

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Timo Nisu

IoT sensoreiden energian louhinta

Diplomityö

2016

Sivumäärä 29, kuvia 14, taulukoita 1.

Tarkastajat: Professori Pertti Silventoinen
Tutkijaopettaja Mikko Kuisma

Hakusanat: IoT, IoE, Esineiden Internet, Teollinen internet, Koneiden internet,
Energian louhinta

Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osasto halusi selvittää uuden teknologian, Esineiden Internetin, määritelmää. Lisäksi haluttiin luoda yksi kokonaisuus energian louhintamenetelmistä, joita käytetään Esineiden Internet -teknologiaan perustuvissa antureissa. Tämä kirjallisuustutkielma antaa lukijalle laajan käsityksen uudesta teknologiasta ja sen mahdollisuuksista sekä ymmärryksen eri energian louhintamenetelmien toimintaperiaatteista. Tutkielma perustuu pääpiirteittäin tieteellisiin artikkeleihin ja kokoaa kerätyn tiedon yhdeksi kokonaisuudeksi.

Tutkimuksen tuloksena todetaan, että energian louhinnan avulla kyetään luomaan itsenäisiä ja pitkäikäisiä sensoreita. Louhinta mahdollistaa luopumisen paristoista, minimoiden samalla sensoreiden huoltotarvetta. Energian louhintamenetelmiä tulisi kuitenkin kehittää energiatehokkaammiksi, jotta ympäröivästä energiasta hyödyttäisiin mahdollisimman paljon. Lisäksi eri louhintamenetelmien yhdistäminen eli hybridikäyttö katsotaan vaativan lisätutkimusta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Timo Nisu

IoT sensors energy harvesting

Master's Thesis

2016

Pages 29, pictures 14, tables 1.

Examiners: Professor Pertti Silventoinen
Associate Professor Mikko Kuisma

Keywords: IoT, IoE, Internet of Things, Internet of Everything, Energy harvesting

Lappeenranta University of Technology department of Electrical Engineering wanted to clarify the definition of a new technology, Internet of Things. The department also wanted to gain one big picture about energy harvesting methods that can be used with wireless sensors that are based on Internet of Things. For those who read this research, it gives a wide insight of this new technology and opportunities that it brings within. The research also gives principles of different energy harvesting methods. The knowledge of this research is gathered basically from scientific articles that are based on Internet of Things.

As a result of this research, it can be seen that with energy harvesting it is possible to build independent and practically everlasting sensors. Energy harvesting is a potential option to build a battery and maintenance free wireless sensor. However, energy harvesting methods need more research to make them more energy-efficient. That way it would be possible to gain more electricity from ambient energy sources. More research is needed in the area of hybrid use, which means combining different energy harvesting methods to one component.

ALKUSANAT

Diplomityön aihe syntyi yhdessä työn ohjaajien kanssa käydyssä alkuneuvottelussa. Tuolloin Esineiden Internet oli suuri tutkimuksenaihe myös suomalaisessa yritysmaailmassa, mutta tiedon määrä julkisuudessa oli vielä hyvin vähäistä. Diplomityön edetessä Esineiden Internetin tietoisuus on kasvanut julkisuudessa. Tutkittavat aiheet olivat jo työn alkupuolella kiinnostavia sekä hyvin ajankohtaisia. Olen suuresti kiitollinen ohjaajilleni Pertti Silventoiselle sekä Mikko Kuismalle, että olen saanut tehdä tutkimusta näin tuoreesta tekniikasta sekä heidän tuestaan.

Työskentely ja rutiinin löytäminen oli aluksi todella haastavaa. Suurimpina vaikuttavina tekijöinä olivat rahoituksen sekä työpisteen puute. Kuitenkin syvempi tutustuminen tutkittaviin aiheisiin kasvatti suuren poltteen ja halun oppia tutkimuskohteista yhä enemmän ja enemmän. Vaikka työn pituus jäi sivumääräisesti lyhyeksi, olen silti tyytyväinen lopputulokseen. Katson saaneeni informatiivisen, helppolukuisen ja kattavan tutkielman Esineiden Internetistä sekä eri energian louhinta tavoista.

Haluan kiittää omaisiani koko koulu-urani aikana annetusta tuesta. Suuri kiitos kuuluu Lappeenrannan teknillisen yliopiston ylioppilaskunnalle ja etenkin sen pääsihteerille, Antti Ilmavirralle, antamastaan tuesta tutkimuksen aikana sekä sallien minun tehdä tutkimusta ylioppilaskunnan toimistolla. Kiitän myös Lappeenrannan teknillisen yliopiston kirjastoa tarjoamastaan lopputyötilasta. Erityiskiitos kuuluu ystävälleni Kipelle, kuka auttoi minua pääsemään tutkittaviin aiheisiin sisälle ja on ollut valmis auttamaan erilaisten tutkimukseen liittyvien ongelmien ilmentyessä. Kiitos kuuluu myös muillekin ystävilleni sekä TeMulle, jotka ovat olleet tukena ja antaneet minulle muuta ajateltavaa koulunkäynnin ohella.

Lappeenrannassa, 20.9.2016

Timo Nisu

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENNELUETTELO	6
1. JOHDANTO	7
1.1 Tutkimuskysymykset ja rakenne	7
2. ESINEIDEN INTERNET	9
2.1 Toimintaperiaate	10
2.2 Käyttökohteet	12
2.3 Haasteita	13
3. ENERGIAN LOUHINTA.....	15
3.1 Energian louhintamenetelmät	16
3.1.1 Säteilyenergia	17
3.1.2 Liike-energia.....	19
3.1.3 Lämpöenergia	22
3.1.4 Biokemiallinen energia.....	24
3.2 Käyttö WSN sensoreissa	25
4. JOHTOPÄÄTÖKSET	26
5. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET.....	28

LYHENNELUETTELO

AC	Vaihtovirta
DC	Tasavirta
ETSI	European Telecommunications Standard Institute, standardoimisjärjestö
IoE	Internet of Everything, Kaiken Internet
IoT	Internet of Things, Esineiden Internet
M2M	Machine-to-Machine, koneiden välinen kommunikointi
OA	Optinen antenni
RFID	Radio Frequency Identification, radiotaajuinen etätunniste
RFR	Radiofrequency Rectenna, radiotekniikassa käytettävä antennimalli
WSN	Wireless Sensor Network, langattomien sensoreiden välinen kommunikointi

1. JOHDANTO

Tässä tutkielmassa käsitellään ympäröivän energian louhintamenetelmiä ja tarkastellaan energian louhinnan soveltuvuutta Esineiden Internet teknologiaan perustuville sensoreille. Esineiden Internet on tällä hetkellä uusimpia teknologioita ja se on noussut lähivuosina suureen suosioon yritysmaailmassa. Yritykset sekä tiedelehdet kirjoittavat uudesta teknologiasta ja aiheen ympärille on perustettu uusia yrityksiä. Yleisesti ottaen kyseisestä aiheesta suomeksi kirjoitetut artikkelit harvemmin poikkeaa toisistaan tai tieto on hyvin pinnallista.

Esineiden Internetiin perustuvista sensoreista halutaan usein helppokäyttöisiä, helposti asennettavia ja huoltovapaita. Nämä kolme kriteeriä täyttää energian louhinnalla varusteltu langaton sensori. Useimmat energian louhinnasta kertovat artikkelit ovat spesifioituneet yhteen louhintamenetelmään tai tieto on pinnallista, jolloin louhintamenetelmän toimintaperiaatetta ei ilmaista.

Kuten aiemmin mainittu, uusi teknologia on herättänyt suurta mielenkiintoa yritysmaailmassa, mukaan lukien Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sähkötekniikan osaston. Suomenkielisen tiedon vähyyden vuoksi siitä on nähty tarpeelliseksi tehdä suomenkielinen kirjallisuustutkielma sisältäen kattavan koosteen eri energian louhintamenetelmistä. Kirjallisuustutkielma perustuu pääasiassa englanninkielisiin tieteellisiin artikkeleihin, jotka käsittelevät Esineiden Internetiä sekä kyseiseen teknologiaan perustuvien sensoreiden käyttämiä energian louhintamenetelmiä.

1.1 Tutkimuskysymykset ja rakenne

Tämä kirjallisuustutkielma on toteutettu kuuden tutkimuskysymyksen pohjalta. Tutkimuskysymykset on jaoteltavissa kahteen eri osioon: Esineiden Internet ja energian louhinta. Tutkimuskysymykset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Diplomityön tutkimuskysymykset.

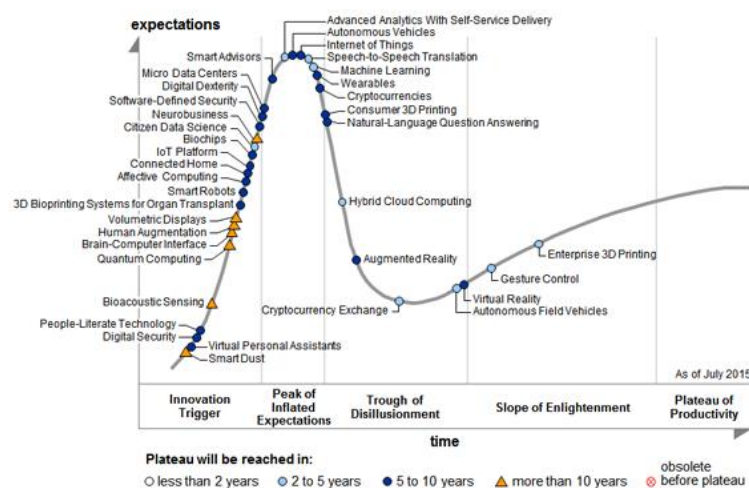
Tutkimuskysymykset
Mikä on Esineiden Internet?
Mitä mahdollisuuksia Esineiden Internetillä on?
Mitä haasteita Esineiden Internet pitää sisällään?
Mitä tarkoittaa energian louhinta?
Mitä energian louhintamenetelmiä on olemassa?
Miten Esineiden Internet ja energianlouhinta ovat kytköksissä toisiinsa?

