

Tuomas Munck

**Ympäristöystävällinen pietsosähköinen energiankeruu
esineiden internetissä**

Tietotekniikan
pro gradu -tutkielma
8. maaliskuuta 2024

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Kokkolan yliopistokeskus Chydenius

Tekijä: Tuomas Munck

Yhteystiedot: tuomas.mu@gmail.com

Puhelinnumero: -

Ohjaaja: Lasse Harjumaa

Työn nimi: Ympäristöystävällinen pietsosähköinen energiankeruu esineiden internetissä

Title in English: Environmentally friendly piezoelectric energy harvesting in the internet of things

Työ: Tietotekniikan pro gradu -tutkielma

Sivumäärä: 95 + 15

Tiivistelmä: Esineiden internetiin (IoT) kytkettyjen laitteiden määrän kasvaessa räjähdysmäisesti ympäristönäkökulmien merkitys laitteiden virrantuotannossa korostuu entisestään. Pietsosähköinen energiankeruu nähdään vaihtoehtona perinteisille akuille ja paristoille, minkä seurauksena alaan liittyvä tutkimuskirjallisuus on merkittävässä nosteessa. Tulevaisuudessa pietsosähköiset materiaalit erottuvat toisistaan entistä enemmän ympäristövaikutustensa perusteella, mutta tästä huolimatta ympäristöystävällisiä pietsosähköisiä materiaaleja ja niiden ominaisuuksia ei ole kartoitettu kattavasti. Tässä tutkielmassa selvitettiin, mitä pietsosähköisiä materiaaleja alan tutkimuskirjallisuudessa pidetään ekologisina ja millaisia erityispiirteitä näillä materiaaleilla on IoT-laitteiden energiantuotannon kannalta. Tutkimus toteutettiin systemaattisena kirjallisuuskartoituksena, jonka aineistoon valikoitui tietokantahakujen myötä lopulta yhteensä 172 tutkimusartikkelia. Nämä artikkelit luokiteltiin ennalta määritellyn tiedonkeruukaavion mukaisesti julkaisutietojen, energiankeruun ominaisuuksien ja ympäristöystävällisyyden perusteella. Tutkimuksessa havaittiin, että ympäristöystävällinen pietsosähköinen energiankeruu IoT:ssa sisältää laajan kirjon erilaisia materiaaleja, energiankeräysrakenteita ja mahdollisia energianlähteitä. Aineiston tutkimukset olivat pääsääntöisesti tieteellisissä aikakauslehdissä julkaistuja validointitutkimuksia. Tutkimusten julkaisumäärissä havaittiin merkittävää kasvua erityisesti vuodesta 2019 lähtien, mikä heijastelee kasvavaa kiinnostusta uudenlaisia pietsosähköisiä materiaaleja kohtaan. Tutkimuskentällä ympäristöystävällisinä pietsosähköisinä materiaaleina pidetään erityisesti niitä, jotka ovat yhteensopivia kansainvälisten lyijyttömyysdirektiivien kanssa, mikä luo erityisen haasteen alalle, jonka suosituin materiaali on lyijy-zirkonaatti-titanaatti (PZT).

Avainsanat: systemaattinen kirjallisuuskartoitus, pietsosähköinen ilmiö, energian kerääminen, esineiden internet (IoT)

Abstract: As the number of devices connected to the Internet of Things (IoT) increases exponentially, the significance of environmental perspectives in the power generation of these devices becomes even more important. Piezoelectric energy harvesting is seen as an alternative to traditional primary and secondary batteries, resulting in a significant rise in related research literature. In the future piezoelectric materials will increasingly differ from each other based on their environmental impacts, yet environmentally friendly piezoelectric materials and their properties have not been comprehensively mapped. This thesis investigated which piezoelectric materials are considered ecological in the field's research literature and what special features these materials have in terms of energy production for IoT devices. The research was conducted as a systematic mapping study, in which a total of 172 research articles were finally selected as a result of database searches. These articles were classified according to a predefined data extraction form based on publication information, energy harvesting properties and eco-friendliness. The study found that environmentally friendly piezoelectric energy harvesting in IoT includes a wide range of materials, energy harvesting structures and potential energy sources. The majority of the studies in the dataset were validation research published in scientific journals. The study found a significant increase in the number of publications, especially since 2019, reflecting a growing interest in new types of piezoelectric materials. The research field mainly considers those piezoelectric materials environmentally friendly which are compatible with international lead-free directives. This poses a special challenge for the field, whose most popular material is lead zirconate titanate (PZT).

Keywords: systematic mapping study, eco-friendly, piezoelectricity, energy harvesting, internet of things (IoT)

Copyright c 2024 Tuomas Munck

All rights reserved.

Sanasto

A/D-muunnin	Analogia-digitaalimuunnin (engl. analog-to-digital converter).
C/N	Coulombia per newton.
D	Sähkövuon tiheys.
d	Pietsosähköinen kerroin (engl. piezoelectric coefficient).
d_{31}	Pietsosähköinen kerroin (rasitus poikittaissuunnassa).
d_{33}	Pietsosähköinen kerroin (rasitus pitkittäissuunnassa).
DEG	Dielektrinen elastomeerigeneraattori (engl. Dielectric Elastomer Generator).
E	Sähkökentän voimakkuus.
#	Väliaineen permittiivisyys.
HSU	Energian kerääminen varastoon ennen käyttöä (engl. Harvest-Store-Use).
HU	Energian kerääminen suoraan käyttöön (engl. Harvest-Use).
IIoT	Teollinen internet (engl. Industrial Internet of Things).
IoT	Esineiden internet (engl. Internet of Things).
k	Sähkömekaaninen kytkentäkerroin (engl. electromechanical coupling factor).
LCA	Elinkaariarviointi (engl. Life Cycle Assessment).
MEMS	Mikrosysteemit (engl. Micro Electro Mechanical Systems).
PEH-järjestelmä	Pietsosähköinen energiankeruujärjestelmä (engl. Piezoelectric Energy Harvesting System).
PICO(C)	Menetelmä tutkimuskysymysten muodostamiselle (engl. Population, Intervention, Comparison, Context).
PV	Valojänniteilmiö (engl. Photovoltaic effect).
RF	Radiotaajuus (engl. Radio Frequency).

ROHS	Vaarallisten aineiden käyttöä sähkö- ja elektroniikkalaitteissa rajoittava direktiivi (engl. The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment).
SECE	Kuorman vaihteluista riippumaton elektroniikkapiiri (engl. Synchronous Electrical Charge Extraction).
SSHI	Resonanssitaajuudella synkronoidulle kytkimelle perustuva elektroniikkapiiri (engl. Synchronized Switch Harvesting on Inductor).
<i>T</i>	Mekaaninen rasitus.
TK	Tutkimuskysymys.
WSN	Langaton sensoriverkko (engl. Wireless Sensor Network).
ZigBee	Vähävirtainen langaton viestintäprotokolla.

Sisältö

Sanasto	i
1 Johdanto	1
2 Ympäristöystävälliset pietsosähköiset materiaalit	4
2.1 Suora pietsosähköinen ilmiö	4
2.2 Pietsosähköiset materiaalit	7
2.2.1 Yksikiteiset materiaalit	9
2.2.2 Keraamiset materiaalit	10
2.2.3 Polymeerimateriaalit	10
2.2.4 Komposiittimateriaalit	11
2.3 Ympäristöystävällisyys	12
3 Energiankeruu esineiden internetissä	15
3.1 Esineiden internet toimintaympäristönä	15
3.2 Energiankeruu mikro- ja nanotasolla	18
3.3 Pietsosähköinen energiankeruu	20
3.4 Pietsosähköiset energiankeruurakenteet	23
3.4.1 Resonanssirakenteet	23
3.4.2 Off-resonanssirakenteet	24
3.4.3 Iskurakenteet	25
3.4.4 Joustavat rakenteet	26
3.5 Muut energiankeruumenetelmät ja hybridijärjestelmät	27
4 Systemaattinen kirjallisuuskartoitus	30
4.1 Tutkimusmenetelmän käytännöt ja ohjeistukset	30
4.2 Valitun ohjeistuksen vaiheet	32
4.2.1 Tutkimuskysymysten ja hakulauseen muodostaminen	32
4.2.2 Aineiston haku ja artikkelien valinta	34
4.2.3 Tiedonkeruu ja karttojen muodostaminen	35
4.2.4 Tutkimuksen validiteetin arviointi	37

5 Tutkimuksen toteutus	39
5.1 Tutkimuskysymysten ja hakulauseen muodostaminen	39
5.2 Aineiston haku ja artikkelien valinta	43
5.3 Tiedonkeruu ja karttojen muodostaminen	50
5.4 Tutkimuksen validiteetin arviointi	54
6 Tulokset	58
6.1 Julkaisutiheys (TK1)	58
6.2 Julkaisualustojen ja tutkimusten tyypit (TK2)	59
6.3 Energianlähteet (TK3)	61
6.4 Energiankeräysrakenteet (TK4)	64
6.5 Pietzosähköiset materiaalit (TK5 ja TK6)	66
6.6 Sähköarvot (TK7)	69
7 Johtopäätökset ja pohdinta	75
7.1 Ympäristöystävällinen pietzosähköinen energiankeruu IoT:ssa	75
7.2 Tutkimuksen rajoitukset ja jatkotutkimusehdotukset	78
Lähteet	81
Liitteet	
A Tutkimuksen validiteetin tarkistuslista ja arviointirubriikit	96
B Pietzosähköisten materiaalien sanasto	99
C Hyväksytyt artikkelit	101

1 Johdanto

Esineiden internetiin (engl. Internet of Things, IoT) kytkettyjen anturinooidien ja toimilaitteiden määrä tulee moninkertaistumaan tämän vuosikymmenen aikana saavuttaen lähes 30 miljardin laitteen rajapyykin [108]. Samalla kun ympäristöhaittojen torjunnassa käytettäviä IoT-sovelluksia kehitetään, ilmastonmuutos ja kestävä kehityksen periaatteet muovaavat tulevaisuuden teknologioita — viime kädessä kansainvälisten direktiivien ja valtioiden kansallisten ilmastopoliittisten asetusten kautta. Suurimman osan IoT-laitteista odotetaan käyttävän virtalähteenään paristoa, sillä laitteista halutaan edullisia ja langattomia [102]. Kehityksen käänköpuolena voidaan nähdä paristo- ja akkutuotantoon liittyvät ilmastovaikutukset sekä pois heitetyistä paristoista aiheutuvat jätteet. Akkujen, paristojen ja laitteiden eliniän pidentäminen on siis alati kasvava ja ajankohtainen haaste IoT-teknologian kehityksessä. Tämän haasteen keskeiseksi ratkaisuksi on esitetty ympäristöstä peräisin olevan energian keräämistä IoT-laitteiden virrantarpeisiin [92] [102].

Energiankeruun avulla IoT-laitteiden elinikää voidaan kasvattaa merkittävästi. Parhaimmillaan laitteet voivat toimia täysin omavoimaisesti keräten kaiken tarvitsemansa energian suoraan ympäristöstä. Ympäristössä saatavilla olevista energianlähteistä yksi yleisimmistä ja huomaamattomimmista on liike-energia, joka ilmenee tyypillisesti värähtelynä. Suosituin ja tutkituin menetelmä värähtelyenergian keräämiseen on pietsosähköinen energiankeruu, jossa energiankerääjän kohtaama mekaaninen rasitus muodostaa pietsosähköisen ilmiön kautta suoraan ja välittömästi sähköenergiaa.

Pietsosähköisen ilmiön hyödyntäminen energiankeruussa on ajankohtainen ja viime vuosina erittäin paljon kiinnostusta herättänyt tutkimuskohde. Scopus-viitetietokannassa pietsosähköistä energiankeruuta ("piezoelectric energy harvesting") koskevia julkaisuja on ilmestynyt tämän vuosikymmenen puolella tuhansia, kun vielä vuoteen 2010 mennessä julkaisuja oli yhteensä vain 1013 kappaletta. Valtaosa alan tutkimuksista keskittyy pietsosähköisten materiaalien kehittämiseen ja energiankeruujärjestelmien optimointiin. Tutkimusalueen nopean kehityksen sekä julkaisujen runsauden vuoksi alalla on jatkuva tarve kokoaville yhteenvedoille, katsauksille ja kartoituksille.

Pietsosähköiseen energian keräämiseen liittyviä katsausartikkeleita onkin julkaistu paljon. Systemaattisia kirjallisuuskatsauksia on tehty mm. pietsosähköisistä polymeerikomposiiteista [76], tekstiilipohjaisista nanogeneraattoreista [11], pietsosähköisestä energiankeruusta teollisuuden sovelluksissa [1] ja tertiäritutkimuksena yleisluontoisista kirjallisuuskatsauksista [34]. Yleisemmin koko aihealuetta hahmottelevia, laadullisia ja kattavia kirjallisuuskatsauksia on myös julkaistu tasaiseen tahtiin [65] [23] [100] [94] [69] [7]. Näistä katsauksista huolimatta kvantitatiivisin menetelmin tutkimuskentän suuntauksia on hahmoteltu vähemmän, eikä esimerkiksi systemaattisia kirjallisuuskartoituksia löydy alan yleisimmistä tietokannoista. Lisäksi monissa tuoreissa katsauksissa, kuten Sezerin ja Koçin [100] sekä Clementin et al. [23] katsauksissa, korostuu uusien pietsosähköisten materiaalien ympäristövaikutusten merkitys tulevaisuuden trendinä, mutta tarkempaa luokittelua siitä, mitä materiaaleja tutkimuskentällä pidetään ympäristöystävällisinä, on vaikea löytää. Herää kysymys, onko tutkimuskentällä yhtenäinen näkemys ympäristöystävällisistä pietsosähköisistä materiaaleista? Entä millaisia ominaisuuksia ja erityispiirteitä tällaisilla materiaaleilla on energiankeruun kannalta? Ympäristöystävällisten materiaalien kartoittaminen on elintärkeää, mikäli energiankeruulla pyritään ratkaisemaan IoT-laitteiden määrän moninkertaistumisesta aiheutuvat ympäristöhaasteet.

Tämän pro gradu -tutkielman tavoitteena on selvittää ympäristöystävällisten pietsosähköisten materiaalien ominaispiirteitä ja hyödynnettävyyttä IoT-laitteiden energiantuotannossa. Lisäksi tavoitteena on hahmottaa kyseisen tutkimuskentän laajempia kehityssuuntia ja trendejä. Tutkimusmenetelmänä käytetään systemaattista kirjallisuuskartoitusta (engl. systematic mapping study), joka soveltuu hyvin tutkimusalueen laaja-alaiseen tarkasteluun [86] [58]. Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen avulla ensisijaisia tutkimuksia voidaan käydä läpi laajemmalla otannalla kuin systemaattisissa kirjallisuuskatsauksissa [86]. Tutkimusmenetelmän painopiste on systemaattisuudessa eli ennalta määritellyn tutkimusprotokollan suunnitelmallisessa toteuttamisessa. Lisäksi tutkimusprosessi raportoidaan mahdollisimman läpinäkyvästi, mikä parantaa tutkimuksen luotettavuutta ja toistettavuutta. Tässä tutkielmassa systemaattinen kirjallisuuskartoitus toteutetaan noudattaen Petersein et al. [86] menetelmäohjeistusta ja sen päivitettyä versiota, jonka ovat laatineet Petersen, Vakkalanka ja Kuzniarz [87]. Kyseinen ohjeistus on menetelmän osalta yksi suosituimmista ja käytetyimmistä tietotekniikan alalla.

Luvussa 2 käsitellään pietsosähköistä ilmiötä ja sen keskeisiä periaatteita ener-

giankeruun kannalta sekä erilaisia pietsosähköisiä materiaaleja ja niiden asemaa ympäristöstävällisyyden kontekstissa. Luvussa 3 syvennyttään esineiden internetiin energiankeruun toimintaympäristönä, esitetään pietsosähköinen energiankeruujärjestelmä ja energiankeräysrakenteet sekä tarkastellaan mahdollisuuksia energiankeruumenetelmien yhdistelmille eli hybridijärjestelmille. Luvussa 4 käydään läpi systemaattista kirjallisuuskartoitusta tutkimusmenetelmänä siten, kuin sen vaiheet on esitetty valitussa menetelmäohjeistuksessa. Luku 5 kuvaa tutkimusprosessin toteutumista vaiheittain, sisältäen tarkemmat tutkimuskysymykset, käytetyn hakulauseen, valitut tietokannat, aineiston valintakriteerit, tiedonkeruukaavion ja kattavan tutkimuksen validiteetin arvioinnin. Luvussa 6 tutkimuksen tulokset eli ympäristöstävällisen pietsosähköisen energiankeruun ominaisuudet ja tutkimuskentän luonne on esitetty visuaalisina karttoina. Lisäksi luvussa käsitellään syitä havaittujen ilmiöiden taustalla ja vastataan esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Luvussa 7 tutkimuksen keskeiset johtopäätökset kootaan yhteen sekä pohditaan pietsosähköisen energiankeruun tutkimuskenttää ohjaavia lyijyttömyysdirektiivejä ja niiden merkitystä suosituimmalle pietsosähköiselle materiaalille. Lopuksi käsitellään tutkimuksen rajoitteita, tutkimusmenetelmän soveltumista opinnäytetyöhön sekä mahdollisia suuntia jatkotutkimukselle. Liitteissä on arvioitu tutkimuksen validiteettia tarkistuslistan ja arviointirubriikkien avulla, selitetty pietsosähköisten materiaalien kemialliset lyhenteet sekä esitetty tutkimuksen aineistoon valikoituneet artikkelit ja niistä kerätyt tiedot.

