valoenergian keruu perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa auringosta saapuvat fotonit muuttuvat sähköenergiaksi. Energian lähteenä voi olla joko auringon valo tai keinotekoinen valaistus [6]. Sisätiloissa saatavat tehot ovat huomattavasti auringonvaloa pienemmät. Ulkona voidaan pilvisyydestä riippuen saada jopa 10 mW/cm^2 tehoja. Sisätiloissa hyvällä valaistuksella jäädyään $10 \mu\text{W/cm}^2$ lukemiin [39]. Energia määrät ovat aika pieniä, mutta ovat kuitenkin täysin riittäviä sensoriverkon noodien tarpeisiin [5].

Käytännössä valoenergian keruu tapahtuu valopaneelilla, joka koostuu kahdesta kerroksesta puolijohtavaa materiaalia [5]. Näistä toinen kerros on P-tyyppiä ja toinen N-tyyppiä, useimmiten materiaalina käytetään monikiteistä piitä [18]. Edellä mainittuun P-N-liitokseen perustuu suurin osa nykyään käytössä olevista ratkaisuista, monikiteisen piin lisäksi käytetään myös yksikiteistä piitä ja amorfista piitä [18]. Niitä käytetään harvemmin, koska niiden valmistuskustannukset ovat monikiteistä piitä korkeammat [18]. Toisena vaihtoehtona ovat ohutkalvotekniikkaan perustuvat paneelit kuten Kadmium-Telluridi (CdTe) [18].

P-N-liitokseen perustuvien valopaneelien hyötysuhde on huono, tyypillisesti hyvissä olosuhteissa noin 5-30% [39]. Kalleimmilla ohutkalvotekniikkaan perustuvilla erikoispaneelilla päästään jopa 40% hyötysuhteeseen [5]. Nämä ratkaisut ovat kuitenkin liian kalliita ja monimutkaisia ajatellen tyypillisiä kuluttajalaitteita [5]. Tästä johtuen kuluttajalaitteissa paneelin on oltava pinta-alaltaan suhteellisen suuri, jotta saatava energiamäärä on kohtuullinen. Huonon hyötysuhteen lisäksi ongelmana on myös, että paneeli täytyy sijaita valoisessa paikassa ja olla suunnattuna valoon päin

[5]. Tämä voi olla ongelma ajatellen teollisuustiloja ja koneita, joissa olevat asennuskohteet sijaitsevat huonosti valaistuissa paikoissa. Paneelien pintaan tarttuva lika ja pöly heikentävät omalta osaltaan paneelien suorituskykyä. Ulkona tapahtuvaa keruuta ajatellen haasteena on myös auringon säteiden ja paneelin välinen kulma [20]. Tämä kulma vaikuttaa hyötysuhteeseen, ja saatava energiataso on parhaimmillaan auringon ollessa korkealla. Ajallisesti optimaalinen energiankeruu tapahtuu puolen päivän molemmin puolin, jolloin auringon kulma suhteessa maahan on lähes pystysuora [20]. Hyvänä puolena on se, että saatava jännite on tasajännitettä joten varauselektroniikka on yksinkertainen [6]. Myös energiansaannin ennakoitavuus varsinkin sisätiloissa tapahtuvaa energiankeruuta ajatellen, sekä koeteltu tekniikka puhuvat valoenergian keruun puolesta. Teollisuusympäristö asettaa kuitenkin omat haasteensa tälle tekniikalle kuten hämärät tuotantotilat, pölyiset olosuhteet ja valaistuksen kannalta huonot asennuskohteet. Teollisuusympäristössä ei voida hyödyntää ulkona saatavilla olevaa luonnollista valoenergiaa, joka on huomattavasti keinovalaistusta tehokkaampaa, vaan joudutaan tyytymään keinovalaistuksesta saatavaan energiaan.

4.2.2 Valoenergian keruu käytännössä

Valoenergian keruun käytännön esimerkeiksi on valittu kaksi sovellusta artikkelista [34]. Ensimmäinen on nimeltään Zebranet [43]. Kyseessä on seeproille rakennettu kaulapanta, jonka tarkoituksena on seurata niiden sijaintia ja käyttäytymistä. Pannassa on 14 aurinkokennoa, joista jokainen tuottaa 7 mA virran 5 V jännitteellä. Niiden yhteenlaskettu maksimi teho on 400 mW. Tällä ladataan 2Ah Li-ion kennoa, joka toimii varavirtalähteenä yöllä ja pilvisellä ilmalla. Tämä akku riittää 72 tunnin toimintaan ilman auringonvaloa pannassa olevalle GPS-noodille, joka perustuu MSP430-kontrolleriin ja GPS-sensoriin [34]. Kuvassa 4.2 näkyy asennettu Zebranet sensorinoodi. Sovelluksessa käytettiin energiankeruuta pääasiassa siksi että sitä oli runsaasti saatavilla ympäristöstä. Seeprojen elinalueilla auringonvaloa on saatavilla suuren osan vuorokaudesta ja sen saatavuus on helposti ennustettavissa. Toisena syynä on se että paristojen vaihtaminen seeprojen kaulapantoihin olisi mittava ja kallis operaation. Käyttämällä energiankeruuta saadaan sensoriverkon ylläpitokulut pidettyä matalina, koska paristoja ei tarvitse vaihtaa.

Toinen esimerkkisovellus on Hydrowatch [35]. Tämä sovellus mittaa ilman suhteellista kosteutta sekä lämpötilaa. Hydrowatch sensoriverkko asennettiin sekä kaupunkiin että metsistöön. Tämän sensoriverkon tehtävänä on kerätä dataa sääolosuh-

teista. Energian noodit keräävät n. 60 X 60 mm kokoisella aurinkokennolla. Aurinkokenno tuottaa teoriassa enintään 276 mW tehon, jolla on tarkoitus ladata 2.5 Ah NiMH-akku. NiMH-akku valittiin tähän sovellukseen sen yksinkertaisen latauselektroniiikan vuoksi. Käytännössä kaupungissa saatiin kerättyä energiaa auringosta vähintään puolen tunnin ajan joka päivä. Päivittäiseksi energiamääräksi muutettuna tämä on 130 mW teho, mikä oli enemmän kuin ryhmän tavoitteena ollut 79.2 mW päivässä [34]. Ympäristön tilaa mittaava langaton sensoriverkko voi olla alueellisesti ja lukumäärällisesti erittäin laaja. Energiankeruulla on tässäkin sovelluksessa laskettu ylläpitokuluja, jotka koituisivat paristojen vaihdosta. Toisina syinä luonnossa helposti saatavilla oleva aurinkoenergia, ja se että sen hyödyntämiseen tarvittavat laitteet ovat edullisia.



Kuva 4.2: Zebranet panta [43]

4.3 Tärinä- ja liike-energia

Liike-energian keruu on mahdollista kaikkialla missä on liikettä. Ihmisen liikkeestä latautuvat taskulamput ovat tämän tekniikan hyödyntämisestä hyvä esimerkki. Teollisuusympäristöistä löytyy myös paljon laitteita, joiden liikkeestä on mahdollista kerätä energiaa. Tässä alaluvussa esitellään erilaisia tekniikoita energiankeruuseen liikkeestä ja tärinästä, sekä sitä mitkä ovat mahdolliset kohteet energiankeruulle teollisuudessa.

4.3.1 Tärinä- ja liike-energian keruu

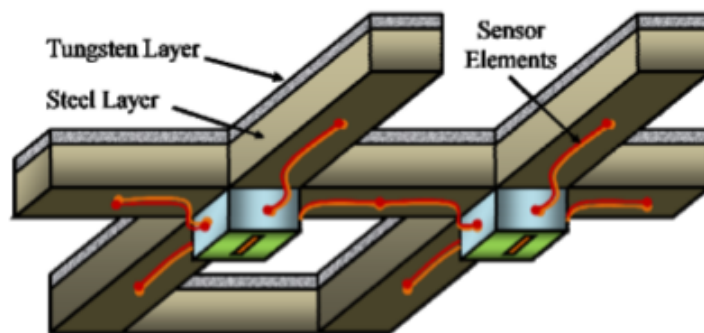
Liike-energian muuttaminen sähköenergiaksi voidaan tehdä joko elektrostaattisesti, piezosähköisesti tai elektromagneettisesti [39]. Seuraavaksi keskitytään ensin elektromagneettiseen ratkaisuun, joka perustuu yksinkertaisesti magneetin liikkumiseen suhteessa sähkökelaan. Tämä saa aikaan magneettivuon, joka puolestaan synnyttää vaihtojännitteen kelaan. Resonanssitaajuus saadaan säädettyä käyttötapaukseen optimaaliseksi käyttämällä joustaa ja tarkoin valitun painoista magneettia. Käytännössä elektromagneettiset keruuelementit ovat tehokkaita, mutta valmistusteknisistä syistä ne ovat kookkaampia kuin elektrostaattiset ja piezosähköiset keruuelementit. Tällä hetkellä pieniä mikrokoneistettuja keruuelementtejä on varsin vähän, ja niistä on saatu vähäisiä tehoja [39]. Liike-energian keruusta on julkaistu paljon mitaustuloksia, mutta olosuhteet kuten taajuus ja kiihtyvyyden vaihtelevat, joten vertailu ei ole yksiselitteistä. Tällä hetkellä ihmisen liikkeestä kerättävä energiamäärä on noin $4 \mu\text{W}$ luokkaa keruuelementin neliösenttimetrin pinta-alaa kohti [39]. Tehokkaimmat piezo ja elektrostaattiset keruuelementit tuottavat kymmenien milliwattien tehon. Pinta-alaa näillä on $200\text{--}300 \text{ cm}^2$. Kuitenkin näin tehokkaat keruuelementit ovat vielä kalliita, joten ne eivät käy kuluttajalaitteisiin. Vullers et al [39] uskovat että mikrokoneistustekniikan kehittyessä elektromagneettisten keruuelementtien ominaisuudet kehittyvät. He uskovat niistä tulevan kokoonsa nähden tehokkaita, ja tehoonsa nähden edullisia valmistaa.

Dang et al [9] tutkivat toista lähestymistapaa, joka on uusien materiaalien kuten PIN-PMN-PT kehittäminen. Tällä materiaalilla on erittäin hyvät sähkömekaaniset ominaisuudet. PIN-PMN-PT-materiaali on kuitenkin kallista, eikä sen vuoksi soveltu kuluttajalaitteisiin. Työssään Dang et al [9] valmistivat keruuelementin, jonka ytimenä käytettiin tästä materiaalista valmistettua kidettä. Parhaimmillaan ryhmä [9] sai mitattua jopa 78mW tehoja, tämä on hyvä lukema ottaen huomioon keruuelementin fyysisen koon. Keruuelementti oli vain 44mm halkaisijaltaan ja sen kokonaiskorkeus oli 54mm .

Tärinä ja liike-energian keruu voi olla mahdollista teollisuusympäristöissä koska niissä on paljon eri taajuuksilla täriseviä ja liikkuvia koneita. Artikkelissa [39] esitelty perinteinen sähkömagneettinen menetelmä tulee varmasti kehittymään ja siten säilyttämään asemansa myös tulevaisuudessa. Sen hyödyntäminen tulee lisääntymään tulevaisuudessa myös teollisuusympäristöissä. Artikkelissa [9] esitelty erikoismateriaaliin perustuva ratkaisu voi toimia kohteissa, joissa kustannukset eivät ole määräävä tekijä.