Taulukon 1 mukaiset tutkimuskysymykset perustuvat tutkimuksen aikana heränneisiin ajatuksiin tutkimuksen aloituksesta tutkimuksen loppuun, alkaen kysymyksistä: ”Mikä on Esineiden Internet” ja ”Mitä tarkoittaa energian louhinta”. Kirjallisuustutkielma on jaettu kahteen pääosioon tutkimuskysymysten mukaan. Tutkielman ensimmäisessä osiossa tutkitaan Esineiden Internetin määritelmää luoden siitä yleiskattavan kokonaisuuden. Tämän jälkeen käydään läpi mahdollisia käyttökohteita ja lopuksi tällä hetkellä ilmeneviä haasteita. Toisessa osiossa tutkitaan energian louhinnan periaatetta ja sen hyötyjä perustuen sensoriteknikkaan. Toisen osion lopussa esitetään eri louhintamenetelmiä neljältä eri ympäröivän energian osa-alueelta: säteily-, liike-, lämpö- ja bioenergia. Tutkielman lopussa käydään läpi työstä syntyneet johtopäätökset ja lopuksi tiivis yhteenveto tutkituista aihealueista.

2. ESINEIDEN INTERNET

Kaiken internet (engl. Internet of Everything, IoE) on uusi teknologiamalli, minkä avulla kaikki esineet ja asiat kytetään tekemään viisaiksi. Tämä mahdollistaa niiden kommunikoinnin keskenään ja ihmisen kanssa käyttäen apunaan tietoliikenneverkkoja. Tätä teknologiaa voidaan soveltaa muun muassa kaupungeissa, kodeissa, maataloudessa ja koneissa. IoE:n avulla kytetään vähentämään liikenneruuhkan suuruutta, kun kaupungin tieverkosto ilmoittaa autoille ennakoitusti ruuhkasta. Tämän seurauksena autoilijoita ehdotetaan käyttämään kiertoteitä. Kotitalouksien sähkölaitteet saadaan etäohjattaviksi ja murroista saadaan välittömästi hälytys omistajalle sekä virkavallalle. Pelloilta saadaan etänä tieto sadon tilanteesta, maan mineraaleista ja mahdollisista tuholaisista. Hajoamaisillaan oleva mekaaninen kone ilmoittaa käyttäjälleen huoltotarpeesta ennen kuin kone hajoaa. Uuden teknologian tuomia mahdollisuuksia on lukuisia ja niitä kehittyä jatkuvasti lisää.[1]

Puhumme ”Teollisuus 4.0:sta”, jossa Esineiden Internet -teknologiaa (engl. Internet of Things, IoT) apuna käyttäen yhdistetään esineet/asiat tietoliikenneverkkoon ja siten internetiin. Vaikkakin IoT on tänä päivänä todella käytetty termi, sen tarkempaa määrittelyä ei tunneta tai sitä ei ole vielä kehittynyt. Tästä huolimatta IoT:n hyödyntäminen on kasvanut lähi-vuosina räjähdysmäisesti ja vuoteen 2020 mennessä uskotaan olevan enemmän kuin 50 miljardia IoT laitetta ja sen markkinaosuuden uskotaan nousevan mahdollisesti jopa 6,34 triljoonaan euroon.[2],[3] Kuva 1 on esitetty teknologiakehityksen tämänhetkinen tilanne.

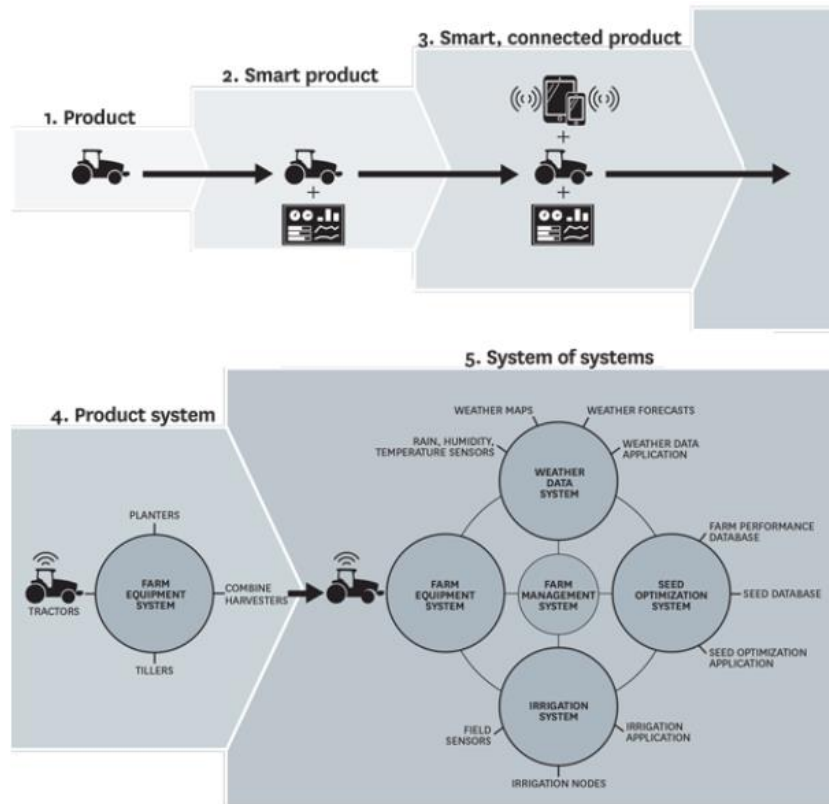


Kuva 1 Garnierin Hype Cycle nouseville teknologioille vuonna 2015. IoT on puhutuimpia teknologioita ja IoT sovellukset ovat nousemassa älykkäiden kotien kanssa mainonnan kohteeksi.[4]

Kuva 1 huomataan IoT:n olevan tällä hetkellä puhutuimpia teknologioita. IoT:n suurin mielenkiinto johtuu oletettavasti yhteiskuntamme digitalisoitumisesta ja helppo- sekä etäkäytettävyys ajatuksesta. Automatisaation ja teknologian kehityksen myötä on oletettavissa etenkin koneiden kunnan tarkkailijoiden sekä fyysisen työn tekijöiden tarpeen vähenevän. Uudet teknologiat lisäävät kuitenkin muun muassa kodin turvallisuutta, vaaratilanteiden ennaltaehkäisyä ja työntekijöiden tarvetta teknisen ja internet -infrastruktuurin kehitys- ja suunnittelupuolella.

2.1 Toimintaperiaate

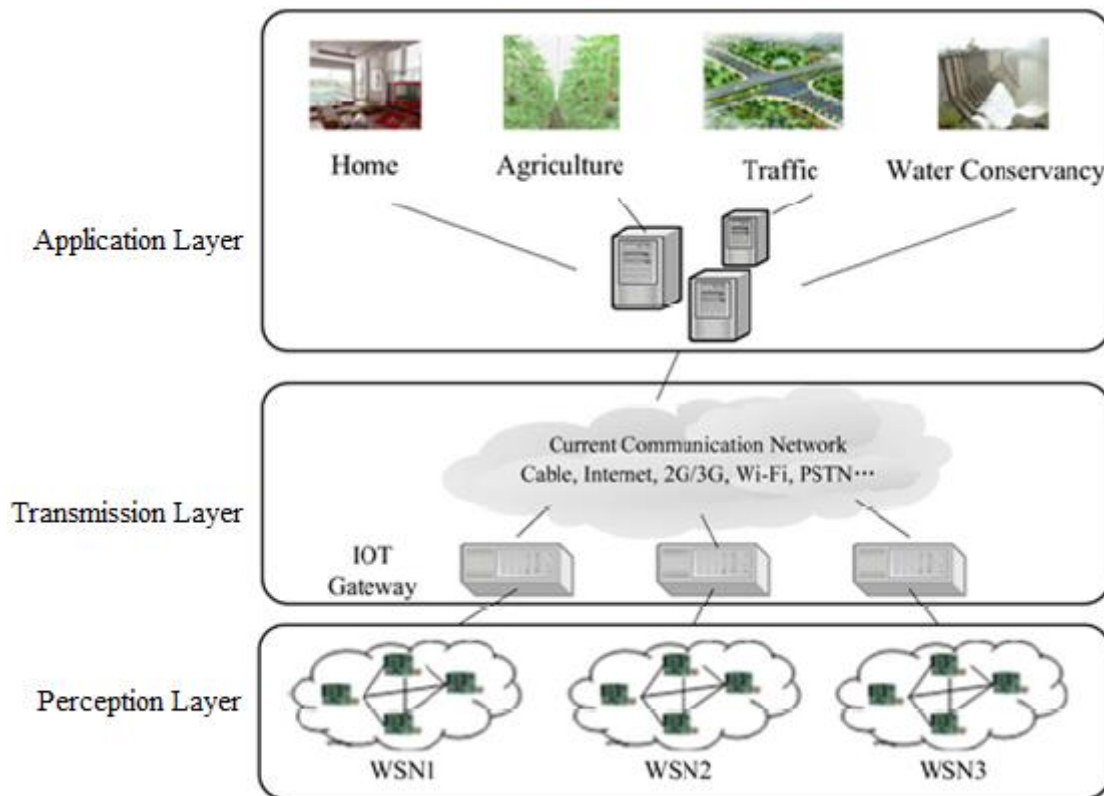
Yksinkertaisuudessaan IoT tarkoittaa esineen yhdistämistä tietoliikenneverkkoon ja mahdollisesti internetiin, luoden siitä siten etäkäytettävän. Jotta IoT-ominaisuus saadaan toteutettua laitteelle, tarvitaan sensoreita ympäröivän tiedon keruuseen, mikroprosessoreita tiedon käsittelyä varten sekä jokin lähetystapa kommunikointia varten. Lisäksi tarvitaan energialähde sekä mahdollinen energiavara-asto toiminnan ylläpitämiseksi.[2] Kuva 2 esitetty maatalouden kehitys IoE ympäristöön.