2 Ympäristöystävälliset pietsosähköiset materiaalit

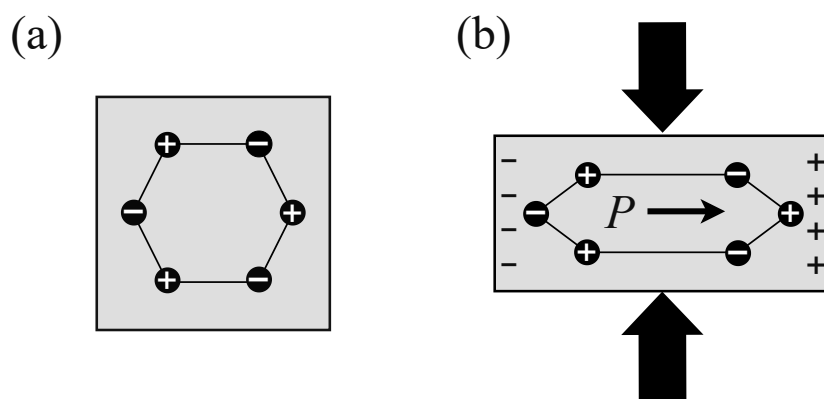
Tässä luvussa tarkastellaan pietsosähköistä ilmiötä erityisesti energiankeruun kontekstissa. Ensin pietsosähköisyyden fysikaalinen perusta johdattaa tärkeiden muuttujien ja käsitteiden äärelle, joita tutkimuskentällä käytetään pietsosähköisten ominaisuuksien kuvaamisessa. Tämän jälkeen luvussa käsitellään pietsosähköisten materiaalien erityispiirteitä ja eroja neljän pääluokan kautta: yksikiteiset, keraamiset, polymeerit ja komposiitit. Luvun lopuksi pohditaan ympäristöystävällisyyden käsitettä pietsosähköisiä materiaaleja ohjaavana tavoitteena.

2.1 Suora pietsosähköinen ilmiö

Pietsosähköinen ilmiö viittaa tiettyjen materiaalien kykyyn muodostaa sähkövaraus kohdatessaan mekaanista rasitusta. Sananmukaisesti voitaisiin puhua ”puristussähköisyydestä”, sillä termi *piezo* juontaa juurensa kreikan kielestä, tarkoittaen puristamista tai painamista [120]. Ilmiön löysivät vuonna 1880 veljekset Pierre ja Jacques Curie, tutkiessaan laboratoriossaan kiderakenteisten materiaalien — kuten kvartsin, topaasin ja ruokosokerin — reaktioita kohdistettuun paineeseen [17, s. 1–3]. Käytännössä Curien veljekset havaitsivat niin kutsutun *suoran* pietsosähköisen ilmiön, jossa materiaaleissa syntynyt sähkövaraus on suoraan verrannollinen siihen kohdistetun rasituksen voimakkuuden kanssa. Ilmiöllä on myös *käänteinen* vaikutus, jossa pietsosähköinen materiaali muuttaa muotoaan altistuessaan sähkökentälle [120]. Näiden ominaisuuksien ansiosta pietsosähköisiä materiaaleja voidaan käyttää laajasti hyvin erilaisissa sovelluksissa: suoraa ilmiötä voidaan hyödyntää antureissa tai energianmuuntimissa ja käänteistä ilmiötä toimilaitteissa [100]. Tämä tutkielma keskittyy pääasiassa energiankeruun kannalta tärkeään suoraan pietsosähköiseen ilmiöön.

Molekyyalitasolla pietsosähköinen ilmiö on yleensä seurausta materiaalien tiettytyypisistä kiderakenteista. Tällaista rakennetta kutsutaan ei-sentrosymmetriseksi eli rakenteeksi, jolta puuttuu symmetriakeskus [14]. Symmetriakeskuksen puuttuminen mahdollistaa kiderakenteen sisäisten sähködipolien järjestyksen muutokset rasituksen yhteydessä, joka johtaa materiaalin polarisoitumiseen. Ilmiö on havainnollistettu **kuvassa 2.1** kvartsikiteen kaksikulotteisen poikkileikkauksen avulla:

Kvartsikide on sähköisesti neutraalissa tilassa, kun materiaaliin ei kohdistu ulkoista rasi- tusta (**kuva 2.1a**). Rasi- tuksen (nuolet materiaalin ulkopuolella kuvassa) myötä ionien etäisyydet toisistaan kasvavat ja sähködipolien tasapaino järkkyy, mikä polarisoi (P) materiaalin sekä johtaa sen sähköistymiseen (**kuva 2.1b**). On kuitenkin tärkeää huomioida, että kyseessä on yksinkertaistettu esitys, sillä todellisuudessa pietsosähköisen ilmiön taustalla on monimutkainen fysikaalinen prosessi ja sähkö- dipolien kehittymiselle on useita mahdollisia syitä [14].



Kuva 2.1: Yksinkertaistettu esitys pietsosähköisestä ilmiöstä, muokattu [89, s. 171] esityksestä.

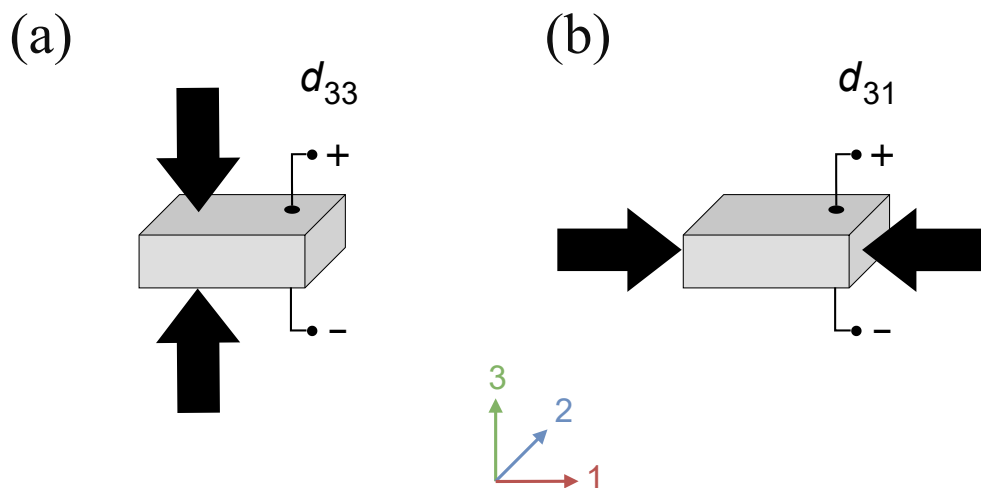
Kiderakenteessa muodostuvan polarisaation voimakkuus on erityisen tärkeä e- nergiankeruun näkökulmasta, koska se määrittää kerättävän energian määrää. Joe Briscoen ja Steve Dunnin [14] mukaan polarisaation voimakkuuteen vaikuttavat ki- derakenteen polarisaation suunta, kiderakenteen symmetria ja materiaaliin kohdis- tetun mekaanisen rasi- tuksen voimakkuus. He esittävät, että pietsosähköisen ilmiön konstitutiivinen yhtälö perustuu materiaalin sähköisille ominaisuuksille ja Hooken lakiin eli materiaalin muodonmuutoksen ja rasi- tuksen voimakkuuden väliselle suh- teelle. Suoran pietsosähköisen ilmiön yhtälö voidaan esittää pelkistetyssä matriisi- muodossa

$$D = dT + \#^T E, \quad (2.1)$$

missä D on sähkövuon tiheys, d on materiaalin pietsosähköinen kerroin, T on me- kaaninen rasi- tus, $\#$ on materiaalin permittiivisyys (väliaineen vaikutus sähkökent-

tään) ja E on sähkökentän voimakkuus [48, s. 18–19] (yhtälön laajemmasta matriisimuodosta ks. [14, s. 4–5] ja tensorimuodosta ks. [123, s. 425]). Yhtälö kuvaa pietsosähköiseen ilmiöön liittyvien elementtien väliset suhteet ja sitä voidaan käyttää tehokkaiden pietsosähköisten materiaalien tunnistamiseen.

Tutkimuskirjallisuudessa keskitytään usein pietsosähköiseen kertoimeen d . Tämä kerroin esitetään yksikössä C/N, ja se kuvaa muodostuvan sähkövarauksen määrää (coulombeina) mekaanista rasitusta kohden (newtoneina) [48, s. 8]. Mitä suurempi pietsosähköinen kerroin on, sitä enemmän sähköenergiaa materiaali tuottaa samaa rasitusta kohden. Kerroin d on tosiasiaassa tensori, jonka ensimmäiseen alaindeksiin merkataan materiaalin polarisaation suuntaus ja toiseen alaindeksiin suunta, jossa mekaaninen rasitus siihen kohdistuu [48, s. 19]. Käytännössä materiaali voi polarisoitua tai kohdata rasitusta minkä tahansa pinnan suuntaisesti, mutta energiankeruun näkökulmasta oleellisia ovat kytkentätilat d_{33} ja d_{31} [106]. Näiden tilojen suuntaukset on havainnollistettu **kuva 2.2**: 33-tilassa (d_{33}) polarisaatioakseli (plus- ja miinusmerkit) on samansuuntainen materiaaliin kohdistuvan rasituksen (mustat nuolet) kanssa (**kuva 2.2a**), kun taas 31-tilassa (d_{31}) ne ovat suuntautuneet kohtisuorasti toisiinsa nähden (**kuva 2.2b**). Polarisaatioakselin suuntautuminen suhteessa mekaaniseen rasitukseen vaikuttaa merkittävästi materiaalin pietsosähköisiin ominaisuuksiin. Esimerkiksi 33-tila tuottaa tyypillisesti korkeampia jännitearvoja ja 31-tila puolestaan enemmän virtaa [69].



Kuva 2.2: Polarisaatioakselin suhde rasituksen suuntaukseen kytkentätiloissa d_{33} ja d_{31} , muokattu [42, s. 25] esityksestä.

Pietsosähköisillä kytkentätiloilla on myös yhteys kytkentäkertoimeen k , jota Jaffe et al. [48, s. 10] pitävät parhaana mittarina pietsosähköisen materiaalin tehokkuudelle. Energiankeruun kannalta tämä kytkentäkerroin kuvaa, kuinka tehokkaasti materiaali muuttaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Tuotetun sähköenergian suhde mekaaniseen rasitukseen esitetään yhtälöllä [48, s. 10]:

$$k^2 = \frac{\text{sähköenergiaksi muutettu mekaaninen energia}}{\text{rasituksesta aiheutunut mekaaninen energia}}. \quad (2.2)$$

Toisin sanoen kytkentäkerroin k on mekaanisen energian muuntotehokkuuden neliöjuuri [100]. Anton et al. [7] ovat katsauksessaan todenneet, että kytkentäkerroin k on usein alhaisempi 31-tilassa verrattuna 33-tilaan. He kuitenkin korostavat, ettei tietyn materiaalin energiankeruun tehokkuuden määrittäminen ole niin yksinkertaista, kuin pelkän kytkentäkertoimen selvittäminen. Joissakin ympäristöissä, kuten alhaisen rasituksen ja matalan värähtelytason ympäristöissä, pienemmän kytkentäkertoimen 31-tila tuottaa huomattavasti enemmän tehoa [12]. 31-tila onkin pietsosähköisessä energiankeruussa käytetyin kytkentätila, sillä se mahdollistaa kustannustehokkaan ja optimoidun energiankeruun varsinkin erittäin pienikokoisissa sovelluksissa [134].

Kytkentätilojen väliset eroavuudet erilaisissa ympäristöolosuhteissa tuovat esille materiaaliominaisuuksien ja energiankeruurakenteiden välisen yhteisvaikutuksen tärkeyden. Koska kytkentätilat ja muut pietsosähköiset ominaisuudet riippuvat materiaalin rakenteesta, nousee materiaalien merkitys avainasemaan pietsosähköisessä energiankeruussa. Materiaaleja ja erilaisia materiaalityyppejä käsitellään seuraavaksi.

2.2 Pietsosähköiset materiaalit

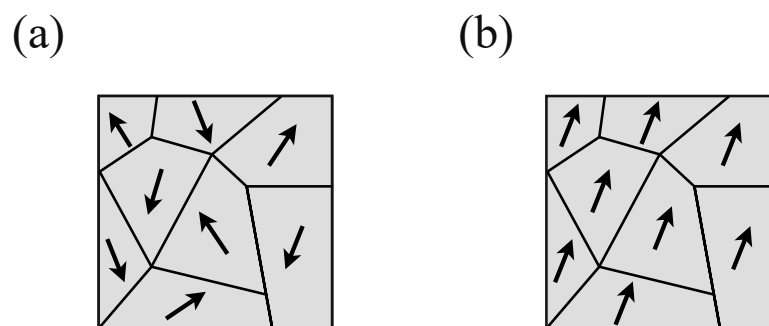
Pietsosähköisen ilmiön laajempi hyödyntäminen käytännön sovelluksissa edellytti entistä tehokkaampien materiaalien löytämistä ja kehittämistä. Tätä kehityshistoriaa on avannut kattavasti Kenji Uchino [120]. Uchinon mukaan pietsosähköisyyden tarjoamiin mahdollisuuksiin herättiin vasta muutama vuosikymmen Curien veljesten löydöksen jälkeen, ensimmäisessä maailmansodassa sukellusveneidien havaitsemiseen tarkoitettujen kaikuluotaimien myötä. Käytännön sovelluksesta syntyi tarve entistä tehokkaammille pietsosähköisille materiaaleille, mikä johti puolestaan useisiin läpimurtoihin materiaalien kehitys- ja valmistustekniikoissa. Erilaisilla valmis-

tustekniikoilla voidaan vaikuttaa merkittävästi materiaalien pietsosähköiseen suorituskykyyn, joka on suorassa yhteydessä siihen, miten pietsosähköinen ilmiö materiaalissa muodostuu.

Kuten aiemmin todettiin, pietsosähköisyys on seurausta materiaalin tietyn tyyppisestä kiderakenteesta. Yhteensä erilaisia kiderakenteita on 32 symmetrialuokkaa (engl. crystal class), joista 20:ltä puuttuu symmetriakeskus ja ne ovat pietsosähköisiä [48][14]. Pietsosähköiset kiderakenteet jaotellaan usein edelleen pyrosähköisiin (engl. pyroelectric) ja ferrosähköisiin (engl. ferroelectric) materiaaleihin. Puolet pietsosähköisistä symmetrialuokista ovat pyrosähköisiä eli sellaisia, joiden rakenne mahdollistaa sähködipolin muodostumisen spontaanisti lämpötilan muutosten kautta, täysin riippumatta mekaanisesta rasituksesta [48]. Osa näistä pyrosähköisistä materiaaleista kutsutaan ferrosähköisiksi, mikäli niiden kiderakenne mahdollistaa spontaanin polarisaation suunnan kääntämisen ulkoisen sähkökentän avulla [14]. Ferrosähköisyys on pietsosähköisten materiaalien kehittämisen kannalta erityisen oleellinen ilmiö, sillä se mahdollistaa materiaalin ominaisuuksien tarkan muokkaamisen ja säätämisen polarisointiprosessin (engl. poling) avulla.

Sähködipolien suuntaan vaikuttava polarisointiprosessi kohdistuu erityisesti synteettisesti valmistettuihin materiaaleihin, joiden rakenne on tyypillisesti monikiteinen (engl. polycrystalline). Yksikiteisissä (engl. monocrystal) rakenteissa, kuten kvartseissa, sähködipolit ovat jo valmiiksi yhdensuuntaisia [18]. Monikiteissä sähködipolit ovat puolestaan suuntautuneet epäsäännöllisesti (**kuva 2.3a**), eikä materiaalilla ole tästä johtuen pietsosähköisiä ominaisuuksia. Ferrosähköisyyden ansiosta materiaalista voidaan kuitenkin tehdä pietsosähköinen, lämmittämällä se Curie-pisteeseen ja altistamalla samanaikaisesti voimakkaalle sähkökentälle [18]. Tämä saa sähködipolit suuntautumaan yhdenmukaisesti, mikä aiheuttaa materiaalin polarisoitumisen (**kuva 2.3b**). Curie-piste onkin tärkeä ominaisuus pietsosähköisissä materiaaleissa, sillä se määrittää materiaalin maksimaalisen käyttölämpötilan: sillä tarkoitetaan lämpötilaa, jonka ylitettyään materiaali menettää ferrosähköiset ja pietsosähköiset ominaisuutensa [97] [48, s. 12].