4.3.2 Tärinä- ja liike-energia keruu käytännössä

Liike-energian keruusovelluksia on useita niin kuluttaja- kuin teollisuuselektronii- kan parissa. Kuluttajaelektronii-kan sovelluksista esimerkiksi liikkeestä latautuvat taskulamput ja lenkkiossujen pohjaan rakennetut laitteet [42]. Esimerkkinä tärinäe- nergian keruusta on kaivosteollisuuden sovellus, jossa täryseulaan asennetut sen- sorinoodit keräävät tarvitsemansa energian erotteluprosessista [14]. Sovelluksessa noodit muodostavat sensoriverkon, jonka tehtävänä on seurata täryseulan verkon kulumisastetta. Sensorit välittävät datan tiedonkeruuyksikölle (sink), joka kytkey- tyy PC:hen USB-liitännän kautta. PC toimii Web-palvelimena, johon saa yhteyden millä tahansa internet-päätelaitteella. Tärinäenergian keruuta hyödyntävä virtaläh- de on työryhmän oma sovellus. Sen ja noodin tarvitsemat komponentit, sekä va- ravirtalähteenä toimiva akku on pakattu alumiinikoteloon, jonka koko on 25mm X 25mm X 25mm. Sensorien energiankeruuelementtinä toimii piezo-elementti, jo- ka saa liikkeen prosessista tapahtuvasta tärinästä. Keruuelementti varaa konden- saattoria, josta saadaan sensorinoodin käytön aikainen energia. Ylimääräinen virta ohjataan latautuvaan akkuun, jota käytetään varavirtalähteenä prosessin ollessa py- sähtyneenä. Alla olevassa kuvassa 4.3 on havainnollistettu sensoreiden asennus tä- ryseulan verkkoon. Kuvasta nähdään, että noodit on kiinnitetty verkon alapuolelle risteyskohtiin. Niistä lähtevät punaisella värillä merkityt johtimet kytkeytyvät var- sinaiseen sensoriin. Sensorinoodit ovat tässä sovelluksessa mekaanisesti vaativassa ympäristössä. Jatkuva tärinä ja kosteus vaativat tiiviin sekä lujan koteloinnin. Tä-ssä esimerkissä saatiin kerättyä tarpeeksi energiaa tämän langattoman sensoriverkon noodien tarpeisiin (6 μ W) [14]. Tarkkailtava prosessi itsessään tarvitsee voimakasta tärinää toimiakseen, ja sen vuoksi sitä oli saatavilla myös tässä toteutetun langatto- man sensoriverkon tarpeisiin riittävästi.



Kuva 4.3: Sensoreiden asennus [13]

4.4 Termoenergia

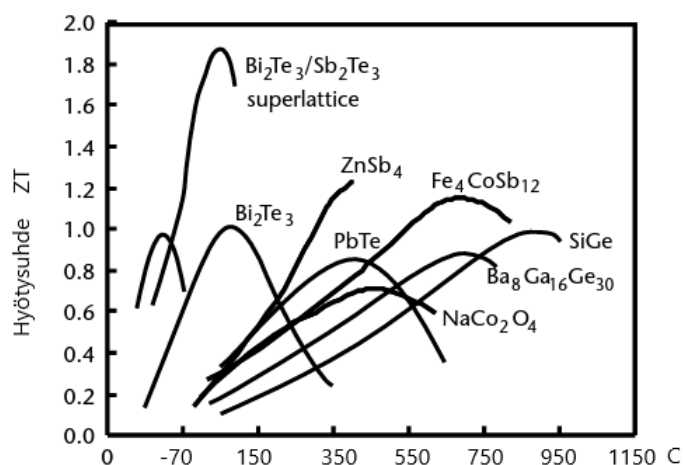
Termoenergiaa on saatavilla lähes kaikkialla, suurin osa tästä energiasta menee kuitenkin hukkaan [5]. Energiaa voitaisiin kerätä esimerkiksi ajoneuvojen moottoreista ja jäähdyttimistä, rakennusten lämmitys- ja ilmastointilaitteista. Termoenergiaa on siis saatavilla paikoissa, joissa on lämpötilaeroja ja laitteet termoenergian keruuseen ovat yksinkertaisia ja toimintavarmoja. Termoenergian keruusta tehtyjen tieteellisten julkaisujen määrä on ollut selvässä kasvussa vuosituhannen alusta asti [6]. Kiinnostavuutta termoenergian keruuta kohtaan lisäävät luultavasti juuri tekniikan yksinkertaisuus sekä keruukohteiden paljous. Teollisuudessa on paljon ympäristöä kuumempia ja kylmempiä pintoja, myös toimintavarmuus on teollisuuden sovelluksissa toivottava ominaisuus.

4.4.1 Termoenergian keruu

Termoenergian keruu perustuu Seebeck-ilmiöön, jossa lämpötilaero aiheuttaa jännitteen kahden eri materiaalin välille [6]. Tätä ilmiötä on käytetty kauan hyväksi esimerkiksi lämpötilan mittauksissa. Viime aikoina sitä on alettu käyttää myös energiankeruuseen. Keruelementin rakenne on yksinkertainen eikä sisällä lainkaan liikkuvia osia, tästä seuraa mekaanisesti kestävä laite. Keruelementin ytimenä on lämpöpari, joka muodostetaan yhdistämällä kaksi puolijohdetta toisiinsa metallisillalla [39]. Puolijohde materiaalit ovat P- ja N-tyyppiä, kuten kappaleessa 4.2 esitellyn valoenergian yhteydessäkin. Kytkemällä useita lämpöpareja sarjaan ja laittamalla niiden ylä- ja alapuolelle levyt saadaan muodostettua keruelementti eli lämpösähköparisto. Saatavaan tehoon vaikuttavat, lämpötilaero, keruelementin pinta-ala sekä valmistuksessa käytetyt materiaalit [5]. Esimerkiksi 1 cm² kokoisella elementillä saadaan 10 °C lämpötilaerolla kerättyä noin 30 μW teho [39].

Vullers et al [39] tekivät kaksi tärkeää havaintoa (i) saatu teho on suoraan verrannollinen levyjen väliseen etäisyyteen; (ii) Saatava jännite on riippuvainen kaavasta h/a^2 , kaavassa h on lämpöparin korkeus ja a on lämpöparin leveys. Joten jos kasvatetaan levyjen etäisyyttä toisistaan lisätehon vuoksi, tämä vaikuttaa jännitteeseen laskevasti. Tästä johtuen tasapainottelulle jännitteen ja tehon suhteen ei jää paljoa liikkumavaraa. Vaan näiden kahden parametrin optimaalinen risteyskohta on helppo hakea. Suurimmat tehoon vaikuttavat tekijät ovatkin käytännössä pinta-ala sekä lämpötilojen erotus. Näiden lisäksi tehoon voidaan vaikuttaa käytettävillä materiaaleilla, sekä sillä kuinka tiheästi lämpöpareja saadaan pakattua elementtiin. Yksi

tapa pakata lämpöpareja tiheämmin, on pakata ne pyöreäksi kelaksi [6]. Käytettäviä materiaalivaihtoehtoja on useita, ne eroavat toisistaan valmistuskustannusten, lämmönkeston ja sen osalta millä lämpötila-alueella niiden hyötysuhde on parhaimmillaan. Hyötysuhdetta kuvaa ZT-luku [6], tämä luku on vaihdellut perinteisesti välillä 0-2 materiaalista ja lämpötilasta riippuen. Viimeaikaisissa kokeiluissa nanotekniikalla on kuitenkin saavutettu lukuja jotka ovat olleet hieman yli 2 [19]. Alla olevassa kuvassa 4.4 on vertailtu eri materiaalien hyötysuhdetta ZT lämpötilan suhteen.

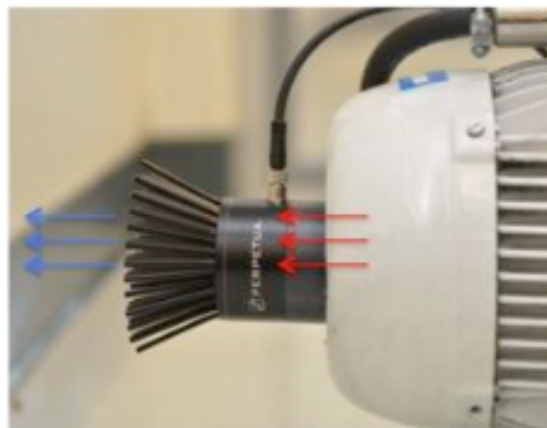


Kuva 4.4: Materiaalien ZT-luku suhteessa lämpötilaan, mukaillen lähdeä [5]

Kuvasta voidaan havaita, että tietyt materiaalit soveltuvat eri lämpötilaeroille. Esimerkiksi vismutin ja telluriumin-yhdiste (Bi₂Te₃) yhdessä antimonin ja telluriumin yhdisteen (Sb₂Te₃) kanssa omaa hyvän ZT-luvun lämpötilaerolla noin 28 °C. Tämän yhdisteen huono puoli on sen kapea lämpötila-alue. Kun taas puhtaalla Bi₂Te₃ yhdisteellä ZT-luku jää noin puoleen tästä, mutta lämpötila-alue on huomattavasti laajempi. Piin ja germaniumin yhdisteen (SiGe) paras hyötysuhde taas saavutetaan noin 900 °C tuntumassa. Materiaalin valinta onkin tehtävä käyttökohteessa olevan lämpötilaeron mukaan [6]. Termoenergian keruun tehokkuus on riippuvainen materiaalin ZT-kertoimesta, joka kuvaa materiaalin hyötysuhdetta. Viimeaikoina nanotekniikan avulla on päästy jo yli 2 ZT-kertoimeen, termoenergian keruun tehokkuuden kannalta nämä tulevaisuuden materiaalit ovatkin avainasemassa [6].

4.4.2 Termoenergian keruu käytännössä

Termoenergian keruu esimerkkinä on kaupallinen ratkaisu, eli Power Puck[®] keruu konsepti. Laitteen valmistaja on Perpetua Power Source Technologies Inc. Tuote on ollut markkinoilla jo useita vuosia ja se on suunniteltu langattomien sensoriverkkojen tarpeisiin[21]. Power Puck[®] soveltuu lämpötila alueelle $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja se on suunniteltu kestäämään teollisuusympäristöissä [38]. Laitteisto koostuu keruuelementistä, välikaapelista ja virtamoduulista. Keruuelementti voidaan adapterien avulla kiinnittää useisiin kohteisiin kuten putkiin, sähkömoottoreihin ja pumppuihin [38]. Adaptereita voidaan myös valmistaa itse, joten asennus useisiin kohteisiin on mahdollista. Kuvassa 4.5 laite on kiinnitetty sähkömoottoriin. Energiankeruu perustuu Seebeck-ilmiöön ja laite tarvitsee vain lämpötilaeron toimiakseen. Tämä laite on saanut jo vahvan jalansijan prosessiteollisuuden sovelluksissa. Tällä hetkellä sensorinoodeina toimivat suoraan Emerson Technologies:n valmistamat langattomat sensorit, kuten lämpötila, paine ja virtaus [38]. Virtamoduuli on suunniteltu sopivaksi Emerson:n valmistamien sensorien sisään, joten ratkaisu on helppo ottaa käyttöön. Tästä huolimatta Power Puck[®]:ia on helppo käyttää myös minkä tahansa muun sovelluksen kanssa. Tämä on huomattava tuote koska se on kaupallinen tuotteistettu energiankeruu konsepti, joka on suunniteltu teollisuusympäristöjä ajatellen. Konsepti soveltuu käytettäväksi myös muilla teollisuuden aloilla, ei pelkästään prosessiteollisuudessa.



Kuva 4.5: Power Puck[®] kiinnitettynä sähkömoottoriin [38]

4.5 RF-energia

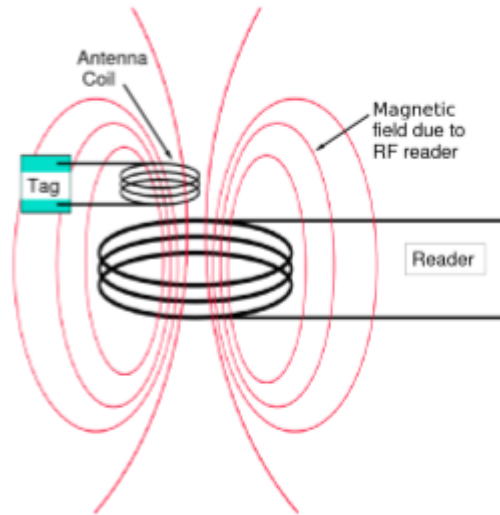
Induktiivinen johtuminen on menetelmänä tunnettu, se perustuu magneettikenttään ensiö- ja toisiokelojen välillä. Ensiökelassa vaikuttava virta siirtyy toisiokelaan johtumalla [6]. Samasta ilmiöstä on kyse myös RF-energian keruussa, erona on se että RF-energian keruussa kyse on säteilevästä energiasta, ei johtuvasta. Toisena erona on että, ensiöpuolella olevaan virtamäärään ei voi vaikuttaa, vaan on kerättävä kaikki saatavilla oleva energia. Säteilyn lähteinä RF-energian keruussa toimivat esimerkiksi GSM-, Wifi- ja TV-antennit tai RFID-tekniikassa tarkoituksellinen lähetin [17]. Seuraavassa alaluvussa tutkitaan asiaa tarkemmin tieteellisten artikkelien pohjalta.