Kuva 2 Maatalouden IoE malli, jossa koneista tehdään älykkäitä IoT-laitteita, jotka kommunikoivat muiden maatalouteen liittyvien IoT osa-alueiden kanssa.[5]

Kuva 2 traktori on esine, josta tehdään älykäs lisäämällä siihen tietokone. Mikäli siihen kytetään piiri, joka mahdollistaa sen kommunikaation muiden laitteiden kanssa tietoliikenneverkkojen välityksellä, siitä tulee IoT-laite. Kun tämä kokonaisuus yhdistetään säätietojen, peltojen ja varastojen vastaavien ominaisuuksien kanssa, saadaan kokonaiskuva IoE maatilasta. Vastaava ajatusmalli toimii älykkäissä kaupungeissa, tehtaissa ja kodeissa.[5]

IoT:n arkkitehtuuri on jaettavissa tyypillisesti kolmeen eri osa-alueeseen: havainnointi, lähetys, käyttösovellus.[6] Kyseinen arkkitehtuuri havainnollistettu Kuva 3.



Kuva 3 IoT-arkkitehtuurin kolme yleisintä kerrosta alimmasta aloittaen: havainnointi, lähetys ja käyttösovellus. Kuvasta on huomattavissa tiedonvälityksen väylät sensoreiden ja sovellusten välillä.[6]

Havainnointikerroksen tärkeimpänä tehtävänä on havainnoida fyysistä maailmaa ja muuttaa se sähköiseen muotoon. Kerätyn tiedon prosessointia voi myös tapahtua tässä kerroksessa. Havainnointi tapahtuu sensoriteknologioita apuna käyttäen. Jokainen järjestelmässä käytettävä sensorilaite on etätunnistettavissa esimerkiksi radiotaajuisten etätunnisteen (engl. Radio Frequency Identification, RFID) avulla. Lisäksi ne kykenevät kommunikoimaan jopa keskenään tietoliikenneverkon välityksellä luoden sensoreiden oman lähiverkon. Tällaista kom-

munikointia tukee ETSIn (European Telecommunications Standard Institute) luoma standardi M2M (Machine-to-Machine) IoT sensoreille, mikä pitää sisällään muun muassa sensoreiden tietoverkoston sovelluksia, tietosuojaa, osoitteita ja integroitumista. Kuva 3 esitetyt kolme lähiverkkoa on toteutettu langattomilla sensoriverkostoilla (engl. Wireless Sensor Network, WSN). Itsenäisen prosessoinnin ja lähiverkon avulla sensorilaitteet kykenevät nopeaan havainnointiin ja reagointiin omassa järjestelmässään.[6], [7]

Lähetyskerroksen tehtävänä on jakaa tietoa Kuva 3 mukaisesti käyttösovellusten ja sensoreiden välillä. Lisäksi tämä kerros toimii mahdollisesti tiedonsiirtokanavana käyttäjän ja käyttösovelluskerroksen välillä. Kun kahden muun kerroksen sekä käyttäjän välinen etäisyys ja siirrettävän tiedon määrä kasvaa, tarvitaan nopeampaa ja tehokkaampaa laitteistoa tiedonsiirtoa varten. Edellä mainitut seikat toisin sanoen sanelevat lähetyskerroksen tarpeellisuuden.[6]

Käyttösovelluskerroksessa tapahtuu järjestelmän varsinainen prosessointi. Lisäksi tämä kerros antaa lähetyskerrokselle käskyn, minne kerätty tieto tulee lähettää: sensoreille, pilvipalveluun vai käyttäjälle.[6]

2.2 Käyttökohteet

Kuten jo aiemmin on todettu, IoT teknologiaa hyödynnetään muun muassa kaupungeissa, kodeissa, maataloudessa ja koneissa. Tulevaisuudessa lähes kaikki on kontrolloitavissa ja valvottavissa etänä, mikäli IoT tuodaan esineeseen tai asiaan. IoT:n tuomia mahdollisuuksia on useita ja ohessa vain muutama sovellusesimerkki.

Älykkäässä kaupungissa katuvalaistuksen tuottamaa valotehoa kyetään säätämään tarpeen mukaan IoT-teknologian avulla. Tällöin katuvalaisimien sensorit tarkkailevat auringonvalon määrää sekä ympäröivää liikennettä, jolloin kyetään vähentämään turhaa energiankulutusta. Lisäksi IoT mahdollistaa katuvalaisimien keskinäisen keskustelun. Katuvalaisimen valon määrä laskee, mitä valoisampaa ulkona on. Valaisin ei kuitenkaan toimi täydellä teholla koko pimeän ajan vaan havaitessaan lähestyvän objektin se lisää valotehoa. Tällainen järjestelmä on ollut testikäytössä muun muassa Espanjassa, Santanderin kaupungissa, ja kyseinen kokeilu osoittautui todella taloudelliseksi. Kokeilun aikana energiankulutus saatiin kolmannekseen ja myös CO2 päästöt laskivat verrattuna koetta ennen saatuihin tuloksiin.[8]

Karjaa tai muuten tarkkailtavia eläimiä kyetään valjastamaan langattomalla sensoriteknikalla ja niiden liikkeistä sekä terveydentilasta saadaan reaaliaikaista tietoa. Jos eläimen pulssissa tapahtuu muutoksia tai karjan havaitaan ylittävän karja-aitaus, siitä tulee viesti järjestelmän haltijalle. Samaa ajatusta voidaan soveltaa esimerkiksi kotieläimen pantaan kytkettävällä tunnisteella, jolloin kotieläimen ollessa riittävän kaukana kodista tai omistajasta, siitä tulee ilmoitus kodin järjestelmään ja siten omistajalle. Terveydentilan tarkkailua voidaan soveltaa myös ihmisiin, kuten yksin eläviin vanhuksiin, sydänsairauksista sairastaviin, diabeetikoihin tai epileptikkoihin.[7]

IoT:lla varustettu tuotantolinja kykenee huomaamaan jonkin koneenosan tulevan käyttökänsä päähän tai mahdollisesta hajoamisesta ja ilmoittaa huoltotarpeestaan sekä mahdollisesti tilaa samalla varastoon uuden osan huoltoa varten. Tällöin ehkäistään koko linjaston pitkäaikaista seisokkia osatilauksen odotuksen ja huollon suhteen, koska ennakointi tapahtuu riittävän ajoissa. Vastaavaa varastonohjausta kyetään hyödyntämään tuotantolinjan, logistiikkayhtiön ja varaston välisellä kommunikoinnilla. Tämä mahdollistaa optimoidun varastonohjauksen, jolloin varastossa on aina tarvittava määrä komponentteja tuotteen valmistukseen. Jotta tämä järjestelmä kuitenkin toimisi, se vaatii kokoajan ilmoittavan järjestelmään, mitä osia on otettu varastosta.[7]

2.3 Haasteita

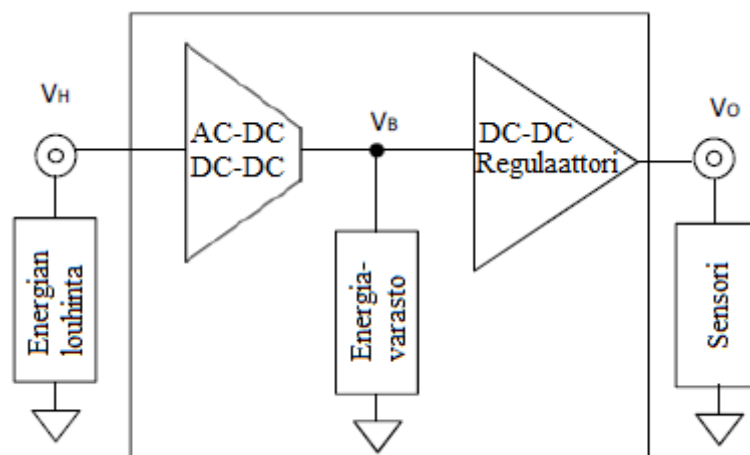
IoT tuo lukuisia mahdollisuuksia, mutta sitä myöden myös uusia haasteita. Kun puhutaan kaiken informaation asettamista internetiin, esimerkiksi pilvipalveluun, ja etäkäytettäväksi, herää etenkin kysymys tietoturvasta sekä intimitetistä. Mikäli sensoreista saatu informaatio laitetaan internetiin, kuka todellisuudessa omistaa tiedon. Tieto on salattavissa, mutta salauksen purun tulee olla järjestelmässä riittävän nopeaa sekä energiatehokasta. Yksi huolenaiheista on kymmenien miljardien sensoreiden yksilöinti ja tiedonsiirtonopeudet kaiken tämän tiedon siirtoon ja sen käsittelyyn. Lisäksi tarvitaan innovatiivisia ratkaisuja tiedon keruuseen sekä sensoreiden sähköistämiseen. Uusi teknologia tarvitsee uusia standardeja ja työryhmiä niiden luomiseksi.[2], [7], [9]