Pietsosähköiset materiaalit voidaan luokitella monin eri tavoin. Energiankeruun näkökulmasta Sezer ja Koç [100] ovat jakaneet materiaalit orgaanisiin, epäorgaanisiin, komposiitteihin ja bioinspiroituneisiin materiaaleihin. Tämä jako korostaa materiaalien alkuperää ja luonnonmukaisuutta, mikä on tärkeä näkökulma tulevaisuuden ympäristöystävällisten materiaalien osalta. On kuitenkin huomattava, että Sezerin ja Koçin luokittelussa esiintyy joitakin rajatapauksia. Esimerkiksi monet



Kuva 2.3: Monikiteisen materiaalin sähködipolien suuntautuminen materiaalissa ennen (a) ja jälkeen (b) polarisointiprosessin, muokattu [76] esityksestä.

bioinspiroituneet materiaalit, kuten selluloosa ja jotkin muut polymeerit, kuuluvat myös orgaaniseen kategoriaan. Näin ollen materiaalien luokittelu niiden kemiallisen rakenteen perusteella on tarkkarajaisempi. Tässä tutkielmassa sovelletaan Lin et al. [61] ja Mishran et al. [76] käyttämää jakoa yksikiteisiin, keraameihin, polymeereihin ja komposiitteihin. Jaossa materiaalit erottuvat toisistaan käytettävyyden ja sovellettavuuden mukaan, mikä on tärkeää niin IoT-sovellusten kuin energiankeruun kannalta.

2.2.1 Yksikiteiset materiaalit

Yksikiteisissä materiaaleissa molekyylit ovat järjestäytyneet säännöllisesti ja jaksotaisesti kolmiulotteisessa tilassa [129]. Esimerkiksi kvartsilla on yksikiteinen rakenne, joten **kuvas**sa 2.1 esitetty molekyylin muoto jatkuu samanlaisena läpi koko materiaalin. Tämän rakenteen ansiosta materiaalin sähködipolit ovat valmiiksi yhdensuuntaisia, eikä erillistä polarisointiprosessia tarvita. Yksikiteisten materiaalien valmistaminen on tästä huolimatta huomattavasti monimutkaisempaa kuin monikiteisten keraamien, mikä tekee myös niiden valmistuskustannuksista suurempia [61]. Suosituimpia yksikiteisiä materiaaleja ovat mm. litiumniobaatti (LiNbO_3) ja PMN-PT [76].

Yksikiteisiä materiaaleja on sovellettu esimerkiksi mikrometrien kokoluokkaan liittyvissä miniatyyrilaitteissa, kuten MEMS-energiankeruussa. Chen et al. [22] muovasivat yksikiteisiä PMN-PT nanovöitä (engl. nanobelts) suuremmasta bulkkimateriaalista siten, että nanovyöt säilyttivät alkuperäisen materiaalin rakenteen ja pietso-sähköiset ominaisuutensa ennallaan. PMN-PT:stä valmistettiin MEMS-energianke-

rääjä, joka aktivoituu tärinästä ulokepalkin avulla. Testiolosuhteissa laite tuotti d_{33} -tilassa maksimijännitteen 5,36 V ja maksimitehon 7,182 mW resonanssitaajuudella 406,0 Hz.

2.2.2 Keraamiset materiaalit

Pietsosähköiset keraamit valmistetaan monimutkaisen prosessointiketjun avulla, jonka lopputuloksena syntyy monikiteinen materiaali [97]. Kuten todettua, monikiteisessä materiaalissa sähködipolit ovat alustavasti suuntautuneet sattumanvaraisesti, joten pietsosähköisten ominaisuuksien muodostamiseksi nämä dipolit tulee kääntää yhdensuuntaisiksi polarisointiprosessin avulla, kuten **kuvassa 2.3** on esitetty. Pietsosähköisten keraamien etuina ovat hyvät sähköiset ominaisuudet, vaivaton käyttöönotto ja monipuolinen sovellettavuus erilaisissa energiankeruurakenteissa ohutkalvoista ulokepalkkeihin [61]. Energiankeruussa keraamien suurimpana heikkoutena on materiaalille ominainen hauraus, joka rajoittaa niiden hyödyntämistä joustavuutta tai taipumista edellyttävissä sovelluksissa [100]. Suosituin pietsosähköinen keraami — ja samalla ylipäätään käytetyin pietsosähköinen materiaali — on lyijy-zirkonaatti-titanaatti (PZT) [94].

Keraamien erinomaisten pietsosähköisten ominaisuuksien ansiosta niitä voidaan soveltaa hyvin monipuolisesti varsin erilaisiin sovelluksiin, kuten arkipäivän esineisiin. Esimerkiksi Kim et al. [55] käyttivät PZT-PZNN-keraamia kehittämässään älykynässä kerätäkseen energiaa kynän liikkeistä. Älykynässä pietsosähköistä ulokepalkkia käytetään kynän varressa d_{31} kytkentätilassa, jolloin se kerää energiaa kynän horisontaalisesta liikkeestä. Lisäksi kynässä on pietsosähköinen levy d_{33} -tilassa, joka kerää energiaa kynän kärjen kohtaamasta iskukuormasta. Ulokepalkin tuottama maksimiteho oli 1,5 mW resonanssitaajuudella 3 Hz, joka vastaa yleisintä kirjoitusliikkeen aiheuttamaa taajuutta. Iskukuormaa hyödyntävä levy tuotti puolestaan 2,6 mW kuorman ollessa 5 MΩ. Kahta kytkentätilaa hyödyntämällä laite onnistui tuottamaan riittävästi energiaa langattoman ZigBee-moduulin hyödyntämiseen.

2.2.3 Polymeerimateriaalit

Polymeerit ovat hiilipohjaisia aineita, jotka muodostuvat pitkistä ja toistuvista polymeeriketjuista, joiden perusrakenneosina ovat yksittäiset molekyylit — ”monomeerit” [61]. Pietsosähköinen ilmiö muodostuu polymeereissä hieman eri tavalla kuin kiteisissä materiaaleissa, kuten yksikiteisissä tai keraameissa. Smithin ja Kar-

Narayanin [105] mukaan polymeerien pitkien molekyylien verkko voi muodostaa kiteisiä alueita, mutta nämä alueet ovat kuitenkin pääasiassa amorfisen aineen eli ei-kiteisen aineen ympäröimiä. Amorfinen aine voi järjestäytyä siten, että sen ominaisuudet ovat yhdenmukaiset kiderakenteen eri suunnissa eli ns. isotrooppisesti, jolloin polymeerimateriaalista tulee keskussymmetrinen, eikä siinä sen vuoksi voi esiintyä pietsosähköisyyttä. Joistakin polymeereistä tämä keskussymmetria voidaan kuitenkin poistaa muokkaamalla kiderakennetta polarisointiprosessin tai venytyksen (engl. drawing) avulla. Venytyksellä vaikutetaan materiaalin polymeeriketjujen ja kiteisten osien suuntautumiseen niin, että keskussymmetriasta päästään eroon ja materiaalista tulee pietsosähköinen. Smith ja Kar-Narayan huomauttavat, että polymeeriketjut voivat suuntautua myös luonnostaan epäsymmetrisesti, kuten monissa biologisissa pietsomateriaaleissa. Rakenteensa ansiosta polymeerit ovat huomattavasti joustavampia kuin kiteiset materiaalit, mutta samalla niiden pietsosähköiset ominaisuudet ovat heikommat [61]. Energiankeruun kannalta suosituimpia pietsosähköisiä polymeerejä ovat polyvinyylideenifluoridi (PVDF) ja sen kopolymeerit [113].

Pietsosähköisessä energiankeruussa polymeerien tyypillinen käyttökohde on erilaisissa aalto- tai virtausenergiaa hyödyntävissä sovelluksissa, joissa materiaalin joustavuus pääsee oikeuksiinsa. Esimeriksi Tang et al. [117] rakensivat tuulivoimaa hyödyntävän energiankerääjän PVDF-kalvojen avulla. Energiankerääjässä tuulen virtaus liikuttaa kalvoihin osuvaa iskuvartta. Iskun seurauksena kalvot taipuvat ja heiluvat, mikä synnyttää sähköenergiaa pietsosähköisen ilmiön kautta. Maksimaalisen tehon keräämiseksi laitteessa on tuuliviiri, joka suuntaa kalvot optimaalisesti suhteessa tuulen virtaukseen ja mahdollistaa energian keräämisen mistä tahansa tuulen suunnasta. Yksittäisen PVDF-kalvon pituus oli 17 cm ja leveys 2 cm. Pietsosähköinen d_{31} -kerroin oli > 20 pC/N ja kytkentäkerroin k oli > 10 %. Käytännön testissä todettiin, että kolmen PVDF-kalvon avulla laite pystyy tuottamaan riittävästi sähköä langattomien sensorinoodien käyttöön, joiden virrankulutus on milliwattien luokkaa. Energiankerääjä tuotti parhaimmillaan 46,2 mW tuulen nopeudella 6,5 m/s.

2.2.4 Komposiittimateriaalit

Pietsosähköiset komposiittimateriaalit ovat kahden tai useamman materiaalityypin yhdisteitä, joilla pyritään parantamaan materiaalin ominaisuuksia energiankeruun kannalta. Komposiittien avulla voidaan mm. vahvistaa hauraiden keraamien joustavuutta tai tehostaa polymeerien pietsosähköisiä ominaisuuksia [32]. Komposiit-

timateriaalin sähköisyys määräytyy yhdistettävien materiaalityyppien faasien järjestäytymisen perusteella [96, s. 378]. Esimerkiksi kahden faasin tai aineen komposiitissa, kuten polymeeri-kerami-yhdistelmäateriaalissa, polymeerimatriisiin satunnaisesti hajautetut keraamiset hiukkaset muodostavat materiaalin, jolla on heikot pietsosähköiset ominaisuudet verrattuna sellaiseen yhdistelmäateriaaliin, jossa keraamit on laminoitu kerroksittain osaksi polymeeriä [82]. Komposiiteissa käytettävistä materiaaleista nousevat esiin erityisesti PVDF-polymeeri sekä PZT-kerami, joilla molemmilla on hyvät pietsosähköiset ominaisuudet omilla materiaaliluokissaan [83].

Sen lisäksi, että komposiittimateriaalien valmistuksessa pyritään hyödyntämään kunkin materiaaliluokan parhaita ominaisuuksia, voidaan materiaalien yhdistämistä ja seostamistekniikoilla saada aikaan hyviä yhteisvaikutuksia. Esimerkiksi Saravananakumar et al. [99] sekoittivat sinkkioksidista (ZnO) valmistettuja nanolankoja PVDF-polymeeriseokseen yksinkertaisella ja edullisella menetelmällä. PVDF:n hyödyt eivät rajoittuneet sen omiin pietsosähköisiin ominaisuuksiin, vaan sillä oli myös tärkeä rooli siinä, miten ZnO-nanolangat valmiissa materiaalissa järjestäytyivät — mikä puolestaan vaikutti merkittävästi komposiitin sähkömekaanisiin ominaisuuksiin. Valmiista yhdistelmäateriaalista tuli paperin kaltainen kalvo, jolla oli jo lähtökohtaisesti hyvät pietsosähköiset ominaisuudet, eikä erilliselle polarisointiprosessille ollut tarvetta. ZnO-PVDF-komposiitti generoi enemmän sähköä yksisuuntaisessa puristuksessa, kuten iskukuormassa, verrattuna taittumiseen. Komposiittikalvosta valmistettu nanogeneraattori tuotti testeissä maksimijännitteen 6,9 V, maksimivirran 0,96 mA ja maksimitehon 6,624 mW. Yhdistelmäateriaalin todettiin olevan käyttökelpoinen iskukuormaa hyödyntävissä ympäristöissä, kuten liikenteessä tai kävelyssä, sen helpon ja edullisen valmistusmenetelmän ansiosta.

2.3 Ympäristöystävällisyys

Pietsosähköiset materiaalit ovat läpikäyneet kolme kehityssukupolvea: ensimmäisessä keskityttiin nanolankojen tuomiin mahdollisuuksiin energiankeruussa, toisessa pyrittiin parantamaan sekä materiaalien sähköntuotantoa että joustavuutta ja kolmannessa kehityssukupolvessa on kiinnitetty erityistä huomiota materiaalien ympäristöystävällisyyteen [107]. Ympäristöystävällisyydellä viitataan materiaalien tuotannosta sekä käytöstä aiheutuvien ympäristövaikutusten arvioimiseen ja vähentämiseen. Ympäristöystävällisyyden arvioinnissa on tärkeää tarkastella materiaalien

elinkaarta kokonaisuudessaan, sillä eri materiaaleilla on erilaisia ympäristövaikutuksia riippuen valmistus-, käyttö- ja hävitysvaiheista [45].

Yksi vakiintunut menetelmä prosessien, tuotteiden ja materiaalien ympäristövaikutusten arviointiin on elinkaariarviointi (engl. Life Cycle Assessment, LCA) [45][116]. LCA-menetelmässä pyritään hahmottamaan materiaalin tai tuotteen kokonaisvaltaisia ja koko elinkaaren mittaisia ympäristövaikutuksia, analysoimalla käytettyjä raaka-aineita, valmistusprosessia, käyttöä, syntyneitä sivutuotteita ja jätteitä [43][116]. LCA:ta ovat soveltaneet pietsosähköisten materiaalien ympäristöprofiilin analysoinnissa ainakin Ibn-Mohammed et al. (2016) [45], Mahmud et al. (2018) [72] ja Hazeri et al. (2022) [40]. Vaikka LCA-menetelmä mahdollistaa useiden ympäristövaikutusten yhtäaikaisen seuraamisen, on pietsosähköisten materiaalien kehitystä ohjannut viime vuosikymmeninä erityisesti lyijyn ympäristö- ja terveyshaitat.

Lyijyyn liittyvät ongelmat heijastuvat pietsosähköisten materiaalien kehityksessä tavoitteena löytää vaihtoehtoja käytetyimmälle ja tehokkaimmalle pietsosähköiselle materiaalille, lyijypohjaiselle PZT-keramille. Kehitystä motivoi kansainväliset lait ja asetukset, kuten EU:ssa vuonna 2003 säädetty RoHS-direktiivi (The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment) [25], jolla pyritään rajoittamaan lyijyn ja muiden haitallisten aineiden käyttöä elektroniikassa. Pietsosähköisten materiaalien osalta vuonna 2018 RoHS:iin sisällytettiin poikkeus 7(c)-I [26], joka mahdollisti lyijypohjaisten keraamien käytön useimpien laiteluokkien kohdalla vuoteen 2021 saakka. Tämä poikkeus päättyy käytännössä kaikkien laiteluokkien osalta 21.7.2024. Laittevalmistajat, kuten Texas Instruments [118] ja APC International [8], ovat vedonneet poikkeusten jatkamisen puolesta, jonka myötä tilanne on toistaiseksi vielä auki eli poikkeukset säilyvät voimassa, kunnes seuraava EU:n päätös julkistetaan. Joka tapauksessa säädökset ovat onnistuneet kirvoittamaan kiinnostuksen lyijyvapaisiin pietsosähköisiin materiaaleihin ja uusia materiaalivaihtoehtoja on löydetty korvaamaan lyijypohjaisia keraameja [38]. Tyypillisesti nämä lyijyvapaat materiaalit jaetaan orgaanisiin ja epäorgaanisiin: orgaanisia pietsosähköisiä materiaaleja ovat mm. PVDF-polymeeri sekä biopolymeerit ja epäorgaanisia puolestaan bariumtitaanaatille (BaTiO_3) tai kaliumnatriumniobaatille (KNN) perustuvat keraamit [122].