4.5.1 RF-energian keruu

RF-energian keruu perustuu säteilevien radioaaltojen muuntamiseen sähköenergiaksi [6]. Tämä tapahtuu asettamalla energiankeruuantenni riittävän lähelle säteilyn lähdeä. Säteilevät radioaallot indusoituvat energiankeruuantenniin, keruun jälkeen energia tasasuunnataan RF-DC muuntimella ja käytetään tai varastoidaan [6]. RF-energian keruusta saatavat tehot ovat tyypillisesti aika matalia. Esimerkiksi matkapuhelimen antennista kerättävä teho on noin $0.1 \mu\text{W}$ [39]. Erikoisantenneilla on päästy jopa $3,5\text{mW}$ tehoihin, mutta välimatka lähteeseen on tällöin ollut alle metri [36].

RF-energian keruun yleisimmässä sovelluksessa eli RFID-tekniikassa, energianlähde on tarkoituksellinen. RFID-tekniikka mahdollistaa langattoman ihmisten ja esineiden tunnistamisen sekä seurannan [17]. Laitteet koostuvat RFID-tunnisteesta eli tägistä sekä lukijasta. Periaate on havainnollistettu kuvassa 4.6. Tässä tekniikassa passiivinen tunniste saa virtansa energiankeruun avulla lukijalta. Kun tunniste viedään lukijan antennin magneettikenttään, tunnisteen sisältämä mikropiiri saa energiaa ja lähettää muistissaan olevan datan radiolla lukijalle. Tällä tekniikalla toimivat esimerkiksi kulunvalvontajärjestelmät, ajoneuvojen ajonestojärjestelmät, sekä logistiikan pakettien seurantajärjestelmät [17]. RFID-tekniikassa käytetään monia eri taajuuksia sen mukaan kuinka kaukaa tunniste halutaan lukea. Tunnistusetäisyyteen voidaan vaikuttaa käytettävällä taajuudella. RFID-tekniikan taajuudet vaihtelevat välillä 125KHz - 960 MHz. Tunnistusetäisyydet vaihtelevat muutamasta senttimetristä aina 15 metriin saakka, taajuudesta riippuen [17]. Edellä mainitut etäisyydet ovat passiivisille tunnisteille ilmoitettuja. Kuvassa 4.6 on esitetty RFID-tekniikan periaate. RF-energian keruu on yksi langattoman tehon siirron muoto.

Energiankeruussa lähde ei kuitenkaan ole välttämättä tarkoituksellinen, vaan siinä pyritään hyödyntämään ympäristössä olevaa hukkaenergiaa esimerkiksi Wifi- ja GSM-antenneista [36]. Käytännössä tämä tapahtuu asettamalla energiankeruuantenni riittävän lähelle lähdeantennia.



Kuva 4.6: RFID-periaate [3]

RF-energian keruussa hyödynnetään siis ilmassa säteilevää radiotaajuisia energiaa. Tästä energiasta suurin osa menee hukkaan, vaikka se voitaisiin kerätä talteen. Tällä hetkellä kuitenkin riittäviä tehoja saadaan vain RFID-tekniikalla, jossa tehonlähde on tarkoituksellinen. Tahattomista säteilylähteistä saatavat energiamäärät ovat liian pieniä langattoman sensoriverkon tarpeita ajatellen. Saatava jännite täytyy myös tasasuunnata, joten tämän tekniikan vaatima elektroniikka on myös vaativampi kuin esimerkiksi valo- tai termoenergian keruussa.

4.5.2 RF-energian keruu käytännössä

RF-energian keruu esimerkiksi valittiin artikkelissa [36] tehty tutkimus, jossa työryhmä Lim et al tekivät tutkimustyötä RF-energian keruusta suurkaupungissa. Ryhmän tarkoituksena oli saada kerättyä mahdollisimman paljon Singaporen keskustassa säteilevästä RF-energiasta. Saatavilla olevasta RF-energiasta kuitenkin vain pieni osa voidaan hyödyntää, koska teho laskee nopeasti energiankeruuantennin ja energianlähteen välimatkan kasvaessa. Avoimessa tilassa kaava on $1/d^2$, jossa d on etäisyys energianlähteestä [36]. Saatavilla oleva teho putoaa 6dB joka kerta kun etäi-

syys kaksinkertaistuu [36]. Käytännön testissä Lim et al [36] saivat kerättyä 3,5mW tehon 0,6 metrin päässä energianlähteestä ja 1 μ W tehon 11 metrin päässä energianlähteestä. Näissä mittauksissa energianlähteenä oli 915MHz Powercast lähetin. Suurissa kaupungeissa RF-energian tehonlähteitä on paljon ja ne säteilevät energiaa eri suuntiin. Tehonlähteitä ovat edellä mainitut GSM-, TV- ja WiFi-antennit. Näistä lähtevä RF-energia kerätään keruuantennilla, muunnetaan RF-DC muuntimella oikeaan muotoon ja varastoidaan akkuun.

Tehokkaan RF-energian keruun teho on riippuvainen energiankeruuantennin ja RF-DC muuntimen tehokkuudesta sekä näiden yhteensovittamisesta. Näissä soveluksissa on käytetty usein ympyränmuotoista liimattavaa energiankeruuantennia [36]. Niissä on kuitenkin omat haasteensa kuten impedanssin sovitus, kiertopolarisaatio ja harmoniset yliaallot. Matalat indusoituvat jännitteet muodostavat myös teknisen ongelman, indusoituvan jännitteen täytyy olla yli 0.3V. Tämä on tasasuuntaussiltojen kynnysjännite, jonka täytyy ylittyä jotta silta toimii. Näitä ongelmia Lim et al [36] pyrkivät ratkaisemaan valmistamalla erikoisrakenteisen energiankeruuantennin, joka oli käännetty suorakaiteen muotoiseksi ja koostui kahdeksasta pienemmästä suorakaiteesta sekä kondensaattorista. Sen lisäksi rakennettiin tasasuuntaaja, joka koostui kahdeksasta samanlaisesta moduulista. Jokainen moduuli sisälsi diodit ja kondensaattorin. Näillä ratkaisuilla ryhmä pääsi hyviin tuloksiin, ja sai yli 0.5V jännitteitä neljännessä kerroksessa ilman lähellä olevia lähettäjiä. Tämä ratkaisu toimi parhaiten energiankeruuantennin ollessa avoimessa tilassa.

Artikkelissa [36] esitellyn perusteella voidaan päätellä, että RF-energian keruu on vielä hyötysuhteeltaan huono vaihtoehto sensoriverkkojen virranlähteeksi. Energia saadaan kerättyä tarpeeksi vain suurissa kaupungeissa, joissa lähettäjiä ja vastaanottimia on runsaasti. Tämän hetkisten tutkimusten perusteella, se ei ole käyttökelpoinen energiankeruumenetelmä teollisuusympäristöön. Täytyy kuitenkin huomata että, energiankeruuantenni on merkittävässä asemassa [6]. Joten jos antennitekniikoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia, tilanne saattaa hyvinkin muuttua. Merkittävässä asemassa on myös RF-DC muunnin ja sen yhteensovitus energiankeruuantennin kanssa [6]. Joten uudet integroidut RF-DC piirit voivat myös tehostaa energiankeruuta tällä menetelmällä [12]. Kuvassa 4.7 on esitetty tutkimuksessa [36] käytetty energiankeruuantenni.



Kuva 4.7: RF-energian keruuantenni [36]

4.6 Energiankeruumenetelmien yhdistäminen

Edellä mainittuja energiankeruumenetelmiä on myös mahdollista yhdistää. Esimerkiksi artikkelissa [12] tutkittiin RF- ja valoenergian keruun yhdistämistä. Eri energiankeruumenetelmien yhdistämisellä saavutetaan tehokkaampi energiankeruu ja varmistetaan energian saatavuus vaihtelevissa olosuhteissa. Esimerkiksi valojen ollessa sammutettuna niistä ei saada kerättyä energiaa silloin voidaan käyttää RF-energiaa, jota on saatavilla myös pimeällä. Voidaankin ajatella että, yöllä RF-energiasta saadaan tarpeellinen määrä energiaa laitteen ylläpitoon. Valoisaan aikaan yhdistämällä virtalähteet, saadaan tarpeeksi energiaa tehokäyttöä varten.

Toinen esimerkki yhdistää RF-energian ja termooenergian keruun. Lhermet et al:n tavoitteena oli valmistaa IC-piiri, joka sisältää RF-DC ja DC-DC muuntimet, latauksen hallinnan sekä sisäisen akun energian varastointiin [24]. IC-piiri kykenee hyödyntämään sitä virtalähdettä, josta energiaa on saatavilla kyseisellä hetkellä enemmän. Koneissa ja laitteissa värinä- ja lämpöenergian keruu voi olla toimiva yhdistelmä. Koneen käydessä tietyt osakomponentit kuten moottorit ja akselit aiheuttavat värinää. Koneissa on myös useita laajoja metallipintoja, jotka ovat kylmempiä tai kuumempia kuin ympäröivä ilma. Esimerkiksi hydraulijäähdytysjärjestelmän ja ympäröivän ilman lämpötilaero voi olla sisätiloissa jopa 80 °C. Ulkoilmassa talvella lämpötilaerot voivat olla vieläkin suuremmat. Säiliöissä on suorat laajat sivut, joten ne sopivat myös sen vuoksi hyvin Peltier-elementin asennukseen.

4.7 Yhteenveto energiankeruumenetelmät

Edellä tutkittiin muutamia yleisiä energiankeruumenetelmiä. Alla olevassa taulukossa 4.1 on kerätty yhteen tyypillisiä edellä mainituilla menetelmillä saatavia tehoja. Taulukon lopussa on arvioitu sensoriverkon noodin noin $100 \mu\text{W}$ kulutukseen tarvittavan keruelementin fyysistä kokoa. Kuten taulukosta selviää, kaikilla muilla energiankeruumenetelmillä elementin fyysinen koko on kohtuullinen paitsi RF-energian keruulla. Käytännössä keruuantennin fyysinen koko jää kohtuuttoman suureksi yhden noodin energian tuottamiseksi. Taulukossa 4.1 esitetyt teoreettiset lukemat termo- ja liike-energian keruun tehoiksi teollisessa ympäristössä ovat lupaavia. Kappaleessa 5 keskitytään aluksi käytännön mittauksiin ja lopuksi vertailaan tuloksia taulukossa 4.1 esitettyjen lukujen kanssa.

Alalukujen 4.2.2, 4.5.2, 4.3.2 ja 4.4.2 käytännön esimerkeistä selvisi, että energiankeruuta käytetään tällä hetkellä laajasti. Valo-, liike- ja RF-energiankeruu ovat ehkä yleisimpiä menetelmiä. RF-energian keruu on löytänyt paikkansa RFID-tunnisteiden parissa ja on siten laajasti käytössä. Valoenergian keruu on myös ollut käytössä jo vuosikymmeniä tietyissä laitteissa, kuten taskulaskimissa ja puutarhavalloissa. Näitä tekniikoita on sovellettu myös langattomien sensoriverkkojen tarpeisiin, ja ne ovat osoittautuneet erittäin toimiviksi. Teollisuuden tarpeisiin on sovellettu ainakin liike-energian [13] ja termoenergian [21] keruuta.

Taulukko 4.1: Yleisten energiankeruumenetelmien vertailu. Taulukossa keruelementin ala on laskennallisesti riittävä pinta-ala sensorinoodin $100 \mu\text{W}$ tehon tarpeelle.

Menetelmä	Olosuhde	Energian tuotto	Keruelementin ala
Valoenergia	Ulkona	$10 \text{ mW} / \text{cm}^2$ [39]	0.3 cm^2
Valoenergia	Sisällä	$10 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ [39]	10 cm^2
RF-energia	Wifi 2.4GHz	$1 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ [39]	100 cm^2
Väriä-/Liike-energia	$1 \text{ Hz} / 1 \text{ m/s}^2$	$4 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ [39]	25 cm^2
Väriä-/Liike-energia	$1 \text{ kHz} / 10 \text{ m/s}^2$	$100 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ [39]	1 cm^2
Termoenergia	Teollinen	$160 \text{ mW} / \text{cm}^2$ [5]	0.6 cm^2
Termoenergia	Ihmisestä $\Delta 5 \text{ }^\circ\text{C}$	$30 \mu\text{W} / \text{cm}^2$ [39]	3.3 cm^2

4.8 Energian varastointi

Jos käytetään epäsuoraa energiankeruuta, tarvitaan energiavarasto. Oikeanlaisen varaston valinta on ensiarvoisen tärkeä sovelluksen tehokkuuden ja toiminnan kannalta [34]. Vaihtoehdot voidaan lajitella kahteen pääkategoriaan: Ladattavat akut ja kondensaattorit.