Mikäli laitteeseen on etäyhteys, on se myös hakeroitavissa ja sitä kautta saatetaan päästä käsiksi muuhun järjestelmään. PubNub on Amerikkalainen yritys, joka tarjoaa helppokäyttöistä ja tietosuojattua sovellusta IoT laitteiden tiedonvälitykselle. Yrityksen johtaja Todd Greene kertoo IoT:n haasteista Innovation Enterprisen San Franciscossa 2014 järjestämässä tapahtumassa, että on lähes mahdotonta tehdä tietoturvallinen IoT järjestelmä, koska koko konseptia ei ole vielä tarkkaan määritelty. Hän lisää, että on myös mahdotonta suojata kaikki yksittäiset IoT laitteet ja suojaus tulisi toteuttaa ennemmin järjestelmän sekä internetin välisten porttien salauksella.[10]

Voidaan huomata, että IoT on monimutkainen yhdistelmä eri protokollia, laitteita, tietoturvaa ja ennen kaikkea internetiä. Uusi teknologia tarvitsee innovatiivisia ratkaisuja sensortechniikan suhteen sekä keinoja sähköistää miljardit sensorit. Eri menetelmiä siirtää tietoa sensoreilta internetiin ja pilvipalveluihin sekä jotenkin turvata tietoliikenne ja kerätty tieto ulkopuolisilta. Lisäksi tämän kaiken pitäisi olla yksinkertaisuudessaan käyttäjäystävällistä.

3. ENERGIAN LOUHINTA

Energian louhinnalla tarkoitetaan ympäröivän energian muuttamista sähköiseen muotoon. Tätä teknologiaa käytetään hyödyksi muun muassa langattomissa IoT sensoreissa. Sensoreita voidaan toki sähköistää johtimilla. Tulee kuitenkin muistaa, että mikäli järjestelmässä on satoja sensoreita, vaaditaan myös paljon johtimia. Lisäksi sensoreita saatetaan joutua sijoittamaan haastavaan paikkaan tai niistä halutaan helposti asennettavia. Tällöin halutaan usein välttää johtimia tai niiden määrää, jolloin tarvitaan langatonta ja itsenäistä vaihtoehtoa. Langaton järjestelmä voidaan toteuttaa käyttämällä uudelleen ladattavia energiavarastoja tai paristoja. Paristot ovat suhteellisen halpa ja helppokäyttöinen vaihtoehto yksittäisen sensorin sähköistämiseen. Sensoreita ollessa järjestelmässä satoja tai niiden sijainnin ollessa vaikeassa paikassa, tulee suuria kuluja uusista paristoista sekä niiden vaihtamiseen kuluva työajasta. Lisäksi paristot eivät ole pidemmällä tarkastelulla ekologinen vaihtoehto. Tällöin ladattava energiavarasto, kuten esimerkiksi akku tai kondensaattori, on parempi vaihtoehto. Energian louhinnan avulla voidaan pidentää uudelleen ladattavan energiavaraston energian kestoa, mikä vuorostaan vähentää energiavaraston henkilökohtaisen lataamisen jaksottaisuutta tai mahdollisesti poistaa sen kokonaan. Joissain tapauksissa energian louhinta saattaa poistaa myös energiavaraston tarpeellisuuden.[11]–[13] Kuva 4 on esitetty lohko-kaaviona energian louhinnalla sekä energian varastolla varustettu WSN:n sensori.



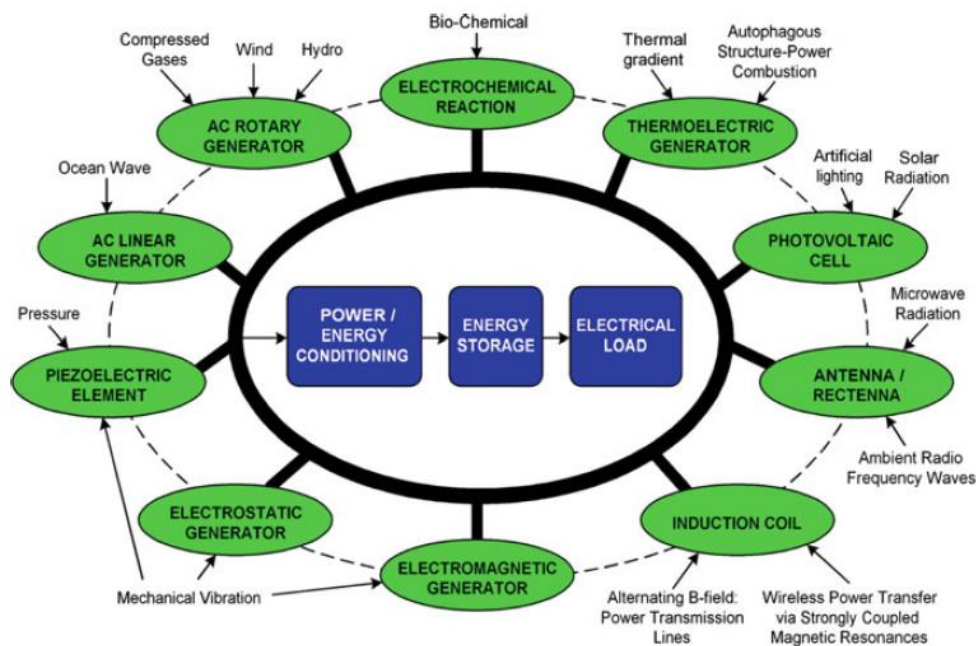
Kuva 4 Louhittava energia muunnetaan vaihtovirrasta(AC) tai tasavirrasta(DC) energiavarastolle sopivaksi virran ja jännitteen suhteen. Tämä vuorostaan jännite tasataan DC-DC regulaattorilla sensoria varten.[14]

Haluttua ympäröivää energiaa kerätään ja muokataan sähköenergiaksi energian louhinnalla. Ennen kuin saatu sähköenergia on käytettävissä järjestelmässä, se tulee muokata virran ja

jännitteen suhteen sopivaksi energiavarastolle ja kuormalle. Tällöin louhittua energiaa kyetään käyttämään optimoidusti. Riippuen sensorin toimintatavasta, louhittua energiaa voidaan varastoida energiavarastoon myöhempään käyttöön. Kuva 4 huomataan, että saatua sähköenergiaa voidaan käyttää myös suoraan sensorilla, mikäli louhitun energian määrä on riittävä sensorin toiminnan ylläpitämiseen.[15]

3.1 Energian louhintamenetelmät

WSN:ssä käytettävää energian louhintamenetelmää tulee miettiä jo sensorin suunnittelun alkuvaiheessa. Louhintatapaa valittaessa tulee huomioida etenkin sensorin tuleva sijainti. Esimerkiksi valoenergia on tunnetuimpia sekä tutkituimpia energianlähteitä energian louhinnan saralla. Lisäksi sillä on yksi parhaimmista hyötysuhteista, mutta se ei kuitenkaan ole paras vaihtoehto pimeässä konehuoneessa olevalle langattomalle sensorille.[15] Kuva 5 on esitetty tunnettuja energian louhinnassa käytettäviä energianlähteitä.

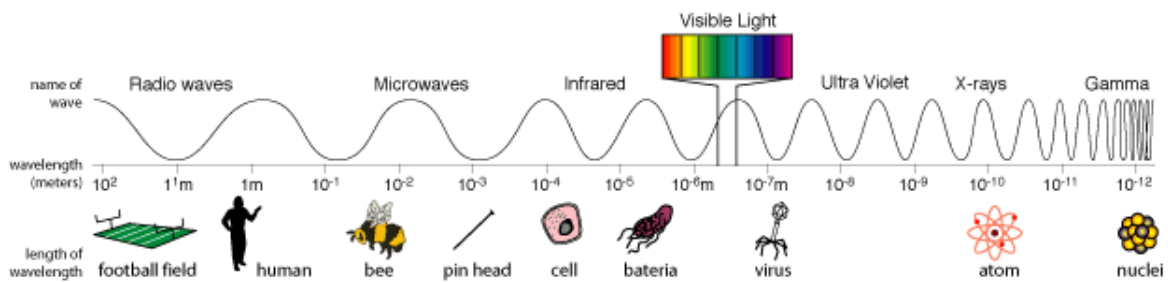


Kuva 5 Sähköenergiaksi muunnettavia uusiutuvia energialähteitä. Energianlähteestä saatava energia muunnetaan sähköenergiaksi yleensä generaattorilla.[15]

Kuva 5 voidaan huomata, että ympärillämme on runsaasti energiaa, mitä on jo opittu louhimaan ja muuttamaan sähköenergiaksi erilaisissa käyttöympäristöissä. Nämä energiamuodot on jaoteltavissa säteily-, liike-, lämpöenergia ja biokemialliseksi reaktioksi.[16]

3.1.1 Säteilyenergia

Tässä työssä säteilyenergiaksi määritellään ympäröivien energianlähteiden säteilemää sähkömagneettista säteilyä, jota kytetään louhimaan ja muuntamaan sähköenergiaksi ilman fyysistä kontaktia energianlähteeseen. Tällaisia energianlähteitä ovat muun muassa aurinko, radiolähettimet ja sähköistetyt sähköjohdot. Eri sähkömagneettista säteilyä säteilevien energianlähteiden lähettämän energian louhintaan käytetään erilaisia menetelmiä, joista muutamia esitetään tässä osiossa. Kuva 6 on havainnollistettu eri sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksia.