Pelkkä lyijyttömyys itsessään ei kuitenkaan tarkoita, että materiaali olisi ympäristöystävällinen. Ibn-Mohammedin et al. [45] mukaan KNN-materiaalia on lyijyttömyytensä ohella pidetty ympäristöystävällisenä ja vihreänä vaihtoehtona PZT:n korvaajaksi. Heidän suorittamansa LCA-vertailu näiden kahden materiaalin välillä

kuitenkin osoitti, että KNN on ympäristön näkökulmasta — erityisesti ilmastonmuutoksen ja ympäristömyrkkujen kannalta — huonompi vaihtoehto kuin PZT. Vaikka KNN on käyttövaiheessa myrkytön ja jopa bioyhteensopiva, sitä voidaan esimerkiksi niellä ilman terveystriskejä, ovat sen ympäristövaikutukset ennen käyttöä pietsosähköisissä sovelluksissa suuremmat kuin PZT:llä [45]. Käytetyimpien materiaalien korvaamisessa ei siis riitä käytöstä aiheutuvien ympäristövaikutusten tarkastelu, vaan myös valmistusprosesseista aiheutuvat päästöt tulee ottaa huomioon. Uusien, ”vihreämpien” materiaalivaihtoehtojen massatuotantoon ja skaalautuvuuteen liittyvät tekijät eivät välttämättä ole täysin selvillä ja ympäristövaikutukset saattavat olla kokonaisvaltaisesti tarkastellen jopa huonommat kuin käytössä olevilla materiaaleilla. Ibn-Mohammed et al. [46] suosittelevat kokonaisvaltaisen LCA-analyysin suorittamista ennen materiaalin julistamista vihreäksi tai ympäristöystävälliseksi.

Tulevaisuuden kannalta erityisen kiinnostavia ympäristöystävällisiä materiaaleja ovat pietsosähköiset biomateriaalit, jotka voidaan valmistaa ilman ympäristölle haitallisia valmistusprosesseja. Sezer ja Koç [100] nostavat katsauksessaan esiin tällaisia bioinspiroituneita materiaaleja, kuten munankuoren kalvon ja selluloosan, joiden pietsosähköisiä ominaisuuksia on pidetty lupaavina energiankeruun kannalta. Esimerkiksi Karanin et al. [51] munankuoren kalvosta valmistama bio-nanogeneraattori on pietsosähköisiltä ominaisuuksiltaan — likimääräisesti 26,4 V jännitteellä, 1,45 mA virralla ja 63 % energian muuntotehokkuudella — vertailukelpoinen joidenkin yleisesti käytössä olevien materiaalien kanssa. Myös selluloosan tai tarkemmin selluloosananofibrillien (engl. cellulose nanofiber) avulla on ylletty PVDF-polymeriä vastaaviin d_{33} -kertoimiin [114]. Vielä ei ole selvää missä määrin bioinspiroituneilla materiaaleilla pystyttäisiin korvaamaan ympäristölle haitallisempia materiaaleja konkreettisissa IoT-sovelluksissa. Tästä huolimatta biomateriaalien tuloksia on pidetty yleisesti lupaavina [100][51][114] [73]. Maiti et al. [73] näkevät bioinspiroituneissa materiaaleissa paljon potentiaalia suuremman mittakaavan sovelluskohteissa, kuten teollisuuden energiankeruussa. Tässä tavoitteessa merkittävänä haasteina ovat kuitenkin mm. biomateriaalien tehotiheyden parantaminen ja bio-nanogeneraattoreiden koon kutistaminen [73]. Bioinspiroituneet materiaalit saattavat vielä nousta merkittävään asemaan IoT-laitteiden energiankeruun osalta, mutta toistaiseksi alalla on tilaa lisätutkimukselle ja uusille innovaatioille.

3 Energiankeruu esineiden internetissä

Tässä luvussa perehdytään esineiden internetiin (engl. Internet of Things, IoT) energiankeruun toimintaympäristönä. Aluksi mielenkiinto kohdistuu erityisesti IoT-peruslaitteen eli noodin kokoonpanoon, jonka osana erilaiset energiankeruujärjestelmät toimivat. Seuraavaksi luvussa käsitellään energiankeruumenetelmiä eri mitta-luokissa, mikä asemoi pietsosähköisen energiankeruun roolia. Tämän jälkeen syvennytään pietsosähköisten energiankeruujärjestelmien arkkitehtuuriin ja tarkastellaan käytännön esimerkein niiden ytimessä toimivia energiankeräysrakenteita neljän kategorian kautta: resonanssirakenteet, off-resonanssirakenteet, iskurakenteet ja joustavat rakenteet. Luvun lopuksi käydään läpi yleisimpiä hybridijärjestelmiä eli energiankeruumenetelmiä, joita voidaan soveltaa yhdessä pietsosähköisen menetelmän kanssa.

3.1 Esineiden internet toimintaympäristönä

Esineiden internet tarkoittaa yleisesti sitä, että lähes mikä tahansa fyysinen objekti voidaan liittää osaksi tietoverkkoja, minkä ansiosta ne kykenevät kommunikoidaan keskenään tai yhdessä muiden laitteiden kanssa. IoT-käsitteen yli 20 vuotta sitten luonut Kevin Ashton [10] on myöhemmin painottanut tarkoitaneensa termillä ilmiötä, jossa teknologian kehityksen myötä fyysiset esineet pystyvät kasvavassa määrin keräämään tietoa ympäristöstään ja toimimaan sen perusteella täysin itsenäisesti. Tätä Ashtonin visiota toteuttavat erityisesti langattomat sensoriverkot (engl. Wireless Sensor Network, WSN), jotka rakentuvat yleensä ympäristöä mittaavista, toisiinsa tietoverkkojen avulla yhdistetyistä anturinoodeista ja niiden keräämän informaation perusteella toimivista toimilaitteista eli aktuaattoreista. Edullisten ja vähävirtaisten anturinooidien avulla sensoriverkkoja voidaan hyödyntää laajasti erilaisissa IoT-sovelluksissa, älykodeista terveydenhuoltoon tai sotilaskäyttöön [4].

On kuitenkin hyvä huomata, että esineiden internet on laajempi yläkäsite langattomille sensoriverkoille. Samuel Greengardin [35, s. 14–17] mukaan IoT:hen kuuluvalta esineeltä tai objektilta edellytetään pääasiassa yhdistymistä internetiin tai toi-

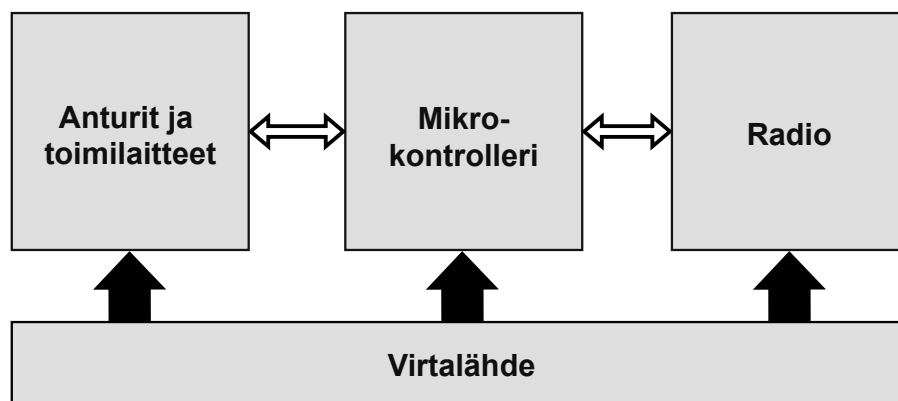
siin laitteisiin joko langallisesti tai langattomasti. Tässä mielessä käyttäjän fysiologisia tietoja keräävä älykello, etäohjattavat älyvalaisimet ja teollisuuden tuotantolinjoja vahtivat anturit voivat kaikki kuulua esineiden internetiin. Teollisuuden esineiden internetin sovelluksista käytetäänkin yleensä erillistä termiä *teollinen internet* (engl. Industrial Internet of Things, IIoT), jonka Greengard kuvaa olevan neljännen teollisen vallankumouksen taustalla. Teollinen internet liittyy tuotannossa käytettävät laitteet osaksi IoT:ta, mikä mahdollistaa päätöksenteon laitteista kerätyn informaation perusteella. Näin teollisuudessa voidaan esimerkiksi seurata, milloin jokin kone vaatii huoltoa tai korjausta.

Mosenian ja Jhanin [80] mukaan IoT:n arkkitehtuuria on kuvattu useilla erilaisilla kerrosmalleilla, jotka vaihtelevat yksinkertaisesta kolmitasomallista aina monimutkaisempiin viisi- ja seitsemäntasoisiihin malleihin. He näkevät kolmitasomallin ikään kuin langattomien sensoriverkkojen laajennettuna versiona: alin kerros koostuu dataa keräävistä langattomista sensoriverkoista, keskimääräinen kerros dataa käsittelevistä pilvipalvelimista ja ylin kerros käyttäjän sovelluksista, joissa kerättyä dataa hyödynnetään. Yksinkertainen kolmitasomalli on riittävä tämän tutkielman puitteissa, sillä se kattaa IoT-järjestelmien ne pääkomponentit, jotka ovat relevantteja energiankeruun ja laitteiden yleisen toimivuuden kannalta. Monimutkaisemmat mallit yleensä pilkkovat tätä samaa kolmijakoa vielä pienempiin osiin [80]. Kolmitasomallia ovat käyttäneet esimerkiksi Gubbi et al. [36] sekä Gupta ja Quamara [37].

Shirvanimoghaddam et al. [102] jakavat IoT-laitteet peruslaitteisiin ja kehittyneisiin laitteisiin. Peruslaitteet ovat laskentatehoiltaan sekä toiminnallisuuksiltaan varsin rajoittuneita ja niiden virtalähteenä on yleensä pieni paristo. Peruslaitteiden sovelluskohteena on esimerkiksi Massiivinen IoT (engl. Massive IoT), jossa yksittäisistä anturinoodeista muodostetaan todella suuria sensoriverkkoja. Kehittyneet laitteet ovat puolestaan laskentatehoiltaan kyvykkäämpiä ja ne käyttävät viestinnässä yleensä matkapuhelin- tai laajaverkkoja. Tyypillisiä kehittyneitä laitteita ovat esimerkiksi matkapuhelimet tai kannettavat tietokoneet. Tämän tutkielman kiinnostuksen kohteena ovat erityisesti peruslaitteet, sillä niissä energiatehokkuudella on keskeinen rooli.

Peruslaitteen eli noodin kokoonpano muodostuu yleensä anturista, virtalähteestä, prosessorista, radiosta (engl. transceiver) ja A/D-muuntimista [36]. Tyypillisen noodin arkkitehtuuri on esitetty neljän perusyksikön kautta **kuvassa 3.1**: Anturit ja toimilaitteet ovat yhteydessä mikrokontrolleriin, joka voi vastaanottaa anturien mittaamaa dataa tai ohjata toimilaitteiden toimintaa. Kuvan mikrokontrolleriyk-

sikkö käsittää tarvittavat laskennalliset komponentit, kuten suorittimet, muistit ja A/D-muuntimet. Radioyksikkö viittaa lähetin-vastaanottimeen, jolla laite kommunikoi muiden laitteiden kanssa viestintäprotokollia hyödyntäen. Laitteen komponentit saavat virtansa virtalähteestä, joka voi olla esimerkiksi paristo tai monimutkaisempi energiankeruuyksikkö, esimerkiksi pietsosähköinen energiankerääjä (ks. kuva 3.2).



Kuva 3.1: Langattoman peruslaitteen arkkitehtuuri, muokattu [2] esityksestä.

Esineiden internet on valloittanut maailmaa osin näkyvästi, esimerkiksi vanhojen vesimittarien vaihtuessa uusiin etäluettaviin älymittareihin, mutta myös osin huomaamattomasti osana teollisuuden kehitystä. Vuonna 2023 käytössä on arvioitu olevan yli 16 miljardia IoT-laitetta [47]. Tilastopalvelut Statista [108] ja IoT Analytics [47] molemmat ennustavat IoT-laitteiden määrän kasvavan yli 29 miljardiin vuoteen 2030 mennessä. Edellä mainittujen tilastojen osalta on hyvä pitää mielessä, että vaikka ne ovat tuoreita ja luotettavilta tahoilta, ovat ne silti parhaimmillaankin vain arvioita. Joka tapauksessa esineiden internetin ubiikkiin eli kaikkialle sulautuvaan luonteeseen kuuluu oleellisesti laitteiden määrän moninkertaistuminen. Kehityksen taustalla vaikuttavana voimana on ollut erityisesti laskentakykyisten laitteiden koon kutistuminen ja erittäin vähävirtaisten viestintäteknologioiden kehittyminen [102].

IoT-laitteiden lukumäärän moninkertaistumisella on myös kääntöpuolensa. Yksi keskeisistä haasteista liittyy virrantarpeeseen, jonka merkitys korostuu laitteiden määrän kasvaessa. Suuri osa IoT-laitteista tulee toimimaan paristoilla kustannusten, käytännöllisyyden, laitteiden koon ja hankalan asennuspaikan vuoksi [102]. Esimer-

kiksi luontoon tai rakennusten rakenteiden sisään kytketyt anturinoodit edellyttävät langattomuutta, joka saavutetaan usein paristoilla. Tällaisissa tilanteissa ladattavat akut eivät tule kysymykseen, sillä niiden ylläpito ja säännöllinen lataaminen voi olla haastavaa tai jopa mahdotonta. Lisäksi laitteiden suuren määrän myötä ylläpitoon liittyvät kustannukset kasvavat nopeasti kohtuuttomiksi. Tällä hetkellä kyseiset IoT-laitteet toimivatkin pääasiassa paristojen voimalla [6]. IoT-laitteiden riippuvuudella paristoista on merkittäviä ympäristövaikutuksia, kuten esimerkiksi se, että poisheitettävien paristojen määrän voidaan olettaa kasvavan entisestään [49]. Euroopan unionin rahoittama EnABLES-projekti [29] on arvioinut, että jopa 78 miljoonaa IoT-laitteiden käyttämää paristoa tullaan hävittämään maailmanlaajuisesti päivittäin vuoteen 2025 mennessä, jos mitään ei tehdä laitteiden eliniän pidentämiseksi. EnABLESin mukaan tämän hetkisistä IoT-laitteiden paristoista päätyy kierrätykseen vain alle 40 %.

IoT-laitteiden elinikää voidaan kasvattaa monin eri keinoin. Jayakumar et al. [49] ovat esittäneet 3 erilaista lähestymistapaa tämän haasteen ratkaisemiseksi: 1) erittäin vähävirtaisten laitteistoalustojen suunnittelu, 2) älykkäiden virranhallintajärjestelmien kehittäminen sekä 3) ympäristön energianlähteiden hyödyntäminen energiankeruun avulla. Heidän mukaansa energiankeruu on noussut viimeisen vuosikymmenen aikana houkuttelevaksi ja entistä toteuttamiskelpoisemmaksi ratkaisuksi vähävirtaisten IoT-laitteiden virransaannin haasteisiin. Adu-Manu et al. [3] esittävät Khajurian ja Guptan [52] tutkimukseen perustuen, että virransäästötekniikat laitekomponenttien ja viestintäprotokollien tasolla auttavat vain tiettyyn pisteeseen asti, sillä noodin toiminta on edelleen riippuvaista rajallisesta virtalähteestä. Sen sijaan energianeutraalin energiankeruun avulla, jossa laite kuluttaa energiaa tasapainoisessa suhteessa siihen, mitä se pystyy itse keräämään, toiminta-aika voi olla teoriassa ääretön. Shaikh ja Zeadally [101] näkevät, että käytännössä kaikki langattomat sensoriverkkosovellukset voisivat hyötyä energiankeruusta, sillä niiden tulisi pyrkiä energiaomavaraisuuteen, pitkäikäisyyteen ja huoltovapauteen.

3.2 Energiankeruu mikro- ja nanotasolla

Energiankeruulla (engl. energy harvesting) tarkoitetaan ympäristössä saatavilla olevien energianlähteiden hyödyntämistä tai muuntamista käyttökelpoiseen muotoon, kuten sähköenergiaksi. Tätä käytäntöä voidaan tarkastella makro- ja mikrotasolla, riippuen käytettävän laitteen koosta tai kerättävän energian mittaluokasta [39].

Makrotasolla ovat vuosisatoja vanhat järjestelmät, kuten tuuli- ja vesimyllyt sekä esimerkiksi verkkovirtaan suuria energiamääriä tuottavat aurinkopaneelijärjestelmät. Mikrotasolle kuuluvat puolestaan nykyaikaiset vähävirtaista mikroteknologiaa hyödyntävät langattomat IoT-laitteet. Makrotason energiantuotanto on tyypillisesti kilo- tai megawattien luokkaa, kun mikrotasolla liikutaan milli- ja mikrowattien tasolla [54]. Jatkuvan kehityksen myötä mikrotasolta on siirrytty edelleen pienempiin mittaluokkiin, ja nykyään tutkimuksessa tarkastellaan nanokokoisia generaattoreita, jotka mahdollistavat entistä pienempien ja fyysisiltä ominaisuuksiltaan joustavampien energiankeruujärjestelmien kehittämisen [20]. Edellisessä alaluvussa (ks. 3.1) esiin nousseet IoT-laitteiden virrantarpeisiin liittyvät haasteet pyritään ratkaisemaan pääasiassa nano- ja mikrotasoilla. Mahdollisia ratkaisuvaihtoehtoja onkin tarjolla useita, sillä laitteiden käyttöympäristöissä on saatavilla monia ympäristöstävällisiä energianlähteitä, kuten tärinä, lämpö, virtausenergiat, valo, radioaalot ja jopa ihmiskehon sisäiset toiminnat (in vivo) [100].