4.8.1 Ladattavat akut

Ladattavien akkujen toiminta perustuu kemialliseen reaktioon, jonka tuloksena syntyy sähköenergiaa [5]. Ladattavia akkuja on useita eri tyyppiä, akkutyypin erot liittyvät niiden sisäiseen kemialliseen koostumukseen [34]. Näistä yleisesti käytössä ovat lyijyakut (SLA), nikkeli-kadmium (NiCd), nikkelimetalli-hybridi (NiMH) ja litium-ion (Li-ion) [5]. Kaikilla näillä tekniikoilla on ominaisuuksia, joiden perusteella ne joko sopivat tai eivät sovi tiettyihin sovelluksiin. Lyijyakuilla on huono energiantiheys eli niiden fyysinen koko on suuri verrattuna niiden sisältämään energian määrään [34]. Lyijyakuille on kuitenkin niiden edullisen hinnan vuoksi paikkansa esimerkiksi ajoneuvojen käynnistysakkuina, sen vuoksi niiden markkinaosuus on 40% [30]. Nikkeli-kadmium akut sisältävät ympäristölle haitallista kadmiumia, siksi ne pyritään korvaamaan tulevaisuudessa NiMH-akuilla [30]. NiMH ja Li-ion akut ovat pääsääntöisesti käytössä sensoriverkoissa, joten käytännössä valinta energiavarastoksi on usein tehtävä näiden kahden tekniikan välillä. Molemmissa tekniikoissa on hyvä energiantiheys, niiden itsepurkautuminen ilman kuormaa on varsin vähäistä eikä kummassakaan ole "lataus muistia" eli vaikka niitä ei ladata aina täyteen asti niiden varauskapasiteetti ei pysyvästi laske [34]. Li-ion tekniikan huono puoli verrattuna NiMH-tekniikkaan on sen vaatima pulssilataus. Tämä tarkoittaa sitä että Li-ion akku täytyy ladata sykäyksittäin, pulssilataus tekee latauspiiristä monimutkaisemman ja nostaa kustannuksia. NiMH-tekniikassa lataus on huomattavasti yksinkertaisempi, mutta sen huonona puolena on, että sen "lataus muistin" nollaus vaatii säännöllisesti tehtävän täyden purkamisen [34]. Jos NiMH-akkua ei pureta säännöllisesti täysin tyhjäksi sen kapasiteetti laskee "lataus muistin" vuoksi. Li-ion kennon jännite on 3.7 V, joka on usein riittävä sensoriverkon noodin jännitteeksi [34]. NiMH-kennon jännite taas on 1.2V, joten niitä tarvitaan aina vähintään 3 kappaletta, jotta saadaan lähes sama jännite kuin yhdestä Li-ion kennosta. Li-ion kennossa energiaa on 1.6 kertainen määrä verrattuna fyysisesti saman kokoiseen

NiMH-kennoon [34]. Nämä kaksi seikkaa vaikuttavat siihen, että NiMH-kennoilla toteutetusta energianvarastointi ratkaisusta tulee väistämättä fyysisesti kookkaampi kuin Li-ion kennoilla toteutetusta.

4.8.2 Kondensaattorit

Toisena vaihtoehtona energiavarastoksi ovat kondensaattorit, ne toimivat periaatteessa samalla tavalla kuin akut. Niiden rakenne koostuu kahdesta elektrodista, joilla on samansuuruinen vastakkainen varaus [5]. Suurimmat erot ovat kondensaattorien nopea itsepurkautumisnopeus jopa 5.9% päivässä sekä huomoinpi energia/paino suhde (5Wh/kg vs. 100Wh/kg) [35]. Toisin kuin akuilla kondensaattorien jännite on suoraan verrannollinen niiden energiavarauksen suuruuteen [5]. Toisaalta kondensaattorit latautuvat huomattavasti nopeammin, niillä ei ole latausmuistia, latauspiiri on yksinkertainen ja niiden käyttöikä on periaatteessa latauskertojen suhteen rajaton [5]. Toisinsanottuna sensoriverkon noodi, joka käyttää kondensattoria energiavarastona, on energiavaraston osalta huoltovapaa. Kapasitanssi kuvaa kondensaattorin kykyä varastoida sähköenergiaa. Kapasitanssin yksikkö on faradi, joka on mittayksikkönä suuri ja yleensä kapasitanssi ilmoitetaan mikro- tai millifaradeina. Kondensaattorit soveltuvat hyvin käyttökohteisiin, joissa katkokset energiankeruussa ovat ajallisesti lyhyitä ja toistuvia. Kondensaattoreita voidaan käyttää myös vaihtelevan tehoisen energiankeruun jännitteen tasaamisessa sekä akun lisänä rinnakkaisena virtalähteenä. Tässä tapauksessa akun käyttöikä kasvaa huomattavasti, kondensaattorin toimiessa lyhyiden virtapiikkien tasaajana [33].

Viimeaikoina superkondensaattorit ovat kehittyneet vaihtoehdoksi akuille, langattomien sensoriverkkojen energiavarastoina [33]. Superkondensaattori menettää 10 vuoden aikana vain noin 20% varauskapasiteetistaan, ja 20 vuoden aikana noin 50%. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että superkondensaattorien elinikä on noin kuusinkertainen akkuihin verrattuna[33]. Niiden itsepurkautumisnopeus on myös huomattavasti perinteisiä kondensaattoreita parempi [26]. Superkondensaattorien jännitealue on 2.3 - 2.75 V, joten niitä tarvitaan vähintään 2 kappaletta, jotta saadaan sama jännite kuin yhdestä Li-ion kennosta.

4.8.3 Yhteenveto energianvarastointi

Energianvarastointia tarvitaan noodin ylläpitämiseen silloin kun energiaa ei ole saatavilla ympäristöstä. Esimerkiksi valosähköisen energian kohdalla yöllä ja pilvisellä jaksolla. Päävalinta on tehtävä kondensaattorin tai akun välillä. Kondensaattori soveltuu käytettäväksi ajallisesti lyhyiden ja toistuvien katkosten tapauksessa. Kondensaattorin elinikä ei lyhene jatkuvalla lataamisella ja purkamisella. Jos halutaan varmistaa toiminta pitkien ajanjaksojen kuten yli vuorokauden ajaksi, on käytettävä akkua. Alla olevaan taulukkoon 4.2 on kerätty yleisten varastointitekniikoiden ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan valita sovellukseen sopiva tekniikka. Periaatteessa NiMH, Li-ion ja superkondensaattorit ovat fyysisen kokonsa vuoksi soveltuvia tekniikoita sensoriverkon tarpeita ajatellen. Eli valinta on tehtävä näiden kolmen välillä, ratkaistavaksi jäävät toteutuksen fyysinen koko ja kustannukset latauspiiriin sekä akkukennoihin liittyen.

Taulukko 4.2: Yleisten energian varastointi tekniikoiden vertailu [34] [5]

Tekniikka	Jännite	Energia Paino Wh/kg	Itsepurkaus % / kk	Lataus muisti	Lataustapa
SLA	6 V	26	20	Ei	Jatkuva
NiCd	1.2 V	42	10	Kyllä	Jatkuva
NiMH	1.2 V	100	20	Ei	Jatkuva
Li-ion	3.7 V	165	<10	Ei	Pulssi
Super Kond.	2.3 - 2.75 V	5	50	Ei	Jatkuva

5 Energiankeruumenetelmien vertailu teollisessa ympäristössä

Tässä luvussa esitellään aidossa tuotantoympäristössä energiankeruulaitteistolla tehdyt mittaasetelmat ja mittaustulokset. Käytännön mittaukset antavat tässä tutkielmassa tehdyille esityölle tarkoituksen ja mittausten tulokset muodostavat tämän työn empiirisen pohjan. Samalla saadaan todennettua tietoa energiankeruumenetelmien tehoista, jota voidaan verrata kappaleessa 4 esitettyyn teoriaan. Lähtökohdana sensoriverkon noodin virrankulutukselle käytetään jatkossa 100 μW tehoa. Tämä perustuu lähteissä [39] ja [5] esitettyihin laskennallisiin keskiarvoihin. Käytännössä sensorinoodin virrankulutus vaihtelee sen mukaan, kuinka suuren osan ajasta se on aktiivinen ja kuinka paljon radiota käytetään. Tässä käytetty 100 μW teho on keskiarvo noodille joka on aktiivinen 1,5 minuuttia tunnin aikana [5].

5.1 Toteutusympäristö

Mittaukset suoritettiin Nivalaisen konepajan teollisuushallissa jonka pinta-ala on 1100m². Yleiskuvan tiloista saa kuvasta 5.1. Tämä toteutusympäristö on tyypillinen teollinen tuotantotila, jossa saadaan realistisia mittaustuloksia. Yrityksen johto suhtautui tilojen käyttöön myönteisesti, koska yritys on kiinnostunut mahdollisuudesta päästä hyödyntämään langatonta sensoriverkkoa kunnossapidon tarpeisiin. Tämän tutkielman yhteydessä tehtävät mittaukset antavat tietoa siitä, voiko mahdollinen toteutus hyödyntää energiankeruuta yrityksen tuotantotiloissa.



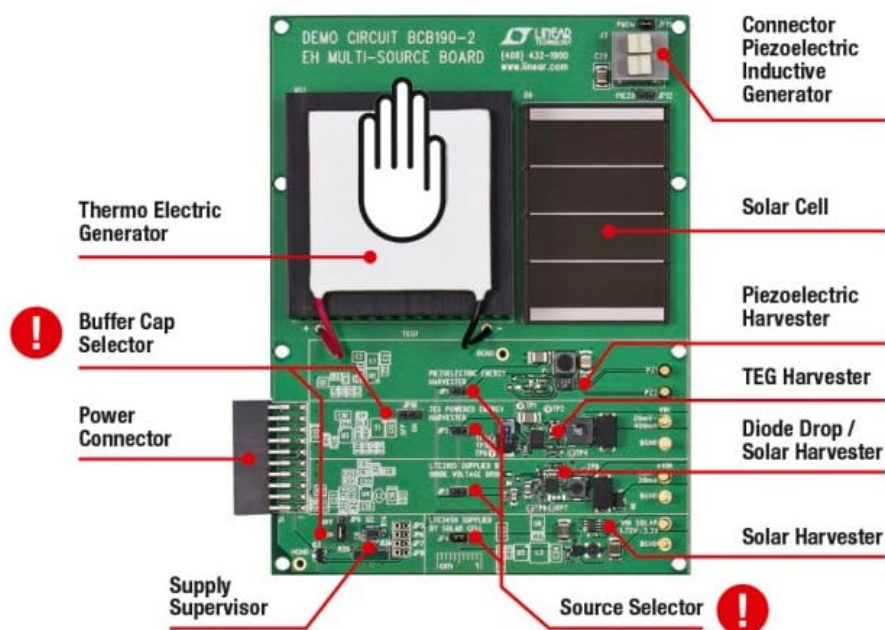
Kuva 5.1: Toteutusympäristö

Tuotantotilat käsittävät koneistus- ja kokoonpanotilat, maalaamon ja lähettämön. Tiloissa on metallintyöstökoneita, hitsauskoneita, teollisuusrobotteja, maalauskammioita ja teollisuuspesukoneita. Tässä teollisessa tuotantotilassa on energiankeruun näkökulmasta monia haasteita, mutta myös monia mahdollisuuksia. Haasteina voidaan nähdä pöly, lika ja huono valaistus, mahdollisuuksina voimakkaat värinät ja lämpötilaerot.

5.2 Laitteisto

Mittauksissa laitteistona käytettiin Würth Elektronik:n ”Energy Harvesting Solution To Go”-laitetta. Energiankeruupuolen valmistaja on Linear Technology ja se sisältää pienen valopaneelin sekä peltier-elementin [25]. Näiden lisäksi on myös mahdollista käyttää ulkoista valopaneelia tai peltier-elementtiä sekä piezo-elementtiä.