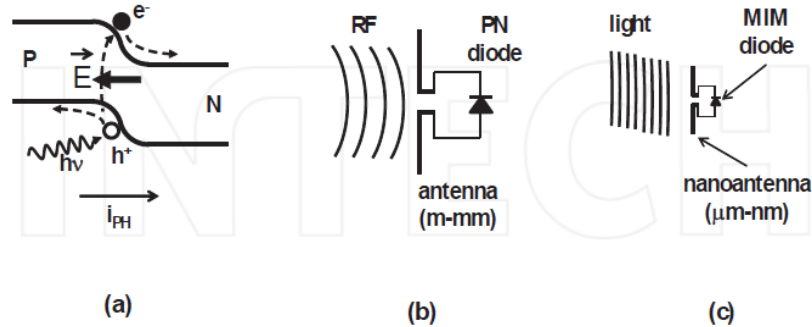


Kuva 6 Sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituuksien määritelmät. Kuvasta voidaan havaita aallonpituuksien suuruusero.[17]

Ympärillämme on havaittavissa sähkömagneettista säteilyä lähestulkoon kaikkialla. Aallonpituudet on luokiteltu karkeasti Kuva 6 mukaisesti eri ryhmiin. Säteily voi olla ihmisen aikaansaamaa tai avaruudesta peräisin olevaa. Runsaiden ihmisen aiheuttamaa sähkömagneettista säteilyä on havaittavissa kaupunki- ja tehdasalueilla. Tämä johtuu langattomien tietoliikenneväylien, sähkölinjojen ja radiomastojen määrästä verrattuna esimerkiksi haja-asutus ympäristöön. Ihmisen aiheuttamaa sähkömagneettista säteilyä tulee myös avaruudessa olevista satelliiteista. Avaruusperäisestä sähkömagneettisesta säteilystä tunnetuin on auringonvalo. Vaikkakin kaupungeissa sekä tehtaissa on runsaasti havaittavissa sähkömagneettista säteilyä, ei se kuitenkaan tarkoita, että näissä kohteissa olisi energiateholtaan runsaasti louhittavaa energiaa. Esimerkiksi yksittäisen WLAN-laitteen lähettämän radioaallon tehotiheys on $10^{-8} - 10^{-6} \text{ mW/cm}^2$, kun taas näköyhteyden ollessa aurinkoon tehotiheys on 10^2 mW/cm^2 .

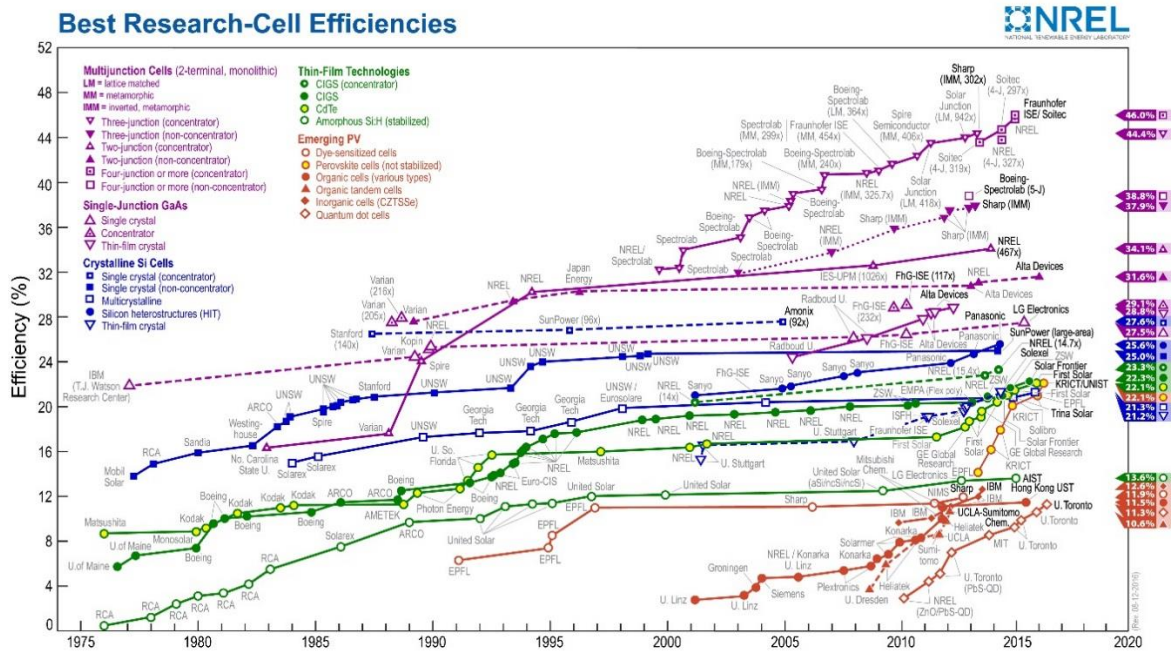
Sähkömagneettista säteilyä louhittaessa on huomioitava, että louhinta heikentää signaalia ja mahdollisesti luo jopa katvealueen eli varjon. Vaikuttavimpana syynä ihmisen käyttämien

langattomien tiedonsiirtoväylien alhaiseen tehottiheyteen on se, että mitä suurempi tehottiheys on, sitä vaarallisempi se on ihmisen biologialle. IEEE:n kansainvälinen komitea on esittänyt suosituksia käytettävien sähkömagneettisten säteilyjen tehottiheyksille.[18], [19] Kuva 7 havainnollistettu kolme eri louhintaperiaatetta sähkömagneettiselle säteilylle.



Kuva 7 Havainnollistava kuva sähkömagneettisen säteilyn mahdollisista louhintaperiaatteista: a) valokennoteknologia, b) RFR ja c) nanoantenni.[18]

Louhintamenetelmä määräytyy pääsääntöisesti säteilevän aallon aallonpituudesta. Kehittynein sekä puhutuin sähkömagneettisen säteilyn louhintamenetelmä on valokennoteknologia, joka perustuu Kuva 7a mukaiseen pn-puolijohdeliitokseen.[18] Valokennoteknologian kehityksen kulkua esitetty Kuva 8.



Kuva 8 Valokennojen kehitys vuodesta 1975 alkaen. Kuvasta havaittavissa uusien teknologioiden kehitys ja hyötysuhteen jatkuva paraneminen.[20]

Kuten Kuva 8 huomataan, kehitys on ollut huomattavaa ja kilpailu suurta. Kehityksen myötä puolijohdekomponentteihin perustuva ohutlevyteknologia on mahdollistanut monikerrosliitos-valokennojen kehittymisen. Näiden valokennojen hyötysuhde on laskennallisesti 50 %. Kuten aiemmin jo todettiin, valokennot perustuvat pn-liitoksessa tapahtuvaan reaktioon. Valossa olevan fotonin absorboituessa pn-liitokseen se aiheuttaa liitoksen sisällä elektroni-aukopareja, joista elektronit siirtyvät n-puolelle ja aukot p-puolelle. Toisin sanoen elektronit kulkeutuvat johdinta pitkin p-puolella oleville aukoille luoden vastakkaissuuntaisen DC-jännitteen, jonka energia on varastoitavissa tai käytettävissä suoraan kuormassa.[18]

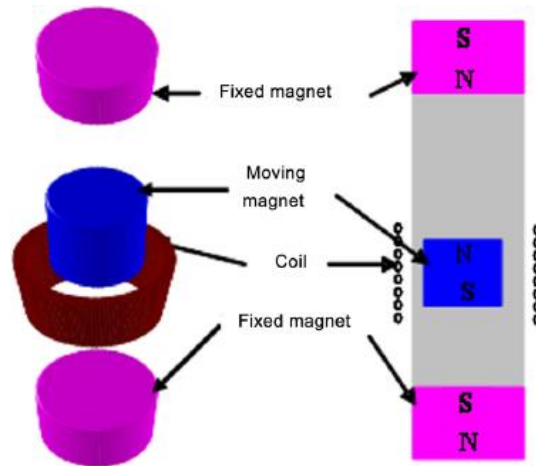
RFR (engl. Radiofrequency Rectenna) on yksinkertainen antenni, joka koostuu sähkömagneettista säteilyä louhivasta $m - mm$ pituisesta antennista sekä tasasuuntaajasta. Sähkömagneettinen säteily saa aikaan värähtelyä antennissa olevissa elektroneissa. Värähtelyn myötä anteeniin syntyy AC-jännite. Antennissa olevien elektrodein yhtenäisen värähtely edellytyksenä on, että sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus on suuruudeltaan antennin pituuden monikerta. Kun anteeniin lisätään tasasuuntaaja, tuotettu AC-jännite saadaan muutettua DC:ksi. Uudehko antennitekniikka, optinen antenni, on ikään kuin RFR, mutta nanokoossa. Optisella antennilla (OA) kyetään louhimaan energiaa sähkömagneettisesta säteilystä, minkä aallonpituus on $\mu m - mm$ suuruusluokkaa. Toisin sanoen optisella antennilla kyetään louhimaan energiaa auringonvalosta ilman kennoa. Aiemmin – IoT laitteiden toimintaperiaatetta käsiteltäessä – mainittu RFID perustuu RFR-/OA-tekniikkaan.[18]