Erityyppiset energianlähteet soveltuvat erilaisiin mikro- ja nanotason sovelluksiin, joten energianlähteen valintaan vaikuttavat sovelluksen erityisvaatimukset ja käyttöolosuhteet. Lämpöenergiaa voidaan hyödyntää erityisesti ympäristöissä, joissa esiintyy suuria lämpötilaeroja tai tuotetaan paljon hukkalämpöä [50]. Lämpöenergiaa keräävän laitteen eli lämpösähköisen generaattorin (engl. Thermoelectric Generator) hyviä puolia ovat, että laitteessa ei ole liikkuvia osia ja sillä on yleensä pitkä elinikä [102]. Menetelmän suurin heikkous on sen alhainen hyötysuhde, mikä tarkoittaa, että vain pieni osa lämpöenergiasta saadaan talteen sähköinä [21]. Suuren hyötysuhteen energianlähteenä pidetään puolestaan valoenergiaa eli aurinkoa, josta energiaa kerätään valojänniteilmiötä (engl. photovoltaic effect, PV) hyödyntävien aurinkokennojen avulla [102]. Tuotetun energian määrä riippuu valon intensiteetistä ja aurinkokennojen koosta [75]. IoT-laitteiden näkökulmasta aurinkoenergian varjopuolena on, että sitä on tarjolla pääasiassa ulkotiloissa ja että sen tehokkuus on riippuvaista vuodenajasta, vuorokaudenajasta sekä sääolosuhteista. Sen sijaan radioaalloista energiaa on saatavilla — vaihtelevilla voimakkuuksilla — vuorokaudenajasta riippumatta, niin sisä- kuin ulkotiloissa [98]. Energian kerääminen radioaajuusvirrasta (engl. radiofrequency, RF) perustuu pääasiassa sähkömagneettiselle induktiolle, jossa antennin vastaanottama RF-signaali synnyttää jännitteen ja sähkövirran (Faradayn lain mukaisesti), jotka voidaan sitten varastoida talteen [95]. Radioaalloista kerättävän energian määrään vaikuttavat alkuperäinen lähetysteho, antennin vahvistus ja etäisyys RF-signaalin lähteestä [90]. RF-energiankeruun huonoja

puolia ovat alhainen tehotiheys ja hyötysuhteen heikkeneminen suurilla etäisyyksillä [119]. Tärinää tai värähtelyä pidetään puolestaan energianlähteenä, jolla on suuri tehotiheys [98]. Tärinä on yksi mekaanisen energian muodoista, johon kuuluvat myös laajemmin kineettisen energian eli liike-energian lähteet. Mekaanista energiaa pidetään sen monimuotoisuuden vuoksi IoT-ympäristöissä yleisimmin saatavilla olevana energianlähteenä [131] [100]. Energiankeruulla mekaanisesta energiasta on myös omat haasteensa, kun esimerkiksi värähtelyenergian tehokas kerääminen edellyttää, että energiankerääjä toimii resonanssissa värähtelyn lähteen kanssa [19]. Lisäksi kerätyn energian määrä riippuu värähtelyn amplitudista ja taajuudesta [131].

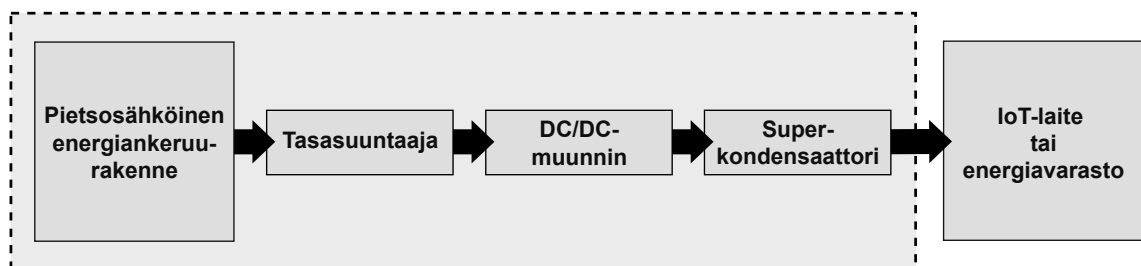
Tärinää on pidetty mikrotason monipuolisimpana ja yleisimmin käytettävissä olevana energianlähteenä [77]. Sitä tuottavat esimerkiksi teollisuuslaitteet [1], ihmisen liike [71] tai erilaiset virtausenergianlähteet, kuten tuuli ja vesi [70]. Värähtelyenergian muuttamiseksi hyötykäytettäväksi sähköenergiaksi on pääasiassa neljä eri menetelmää: pietsosähköisyys, tribosähköisyys, sähkömagneettisuus ja sähköstaattisuus [98] [134]. Vaikka kaikilla näistä menetelmistä on omat vahvuutensa, pietsosähköisyyttä pidetään lupaavimpana useista syistä: 1) se ei edellytä erillistä jännitelähdettä, magneettikenttää tai kontaktia minkään muun materiaalin kanssa, vaan sen mekanismi perustuu materiaalin sisäiseen polarisoitumiseen [100]; 2) sillä on erinomainen tehotiheys [93] — jopa kolme kertaa suurempi kuin sähkömagneettisuudella tai sähköstaattisuudella [91]; 3) mittaluokan kutistumisesta ei ole merkittävää haittaa, minkä ansiosta pietsosähköisyys soveltuu hyvin myös erittäin pienikokoisiin MEMS-laitteisiin [13]. Pietsosähköinen menetelmä onkin tutkituin kaikista värähtelyenergiaa koskevista menetelmistä [98].

3.3 Pietsosähköinen energiankeruu

Pietsosähköinen energiankeruu perustuu materiaaleille, joilla on kyky muuttaa mekaaninen rasitus sähköenergiaksi luvussa 2 esitetyllä tavalla. Käytännössä energiankeruu tapahtuu pietsosähköisen energiankeruujärjestelmän eli PEH-järjestelmän (engl. Piezoelectric Energy Harvesting system) avulla, joka asettuu IoT-laitteen arkkitehtuurissa (ks. **kuva 3.1**) virtalähdetyksikköön. PEH-järjestelmä toimii pääasiassa joko niin, että ympäristöstä kerättyä energiaa käytetään suoraan itse noodin toimintoihin (engl. harvest-use, HU) tai niin, että kerätty energia varastoidaan esimerkiksi akkuihin ennen käyttöönottoa (engl. harvest-store-use, HSU) [112]. HSU-menetelmä on

näistä kahdesta vaihtoehdosta suositumpi, sillä vaikeasti ennakoitavista energianlähteistä kerättyä energiaa ei voida suoraan hyötykäyttää ilman varastointia [98].

Kuvassa 3.2 on esitetty PEH-järjestelmän komponentit, joissa tuotettua sähkövirtaa käsitellään ennen sen varsinaista hyödyntämistä. Aluksi tiettyyn muotoon ja konfiguraatioon kytketty pietsosähköinen materiaali eli energiankeruurakenne muuntaa ympäristössä esiintyvän mekaanisen rasituksen sähköenergiaksi. Energiankeruurakenteella on suuri vaikutus PEH-järjestelmän tehokkuuteen ja niitä onkin käsitelty tarkemmin luvussa 3.4. Seuraavaksi pietsosähköisen energiankeruurakenteen tuottama sähkövirta, joka on pietsosähköiselle energiankeruulle luonteenomaisesti vaihtovirtaa [62], tulee muuntaa tasasuuntaajan avulla tasavirraksi ennen kuin sitä voidaan hyödyntää akuissa tai muissa sähkölaitteissa [68]. Koska tämän tasasuunnatun sähkövirran jännite riippuu yhä syklisestä energianlähteestä (esim. tärinästä), jännitettä pyritään optimoimaan impedanssisovituksen avulla, jossa tasasuuntaajan lähtöimpedanssi sovitetaan yhteen superkondensaattorin impedanssin kanssa käyttäen DC/DC-muunninta [30]. Järjestelmän avulla generoidut sähkötehot ovat tyypillisesti matalia, joten tuotettua sähköenergiaa varastoidaan riittävästi superkondensaattoriin ennen tehonsyöttöä akulle [102] tai IoT-laitteelle [130], riippuen siitä onko käytössä HU- vai HSU-menetelmä.



Kuva 3.2: PEH-järjestelmän arkkitehtuuri [78].

PEH-järjestelmän ensisijainen toimintaperiaate on se, että pietsosähköisen ilmiön avulla tuotettua sähköenergiaa prosessoidaan ja käsitellään ennen kuin sitä voidaan hyödyntää käytännön energiankeruusovelluksissa. Tässä prosessissa energian muuntamiseen käytetyt komponentit vaikuttavat merkittävästi koko energiankeruusovelluksen tehokkuuteen. Todellisuudessa järjestelmän arkkitehtuuri edellyttää aina sovelluskohtaista suunnittelua, sillä optimaalista universaalia ratkaisua ei ole olemassa [30, s. 340].

Vaihtoehtoisia malleja **kuvan 3.2** arkkitehtuurille ovat esimerkiksi SSHI- (engl. Synchronized Switch Harvesting on Inductor) ja SECE-piirit (engl. Synchronous Electrical Charge Extraction) [24]. SSHI:ta pidetään erityisen hyvänä vaihtoehtona järjestelmissä, joiden sähkömekaaninen muunnos on vähäistä, sillä kyseinen menetelmä pyrkii optimoimaan hukatun energian talteenoton [30]. Wu et al. [126] kuvaavat, kuinka SSHI:n toiminta perustuu energiankeruurakenteen rinnalle integroituu kytkimeen, joka aukeaa ja kääntää piirin jännitteen optimaalisessa vaiheessa niin, että kondensaattorin lataamiseen tarvittava energia saadaan myös varastoitua talteen. SECE-piirin toiminta perustuu samalla tavoin integroidulle kytkimelle, mutta toisin kuin SSHI:ssa, kondensaattorin energia siirretään ensin ulkoiselle kelalle ja vasta sitten kuormalle [127]. Kyseisen mekanismin ansiosta kuormaan liittyvät vaihtelut eivät vaikuta energiankeruun tehokkuuteen SECE-menetelmässä [126].

PEH-järjestelmä voidaan siis konfiguroida eri tavoin vastaamaan sovelluskohdeiden erityisvaatimuksia, mikä optimoi energiankeruun tehokkuutta. Parannuksia voidaan saavuttaa arkkitehtuuri- ja piirivalintojen lisäksi tehostamalla yksittäisten komponenttien toimintaa entisestään. Tällaisesta komponenttikohtaisesta optimoinnista on mainittava esimerkkinä viime aikoina kasvavassa määrin huomiota saaneet [104] itselatautuvat pietsosähköiset superkondensaattorit (engl. self-charging supercapacitor power cell). Näissä superkondensaattoreissa pietsosähköistä materiaalia käytetään eristemateriaalina, mikä mahdollistaa kondensaattorin latautumisen omatoimisesti pietsosähköisen ilmiön kautta laitteen kohdatessa mekaanista rasitusta [59]. Singhin et al. [104] katsauksessa todetaan alan olevan vielä alkuvaiheissaan, joten pietsosähköisten superkondensaattorien todellinen merkitys energiankeruun kannalta saadaan selville tulevaisuudessa.

Tämä tutkielma keskittyy PEH-järjestelmän komponenteista erityisesti energiankeruurakenteeseen. Energiakeruurakenteen ja pietsosähköisen materiaalin yhteisvaikutus nimittäin määrittää laitteen sähkömekaanisen muuntotehokkuuden, kun järjestelmän muut komponentit vaikuttavat energiankeruun tehokkuuteen tyypillisesti vasta pietsosähköisen muunnoksen jälkeen. Seuraavaksi tarkastellaan yleisimpiä energiankeruurakenteita sekä niiden suorituskyvyn kannalta merkittäviä tekijöitä.

3.4 Pietsosähköiset energiankeruurakenteet

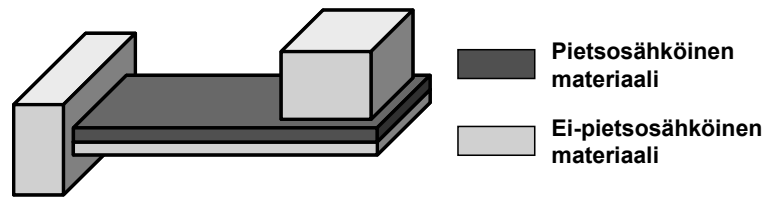
Optimaalisen energiankeruurakenteen valintaa ohjaavat energiankeruusovelluksen tarpeet sekä erityisesti ympäristön mekaanisen energianlähteen värähtelyominaisuudet. Tältä pohjalta Li ja Lee [65] ovat luokitelleet energiankeruurakenteet kolmeen yleiseen kategoriaan: 1) resonanssirakenteet, 2) off-resonanssirakenteet ja 3) iskurakenteet. Lisään tähän luokitteluun kategorian 4) joustavat rakenteet, joka käsittelee erityisesti pietsosähköisten nanorakenteiden (esim. nanolankojen, nanosauvojen ja nanopartikkelien) avulla valmistetut kalvomaiset energiankeruurakenteet. Vaikka joustavat rakenteet soveltuvat käytettäväksi myös muissa kategorioissa, on niillä sellaisia rakenteellisia piirteitä (nanotason mittaluokka) ja energiankeruumahdollisuuksia (energiankeruu taipumisliikkeestä), että käsittelen ne omana luokkana.

3.4.1 Resonanssirakenteet

Resonanssirakenteet ovat energiankeruurakenteita, joiden värähtelytaajuus on viri-tetty vastaamaan ympäristön ominaisvärähtelytaajuutta. Resonanssitaajuudella värähtelyamplitudit kasvavat merkittävästi, mikä kasvattaa puolestaan pietsosähköisen materiaalin rasitusta ja sitä kautta koko järjestelmän tuottaman sähköenergian määrää [66].

Yksi käytetyimmistä resonanssirakenteista on ulokepalkki (engl. cantilever), jonka kärkeen on asennettu lisämassa [65] (**kuva 3.3**). Ulokepalkissa pietsosähköinen materiaalikerros liitetään yhteen johdinmateriaalin kanssa joko yksikerroksisesti (engl. unimorph) tai niin, että kaksi pietsosähköistä kerrosta ympäröivät johdinmateriaalia sen molemmiin puolin (engl. bimorph) [61]. Ulokepalkki kytketään toisesta päästä kiinni värähtelyn lähteeseen, jonka synnyttämä liike saa palkin heilumaan vapaan kärjen puolelta. Kärkeen asennetun lisämassan avulla ulokepalkin värähtelytaajuus voidaan sovittaa ympäristön värähtelytaajuuteen, joka on tyypillisesti matalataajuisista (alle 100 Hz) [100]. Ilman lisämassaa ulokepalkin värähtelytaajuus on huomattavasti korkeampi [63].

Resonanssirakenteet edellyttävät ympäristön energianlähteen värähtelytaajuuden huomioimista, sillä kerätyn energian määrä vähenee merkittävästi, kun kyseistä rakennetta sovelletaan resonanssitaajuuden ulkopuolella. Ympäristön värähtelytaajuus voidaan selvittää mittauksilla ennen PEH-laitteen käyttöönottoa. Näin tekivät Huet et al. [44] tutkiessaan resonanssirakenteisen PEH-laitteen käyttöä langattoman



Kuva 3.3: Pietsosähköinen unimorph-ulokepalkki [61].

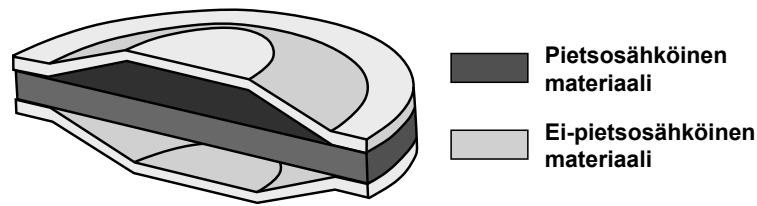
anturinoodin virtalähteenä teollisuusympäristössä. Kiihtyvyyssmittarilla tehdyn esiselvityksen avulla he huomasivat, että moottori- ja tyhjiöpumppujen värähtelytaajuudessa sekä amplitudissa oli suurta vaihtelua mittauskohdasta riippuen. He kehittivät viritettävän ulokepalkkirakenteen, jonka värähtelytaajuutta voitiin säätää muuttamalla ulokepalkin kiinnityskohdan pituutta ja lisämässän painoa. Viritysmekanismin ansiosta laite voidaan räätälöidä sopivaksi eri kiinnityskohtiin. Huetin et al. mukaan PZT-materiaalista valmistettu PEH-laite keräsi 49 Hz taajuudella 100 mA sähkövirtaa 3,3 V jännitteellä ilman katkoksia, mikä mahdollisti langattoman JENNIC JN5148-moduulin sekä lämpötilasensorien paristovapaan toiminnan.