Käytettävä lähde valitaan neljällä siltauskytkimellä. Asentamalla siltauskytkinten tilalle diodit laite tukee lähteiden yhdistelmiä. Näin diodit toimivat automaattisina siltauskytkiminä valiten käyttöön aina sen lähteen, jonka jännite on suurin. Tämä on yksinkertainen tapa kokeilla hybridi energiankeruuta. Sivistyneempi tapa vaatisi hienostuneemman elektroniikan välipiireillä toteutettuna. Laitteisto on esitetty kuvassa 5.2

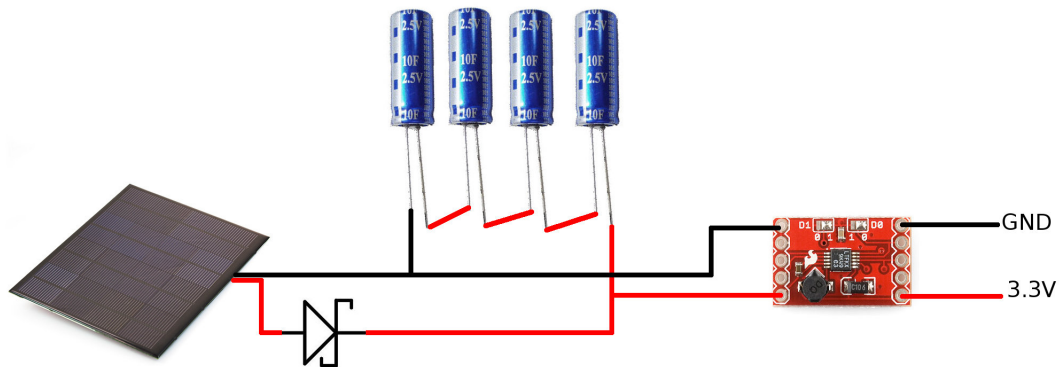


Kuva 5.2: "Energy Harvesting Solution To Go"-laite [25]

Laitteen oli tarkoitus olla toimintavalmiina jo saapuessaan. Näin ei kuitenkaan ollut, vaan laite vaati energiankeruupuolen ylösajon Analog Devices:n ohjeen mukaan [25]. Sekä ohjelman lataamisen kontrolleriin alaluvussa 5.2.4 kuvatun Simplicity Studion avulla. Tämän jälkeen laite oli toimintavalmis ja toimi valopaneelin varassa, valaistuksen ollessa riittävä. Siltauskytkimien asentoa muuttamalla, myös peltier-elementti tuotti tarpeeksi energiaa mikrokonrollerin toimintaan. Tätä kokeiltiin käden lämmöllä, sekä kuumalla juomalasilla. Tämä laite valittiin käytettäväksi näissä mittauksissa, koska se oli valmis ratkaisu, johon kuului lähes kaikki tarpeellinen. Laitteiston lisäksi jouduttiin hankkimaan erikseen ainoastaan alaluvussa 5.2.3 mainittava piezosähköinen energiankeruulaite. Vaihtoehtoja olisi ollut runsaasti, mutta ne olisi jouduttu kokoamaan eri komponenteista.

Näitä vaihtoehtoja olisivat olleet esimerkiksi Texas Instrumentsin Launchpad-

tai Arduino-alustat. Nämä kaksi ovat yleisiä alustoja, jotka ovat käytössä niin harrastelijoiden kuin ammattilaisten parissa. Ne perustuvat alaluvussa 3.1.1 mainittuihin MSP430- ja ATmega-mikrokontrolleihin. Niille on myös saatavilla energiankeruumoduuleita, näistä mainittakoon Arduinolle valmistettu SparkFun ”Energy Harvesting Breakout”. Tähän sarjaan voidaan kytkeä piezo-elementtejä sekä tasavirtalähteitä, kuten valopaneeleita. Lähtöjännite on valittavissa siltauskytkimillä vaihtoehtoina ovat 1.8V, 2.5V, 3.3V ja 3.6V. Laite tukee myös epäsuoraa energiankeruuta, siihen voi kytkeä kondensaattorin energiavarastoksi. Energiankeruupiirinä ”Energy Harvesting Breakout” käyttää Linear Technologies:n LTC3588-piiriä, joka on sama kuin ”Energy Harvesting Solution To Go”-sarjassa. Kuvassa 5.3 on ”Energy Harvesting Breakout”-laitteen kytkentäesimerkki, jossa on paneeli valoenergian keruuta varten.



Kuva 5.3: Sparkfun ”Energy Harvesting Breakout”

5.2.1 Mikrokontrolleri

Mikrokontrollerina on Silicon Labs:n EFM32 giant gecko. Se perustuu ARM Cortex M3 prosessoriin, Flash muistia on 1024 kilotavua ja RAM muistia 128 kilotavua [25]. Virrankulutuksen suhteen mikrokontrolleri tukee neljää erilaista toimintatilaa *aktiivinen, uni, syvä uni, seis ja sammutus*. Hyödyntämällä eri tiloja, voidaan sovelluksen energiankulutusta hallita tilanteen mukaan [25]. Taulukko 5.1 listaa eri tilat ja niiden virrankulutukset.

Taulukko 5.1: EFM32 Mikrokontrollerin toimintatilat [25]

Tila	Virrankulutus	Kuvaus
0 Aktiivinen / Käy	114 μ A / MHz	Kaikki laitteet toimivat
1 Uni	48 μ A / MHz	CPU sammutettuna RAM, Flash, DMA ja RPS toimivat
2 Syvä uni	0.9 μ A	Sama kuin yllä mutta matalampi kelloaajuus
3 Seis	0.5 μ A	Kaikki sammutettuna, RAM- ja RTC-tilat säilytetty
4 Sammutus	20 nA	Kaikki sammutettuna, RAM- ja RTC-tilat nollattu

5.2.2 Energiankeruupiirit

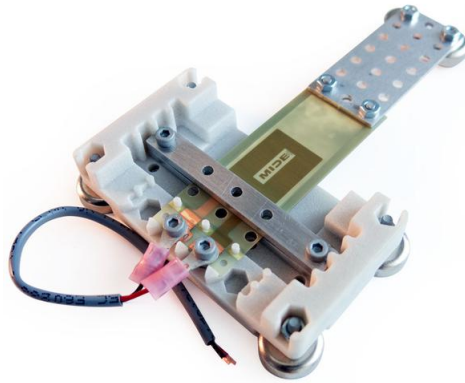
Energiankeruu vaatii sähköenergian käsittelyä lähes aina keruun jälkeen. Se minimaalista prosessointia tarvitaan, riippuu energiankeruumenetelmästä, sekä siitä mitä energialla tehdään prosessoinnin jälkeen. Prosessointiin on saatavilla IC-piirejä, jotka sisältävät energiankeruumenetelmään sopivan elektroniikan sekä ulostulojännitteen asettelun. On olemassa myös IC-piirejä, jotka kykenevät toiminaan kahden hyvin erilaisen energiankeruumenetelmän kanssa. Kuten PowerCast:n P2110B [29], joka toimii sekä termooenergian että RF-energian keruussa.

”Energy Harvesting Solution To Go”-laitteessa energiankeruupiirejä on neljä erilaista, joista kukin soveltuu tiettyyn tarkoitukseen[25]. LTC-3588 toimii vaihtojännitelähteillä, kuten piezo-elementeillä. LTC-3018 toimii millivolttiluokan jännitteillä kuten Peltier-elementeillä. LTC-3105 on suunniteltu valopaneeleille ja se sisältää Maximum Power Point Control-toiminnon[25]. Tämä toiminto laskee optimaalisen latausjännitteen, niin että akuston latausvirta on optimaalinen. Neljäs energiankeruupiiri koostuu LTC-3459 ja LTC-2935 piireistä, ja on tarkoitettu erittäin pienien virtamäärien keräämiseen sisävalaistuksesta.

5.2.3 VLT-9001 piezosähköinen energiankeruulaite

Mide electronics toimittaa piezosähköisen energiankeruulaitteen sarjana. Sarja sisältää PPA-2011 piezo-elementin, PPA-9001 telineen, useita painoja reikälevyjä sekä

magneetteja [27]. Ajatuksena on, että jatkamalla vipuvartta reikälevyillä ja vaihtelemalla painoja, saadaan juuri kohteeseen sopiva kokoonpano. Tavoitteena on saada aikaiseksi kohteen värinää vastaava kokoonpano. Laitteen runko on muovia, johon tulevat magneettijalat tekevät laitteen kiinnittämisen metallipinnoille helpoksi. Laitteen rakenne selviää tarkemmin alla olevasta kuvasta 5.4



Kuva 5.4: Mide electronics VLT-9001 energiankeruulaite

5.2.4 Ohjelmointiympäristö

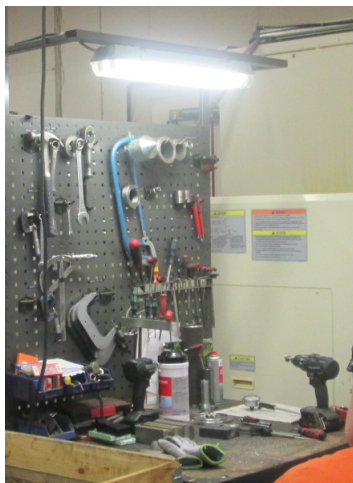
Ohjelmistona EFM32 käyttää Simplicity Studiota, joka perustuu Eclipseen. Ohjelmiston asennus on aika suoraviivainen ja sen mukana tulee paljon esimerkkejä. Käyttäjälle ympäristö on selkeä ja aika lailla samankaltainen monien muiden mikrokontrollerien ohjelmistojen kanssa. Useat ohjelmointiympäristöt perustuvat Eclipseen ja ovat siksi samankaltaisia. Kun EFM32 on kytkettynä USB-porttiin Simplicity Studio lataa ja asentaa tarvittavat kirjastot ja esimerkit. Esimerkkiohjelman lataamisen jälkeen on mahdollista käyttää "energy profiler"-toimintoa, joka antaa mahdollisuuden tarkkailla kontrollerin virrankulutusta. Tämä on erittäin kätevä työkalu silloin kun kehitetään vähävirtaisia sovelluksia, tai halutaan tutkia virrankulutusta eri tilanteissa.

5.3 Energiankeruumittaukset

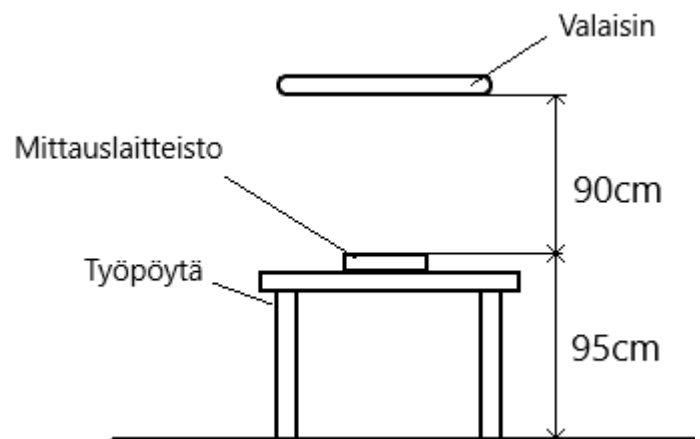
5.3.1 Valoenergia

Ympäristönä toimiva konepaja asettaa haasteita valoenergian keruulle. Ikkunat ovat pölyiset ja likaiset, niiden pinta-ala on suhteessa pieni. Ikkunat sijaitsevat seinien ylärajassa, joten auringonvalo on vain hyvin pienen ajan päivästä optimaalisessa kulmassa tehokasta valoenergiankeruuta ajatellen [34]. Tästä johtuen keruun kannalta tehokkaan luonnonvalon saatavuus on heikkoa. Yleisvalaistuksena tiloissa on kattoon noin 6 metrin korkeuteen asennettuja loisteputkivalaisimia. Jokaisessa valaisimessa on kaksi 58 watin tehoista loisteputkea, joiden asennustiheys on 1 valaisin 14 m^2 pinta-alaa kohti. Tuotantotilojen valkeat seinät ja katto ovat erittäin likaiset ja valaisimien taustaheijastimien pinnat ovat pölyiset. Nämä seikat johtavat siihen, että valoenergiaa on vähän kerättäväksi.

Tilannetta parantavat jonkin verran työpöytien päälle sekä työstökoneiden sisälle asennetut kohdevalaisimet. Käytännössä nämä kohdevalaisimet on asennettu juuri huonon yleisvalaistuksen kompensoimiseksi. Työpöytien päälle asennetut valot ovat 95 cm korkeudella pöytien pinnasta ja niissä on kaksi 36 watin tehoista loisteputkea, jotka on suojattu muovikuvulla. Työstökoneiden sisällä olevat kohdevalot ovat teholtaan 55 wattia. Alla olevissa kuvissa 5.5 ja 5.6 esitetään kohteet, joissa energiankeruu mittaukset suoritettiin sekä mittapiirroksen asetelmista.