3.1.2 Liike-energia

Liike-energiaa saadaan louhittua sähköenergiaksi Kuva 5 mukaisesti sähkömagneettisella, sähköstaattisella, lineaarisen tai pyörivän liikkeen generaattoreilla sekä pietsosähköisillä materiaaleilla. Sähkömagneettista ja sähköstaattista generaattoria sekä pietsosähköisiä materiaaleja käytetään mekaanisen värinän muuntamisessa sähköenergiaksi. Lineaarista liikettä muuntavia generaattoreita käytetään muun muassa merten aaltojen sisältämän liike-energian muuntamisessa sähköenergiaksi. Pyörivän liikkeen generaattorilla saadaan esimerkiksi tuulen sisältämä liike-energia muutettua sähköenergiaksi.

Mekaanista värinää muutettaessa sähköenergiaksi magneeteilla, kestromagneetti liikkuu käämitetyn putken sisällä edestakaisin putken väristessä. Kestomagneetti voi olla myös kiinnitetty putken päihin jousilla. Putken kumpaankin päähän on kiinnitetty magneetit siten, että

niiden navat ovat keskenään samat kestmagneettiin nähden.[21] Asetelma havainnollistettu Kuva 9.



Kuva 9 Havainnollistava asetelma mekaanisen värinän muuttamisesta sähköenergiaksi magneeteilla.[21]

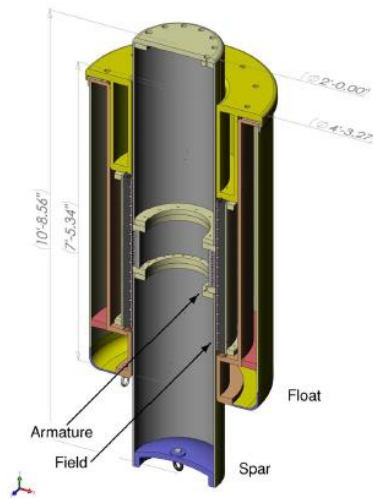
Kestomagneetin edestakainen liike toisiin magneetteihin nähden putken sisällä muuttaa käämissä olevaa magneettivuota. Magneettivuon muutoksen myötä käämiin indusoituu vaihtovirtaa, mikä on saatavissa käyttöön Kuva 9 mukaisen käämin päistä. Tällaisella louhintamenetelmällä voidaan tarkkailla muun muassa kerrostalojen sekä siltojen liikettä.[19]

Sähköstaattisessa generaattorissa säädettävä kondensaattori polarisoidaan alhaiselle jännitteelle. Kun kondensaattorin sähköisesti eristetyt elektrodit erkaantuvat toisistaan, niiden välinen jännite kasvaa. Jännitteen kasvu aiheuttaa vuorostaan virran kulkua muualla piirissä. Tällaista menetelmää käytettäessä tulee muistaa, että kasvanut jännite voi olla liian suuri kuormalle ja siten vahingoittaa sitä. Kuorman vioittumista voidaan estää jännitemuuntimella.[22], [23]

Pietsosähköisillä materiaaleilla energian louhinta perustuu kalvomaisen tai keraamisen pietsosähköisen materiaalin mekaaniseen muovaamiseen. Materiaalin muovaamisen tuloksena saadaan muutettua materiaalin sähköpotentiaaliero ja siten tuotettua sähkövirtaa. Kyseisessä louhintatavassa käytettävä kalvomainen materiaali on polyvinylideenifluoridia ja keraaminen materiaali on lyijy zirkonium titanaattia. Pietsosähköisten materiaalien louhintatavan kiinnostus on ollut kasvussa. Kiinnostusta kasvattaa mahdollisuus käyttää tuotettua säh-

kövirtaa heti kuormassa sekä sen käyttösovellusmahdollisuudet. Tämä menetelmä mahdollistaa muun muassa sähkön tuottamisen kävellessä, mikäli generaattori implementoidaan kengän pohjaan.[13], [24]

Lineaarisen liikkeen muuntaminen sähköenergiaksi perustuu sähkömagneettiseen ilmiöön. Sähköä generoiva generaattori koostuu vähintään kahdesta sylinterimäisestä osasta, joista toinen on toisen sisällä. Toisessa sylinterissä on kestopagneetteja ja toiseen on rakennettu ankkurikäänitys.[25] Kuva 10 havainnollistettu yhdenlaisen lineaarista liikettä generoivan generaattorin rakenne.

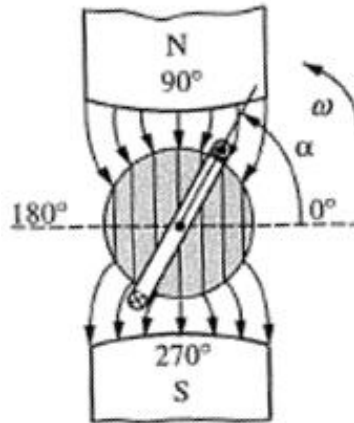


Kuva 10 Havainnollistava malli lineaariliikkeen generaattorista.[25]

Kuva 10 generaattorilla kyetään tuottamaan sähköenergiaa veden aaltoliikkeestä. Sisempi sylinteri – tässä tapauksessa staattori – on kiinnitetty alhaalta vastapainoon, jonka avulla staattori pysyy aaltoliikkeen aikana lähestulkoon paikoillaan. Ulompi sylinteri on poijumainen ja aaltoliikkeen vaikutuksesta se liikkuu ylösalaisin. Tässä generaattorissa ankkurikäänitys on staattorissa ja kestopagneetit ulommassa sylinterissä. Ulomman sylinterin liike aiheuttaa staattorin käänitykseen magneettikentän muutosta, jolloin staattoriin indusoituu sähkövirtaa.[25]

Pyörivää liikettä kyetään muuntamaan generaattoreilla, joiden toimintaperiaate on periaatteessa sama, kuin lineaarisen liikkeen generaattoreissa. Eroavaisuutena kuitenkin on, että yleisesti pyörivän liikkeen generaattoreissa ulkopuolella oleva sylinterimäinen rakenne toimii staattorina ja sisempi – pyörivä osa – roottorina[26]. Roottoria pyörittävää mekaanista

voimaa saadaan aikaan Kuva 5 mukaisesti virtaavista energianlähteistä. Yksinkertainen kyseisenlainen generaattori on Kuva 11 mukainen yksivaihegeneraattori.

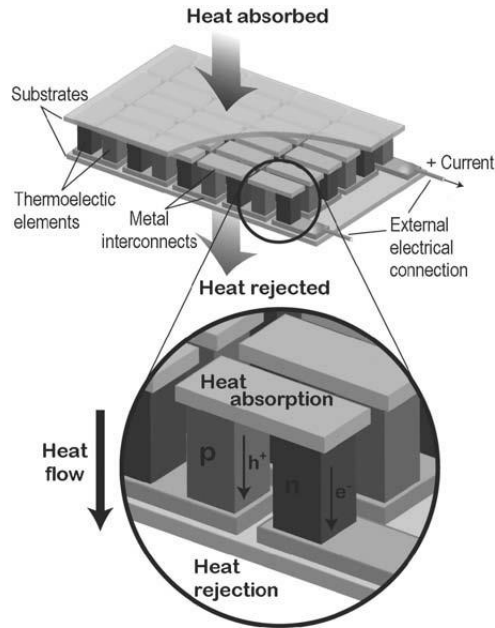


Kuva 11 Yksivaihegeneraattori, jonka ylä ja alapuolella on kestopagneetit, joiden tehtävänä on muodostaa roottoriin magneettikenttä.[26]

Generaattorin staattorissa olevat kestopagneetit muodostavat roottorissa olevaan käämitykseen magneettikentän. Kun roottori pyörii Kuva 11 mukaisesti kestopagneettien välillä, sen käämityksen magneettikenttä muuttuu ja siihen indusoituu vaihtovirtaa.[26]