3.4.2 Off-resonanssirakenteet

Off-resonanssirakenteita käytetään, kun kapealla resonanssitaajuusalueella toimiminen ei ole käytännöllistä. Esimerkiksi erittäin matalilla taajuuksilla energiankeruurakenteen virittäminen resonanssitaajuudelle edellyttää pietsosähköisen elementin koon kasvattamista epäkäytännöllisen suureksi, joten näissä tilanteissa sopivampia vaihtoehtoja ovat off-resonanssirakenteet [61].

Off-resonanssirakenteena voi toimia esimerkiksi symbaali (engl. cymbal) [61] (kuva 3.4). Symbaalirakenteessa ympyränmuotoinen pietsosähköinen levy asetetaan johdinmateriaalista valmistettujen kupolien väliin, minkä vuoksi rakenne kestää suuria kuormia, kupolien jakaessa rasituksen tasaisesti läpi koko pietsosähköisen materiaalin [7].

Rakenteensa puolesta symbaali soveltuu hyvin sovelluksiin, joissa värähtelytaajuus voi olla hyvinkin alhainen, mutta rasituksen intensiteetti puolestaan korkea. Tällainen sovelluskohde on esimerkiksi ihmisen kävely, jonka taajuus on tyypillisesti alle 2 Hz ja kuormitus määräytyy askelluksen painon mukaan. Kuang et al. [60] ovat tutkineet symbaalirakenteen soveltamista askelenergian keräämiseen. Tutkimuksessaan he asensivat kenkään symbaalirakenteen, jossa pietsosähköinen PZT-



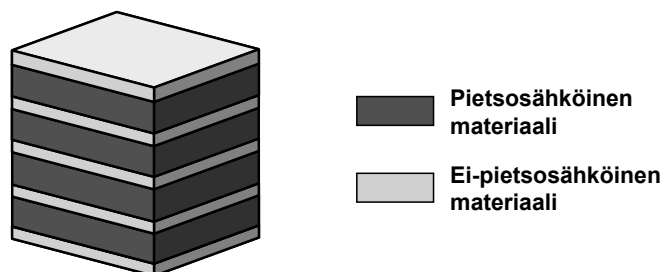
Kuva 3.4: Pietsosähköinen symbaalirakenne (poikkileikkauskuva) [60].

levy oli kerrostettu kupolien lisäksi kahden metallisubstraatin väliin. Kävelytestissä 76 kg painoinen henkilö käveli 4,8 km/h vauhdilla kahden minuutin ajan, jolloin kävelyn taajuus oli 1,4 Hz ja suurin tuotettu keskimääräinen teho 2,5 mW. Tutkijoiden mukaan rakenne tuottaa riittävästi virtaa jaksoittaisesti toimivien langattomien sensoreiden tarpeisiin, kunhan se yhdistetään asianmukaiseen arkkitehtuuriin ja tarvittaviin energiavarastoihin.

3.4.3 Iskurakenteet

Iskurakenteiden (engl. impact-based) avulla energiaa kerätään impulssivoimista ja törmäyksistä [65]. Off-resonanssirakenteiden tavoin iskurakenteet toimivat resonansitaajuuden ulkopuolella, mutta painottuvat vielä enemmän jaksoittaisten ja erittäin voimakkaiden kuormien ympäristöihin. Näin ollen iskurakenteet tuottavat tyypillisesti myös suuria jännitteitä [65].

Yksi tapa vahvistaa pietsosähköisestä materiaalista iskunkestävä on muodostaa ns. pinorakenne [61] (kuva 3.5). Pinorakenteessa pietsosähköisiä kerroksia ladotaan päällekkäin siten, että materiaalin polarisaation suunta pysyy yhtenäisenä pinon pituussuunnan mukaisesti [100]. Monikerroksisuuden ansiosta rakenteen kapasitanssi kasvaa ja samalla siitä tulee vankka, suuriakin kuormia kestävä iskurakenne.



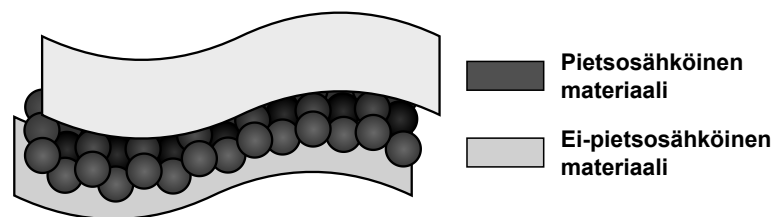
Kuva 3.5: Pietsosähköinen pinorakenne [24].

Energiankeruuympäristönä liikenne, jossa raskaat ajoneuvot liikkuvat suurilla nopeuksilla, on tyypillinen sovelluskohde kovia voimia kestäville iskurakenteille. Khalili et al. [53] ovat tutkineet autoteille soveltuvaa energiankeruujärjestelmää. Järjestelmä muodostuu neljästä rinnankytketystä PZT-pinorakenteesta, jotka on asennettu metallikoteloon niin, että autotielle integroituna liikenteen tuottama rasitus kohdistuu pietsosähköisiin pinoihin. Laboratoriotesteissä yksittäinen pinorakenne tuotti 1,1 kN voiman alla tehollisarvon 95 V ja 11 kN alla puolestaan 1190 V. Tutkijat arvioivat, että kyseisistä pinorakenteista valmistettu PEH-laite voisi tuottaa käytännössä tehollisarvon 4,2 W, joka olisi riittävä esimerkiksi mikroprosessorien virrantarpeisiin.

3.4.4 Joustavat rakenteet

Joustavat (engl. flexible) rakenteet keräävät energiaa puristumisen ja venymisen lisäksi erilaisista taipumisliikkeistä, joita esiintyy mm. puettavan teknologian (engl. wearable technology) sovelluksissa. Joustavat pietsosähköiset rakenteet toteutetaan joko yhdistämällä alhaisen vetolujuuden materiaalit joustavaan substraattiin tai käyttämällä rakenteena suoraan luontaisesti taipuisia pietsosähköisiä materiaaleja [128].

Joustavia rakenteita esiintyy pietsosähköisissä nanorakenteisissa energiankerääjissä, joita kutsutaan myös nanogeneraattoreiksi (engl. nanogenerator). Näissä rakenteissa joustavat energiankeru ominaisuudet voidaan saavuttaa esimerkiksi nanopartikkeleista muodostetun ”kalvon” avulla [15] (kuva 3.6). Rakenne tuottaa taipuessaan sähköenergiaa nanopartikkeleissa syntyvän pietsosähköisen ilmiön kautta.



Kuva 3.6: Nanopartikkeleista muodostettu joustava kalvomainen nanogeneraattori (mittakaava alle 100 nm), muokattu [133] esityksestä.

Mittakaavan kutistuessa nanotasolle myös tuotetun sähköenergian määrä pienee huomattavasti. Mikroskooppisesta kokoluokastaan huolimatta, nanogeneraattoreissa tehonlisäystä voidaan hakea nanokomposiiteista ja monipuolisten nanora-

kenteiden yhteistoiminnasta (ks. myös esimerkki nanokomposiitista luvussa 2.2.4). Nanorakenteiden yhteistoiminnan tehostamista valmistusmenetelmien avulla tutkivat Zhang et al. [132]. Kehittämänsä valmistusmenetelmän avulla he muodostivat BaTiO₃-nanopartikkeleista ja P(VDFTrFE)-kopolymeeristä PEH-rakenteen. Rakenteessa nanopartikkelit asettuvat kolmiulotteisen pohjarungon onkaloihin, mikä parantaa merkittävästi mekaanisen rasituksen siirtymistä pietsosähköisten materiaalien välillä ja sitä kautta koko järjestelmän energiankeru ominaisuuksia. PEH-rakenteen energiatiheys oli parhaimmillaan 12 mW/cm³, mikä oli huomattavasti aikaisemmin raportoituja rakenteita suurempi. Zhang et al. testasivat PEH-rakennetta ihmiskehon nivelissä — ranteissa, kyynärpäissä ja polvissa — biomekaanisen rasituksen aikana. Heidän mukaansa kyseinen energiankerääjä osoittautui varteenotettavaksi ratkaisuksi omavoimaisissa puettavan teknologian sovelluksissa.

3.5 Muut energiankeruumenetelmät ja hybridijärjestelmät

Pietsosähköistä energiankeruuta voidaan käyttää myös osana energiankeruumenetelmien yhdistelmiä eli ns. hybridijärjestelmiä. Hybridit mahdollistavat energian keräämisen useista eri lähteistä samassa sovelluksessa sekä energianmuuntomekanismien yleisen tehostamisen [67]. Koska kineettiseen energiaan liittyvää muuntomekanismia voidaan tehostaa hybridijärjestelmien avulla, astuvat muut värähtelyenergiaan liittyvät menetelmät pietsosähköisen ilmiön tueksi tai rinnalle. Hybridijärjestelmien toimintamekanismien hahmottamiseksi seuraavassa on avattu lyhyesti näiden menetelmien yleiset toimintaperiaatteet:

Sähkömagneettinen menetelmä noudattaa Faradayn induktiolakia: energiankerääjä muodostuu kelasta, jonka sisällä oleva magneetti alkaa liikkua värähtelyn vaikutuksesta ja indusoi siten sähkövirran kelassa [131] [121] [28]. Niell Elvinin ja Alper Erturkin [28] mukaan sähkömagneettisen energiankerääjän tuottama sähkötehon määrä riippuu magneettikentän voimakkuudesta, käämien lukumäärästä sekä käämin ja magneettivuon välisestä suhteellisesta nopeudesta. He esittävät myös, että sähkömagneettiselle menetelmälle ovat tyypillisiä matalat jännitteet ja korkeat sähkövirrat.

Tribosähköisessä ilmiössä staattinen sähkövaraus syntyy kahden materiaalin hangatessa toisiaan vasten. Ilmiö tunnetaan paremmin hankaussähköinä. Wu et al. [125] esittävät, että tribosähköisissä nanogeneraattoreissa hyödyn-

netään hankaussähkön lisäksi sähköstaattista induktiota: toisiaan vasten hangeanneet materiaalit saavat sähköisen varauksen ja näiden varautuneiden materiaalien liike muodostaa sähkövirran. Heidän mukaansa tribosähköisten nanogeneraattoreiden hyviä puolia ovat materiaalien joustavuus, valmistusmenetelmien helppous ja edullisuus.

Sähköstaattinen energiankeruumenetelmä perustuu varautuneille kondensaattoreille. Tärinän liike aiheuttaa muutoksia kondensaattorien kapasitanssissa ja muodostaa siten sähköenergiaa [134]. Sähköstaattinen menetelmä edellyttää kondensaattoreilta tiettyä varaustasoa, joten järjestelmä tarvitsee yleensä jännitettä ulkoisesta virtalähteestä, kuten paristosta [98] [28].

Pietsosähköisen ja sähkömagneettisen menetelmän toimintamekanismit eroavat toisistaan merkittävästi, mutta samalla niiden lähes päinvastaisilla sähköisillä ominaisuuksilla on mahdollisuus kompensoida kummankin menetelmän heikkouksia. Liun et al. [67] mukaan pietsosähkö-sähkömagneettisia hybridejä on tutkittu erityisesti energiankerääjän rakenteellisesta näkökulmasta eli siitä, miten magneetit saadaan liitettyä luontevasti osaksi pietsosähköistä rakennetta. Kyseisten menetelmien energianmuuntomekanismit eivät kuitenkaan ole suoranaisesti synergisiä, joten yhteisvaikutuksen maksimointi on tällaisissa hybrideissä haastavaa [67].

Tästä näkökulmasta Liu et al. [67] näkevät tribosähköisen ja pietsosähköisen menetelmän olevan lähempänä toisiaan: molemmissa sähkömekaaninen muunnos tapahtuu suoraan ulkoisen voiman vaikutuksesta. Tribosähköisessä ilmiössä tämä sähköinen potentiaali muodostuu materiaalien pinnoilla ja pietsosähköisessä ilmiössä puolestaan materiaalin sisäisessä kiderakenteessa. Näin ollen hybridijärjestelmässä menetelmät voidaan yhdistää sähkömekaanisen energianmuunnoksen tehostamiseksi [67].

Sähköstaattisen menetelmän yhteydessä pietsosähköinen ilmiö voi toimia tukipilarina, joka vapauttaa energiankeruujärjestelmän ulkoisen jännitelähteen tarpeesta. Esimerkiksi sähköstaattisissa DEG-järjestelmissä (engl. Dielectric Elastomer Generators) alkulataus voidaan saada aikaan pietsosähköisen materiaalin kohtaaman rasituksen kautta [79]. Tällaisessa hybridissä sähköstaattisen materiaalin rooli on puolestaan kasvattaa syntyneiden varauksien sähköpotentiaalia [79].

Menetelmien yhdistämisellä pyritään siis tehostamaan energiankeruusovelluksen toimintaa. Yhdistettävien menetelmien määrällä ei ole teoriassa rajoituksia, mutta käytännössä lopullisen laitteen fyysinen koko ja menetelmien keskinäinen yh-

teensopivuus asettavat raamit järjestelmälle.

Yhdistämällä edellä kuvattuja liike-energiaan liittyviä menetelmiä on saatu aikaan toimivia ja tehokkaita hybridejä. Esimerkiksi He et al. [41] kehittivät tribosähkö-pietsosähkö-sähkömagneettisen hybridin, joka tuotti huomattavasti enemmän tehoa kuin mikään näistä menetelmistä yksinään. Kolmea menetelmää hyödyntävän hybridin keskiössä on magneetti, joka heiluu ulkoisten värähtelyjen seurauksena tuottaen energiaa sähkömagneettisen induktion kautta. Heiluessaan magneetti osuu pietsosähköisiin ja tribosähköisiin levyihin, jotka on asennettu rakenteen ylä- ja alapätyihin. Näin värähtelevän magneetin avulla synnytetään sähkötehoa myös pietsosähköisen ja tribosähköisen ilmiön kautta. Hybridijärjestelmä nähtiin lupaavana IoT:n virrantarpeiden kannalta, sillä sitä käytettiin onnistuneesti langatonta ZigBee-protokollaa hyödyntävän sensorinoodin virtalähteenä.

4 Systemaattinen kirjallisuuskartoitus

Tässä luvussa käydään läpi systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tavoitteita sekä perustellaan, miksi kyseinen tutkimusmenetelmä ja sen tarkempi menetelmäohjeistus valittiin tutkimuksen ohjenuoraksi. Petersenin, Vakkalankan ja Kuzniarzin [87] esittämät systemaattisen kirjallisuuskartoituksen vaiheet luokitellaan neljään keskeiseen jaksoon, joita käsitellään yksityiskohtaisesti. Luvun tarkoituksena on kuvata yleisellä tasolla tutkimusmenetelmään liittyviä vaihtoehtoja ja toimenpiteitä. Näistä toimenpiteistä tutkimuksen toteutusvaiheeseen päätyneet on kuvattu tarkemmin luvussa 5.

4.1 Tutkimusmenetelmän käytännöt ja ohjeistukset

Systemaattinen kirjallisuuskartoitus (engl. systematic mapping study) on tutkimusmenetelmä, jonka tarkoituksena on havainnollistaa, kategorisoida ja antaa laajempi yleiskuva valitusta tutkimusalueesta [86]. Tutkimusaluetta edustavat usein primääritutkimukset, mikä tekee systemaattisesta kirjallisuuskartoituksesta sekundääritutkimusta. Yleiskuvan avulla tutkimusalueesta tiivistyy esiin esimerkiksi trendejä tai tutkimusaukkoja [87]. Lisäksi menetelmän tavoitteena voi olla yhteenvedo aikaisemmista tutkimustuloksista tai kattavamman systemaattisen kirjallisuuskatsauksen (engl. systematic literature review) tarpeellisuuden selvittäminen [9, s. 6]. Systemaattisessa kirjallisuuskartoituksessa noudatetaan näyttöön perustuvan ohjelmistotekniikan (engl. evidence-based software engineering) tutkimuksen periaatteita, joiden mukaan kartoitusprosessi toteutetaan tarkasti ennalta määritettyä protokollaa noudattaen [86]. Petersenin et al. [86] esittämän ohjeistuksen mukaan menetelmässä määritellään ensin tarkkaan tutkimuskysymykset, joihin perustuen kartoitukseen sopivat hakulauseet, termit ja toimintasuunnitelma muodostetaan. Hakulauseita ja toimintasuunnitelmaa noudatetaan systemaattisesti olemassa olevan tutkimuskirjallisuuden hakemiseen, läpikäymiseen ja luokitteluun. Ohjeistuksen mukaan aineiston luokittelusta saadut tulokset esitetään usein visuaalisina yhteenve-toina eli systemaattisina karttoina.

Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen toteuttamiseen on olemassa useita käy-

täntöjä ja ohjeistuksia. Petersen et al. [87] kartoittivat, miten tutkimusmenetelmää on sovellettu tietotekniikan alalla (2004–2012). Tutkimukseen valikoituneen aineiston 52 kirjallisuuskartoituksesta löytyi 10 erilaista ohjeistusta, joita kartoituksissa oli noudatettu. Ylivoimaisesti suosituimmat näistä olivat Barbara Kitchenhamin [56] vuonna 2004 julkaisema kirjallisuuskatsauksen malli ja sen päivitys yhdessä Stuart M. Chartersin [58] kanssa sekä Petersenin et al. [86] vuonna 2008 esittämä kirjallisuuskatsauksia koskeva ohjeistus. Muita käytettyjä ohjeistuksia olivat esimerkiksi Petticrew'n ja Robertsin [88] systemaattisten katsausten käytännöllinen opas sosiolitieteitä varten, Budgenin et al. [16] tietotekniikan alan kartoituksia käsittelevä artikkeli sekä Arkseyn ja O'Malley'n [9] yhtenäistä kirjallisuuskartoituksen metodia ja viitekehystä rakentava artikkeli. Joissakin kartoituksissa yhdisteltiin erilaisia ohjeistuksia, mikäli yksittäisen käytännön seuraaminen ei sopinut tutkimusasetelmaan riittävän hyvin [87].

Edellä mainitut ohjeistukset eroavat toisistaan erityisesti siinä, että osa niistä — kuten [56], [58] ja [88] — painottuvat enemmän systemaattisen kirjallisuuskatsauksen käytäntöihin. Systemaattinen kirjallisuuskatsaus on tieteellistä tietoa kokoava tutkimusmenetelmä, joka Kitchenhamin ja Chartersin [58] mukaan eroaa kirjallisuuskartoituksesta tarkemmilla tutkimuskysymyksillä ja hakulauseilla sekä tiiviimmin kohdennetulla tutkimusaineistolla. Lisäksi he näkevät analyysimenetelmissä eroja, sillä kartoituksessa on kyse laajemman yhteenvedon tekemisestä. Petersen et al. [87] korostavat eroja menetelmien tavoitteissa, jotka heijastuvat lopulta koko tutkimusprosessiin: systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tavoitteena on laajan yleiskuvan luominen tutkimusalueesta, kun kirjallisuuskatsaus pyrkii puolestaan arvioimaan, syntetisoimaan ja kokoamaan yhteen tutkimuksista löytyvää todistusaineistoa. Käytännössä menetelmien väliset erot eivät ole kuitenkaan yhtä selkeitä kuin teoriassa, sillä molemmissa hyödynnetään usein laajoja tutkimuskysymyksiä ja hakulauseita [81].

Käsillä olevassa tutkielmassa sovelletaan kirjallisuuskartoitusta siten, kuin se on esitetty Petersenin et al. [86] vuoden 2008 ohjeistuksessa ja sen päivityksessä vuodelta 2015, jonka ovat kirjoittaneet Petersen, Vakkalanka ja Kuzniarz [87]. Systemaattinen kirjallisuuskartoitus on valittu tutkielman menetelmäksi, koska se vastaa tavoitteeseen luokitella ympäristöystävällisiä pietsosähköisiä materiaaleja ja niiden erityispiirteitä IoT:n energiankeruun kontekstissa. Aiheeseen liittyvän tutkimuskirjallisuuden määrä on kasvanut merkittävästi viimeisen 10 vuoden aikana ja tutkimusallalla voidaan tunnistaa tarve kokoavalle yhteenvedolle sekä tutkimusten suunnan

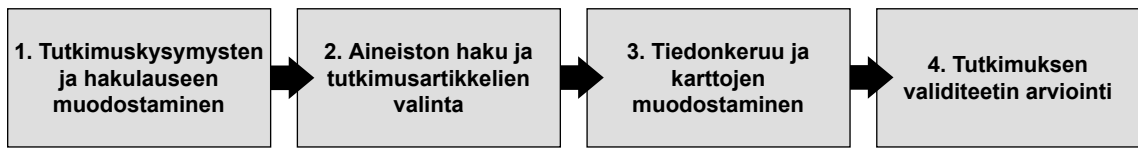
havainnoinnille, erityisesti ympäristöystävällisyyden näkökulmasta. Tutkimusprosessi pohjataan edellä mainittuun menetelmäohjeistukseen, sillä se on yksi suosituimmista ja käytetyimmistä ohjeistuksista [87]. Lisäksi valittu ohjeistus kuvaa systemaattisen kirjallisuuskartoituksen prosessin riittävällä tarkkuudella, jotta sitä voidaan noudattaa säännönmukaisesti — parantaen tutkimuksen todennettavuutta ja toistettavuutta. Petersenin et al. [87] mukaan alkuperäisen menetelmäohjeistuksen päivitys on laadittu osin sen vuoksi, että systemaattisten kirjallisuuskartoitusten prosessit olisivat keskenään mahdollisimman yhdenmukaisia. Tätä menetelmäohjeistusta noudattamalla tutkielmasta pyritään siis saamaan vertailukelpoinen muiden systemaattisten kirjallisuuskartoitusten kanssa.

4.2 Valitun ohjeistuksen vaiheet

Valittu menetelmäohjeistus [87] esittää systemaattisen kirjallisuuskartoituksen kuusi-vaiheisena prosessina. Nämä kuusi vaihetta voidaan tiivistää edelleen neljään selkeään jaksoon (**kuva 4.1**), jotka erottuvat toisistaan sen perusteella, miten niissä käsitellään tutkimusaineistoa. Ensimmäinen jakso toteutetaan ennen tutkimusaineiston muodostamista. Siinä määritellään tutkimusongelman ja kartoituksen laajuus sekä muodostetaan hakulauseet ja valitaan tutkimusaiheen kannalta relevantit tietokannat. Toisessa jaksossa toteutetaan itse tutkimusaineiston keruu soveltamalla hakulauseita valittuihin tietokantoihin. Tämän haun tuloksena saadaan suuri joukko aiheeseen liittyviä tutkimuksia, joista karsitaan pois ne, jotka eivät ole merkityksellisiä tutkimusongelman ratkaisemiseksi. Kolmannessa jaksossa mukaan valikoituneesta tutkimusaineistosta muodostetaan avainsanoja, joita luokittelemalla ja analysoimalla voidaan vastata tutkimusongelmaan. Tästä tiedonkeruusta ja luokittelusta saadut tulokset esitetään visuaalisesti systemaattisina karttoina. Lopuksi neljännessä jaksossa arvioidaan koko tutkimusprosessin luotettavuutta ja pätevyyttä. Seuraavissa alaluvuissa avataan edellä kuvattujen jaksoiden sisältö ja koko systemaattisen kirjallisuuskartoituksen prosessi vielä tarkemmin valitun ohjeistuksen [86] [87] pohjalta.

4.2.1 Tutkimuskysymysten ja hakulauseen muodostaminen

Tutkimuskysymysten muodostamista ohjaavat tutkimusmenetelmän keskeiset tavoitteet. Näiden tavoitteiden osalta Petersen et al. [87] viittaavat Arksey'n ja O'Malley'n [9] tunnistamiin kirjallisuuskartoitusten tutkimustavoitteisiin, joiden perusteella menetelmässä pyritään selvittämään, mitä tietoa valitusta tutkimusaiheesta on saata-



Kuva 4.1: Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen prosessi, muokattu [86] esityksestä.

villa, missä määrin ja millä menetelmillä aiheesta on tehty tutkimusta, onko laajemmalle systemaattiselle kirjallisuuskatsaukselle tarvetta sekä löytyykö olemassa olevasta tutkimuskirjallisuudesta aukkoja tai puutteita, joihin olisi hyvä kiinnittää huomiota tulevaisuudessa. Näihin tutkimustavoitteisiin pyritään vastaamaan tutkimuskysymyksillä, jotka käsittävät aihealueen mahdollisimman laajasti. Esimerkiksi Petersenin et al. [87] kirjallisuuskartoituksen tutkimusongelma on asetettu muotoon: miten systemaattiset kirjallisuuskartoitusprosessit on toteutettu tietotekniikan alalla? Tällaiset korkean tason tutkimusongelmat tulee yleensä purkaa vielä tarkempiin tutkimuskysymyksiin, joihin voidaan vastata aineiston avulla tiedonkeruuvaiheessa [87].

Kirjallisuuskartoitukseen valitun aineiston määrä ei korvaa laatua. Petersenin et al. [87] mukaan suurempi määrä tutkimusartikkeleita ei tuo itsessään lisäarvoa, vaan tärkeämpää on, että tutkimusaihe on edustettu riittävän kattavasti. Koska tutkimusalueen edustavuutta saattaa olla vaikea tietää tai päätellä tutkimuksen alkuvaiheessa, Petersen et al. [87] suosittelevat pohtimaan tutkimusartikkelien hakuprotokollan määrittelyn yhteydessä seuraavia kysymyksiä: Ovatko aihealueen etukäteen tunnistetut osa-alueet edustettuna löytyvässä joukossa? Ovatko tärkeimmät julkaisufoorumit edustettuna? Onko tutkimusten julkaisumäärissä suuria muutoksia ja jos on, niin mistä nämä muutokset voisivat johtua?

Hakulauseiden muodostamiseksi ohjeistuksessa ehdotetaan PICO(C)-menetelmää (population, intervention, comparison, outcome, context) [87]. Tietotekniikan tutkimukseen PICO(C)-menetelmä juontaa juurensa Kitchenhamin ja Chartersin [58] systemaattisten kirjallisuuskatsausten ohjeistuksesta, jossa sen käyttöä on avattu tarkemmin. Kitchenhamin ja Chartersin [58] mukaan PICO(C)-menetelmän tausta on lääketieteessä, missä sitä on käytetty hoidon tehokkuuden arvioimiseksi. Tämän taustan ymmärtäminen auttaa PICO(C):n osa-alueiden hahmottamisessa ja menetelmän soveltamisessa eri alojen hakulauseisiin.

Kitchenhamin ja Chartersin mukaan [58] *populaatio* on joukko, johon tutkimus

kohdistuu. Se käsittää esimerkiksi henkilöt, joihin tietty lääketieteellinen hoitomuoto vaikuttaa tai tietotekniikan sovellusalueen, jota halutaan tutkia. *Interventiolla* tarkoitetaan menettelytapaa, joka vaikuttaa kyseiseen populaatioon. Se voi olla hoitotoimenpide tai sovellusalueen käyttämä teknologia. *Vertailu* viittaa interventioiden väliseen keskinäiseen vertailuun ja *Lopputulokset* puolestaan edustaa intervention aikaansaamaa vaikutusta populaatioon, kuten rokotteen tehoa tai ohjelmointiparadigman käyttökelpoisuutta. Viimeisenä laajempaan käsitteenä *konteksti* kuvaa sitä taustaa, jossa interventio toteutetaan. Tämä voi olla esimerkiksi koeympäristö, jossa aikaansaatu tulosten yleistettävyyttä todelliseen maailmaan tulee arvioida.

Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa korostetaan erityisesti populaation ja intervention huomioimista hakulausetta määritettäessä, sillä PICO(C)-menetelmän muut osa-alueet saattavat rajata hakutuloksia liikaa. Hakulauseen rajaukset vaikuttavat suoraan hakutulosten osumatarkkuuteen ja tutkimusasetelmaan sopimattomien artikkelien eli kohinan (engl. noise) määrään aineistossa. Hakulauseen muodostaminen on siis tasapainoilua osumatarkkuuden ja hakutuloksen kattavuuden välillä.

Tietokantojen osalta Petersen et al. [87] suosittelevat IEEE:n ja ACM:n tietokantoja sekä kahta erillistä viitetietokantaa. Suositus perustuu Kitchenhamin ja Breretonin [57] katsaukseen, jonka mukaan viitetietokantoja hyödyntämällä voidaan säästää aikaa, niiden kattaessa joidenkin yksittäisen julkaisujen tietokannat. Keskeistä tietokantojen valinnassa on, että ne ovat tutkimusasetelman ja aiheen näkökulmasta relevantteja.

Sopivan hakulauseen valinta ja edustavan tutkimusaineiston löytäminen on lopulta iteratiivinen prosessi. Petersenin et al. [87] mukaan hakutuloksia on tärkeää arvioida suhteessa siihen, mitä populaatiosta tiedetään ennen hakua. Arvioinnissa voidaan hyödyntää etukäteen tunnetuista tutkimusartikkeleista koostuvaa testijoukkoa, jonka pitäisi tulla esiin hakutuloksissa. Muita arviointimenetelmiä ovat esimerkiksi haun täydentäminen vaihtoehtoisella hakumenetelmällä, kuten manuaalisella haulla tai lumipallotekniikalla (engl. snowball sampling). Hakulauseen voidaan katsoa olevan valmis, kun vaihtoehtoisen menetelmän avulla ei löydetä enää lisää uusia artikkeleita aineistoon.

4.2.2 Aineiston haku ja artikkelien valinta

Tutkimusprosessin seuraavassa vaiheessa sovelletaan ennalta määriteltyjä hyväksymis- ja hylkäämiskriteerejä erottamaan hakutuloksista tutkimukseen sopivat artikkelit. Petersen et al. [87] listaavat 5 mahdollista näkökulmaa, jotka voidaan ottaa

huomioon valintakriteerejä määritettäessä: 1) artikkelin aiheen asiaankuuluvuus, 2) artikkelin julkaisukanava, 3) artikkelin julkaisuaika, 4) julkaisun arviointiin liittyvät vaatimukset ja 5) julkaisukieleen liittyvät rajoitukset. Kirjoittajat suosittelevat välttämään julkaisujen arviointiin liittyvien vaatimusten käyttämistä hyväksymis- ja hylkäämiskriteereissä, jotta myös viime aikaiset ja tuoreimmat trendit tulevat esille tutkimuksessa.

Hyväksymis- ja hylkäämiskriteerien soveltamisen luotettavuutta voidaan parantaa muutamilla eri tavoilla. Petersen et al. [87] tunnistivat kolme erilaista strategiaa, joita on noudatettu systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa. Nämä menetelmät on kuvattu tarkemmin Alin ja Petersenin [5] artikkelissa. Ensimmäinen lähestymistapa on muodostaa valintakriteerit objektiivisesti ja arvioida objektiivisuutta valintaa tekevien tutkijoiden mielipiteitä vertailemalla. Toinen strategia on muodostaa päätössäännöt, jotka ohjaavat artikkelien valintaprosessia ja määrittävät sen hyväksytäänkö artikkeli mukaan tutkimukseen. On myös mahdollista, että jonkun artikkelin suhteen tarvitaan lisäselvitystä ja tämä kohta voidaan ottaa huomioon päätössäännöissä. Kolmas menetelmä on määrittää säännöt, jotka auttavat tutkijoita ratkaisemaan epäselvyydet ja erimielisyydet. Esimerkiksi ulkopuolisten arvioijien mielipiteiden kysyminen tai äänestäminen voivat olla hyviä keinoja näiden haasteiden ratkaisemiseksi.

Petersen et al. [87] suosittelevat virallisessa ohjeistuksessaan edellisten menetelmien yhdistelmää, jossa ensin määritetään valintakriteerit ja sitten sovelletaan niitä käytännössä. Artikkeleita käydään siis läpi systemaattisesti noudattaen valintakriteerejä, minkä jälkeen valitsijat keskustelevat kriteereistä ääneen ja päivittävät niitä iteratiivisesti. Huomionarvoista on, että tämä ohjeistuksessa suositeltu menetelmä edellyttää kahden valitsijan välistä yhteistyötä.

4.2.3 Tiedonkeruu ja karttojen muodostaminen

Tutkimusaineiston kokoamisen jälkeen valittuja tutkimusartikkeleita pyritään luokittelemaan ja analysoimaan tutkimusongelman ratkaisemiseksi. Tiedonkeruu toteutetaan käytännössä niin, että aineistoa käydään systemaattisesti läpi ja esiin nouseva relevantti informaatio tallennetaan taulukkoon. Petersen et al. [86] käyttivät Excel-taulukkoa, jossa tietoalkiot muodostettiin luokittelumallien pohjalta. Luokittelumalli voi olla joko yleisesti sovellettavissa eri kirjallisuuskartoitusten välillä — eli aiheesta riippumaton — tai tietyn kirjallisuuskartoituksen tarpeisiin aihekohtaisesti räätälöity [87].