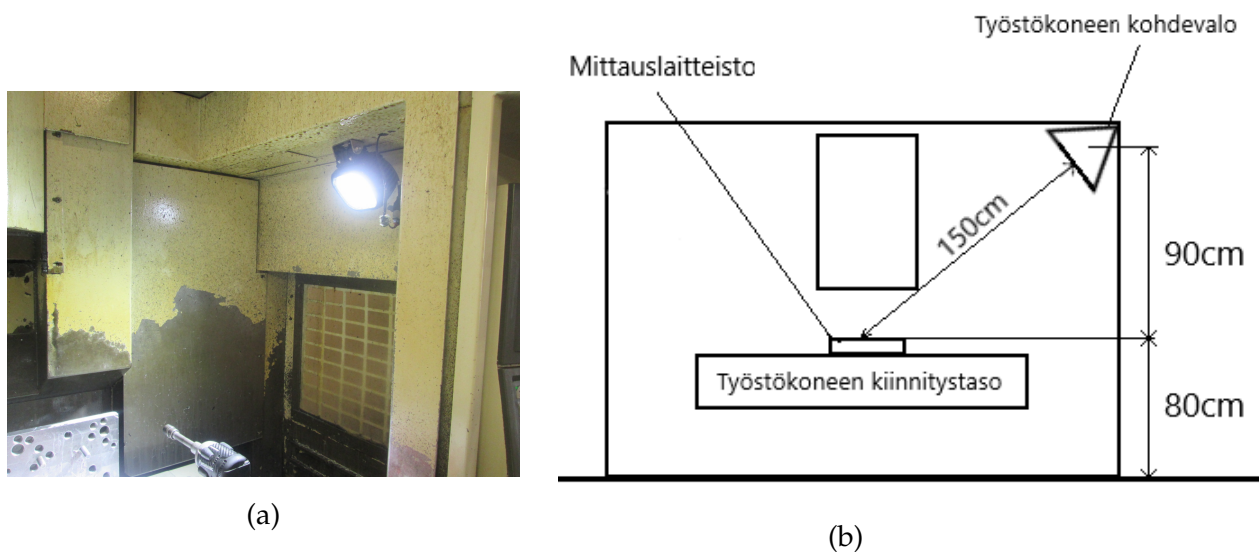


(a)



(b)

Kuva 5.5: a) Valoenergian keruu työpöydän kohdevalosta. b) Mittausasetelman piirros



Kuva 5.6: a) Valoenergian keruu työstökoneen kohdevalosta. b) Mittausasetelman piirros

Mittaus ja tulokset

Arvoja mitattiin eri kohteissa käyttämällä "Harvesting Solution To Go"-laitteistoa (Kuva 5.2), johon kytkettiin 3 k Ω vastus keinokuormaksi. Yleismittarilla rekisteröitiin vastuksen yli vaikuttava jännite, josta laskettiin vastusarvon avulla saatava virta ja teho. Keruelementtinä on Sanyon AM-5412 valopaneeli, jonka pinta-ala on 13cm² [32]. Mittaukset tehtiin puolenpäivän aikoihin, jolloin tilojen valoisuus on korkeimmalla tasolla. Mittauksia suoritettiin noin 15 minuutin ajan joka kohteessa. Mittaustulokset on kerätty alla olevaan taulukkoon 5.2, jossa verrataan energian saatavuutta laitteen fyysisen sijainnin suhteen. Taulukkoon on myös laskettu tehon tuotto energiankeruelementin yhtä neliösenttiä kohti.

Taulukko 5.2: Energiankeruu taulukko valo

Paikka	Olosuhde	Tehon tuotto	/ 1 cm ²
Yleisvalaistuksen alla	Ikkunoista tuleva luonnonvalo ja kattovalaistus	15 μ W	1 μ W
Työpöydällä	Työpöydän kohdevalo	32 μ W	2.4 μ W
Työstökoneen sisällä	Työstökoneen kohdevalo	86 μ W	6 μ W
Nurkkauksessa	Hämärä paikka	1.3 μ W	0.1 μ W

5.3.2 Tärinä

Konepajalla on hyvät mahdollisuudet energiankeruulle tärinästä. Täriseviä koneita ja laitteita on paljon, ja ne ovat käynnissä usein koko työpäivän ajan. Kohteissa on usein myös paljon metallia, joten energiankeruuelementin kiinnittäminen magneetilla on helppoa. Käsin havainnoimalla tuntuu että värinä on voimakasta ja että siitä voisi saada kerättyä paljon energiaa. Mutta kuten taulukosta 5.3 alla ilmenee, näin ei ole, vaan kerätyn energian määrä jää käytännössä marginaaliseksi. Kuvissa 5.7 ja 5.8 on esitetty mittausasetelmat maalaamon poistopuhaltimesta sekä paineilma-kompressorista. Työstökoneen mittausasetelmaa ei tässä esitetä koska se on lähes identtinen paineilmakompressorin mittausasetelman kanssa.

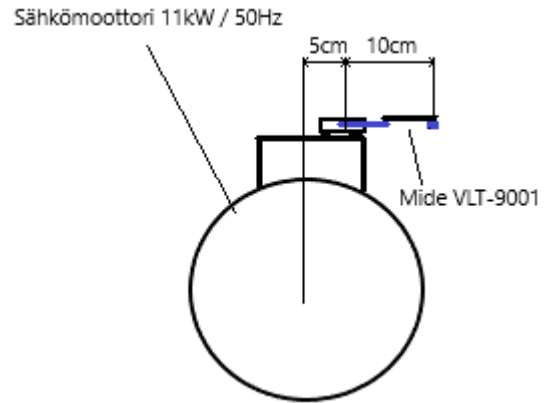
Maalaamon poistopuhallin on keskipakotyyppinen, se on kiinnitetty tuotantotilojen ulkopuolelle rakennuksen kivijalkaan. Puhaltimen moottorin teho on 11 kW ja sen taajuus on 50Hz. Energiankeruuyksikkö kiinnitettiin moottorin kytkentärasian kannen päälle magneettijalkojen avulla, siten että vipuvarsi jäi kannen reunan ulkopuolelle (kuva 5.7).

Paineilmakompressorin moottorin teho on 28 kW. Se on taajuusmuuttajakäyttöinen eli sen värinän taajuus vaihtelee. Se on asennettu sisätiloihin suoraan lattian päälle. Varsinainen kompressoriyksikkö on asennettu laitteen sisälle kumityynyjen varaan. Tämä vaimentaa kompressorin metalliseen kuoreen johtuvia tärinöitä ja on siksi energiankeruun kannalta huono asia. Energiankeruuyksikkö asetettiin kompressorin päälle, kannen reunalle, siten että vipuvarsi ja painot jäivät laitteen reunan ulkopuolelle.

Työstökone on metallin koneistamiseen tarkoitettu jyrsinkone. Suurimmat värinät laitteessa syntyvät varsinaisesta työstä, eli metallin työstämisestä lastuamalla. Nämä värinät ovat taajuudeltaan ja voimakkuudeltaan erittäin vaihtelevia ja riippuvat työstettävästä materiaalista sekä käytettävän työkalun geometriasta. Työstökoneen energiankeruun mittausasetelma ei poikkea edellä esitetystä paineilma-kompressorin mittausasetelmasta.



(a)

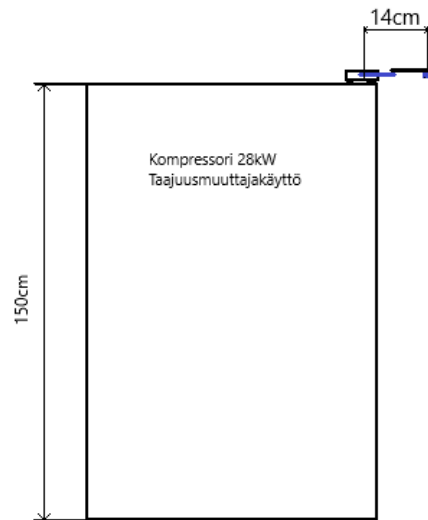


(b)

Kuva 5.7: a) Värinäenergian keruu maalaamon puhaltimesta. b) Mittausasetelman piirros



(a)



(b)

Kuva 5.8: a) Värinäenergian keruu paineilmakompressorista. b) Mittausasetelman piirros

Mittaus ja tulokset

Mittaukset suoritettiin kolmesta eri kohteesta. Kohteet olivat työstökoneen runko työstön aikana, ilmakompressorin runko sen käydessä sekä maalaamon poistopuhaltimen moottori puhaltimen ollessa käynnissä (kuvat 5.7 ja 5.8). Mittaukset suo-

ritettiin samalla "Harvesting Solution To Go"-laitteistolla kuin valoenergian yhteydessä alaluvussa 5.3.1, keruelementtinä käytettiin Mide electronicsin PPA-2011:sta. Tämän piezo-elementin pinta-ala on 18 cm². Vipuvarren pituuksien ja erilaisten painojen yhdistelmiä kokeiltiin useita. Vipuvarren pituudet vaihtelivat välillä 5-15 cm ja painot välillä 5-20 grammaa. Mittaustulokset on kerätty alla olevaan taulukkoon 5.3 ne kertovat parhaimmalla yhdistelmällä saadut lukemat kyseisestä mittauspai- kasta. Huonommilla painojen ja vipuvarsien yhdistelmillä kerätyt tehot olivat niin pieniä, ettei niitä saatu mitattua. Jokaista mittauserästä suoritettiin 5 minuutin ajan kaikissa kohteissa.

Taulukko 5.3: Energiankeruu taulukko tärinä

Kohde	Olosuhde	Tehon tuotto	Vipuvarsi L	Paino	/ 1 cm ²
Poistopuhallin	50 Hz	18 μW	10 cm	5 g	1 μW
Kompressori	66 Hz	21 μW	14 cm	10 g	1 μW
Työstökone	Vaihteleva taajuus	12-38 μW	14 cm	10g	1-2 μW

5.3.3 Termenergia

Teollinen ympäristö on otollinen termenergian keruuseen, ympäristöä kuumempia ja kylmempiä pintoja on paljon. Tässä alaluvussa keskityttiin mittaamaan saatavaa energiaa työstökoneen hydraulioöljysäiliön pinnasta, lämmityspatterin putkesta sekä kompressorin lauhduttimesta. Asennuskohteet on havainnollistettu kuvissa 5.9 ja 5.10. Kompressorin lauhdutinta ei ole kuvattu, koska se on mittauserästä osalta identtinen hydraulioöljysäiliön mittauksen kanssa.

Hydraulioöljysäiliö on asennettu työstökoneen taakse ja on kiinnitetty koneen runkoon. Säiliön tilavuus on 50 litraa, se on muodoltaan laatikkomainen ja valmistusmateriaalina on teräs. Säiliössä on laajat ja tasaiset sivut, joihin on helppo asentaa Peltier-elementti energiankeruuta varten. Hydraulioöljyn lämpötila kasvaa paineen nostamisesta johtuvan puristamisen seurauksena noin 40 °C ympäristöä kuumemmaksi. Näin ollen se on helppo kohde termenergian keruuta varten.

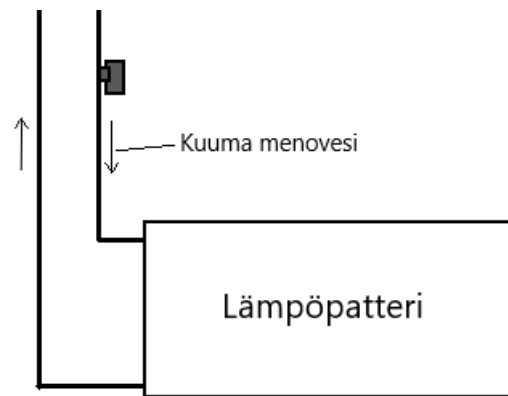
Lämpöpatterien putkia on tuotantotiloissa useita, niiden halkaisijat vaihtelevat väliltä 2-8 cm. Valmistusmateriaalina on teräs. Putkissa virtaava neste on vesi, jota lämmitysjärjestelmässä on kaikkiaan 800 litraa. Putkistossa kiertävä vesi on kuu-

minta silloin kun ilmanlämpötila rakennuksen ulkopuolella on kylmimmillään, eli keskitalvella. Peltier-elementin asentaminen pyöreän putken päälle vaatii adapterin käyttämistä. Lämpötilaeron tehostamisen vuoksi elementin kylmälle puolelle voidaan asentaa jäähdytys siili.

Kompressorin lauhdutin on asennettu kompressorin yhteyteen. Sen tehtävänä on jäähdyttää kompressorin voiteluöljy, joka kuumenee mekaanisten kitkojen seurauksena. Tämän tutkielman kannalta se ei juurikaan poikkea edellä mainitusta hydraulioöljysäiliöstä. Se on valmistettu teräksestä, sen sisäpuolella on öljyä ja ulkopuolella ilmakehä. Merkittävin ero näiden kahden välillä on se että lauhduttimen sisällä oleva paine on 8 bar suurempi kuin ilmakehän. Tällä seikalla ei ole merkitystä energiankeruun kannalta.