3.1.3 Lämpöenergia

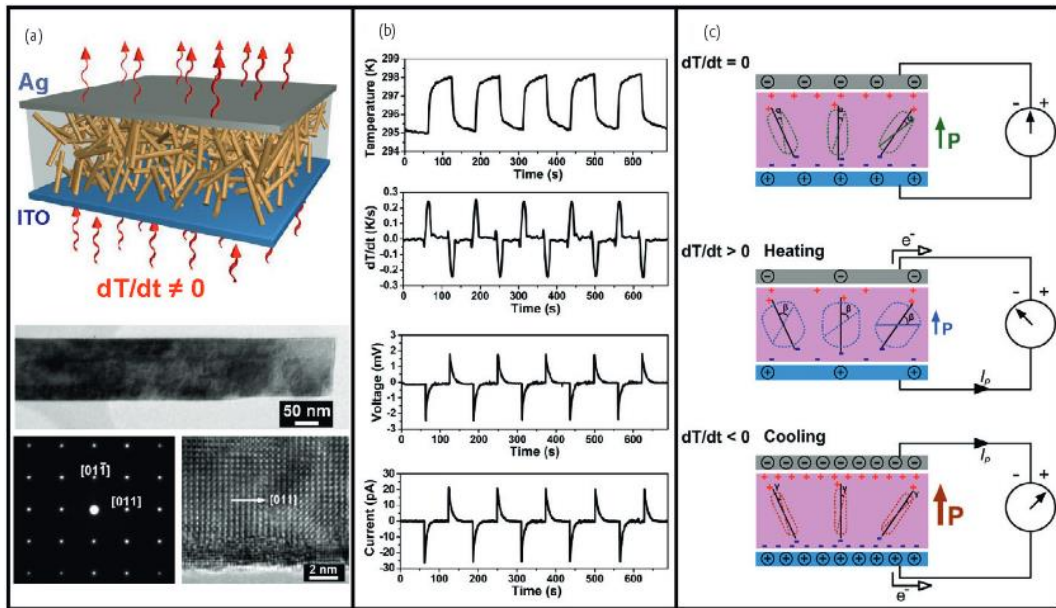
Pääpiirteissään lämpöenergian louhinta perustuu kahden eri väliaineen välisen lämpötilaeron tai väliaineen lämmönvaihtelun aiheuttamaan termojännitteeseen termoelementissä. Lämpötilaerosta saatavan energian louhinta perustuu Seebeck-ilmiöön.[27], [28] Kuva 12 esitetty puolijohdekomponentin rakenne, jota käytetään louhissa energiaa lämpötilaerosta.



Kuva 12 Lämpösähköisen energian louhinnassa käytettävän puolijohdekomponentin rakenne. Kuvassa huomattavissa p- ja n-tyypin puolijohdeiden sijoitus lämpösähköisessä louhijassa sekä niiden yhdistäminen toisiinsa.[27]

Lämpösähköisessä louhijassa p- ja n-tyypin puolijohdeet ovat yhdistettyinä toisiinsa sarjaan Kuva 12 mukaisesti johtavalla materiaalilla. Kun lämpö johtuu louhijan välityksellä lämpimästä väliaineesta viileään, se saa puolijohdeessa olevat vapaat elektronit (n-tyyppi) tai aukot (p-tyyppi) kulkeutumaan viileään väliaineen suuntaan tuottaen sähköstaattisen potentiaalieron puolijohdeiden välille. Tätä ilmiötä kutsutaan Seebeck-ilmiöksi. Louhijan avulla saadaan tuotettua DC-jännitettä ja virran kulku on p-puolelta n-puolelle. Lämpösähköisen louhijan tuottama sähköenergia riippuu muun muassa väliaineiden välisestä lämpötilaerosta sekä käytettävien materiaalien ominaisuuksista, kuten lämmönjohtavuus sekä vapaiden elektronien/aukkojen määrä. Kyseinen louhintamenetelmä on varteenotettava vaihtoehto energian louhinnassa louhijan pienen koon sekä huoltovapauden kannalta. Vaikkakin kyseisen louhintamenetelmän lämpö-sähkö-hyötysuhteen energiatehokkuus on todella alhainen, sillä saadaan tuotettua riittävästi energiaa esimerkiksi rannekellolle ihon lämmöstä.[27], [28]

Lämpötilavaihtelusta saatavan energian louhinta perustuu pyrosähköiseen ilmiöön. Lämpötilavaihtelu saa pyrosähköisessä materiaalissa spontaanin sähköisen polarisaation. Tällöin pyrosähköisen materiaalin kummallekin puolelle sijoitettujen kalvomaisten rakenteiden vapaat elektrodit tai aukot värähtelevät ja kulkeutuvat johtimiin tuottaen tilapäistä sähkövirtaa.[29], [30] Kuva 13 havainnollistettu pyrosähköisen louhijan toimintaperiaate.

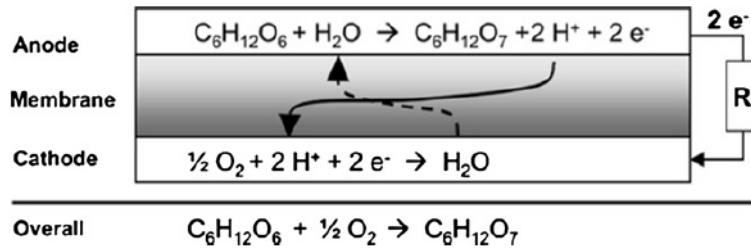


Kuva 13 Lämpötilavaihtelussa käytettävän louhijan toimintaperiaate. (a) Louhijan rakenne. (b) Lämpötilavaihtelun mukaan tuotettu jännite sekä virta. (c) Havainnollistava esitys louhijan toimintaperiaatteesta.[29]

Kuva 13c on havaittavissa virran kulku johtimissa, kun pyrosähköisessä louhojassa tapahtuu lämpötilamuutosta. Kyseisessä louhintatavassa on saatavilla sähkövirtaa vain silloin, kun pyrosähköisessä materiaalissa tapahtuu lämpötilavaihtelua. Toisin sanoen, kun lämpötilamuutosta ei enää tapahdu, pyrosähköisen materiaalin spontaani sähköinen polarisaatio häviää ja siten myös johtimissa oleva jännite muuttuu nolllaksi.[28]

3.1.4 Biokemiallinen energia

Biokemiallinen energian louhija perustuu sähkökemialliseen ilmiöön. Kyseistä energian louhintatapaa voidaan käyttää esimerkiksi sähköistämään ihmisen sisälle asetettavia sensoreita. Entsyymipohjaisilla biopolttoainetta käyttävillä kennoilla kyetään saamaan aikaan veressä olevista endogeenisistä aineista sähkövirtaa. Yleisimmin käytettävä polttoaine on glukoosi.[31], [32] Kuva 14 havainnollistettu tällaisen louhintatavan toimintaperiaate.



Kuva 14 Havainnollistava kuva glukoosia hapettavasta biosähkögeneraattorista.[31]

Kun glukoosin molekyyliä rakennetta hapetetaan Kuva 14 mukaisesti ja muutetaan hiilidioksidiksi sekä vedeksi, siitä saadaan vapautettua elektrodeja muodostaen potentiaalieron anodin ja katodin välille. Vapaat elektrodit kulkeutuvat louhijan anodilta välipiirin kautta katodille.[31]

3.2 Käyttö WSN sensoreissa

Energian louhinta mahdollistaa itsenäisten ja huoltovapaiden WSN sensoreiden valmistamisen. Jotta sensorin toiminta saadaan taattua, tulee IoT sensoreiden energiankulutusta minimoida tai louhintamenetelmää kehitettävä. Tämä johtuu siitä, että nykyisillä energianlouhintamenetelmillä ei kyetä saamaan suuria määriä sähköenergiaa halutuilla komponenttikoilla. On myös mahdollista, että louhittavaa energiaa ei ole saatavilla käytössä olevalla louhintatavalla. Yksi energiankulutusta minimoiva tapa on jaksottaa sensorin toimintaa. Tämä tarkoittaa sitä, että sensori on minimienergiankulutustaan olevassa uni- tai valmiustilassa. Kun sensorin tulee lähettää tai vastaanottaa tietoa se aktivoituu vain lyhyeksi ajaksi. Myös tiedon prosessointi tulisi tehdä muualla järjestelmässä, eikä sensorissa.[24], [33]

Louhinnassa käytettävien generaattoreiden tekniikan sekä materiaalien kehitys mahdollistaa louhinnan hybridikäytön. Näin ollen IoT sensoreissa voidaan käyttää useampaa eri louhintatapaa louhimaan energiaa eri energianlähteistä. Tällä tavoin voidaan hyödyntää useampaa ympäröivää energianlähdettä samanaikaisesti ja näin ollen parantamaan sensoreiden energiansaantia sekä huoltovapautta. Hybridimenetelmiä on jo olemassa ja uusien teknologioiden tutkimus on suuressa kasvussa.[13]

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

IoT sensoreiden suosio on ollut suuressa kasvussa lähivuosina ja kiinnostuksen kasvu vaikuttaa nousujohteiselta. Kiinnostuksen kasvun oletetaan lisäävän tutkijoiden tarvetta etenkin laitetekniikan kehityspuolella. IoT mahdollistaa uusien yritysten toimintamallien, tuotteiden ja palveluiden kehittämisen. Koska IoT sensoreiden määrän uskotaan kasvavan vuoteen 2020 mennessä jopa 50 miljardiin, voidaan katsoa tietoliikenneverkkojen tiedonvälityskapasiteetin kasvattamisen tarpeellisuutta tai uusia tietoliikenneverkkoja uusille tiedonvälitysprotokollille. Lisäksi etenkin langattomat sensorit lisäävät tietoturvariskiä järjestelmässä, ellei tietoturvaan ole panostettu riittävästi.

Energianlouhinnan voidaan katsoa olevan potentiaalinen vaihtoehto langattomien IoT sensoreiden sähköistämiseen, mikäli niistä halutaan pitkäikäisiä ja huoltovapaita. Louhintatapoja on useita ja niistä pyritään saamaan jatkuvasti entistä energiatehokkaampia. Tällöin ympäröivää energiaa kyetään muuntamaan entistä enemmän uudelleen käytettäväksi sähköenergiaksi. Lisäksi uusia menetelmiä on odotettavissa tulevaisuudessakin. Tärkeä tutkimussuunta on eri louhintamenetelmien integrointi yhdeksi komponentiksi, jolloin louhijasta saadaan hybridikäyttöinen. Tällöin yhdellä louhijalla kyetään louhimaan useampaa eri energialähdettä samanaikaisesti.

5. YHTEENVETO

IoT-tekniikan mielenkiinnon herättäjänä on oletettavasti teollisuus 4.0 malli, jossa esineet ja asiat yhdistetään internetiin. Uusi sensoritekniikka mahdollistaa helppokäyttöisyydellään vanhojen koneiden nykyaikaistamisen ja siten niiden etäkäytön. Lisäksi sen avulla kyetään parantamaan muun muassa varastohallinnan automatisointia pelkästään M2M-kommunikaation ansiosta. M2M:n ansiosta myös kaupungeista saadaan energiatehokkaampia esimerkiksi älykkään valaistuksen myötä.

Energiaa saadaan louhittua ympäröivästä energiasta. Louhittavat energialähteet on jaoteltavissa neljään eri kategoriaan: säteily-, liike-, lämpö-, ja bioenergia. Kussakin eri kategoriassa on eri menetelmiä energian louhintaan ja louhintatapa määräytyy sensorin sijoituksen mukaan. On jo olemassa eri hybridikäyttöisiä louhintamenetelmiä ja uusia menetelmiä tutkitaan jatkuvasti.

Energian louhinnan ansiosta IoT sensoreista saadaan langattomia, mikä vähentää johdotuksen tarvetta. Lisäksi energian louhinnalla kyetään vähentämään epäekologisten paristojen käyttöä. Hyvällä energian louhinnan suunnittelulla sensoreista saadaan pitkäikäisiä ja huoltovapaita. Nämä ominaisuudet voidaan katsoa olevan tärkeimmät ominaisuudet langattomassa sensoritekniikassa, sillä ne vähentävät huomattavasti sensoreihin kohdistuvia työtunteja.

Tulee kuitenkin muistaa, että IoT käsitteen tarkempi määrittely on vielä alkutekijöissä. Lisäksi muun muassa pilvipalveluun kerätyn tiedon omistusoikeus on vielä epäselvää. On kuitenkin oletettavissa, että IoT-infrastruktuuria tullaan näkemään lähivuosina jollain tapaa kaikkien yritysten toiminnassa sekä suurempien kaupunkien katukuvassa.

LÄHTEET

- [1] S. Abdelwahab, B. Hamdaoui, M. Guizani, and A. Rayes, "Enabling Smart Cloud Services Through Remote Sensing: An Internet of Everything Enabler," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 3, pp. 276–288, Jun. 2014.
- [2] F. Wortmann and K. Flüchter, "Internet of Things: Technology and Value Added," *Bus. Inf. Syst. Eng.*, vol. 57, no. 3, pp. 221–224, Jun. 2015.
- [3] H. G. Lee and N. Chang, "Powering the IoT: Storage-less and converter-less energy harvesting," in *Design Automation Conference (ASP-DAC), 2015 20th Asia and South Pacific*, 2015, pp. 124–129.
- [4] "Gartner's 2015 Hype Cycle for Emerging Technologies Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor." [Online]. Available: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>. [Accessed: 22-Jun-2016].
- [5] M. E. Porter and J. E. Heppelmann, "How Smart, Connected Products Are Transforming Competition," *Harvard Business Review*, 01-Nov-2014. [Online]. Available: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition>. [Accessed: 22-Jun-2016].
- [6] Q. Zhu, R. Wang, Q. Chen, Y. Liu, and W. Qin, "IOT Gateway: Bridging Wireless Sensor Networks into Internet of Things," 2010, pp. 347–352.
- [7] D. Bandyopadhyay and J. Sen, "Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 58, no. 1, pp. 49–69, May 2011.
- [8] C. Estevez and J. Wu, "Recent advances in Green Internet of Things," 2015, pp. 1–5.
- [9] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013.
- [10] PubNub, *Top 10 Challenges in Securing IoT Communications on Vimeo*. San Francisco, 2014.
- [11] J. Leicht, P. Heilmann, T. Hehn, X. Li, D. Maurath, C. Moranz, M. Thewes, G. Scholl, and Y. Manoli, "Wireless Anti-Theft Alarm System for Automobiles Based on Thermoelectric Energy Harvesting Powered Glass Break Detection," in *2014 7th GMM-Workshop - Proceedings of Energy self-sufficient Sensors*, 2014, pp. 1–4.
- [12] J. Hofbauer, M. Wolf, and M. Rudolph, "Self-sufficient sensors based on energy harvesting validation and evaluation study of tram bearing diagnostics using simulation techniques," in *2016 13th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, 2016, pp. 613–618.
- [13] Z. L. Wang and W. Wu, "Nanotechnology-Enabled Energy Harvesting for Self-Powered Micro-/Nanosystems," *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 51, no. 47, pp. 11700–11721, Nov. 2012.
- [14] J. Higuera and J. Polo, "Autonomous and Interoperable Smart Sensors for Environmental Monitoring Applications," in *Smart Sensing Technology for Agriculture and Environmental Monitoring*, S. C. Mukhopadhyay, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 323–359.
- [15] W. K. G. Seah, Y. K. Tan, and A. T. S. Chan, "Research in Energy Harvesting Wireless Sensor Networks and the Challenges Ahead," in *Autonomous Sensor Networks*, D. Filippini, Ed. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 73–93.

- [16] “Powering IoT Devices: Technologies and Opportunities - IEEE Internet of Things.” [Online]. Available: <http://iot.ieee.org/newsletter/november-2015/powering-iot-devices-technologies-and-opportunities.html>. [Accessed: 09-Aug-2016].
- [17] NASA, “Electromagnetic Waves - different waves, different wavelengths.” [Online]. Available: <http://science.hq.nasa.gov/kids/imagers/ems/waves3.html>. [Accessed: 18-Aug-2016].
- [18] G. Abadal, J. Alda, and J. Agust, “Electromagnetic Radiation Energy Harvesting – The Rectenna Based Approach,” in *ICT - Energy - Concepts Towards Zero - Power Information and Communication Technology*, G. Fagas, Ed. InTech, 2014.
- [19] M. Lampi, “Internet of Things. Ambient Energy Harvesting.” [Online]. Available: <https://wiki.aalto.fi/download/attachments/59704179/lampi-iot-ambient-energy-harvesting.pdf>. [Accessed: 10-Aug-2016].
- [20] “NREL: National Center for Photovoltaics Home Page.” [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/ncpv/>. [Accessed: 31-Aug-2016].
- [21] C. R. Saha, T. O’Donnell, N. Wang, and P. McCloskey, “Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 147, no. 1, pp. 248–253, Sep. 2008.
- [22] P. D. Mitcheson, T. C. Green, and E. M. Yeatman, “Power processing circuits for electromagnetic, electrostatic and piezoelectric inertial energy scavengers,” *Microsyst. Technol.*, vol. 13, no. 11–12, pp. 1629–1635, May 2007.
- [23] R. J. M. Vullers, R. van Schaijk, I. Doms, C. Van Hoof, and R. Mertens, “Micropower energy harvesting,” *Solid-State Electron.*, vol. 53, no. 7, pp. 684–693, Jul. 2009.
- [24] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, “Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications,” *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 13, no. 3, pp. 443–461, 2011.
- [25] J. Prudell, M. Stoddard, E. Amon, T. K. A. Brekken, and A. von Jouanne, “A Permanent-Magnet Tubular Linear Generator for Ocean Wave Energy Conversion,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 6, pp. 2392–2400, Nov. 2010.
- [26] L. Aura and A. J. Tonteri, *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet*. Porvoo; Helsinki; Juva: WSOY, 1996.
- [27] G. J. Snyder, “Thermoelectric Energy Harvesting: Chapter 11,” in *Energy Harvesting Technologies*, S. Priya and D. J. Inman, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 325–336.
- [28] G. Sebald, D. Guyomar, and A. Agbossou, “On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 12, p. 125006, Dec. 2009.
- [29] Z. L. Wang, G. Zhu, Y. Yang, S. Wang, and C. Pan, “Progress in nanogenerators for portable electronics,” *Mater. Today*, vol. 15, no. 12, pp. 532–543, Dec. 2012.
- [30] D. Zakharov, B. Gusarov, E. Gusarova, B. Viala, O. Cugat, J. Delamare, and L. Gimeno, “Combined Pyroelectric, Piezoelectric and Shape Memory Effects for Thermal Energy Harvesting,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 476, p. 12021, Dec. 2013.
- [31] C.-Y. Sue and N.-C. Tsai, “Human powered MEMS-based energy harvest devices,” *Appl. Energy*, vol. 93, pp. 390–403, May 2012.
- [32] C. Xu, C. Pan, Y. Liu, and Z. L. Wang, “Hybrid cells for simultaneously harvesting multi-type energies for self-powered micro/nanosystems,” *Nano Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 259–272, Mar. 2012.
- [33] H. Jayakumar, K. Lee, W. S. Lee, A. Raha, Y. Kim, and V. Raghunathan, “Powering the internet of things,” 2014, pp. 375–380.