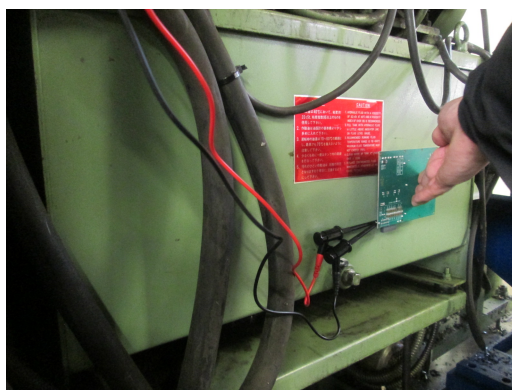


(a)

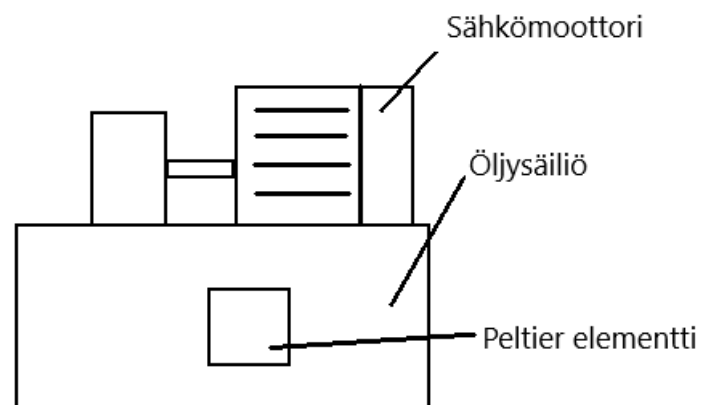


(b)

Kuva 5.9: a) Termoenergian keruu patterin putkesta. b) Mittausasetelman piirros



(a)



(b)

Kuva 5.10: a) Termoenergian keruu hydraulioöljysäiliöstä. b) Mittausasetelman piirros

Mittaus ja tulokset

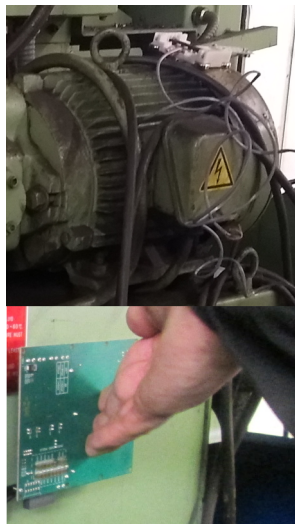
Mittaus suoritettiin "Harvesting solution To Go"-laitteen Peltier-elementillä, jossa on kylmällä puolella jäähdytysaiili haihduttimena. Elementti on CUI:n valmistama ja sen pinta-ala on 16 cm^2 [8]. Peltier-elementtiä painettiin käsin CNC-koneen hydraulioiljysäiliötä vasten. Ympäristön lämpötilan ollessa $22 \text{ }^\circ\text{C}$ ja säiliön pinnan lämpötilan ollessa $38.6 \text{ }^\circ\text{C}$. Mittauksia tehtiin myös lämmityspatterin putkesta, jonka lämpötilaksi mitattiin $48.6 \text{ }^\circ\text{C}$ sekä kompressorin lauhduttimesta, jonka lämpötila oli $51.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Lämpöpatterin putkea varten valmistettiin alumiinista adapteri, jolla elementti saatiin hyvin kiinnitettyä pyöreään putkeen. Peltier-elementti myös irrotettiin laitteesta mittauksen ajaksi. Lämpötilat todettiin infrapunamittarilla. Mittauksia suoritettiin noin 10 minuuttia jokaisesta kohteesta. Mittausten tulokset on kerätty alla olevaan taulukkoon 5.4.

Taulukko 5.4: Energiankeruu taulukko termenergia

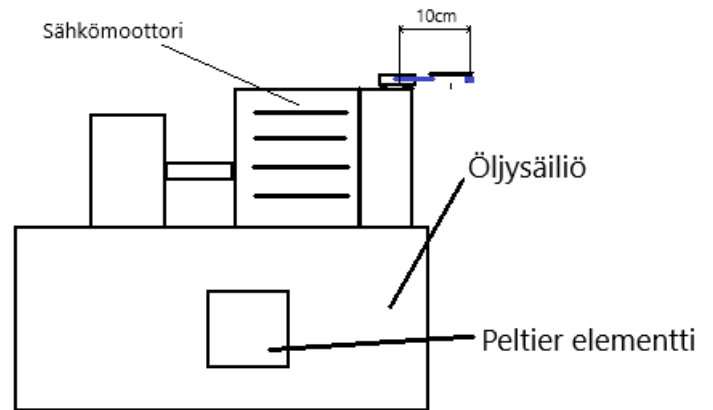
Kohde	Olosuhde	Tehon tuotto	/ 1 cm^2
Öljysäiliö	$\Delta 16.6 \text{ }^\circ\text{C}$	$290 \text{ } \mu\text{W}$	$18 \text{ } \mu\text{W}$
Patterin putki	$\Delta 26.6 \text{ }^\circ\text{C}$	$410 \text{ } \mu\text{W}$	$25 \text{ } \mu\text{W}$
Kompressor	$\Delta 29.2 \text{ }^\circ\text{C}$	$430 \text{ } \mu\text{W}$	$26 \text{ } \mu\text{W}$

5.3.4 Yhdistetty värinä- ja termenergia

Testiympäristö on tässä lähes sama kuin termenergian yhteydessä alaluvussa 5.3.3. Tähän mittaukseen lisättiin energiankeruu piezo-elementillä. Elementtinä käytettiin jo aiemmin mainittua Mide electronicsin VLT-9001:tä, joka kytkettiin "Harvesting solution To Go"-laitteeseen. Termenergiaa kerättiin peltier-elementillä. Piezosähköinen keruulaite asetettiin sähkömoottorin päälle magneettijalkojen avulla ja peltier-elementti painettiin käsin kiinni öljysäiliön pintaan. Hydrauliyksikön sähkömoottorin teho on 5.5 kW ja sen taajuus on 50 Hz . Säiliön tilavuus on 50 litraa .



(a)



(b)

Kuva 5.11: a) Termo- ja värinäenergian keruu hydrauliyksiköstä. b) Mittausasetelman piirros

Mittaus ja tulokset

Kaksi edellistä menetelmää yhdistettiin asettamalla piezosähköinen keruulaite koneen hydrauliiikkapumpun sähkömoottorin päälle ja peltier-elementti hydraulioöljysäiliön kylkeen. Edelliset mittaukset osoittivat jo valmiiksi, että tärinästä saatava osuus tulee olemaan marginaalinen termooenergiaan verrattuna. Mittaus kuitenkin suoritettiin pääasiassa sen vuoksi, että siitä saatiin vertailutietoa tähän tutkielmaan. Piezo-laitteen optimaaliseksi kokoonpanoksi osoittautui tässä kohteessa 10 cm vipuvarren pituus ja 10 gramman painot. Mittauksen tulokset on listattu taulukkoon 5.5

Taulukko 5.5: Energiankeruu taulukko yhdistetty tärinä ja termooenergia

Kohde	Olosuhde	Tehon tuotto
Öljysäiliö	$\Delta 16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$290\text{ }\mu\text{W}$
Sähkömoottori	Hz	$5\text{ }\mu\text{W}$
	Yhteensä	$295\text{ }\mu\text{W}$

5.4 Energiankeruumenetelmien vertailu

Valoenergian keruun teho jäi parhaimmillaan noin puoleen siitä mitä kirjallisuuteen perustuvassa alaluvussa 4.2.1 esitettiin. Tämä selittyy luultavasti sillä, että teolliset tuotantotilat ovat likaiset (ikkunoista ei juurikaan tule luonnonvaloa) ja valaisimet sekä niiden heijastimet ovat likaisia. Näitä seikkoja käytiin tarkemmin läpi jo aiemmin alaluvussa 5.3.1 ja ne näyttävät vaikuttavan energiankeruuseen odotetulla tavalla. "Harvesting solution To Go"-laitteen paneelilla saatiin kerättyä parhaimmillaan $86 \mu\text{W}$ teho työstökoneen sisällä olevasta kohdevalosta. Tämä jää hiukan alle tämän kappaleen alussa asetetusta $100 \mu\text{W}$ rajasta. Joten se ei ole riittävä teho langattoman sensoriverkon noodin tarpeisiin. Tämän lisäksi työstökone on fyysisesti sellainen asennuspaikka, jossa paneeli ei voi toimia mekaanisesti. Työstökoneen sisällä on suihkuavaa vesipohjaista leikkuuneste-emulsiota, tästä muodostuvaa vesihöyryä sekä sinkoilevia metallilastuja. Näissä olosuhteissa paneelit eivät kestä mekaanisia rasituksia, lisäksi paneelin pinnalle muodostuu hetkessä myös likakerros, joka heikentää energiankeruun hyötysuhteen olemattomaksi. Edellä mainituista seikoista johtuen, valosähköisen energiankeruu ei ole sopiva vaihtoehto teollisuusympäristössä.

Energiankeruuta värinästä kokeiltiin kolmesta eri kohteesta. Kappaleessa 4.3 annettiin värinästä tapahtuvalle energiankeruulle viitteellisiksi tehoarvoiksi $4\text{--}100 \mu\text{W}$. Käytännössä suoritetuissa mittauksissa saatiin mitattua vain noin $1 \mu\text{W}$ tehoja. Tämän selittää se että teollisuuden koneet ja laitteet ovat hyvin vaimennettuja ja tasapainotettuja. Sen vuoksi ne eivät tärise niin paljon, että niistä saisi kerättyä energiaa langattoman sensoriverkon tarpeisiin. Energiankeruuta värinästä voi käyttää toisten energiankeruumenetelmien tukena, esimerkiksi termoenergian lisänä kuten alaluvussa 5.3.4. Yksistään se ei kuitenkaan ole sensorinoodin tarpeisiin riittävä energiankeruumenetelmä. Menetelmä on muuten toimiva ja kaikin puolin teollisuuden käyttöön sopiva, ainoastaan alhainen tehonsaanti on ongelmana. Ehkä tulevaisuudessa piezo-materiaalit kehittyvät ja tälläkin menetelmällä päästään parempiin tuloksiin tehon tuoton osalta. Mutta tällä hetkellä tärinä on toimiva ratkaisu vain, jos ympäristössä on voimakkaasti täriseviä laitteita, kuten El Kouchen työssä [13] käytetyt täryseulat. Konepaja ympäristöstä en kuitenkaan onnistunut löytämään laitetta, jonka värinästä olisi saatu kerättyä tarpeeksi energiaa sensoriverkon noodin tarpeisiin.

Termoenergian kohdalla mitatut tulokset ovat linjassa teoriaosan kappaleen 4.4 kanssa. Laitteen peltier-elementillä saatiin tuotettua $16.6 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaerolla $290 \mu\text{W}$

teho. Tämä on riittävä määrä jo kolmen langattoman sensoriverkon noodin ylläpitämiseen. Näissä tuotantotiloissa oli 12 hydraulioöljysäiliötä eli jos jokaiseen asennettaisiin yksi energiankeruuelementti, saataisiin riittävästi tehoa 36 sensoriverkon noodille. Tämän lisäksi myös lämmityspatterien putkiin asennetuilla keruuelementeillä saatiin tehoja, jotka ovat riittäviä jopa neljän sensoriverkon noodin tarpeisiin. Termoenergian keruumenetelmä on myös luonteensa puolesta teolliseen ympäristöön sopiva, keruuelementin rakenne on yksinkertainen eikä sisällä liikkuvia osia. Tällä menetelmällä saadaan kohtuullisen kokoisella paneelilla kerättyä riittävästi energiaa langattoman sensoriverkon noodin tarpeisiin. Kohteita termoenergian keruulle on teollisessa ympäristössä runsaasti ja keruuelementin kiinnittäminen kohteisiin on usein yksinkertaista. Tämän asian on huomannut myös Perpetua Power Technologies, joka on kehittänyt Power Puck[®][38] energiankeruulaitteen prosessiteollisuuden tarpeisiin (alaluku 4.4.2).

Taulukko 5.6: Mitattujen ja teoreettisten energiankeruumenetelmien vertailu

Menetelmä	Energian tuotto teoria	Mitattu tuotto
Valoenergia Sisätiloissa	10 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$ [39]	1-6 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$
Värinä-/Liike-energia	4 $\mu\text{W} - 100 \mu\text{W} \text{ cm}^2$ [39]	1-2 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$
Termoenergia	0.3 mW - 160 mW / cm^2 [5]	18-26 $\mu\text{W} / \text{cm}^2$

6 Yhteenveto

Langattomat sensoriverkot soveltuvat mittaus- ja tarkkailusovelluksiin useilla eri osa-alueilla. Myös teollisuudessa niiden soveltaminen on jo arkipäivää, kuten voimme huomata esimerkiksi alaluvuissa 4.3.2 ja 4.4.2 esitellyistä käytännön sovelluksista. Virtalähteenä toimivan pariston energian rajallisuus on yksi langattomien sensoriverkkojen mahdollisuuksia rajoittava tekijä. Langattoman sensoriverkon nooidien on toimittava useita vuosia pienen sisäisen pariston varassa. Sen vuoksi sovellukset joudutaan suunnittelemaan niin, että nooidien virrankulutus on mahdollisimman vähäistä. Paristojen käyttäminen virtalähteenä myös nostaa langattoman sensoriverkon ylläpitokustannuksia. Paristojen vaihtaminen alueellisesti laajan sensoriverkon noodeihin on kallis ja työläs toimenpide. Energiankeruu ympäristöstä mahdollistaa langattoman sensoriverkon, joka voi toimia ilman ehtyvän virtalähteen asettamia rajoitteita.

Tämän tutkielman pääteemat olivat erilaiset energiankeruumenetelmät ja näiden menetelmien soveltuvuus teollisuuden langattoman sensoriverkon tarpeisiin. Teoriaosuudessa keskityttiin antamaan yleiskuva langattomista sensoriverkoista ja käytiin läpi yleisiä laitealustoja, käyttöjärjestelmiä sekä energiankeruumenetelmiä. Teollisen ympäristön asettamat erityistarpeet ja olosuhteet, kuten lika, tärinät sekä lämpötilojen äkilliset vaihtelut otettiin huomioon. Energiankeruumenetelmistä valosähköinen-, tärinä-, liike-, RF- ja termoenergia valittiin tämän työn teoriaosaan tarkasteltaviksi. Näiden menetelmien valinta perustui omiin käytännön kokemuksiini teollisuuden kunnossapidon parissa sekä lukemaani lähdemateriaaliin. Ennen työn aloittamista keräsin tietoa aiheesta lukemalla useita energiankeruuseen liittyviä artikkeleita, kirjoja sekä päättötöitä. Käytännön mittauksia tehdessäni tietyt tulokset yllättivät minut positiivisesti ja tietyt negatiivisesti.

Valoenergian keruun käytännön tulokset jäivät noin puoleen teoriaosan asettamista ennakko-odotuksista. Tässä vaikuttavat edellä mainitut teollisuuden asettamat olosuhteet kuten pöly ja lika, jotka johtavat siihen että valoenergiaa on saatavilla rajoitetusti. Valoenergian keruun kohdalla en yllättynyt energiamäärien suhteen, ne vastasivat omia ennakko-odotuksiani.

RF-energian keruumenetelmää ei tässä käytännössä tutkittu, siihen perehdyttiin

ainoastaan teoriaosuudessa. Käytännön mittauksia ei suoritettu, koska en saanut käyttöni mittauksessa tarvittavia laitteita ja toisaalta teoriaosuudessa kävi selväksi, että saadut tehot olisivat olleet marginaalisia. Täytyy kuitenkin huomata, että RF-energian keruumenetelmässä antenni on merkittävässä asemassa [6]. Joten jos antennitekniikoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia, hyötysuhde voi kasvaa huomattavasti.

Energiankeruu tärinästä oli pettymys, lähinnä saatujen tehojen osalta. Ajattelin että teollisessa ympäristössä koneista ja laitteista saataisiin kerättyä paljon energiaa tärinästä. Näin ei kuitenkaan ainakaan tässä toimintaympäristössä ollut, vaan lukeumat olivat verraten pieniä. Teollisuuden koneet ja laitteet on hyvin tasapainotettu ja värinävaimennettu, sen vuoksi niiden ulkopinnat eivät tärisä riittävän voimakkaasti energiankeruuta ajatellen. Tähän ovat poikkeuksena sellaiset koneet, joissa tärinä on olennainen osa prosessia, kuten seulat ja paineilmavasarat. Tällaisia koneita ei kuitenkaan tässä ympäristössä ollut, joten tällä menetelmällä saadut tehot jäivät pieniksi.

Termoenergian keruun kohdalla yllätyin positiivisesti. Tämä on menetelmänä yksinkertainen ja toimiva. Sen vaatima elektroniikka on myös yksinkertainen. Saatavat tehot ovat kohtuullisia, ja riittävät langattoman sensoriverkon noodin tarpeisiin. Teollisessa ympäristössä, jossa mittaukset tehtiin oli myös runsaasti kohteita termoenergian keruulle. Termoenergia onkin tutkimistani menetelmistä mielestäni käyttökelpoisin ja toimivin ratkaisu langattoman sensoriverkon tarpeisiin teollisuusympäristössä. Lämpötilaeroilla $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $29.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ saatiin mitattua $18\text{ }\mu\text{W}$ - $26\text{ }\mu\text{W}$ tehoja keruelementin yhden neliösentin pinta-alaa kohti. Mielestäni edellä mainitut teholumemat ovat pinta-alaan suhteutettuna erittäin hyviä. Kappaleessa 4.4.1 mainittu nanotekniikka voi tulevaisuudessa tuoda markkinoille keruelementtejä, joiden hyötysuhde on huomattavasti nykyisiä parempi. Tällainen kehitys mahdollistaisi entistä suurempien energiamäärien keruun tällä tekniikalla sekä keruelementtien pienemmän fyysisen koon.

Lähteet

- [1] AKYILDIZ, I. F., MELODIA, T., JA CHOWDHURY, K. R. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer networks* 51, 4 (2007), 921–960.
- [2] ALATALO, J. Aikasynkronointi langattomissa anturiverkoissa. Pro Gradu, Jyväskylän yliopisto, Marraskuu 2009.
- [3] ATMEL CORPORATION. *Tag Tuning/RFID Document 2055A-RFID-07/02*, 2002.
- [4] ATMEL CORPORATION. *Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash*, 2013.
- [5] BEEBY, S., JA WHITE, N. *Energy harvesting for autonomous systems*. Artech House, 2010.
- [6] BRAND, O., FEDDER, G. K., HIEROLD, C., KORVINK, J. G., JA TABATA, O. *Micro energy harvesting*. John Wiley & Sons, 2015.
- [7] COLLIN, J., JA SAARELAINEN, A. *Teollinen internet*. Talentum, 2016.
- [8] CUI INC. *Peltier modules Series CP85 Datasheet*, 9 2018.
- [9] DANG, P., MOSS, S. D., XAI, J., JA CAIRNEY, J. M. Vibration energy harvesting using relaxor ferroelectric transduction. *Procedia Engineering* 188 (2017), 432–439.
- [10] DIGITA. Mikä on lorawan? URL https://www.digita.fi/yrityksille/iot/mika_on_lorawan. Viitattu: 26.10.2018.
- [11] DUNKELS, A., GRONVALL, B., JA VOIGT, T. Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. Julkaisusarjassa *Local Computer Networks, 2004. 29th Annual IEEE International Conference on* (2004), IEEE, 455–462.
- [12] EIDAKS, J., TJUKOVŠ, S., JA PIKULINS, D. Exploration of possible energy sources for hybrid power system of indoor wsn. Julkaisusarjassa *Advances in*

- Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), 2017 5th IEEE Workshop on (2017), IEEE, 1–5.*
- [13] EL KOUICHE, A. *Wireless sensor network platform for Harsh Industrial Environments*. PhD thesis, 2013.
- [14] EL KOUICHE, A., AL-AWAMI, L., HASSANEIN, H., JA OBAIA, K. Wsn application in the harsh industrial environment of the oil sands. *Julkaisusarjassa Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International (2011), IEEE, 613–618.*
- [15] ESWARAN, A., ROWE, A., JA RAJKUMAR, R. Nano-rk: an energy-aware resource-centric rtos for sensor networks. *Julkaisusarjassa Real-Time Systems Symposium, 2005. RTSS 2005. 26th IEEE International (2005), IEEE, 10–pp.*
- [16] FAROOQ, M. O., JA KUNZ, T. Operating systems for wireless sensor networks: A survey. *Sensors 11, 6 (2011), 5900–5930.*
- [17] GONZÁLEZ, G. Z. *Radio frequency identification (RFID) tags and reader antennas based on conjugate matching and metamaterial concepts*. PhD thesis, Universitat Autònoma de Barcelona, 2013.
- [18] GREENMATCH. Types of solar panels (2018). URL <http://www.greenmatch.co.uk/blog/2015/09/types-of-solar-panels>. Viitattu: 26.10.2018.
- [19] HARMAN, T., TAYLOR, P., WALSH, M., JA LAFORGE, B. Quantum dot superlattice thermoelectric materials and devices. *science 297, 5590 (2002), 2229–2232.*
- [20] IBRAHIM, R., CHUNG, T. D., HASSAN, S. M., BINGI, K., JA BINTI SALAHUDDIN, S. K. Solar energy harvester for industrial wireless sensor nodes. *Procedia Computer Science 105 (2017), 111–118.*
- [21] KARSCHNIA, B. Energy harvesting enables widespread wireless sensing in process plants. *Technology Feature (2016).*
- [22] KHAN, I. U., SAFI, A., AHMAD, S., AZIM, N., SHAH, S. B. H., JA FULIANG, Y. Latest advancements and future patterns in wireless sensor networks. *IJSEAT 5, 5 (2017), 463–466.*

- [23] LEVIS, P., MADDEN, S., POLASTRE, J., SZEWCZYK, R., WHITEHOUSE, K., WOO, A., GAY, D., HILL, J., WELSH, M., BREWER, E., ET AL. Tinyos: An operating system for sensor networks. *Kirjassa Ambient intelligence*. Springer, 2005, ss. 115–148.
- [24] LHERMET, H., CONDEMINÉ, C., PLISSONNIER, M., SALOT, R., AUDEBERT, P., JA ROSSET, M. Efficient power management circuit: From thermal energy harvesting to above-ic microbattery energy storage. *IEEE Journal of solid-state circuits* 43, 1 (2008), 246–255.
- [25] LINEAR TECHNOLOGIES. *Energy Harvesting (EH) Multi-Source Demo Board with Transducers datasheet*, 2004.
- [26] MAXWELL TECHNOLOGIES. *BCAP0350 Datasheet*.
- [27] MIDE TECHNOLOGY. *PPA products datasheet & user manual*, 2013.
- [28] NOTH, A. History of solar flight. *Autonomous Systems Lab, Switzerland: ETH Zürich* (2008).
- [29] POWERCAST. *P2210B RF powerharvester receiver datasheet*, 2017.
- [30] RAHN, C. D., JA WANG, C.-Y. *Battery systems engineering*. John Wiley & Sons, 2013.
- [31] REZENDE, L. *Chronology of science*. Infobase Publishing, 2006.
- [32] SANYO SEMICONDUCTORS. *Solar Cell AM-5412 Datasheet*, 2008.
- [33] SIMJEE, F., JA CHOU, P. H. Everlast: long-life, supercapacitor-operated wireless sensor node. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 2006 international symposium on Low power electronics and design* (2006), ACM, 197–202.
- [34] SUDEVALAYAM, S., JA KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 13, 3 (2011), 443–461.
- [35] TANEJA, J., JEONG, J., JA CULLER, D. Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks* (2008), IEEE Computer Society, 407–418.

- [36] TECK, B. L., NGAI, M. L., JA BOON, K. P. Feasibility study on ambient rf energy harvesting for wireless sensor network. *Julkaisusarjassa Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO)*, 1–3.
- [37] TEXAS INSTRUMENTS. *Mixed signal microcontroller datasheet*, 2013.
- [38] THOMPSON, K. Improved pump monitoring with WSN and power puck® thermoelectric energy. *Case Study* (2012).
- [39] VULLERS, R., VAN SCHAIJK, R., DOMS, I., VAN HOOFF, C., JA MERTENS, R. Micropower energy harvesting. *Solid-State Electronics* 53, 7 (2009), 684–693.
- [40] WILLIAMS, R. *The journal of chemical physics*. (1960). vol. 32, 1505–1514.
- [41] WILLIG, A. Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on industrial informatics* 4, 2 (2008), 102–124.
- [42] ZENG, P., CHEN, H., YANG, Z., JA KHALIGH, A. Unconventional wearable energy harvesting from human horizontal foot motion. *Julkaisusarjassa Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE* (2011), IEEE, 258–264.
- [43] ZHANG, P., SADLER, C. M., LYON, S. A., JA MARTONOSI, M. Hardware design experiences in zebranet. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems* (2004), ACM, 227–238.