Aiheesta riippumattoman luokittelumallin avulla pyritään yhtenäistämään systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa käytettyjä kategorisointeja. Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa suositellaan käyttämään tällaista yleistä luokittelumallia julkaisutyypin, tutkimustyyppin ja tutkimusmenetelmän osalta. Julkaisutyypin yleiseksi luokittelumalliksi he ehdottavat Suomen opetusministeriön julkaisutyypiluokittelua [84], sillä se on juonnettu todellisesta julkaisutoiminnasta. Tutkimustyyppin luokittelun osalta kartoituksissa on usein käytetty Wieringan et al. [124] esittämää mallia, johon perustuen Petersen et al. [87] esittävät yksinkertaisen päätöstaulun. Tutkimusmenetelmien luokittelun kannalta Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa listataan yleisesti käytetyt menetelmät ohjelmistotuotannon alalla ja painotetaan, että tutkimusmenetelmien tulee olla luokittelussa johdonmukaiset tutkimustyyppin kanssa.

Aihekohtaisessa luokittelussa malli muodostetaan kunkin systemaattisen kirjallisuuskartoituksen aineiston perusteella. Näin jokaiselle kirjallisuuskartoitukselle muodostuu siis oma uniikki luokittelumallinsa. Petersenin et al. [86] alkuperäisessä ohjeistuksessa esitettiin tällaisen aihekohtaisen luokittelun muodostamista avainsanoittamisen avulla. Avainsanoitusvaiheessa kategoriat muodostetaan tunnistamalla keskeisiä konsepteja tutkimusartikkelien abstrakteista. Ohjeistuksen päivityksessä [87] selvennetään, että käytännössä tekstejä siis luetaan ja esiin nouseville konsepteille määritetään avainsanat, jotka edustavat kukin yhtä kategoriaa. Vaiheen edessä avainsanat voivat muuttua ja kategoriat yhdistyä toisiinsa. Kun kategoriat on muodostettu, artikkelit luokitellaan niiden perusteella. Avainsanoja voidaan etsiä tutkimusartikkelien abstrakteista tai muista osista, mikäli tarve vaatii. Ennen aihekohtaisen luokittelun aloittamista Petersen et al. [87] suosittelevat tarkistamaan alan asiantuntijoilta jo olemassa olevien luokittelumallien saatavuutta.

Tiedonkeruun jälkeen kuhunkin luokkaan kuuluvien tutkimusartikkelien määrät lasketaan ja näistä esiintymiskerroista muodostetaan systemaattisia karttoja, jotka vastaavat tutkimuskysymyksiin visuaalisesti. Tietotekniikan systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa yleisimmin käytettyjä kaaviotyyppejä ovat kupla-, pylväs- ja ympyrädiagrammit [87]. Menetelmäohjeistuksessa [86] tutkijoita suositellaan pohtimaan vaihtoehtoisia tapoja visualisoida tuloksiaan: esimerkiksi kupladiagrammeissa useita kategorioita voidaan esittää samanaikaisesti, mikä korostaa tutkimusten suhteellista, keskinäistä painotusta.

4.2.4 Tutkimuksen validiteetin arviointi

Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tieteellistä pätevyyttä uhkaavat tutkimuksen toistettavuuteen ja luotettavuuteen vaikuttavat tekijät. Näiden uhkatekijöiden osalta Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa esitetään seuraavat kategoriat validiteetin arvioimiselle: **1) kuvaileva validiteetti** (engl. descriptive validity), **2) teoreettinen validiteetti** (engl. theoretical validity), **3) yleistettävyys** (engl. generalizability) ja **4) tulkinnallinen validiteetti** (engl. interpretive validity). Kyseiset kategoriat perustuvat Joseph Maxwellin [74] määrittelemille validiteetin tyypeille.

Kuvaileva validiteetti liittyy siihen, kuinka tarkasti ja objektiivisesti havainnot on tutkimuksessa kuvattu [87]. Maxwellin [74] mukaan kyseessä on ensisijainen validiteetti, johon muut kategoriat perustuvat, sillä virheet havaintojen tarkkuudessa heijastuvat myös myöhempien vaiheiden pätevyyteen. Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa kehoitetaan käyttämään ennalta suunniteltua tiedonkeruulomaketta, joka ohjaa prosessia objektiivisempaan suuntaan ja lisää sen luotettavuutta kuvailevan validiteetin osalta.

Teoreettinen validiteetti viittaa tutkimuksen käsitteiden ja tutkittavan ilmiön yhteensopivuuteen [74]. Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa teoreettinen validiteetti muodostuu sen perusteella, miten hyvin tutkijat onnistuvat saavuttamaan tutkimustavoitteensa. Teoreettista validiteettia uhkaavina tekijöinä he näkevät erityisesti tutkimusharhat (engl. bias). Systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa nämä tutkimusharhat voivat esiintyä esimerkiksi aineiston valinnan tai tiedonkeruun yhteydessä. Aineiston valinnan osalta teoreettista validiteettia voidaan vahvistaa tuemalla valittua hakumenetelmää lumipallotekniikan avulla. Tiedonkeruun osalta Petersenin et al. ohjeistus suosittelee kaksivaiheista prosessia, jossa ensin yksi tutkija suorittaa tiedonkeruun ja tämän jälkeen toinen tutkija tarkistaa kyseisen prosessin tulokset.

Yleistettävyydellä tarkoitetaan sitä, kuinka laajasti tutkimuksen tuloksia voidaan soveltaa tutkimusasetelman ulkopuolelle, toisiin populaatioihin ja ympäristöihin [74]. Joseph Maxwell [74] jakaa yleistettävyyden kahteen kategoriaan: sisäiseen ja ulkoiseen. Sisäinen yleistettävyys tarkoittaa sitä, kuinka hyvin tutkimustulokset soveltuvat selittämään tutkitun populaation niitä osia, jotka rajautuivat tutkimusasetelman ulkopuolelle. Ulkoisessa yleistettävyydessä tarkastellaan puolestaan sitä, miten yleistettäviä tulokset ovat täysin ulkopuolisten populaatioiden kannalta.

Maxwellin [74] luokittelussa **tulkinnallinen validiteetti** koskee erityisesti laadullista tutkimusta, jossa pyritään huomioimaan tutkittavien henkilöiden näkökul-

ma tutkimusasetelmaan. Systemaattisten kirjallisuuskartoitusten osalta Petersen et al. [87] ulottavat tulkinnallisen validiteetin tutkijaan ja hänen johtopäätöksiinsä asti. Heidän mukaansa tulkinnallinen validiteetti saavutetaan, kun johtopäätökset ovat yhtenäisiä tutkimuksen datan kanssa. Tätä yhtenäisyyttä uhkaavat tutkimusharhat, kuten tutkijan vinouma.

Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa pidetään tärkeänä, että systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa arvioidaan tutkimuksen validiteettia ja kartoitusprosessia. Arvioinnin helpottamiseksi he ovat laatineet tarkistuslistan (**taulukko A.1**) ja arviointirubriikit (**taulukot A.2–A.6**). Tarkistuslista sisältää systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa tunnistettuja toimenpiteitä tutkimuksen eri vaiheissa. Tutkija voi verrata omaa tutkimusprosessiaan tarkistuslistaan ja laskea suhdeluvun tehtyjen toimenpiteiden sekä kaikkien tarkistuslistassa esitettyjen toimenpiteiden määrän välillä. Petersenin et al. mukaan korkea suhdeluku saattaa viestiä tutkimuksen laadusta, sillä toimenpiteiden määrällinen lisääminen parantaa kirjallisuuskartoitusten luotettavuutta. On kuitenkin todennäköistä, että toimenpiteiden määrän suhteen tulee piste, jossa luotettavuus ei enää merkittävästi lisäännä. Tarkistuslistasta he ovat juontaneet vielä viisi erilaista arviointirubriikkia, joiden perusteella tutkija voi arvioida oman työnsä eri vaiheita aina kirjallisuuskartoituksen tarpeen perusteluista tutkimuksen validiteetin arviointiin. Ohjeistuksessa todetaan, että tarkistuslistaa ja arviointirubriikkeja voidaan hyödyntää myös tieteellisen raportoinnin tukena varmistamaan, että kaikki tutkimuksen vaiheet tulevat mainituiksi lopullisessa tutkimusartikkelissa.

5 Tutkimuksen toteutus

Tässä luvussa havainnollistetaan, kuinka systemaattista kirjallisuuskartoitusta sovellettiin käytännön tutkimustyössä ympäristöystävällistä pietsosähköistä energiankeruuta IoT:ssa koskeviin tutkimusjulkaisuihin. Luvussa esitetään tutkimusprosessin kannalta oleelliset elementit, kuten tarkemmat tutkimuskysymykset, hakulause, valitut tietokannat, hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit, tiedonkeruukaavio ja tutkimuksen validiteetin arviointi. Ennen varsinaisen tutkimusprosessin aloittamista suoritettiin katsaus aikaisempiin aiheeseen liittyviin tai sitä lähellä oleviin kirjallisuuskartoituksiin ja -katsauksiin. Tämä katsaus on kuvattu tarkemmin luvussa 1.

5.1 Tutkimuskysymysten ja hakulauseen muodostaminen

Käsillä olevan systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tavoitteena on selvittää ympäristöystävällisten pietsosähköisten materiaalien käyttöpotentiaalia ja ominaisuuksia IoT-laitteiden energiankeruussa sekä kyseisen tutkimusalueen yleisiä suuntauksia. Edellä mainitun tavoitteen saavuttamiseksi aiheeseen liittyvää tutkimuskirjallisuutta lähestytään seuraavien tutkimuskysymysten (TK) kautta:

TK1: milloin ympäristöystävällisiä pietsosähköisiä materiaaleja IoT-sovellusten energiankeruussa käsittelevät tutkimukset on julkaistu?

TK2: minkä tyyppisiä tutkimukset ovat ja mikä on niiden julkaisutyyppi?

TK3: mistä energianlähteistä pietsosähköisillä materiaaleilla on kerätty energiaa?

TK4: millaisia energiankeräysrakenteita pietsosähköisissä materiaaleissa on sovellettu?

TK5: mitä pietsosähköisiä materiaaleja on tutkittu?

TK6: mitkä pietsosähköiset materiaalit on mainittu tutkimuksissa ympäristöystävällisiksi?

TK7: kuinka paljon sähköä pietsosähköisten materiaalien avulla on tuotettu jännitteen, sähkövirran ja sähkötehon osalta?

Tutkimuskysymysten TK1 ja TK2 avulla pyritään saamaan kooste artikkeleihin liittyvistä julkaisutiedoista. Kysymyksiin vastaamalla voidaan hahmottaa tutkimusalan kehittymistä ajassa sekä tutkimusalueen ja julkaisu ympäristön luonnetta. Nämä kysymykset pohjautuvat menetelmäkirjallisuudessa esitettyyn suositukseen käyttää aiheesta riippumattomia luokittelumalleja [87].

Tutkimuskysymysten TK3, TK4, TK5, TK6 ja TK7 kautta selvitetään tarkemmin pietsosähköisten materiaalien ominaisuuksia ja erityispiirteitä. Kysymyksiin TK3, TK4 ja TK5 vastaamalla voidaan hahmottaa pietsosähköisille energiankerääjille tyyppisimpiä energianlähteitä, käytetyimpiä energiankeräysrakenteita sekä suosituimpia pietsosähköisiä materiaaleja. Tutkimuskysymykseen TK6 vastaamalla kartoitetaan materiaaleja, joita pidetään erityisen lupaavina ympäristön näkökulmasta. Nämä korostetusti ympäristöystävällisiksi tunnistetut materiaalit tarjoavat tarkastelukulman, jonka kautta voidaan hahmottaa tutkimuskentän asemoitumista tai kehittymistä ekologisen perspektiivin osalta. Tutkimuskysymyksen TK7 avulla puolestaan hahmotetaan pietsosähköisten materiaalien sähköisiä ominaisuuksia: energiantuotantokykyä ja mahdollisesti sitä, mitkä materiaalit ovat osoittautuneet erityisen lupaaviksi energiankeruussa.

Tutkimuksen alkuvaiheessa sovellettiin PICO(C)-menetelmää hakulauseiden muodostamiseen. PICO(C) on akronyymin englannin kielen sanoista population (populaatio), intervention (interventio), comparison (vertailu), outcome (lopputulokset) ja context (konteksti). Menetelmä on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2.2, mutta kiteytetyksi sen pääperiaatteena on muodostaa hakulauseita purkamalla tutkimusongelma osiin edellä mainittujen termien kautta.

Taulukossa 5.1 on esitetty, kuinka hakulauseet muodostuivat PICO(C)-menetelmää noudattaen tässä tutkimuksessa. Tutkielman tarkoituksena on tutkia pietsosähköisiä materiaaleja IoT:ssa, joten populaation eli tutkimuksen kohteen muodostavat IoT-sovellukset. Näihin IoT-sovelluksiin vaikuttavana interventiona ovat pietsosähköiset materiaalit tai pietsosähköinen ilmiö. Tutkielmassa ei suoriteta vertailua muiden materiaalien kanssa, joten menetelmän vertailuun liittyvä termi jätettiin käyttämättä. Eniten pohdintaa aiheutti lopputulokseen liittyvä termi, sillä tutkimusongelma nähtiin laajana ja yleisluontoisena. Tässä vaiheessa tutkimusta vajaan PICO(C)-mallin avulla luotua hakulausetta alettiin jo kokeilla eri tietokannoissa. PICO(C)-menetelmän soveltamiseen kuitenkin palattiin, kun käsitys lopputuloksesta kirkastui: lopputuloksena ovat pietsosähköisten materiaalien energiankeruun ominaisuudet. Siispä energiankeruu otettiin osaksi hakulausetta, mikä paransi haun osuma-

tarkkuutta ja vähensi kohinan osuutta merkittävästi. PICO(C)-menetelmän viimeisen termin, kontekstin, osalta hakulauseessa huomioitiin tutkimusongelman taustalla vaikuttava ympäristöystävällisyyden käsite. Ympäristöystävällisyys oli tärkeä sisällyttää hakulauseeseen tutkimuksen tavoitteiden näkökulmasta. Sen merkitys hakulauseen toimivuuteen tuli ilmi myös testihakujen kautta.

Taulukko 5.1: Hakulauseen muodostaminen PICO(C)-menetelmän avulla.

PICO(C)	Käsite
Populaatio (Population)	IoT-sovellukset
Interventio (Intervention)	Pietsosähköisyys, pietsosähköiset materiaalit
Vertailu (Comparison)	-
Lopputulos (Outcome)	Energiankeruu
Konteksti (Context)	Ympäristöystävällisyys

PICO(C)-menetelmän avulla koostetuille suomenkielisille käsitteille etsittiin vastaavat englanninkieliset asiasanat ja synonyymit käymällä läpi alan kirjallisuutta sekä erityisesti sellaisia katsausartikkeleita (kuten [7], [65] ja [100]), joiden nähtiin käsittelevän samaa tutkimusaluetta. Lopullisen hakulauseen muodostaminen oli iteraatiivinen prosessi, jota kehitettiin koehakujen tulosten perusteella. Näin pystyttiin kontrolloimaan tutkimuksen laajuutta ja hakujen osumatarkkuutta.

Asiasanojen ja synonyymien muodostamisen lopputulos on nähtävissä **taulukossa 5.2**. IoT-sovellusten osalta englanninkielisiksi asiasanoiksi määrittäytyivät ”*internet of things*” ja sen lyhenne ”*IoT*”. Pietsosähköisten materiaalien osalta huomattiin, että pietsosähköisyyttä käsiteltiin kirjallisuudessa yleisillä termeillä ”*piezoelectric*” ja ”*piezoelectricity*”, joten *materiaalista* ei tarvinnut muodostaa erikseen asiasanaa. Energiankeruun osalta testattiin muutamia vaihtoehtoja, kuten ”*energy harvesting*”, ”*energy scavenging*” ja ”*ambient power*”. Koehakujen aikana kävi ilmi, että ”*energy harvesting*” ja ”*energy harvester*” kattoivat pääosin myös muilla energiankeruuseen liittyvillä termeillä löytyneet tutkimukset.

Ympäristöystävällisyys on melko laveasti määritelty käsite ja siihen liitettyjä asiasanoja löytyi runsaasti alan kirjallisuudesta. Tutkimukseen haluttiin sisällyttää mahdollisimman laajasti sellaista aineistoa, jossa sovellusta, materiaalia tai käytäntöjä kuvattiin ympäristön kannalta sopusointuisiksi. Ympäristönäkökulmaa edustaviksi asiasanoiksi valittiin testihakujen artikkeleita seuraten ”*eco-friendly*”, ”*environmen-*

tally friendly”, *green*” ja *sustainable*”. Vihreyden käsite nousi esiin koehauissa termien *green iot*” ja *green technology*” myötä, joten se otettiin hakulauseen osaksi. Tutkimuksessa huomioitiin, että kyseinen termi saattoi lisätä myös virheosumien määrää sellaisten artikkeleiden osalta, joissa satuttiin käsittelemään kirjaimellisesti väriltään vihreitä asioita. Myös kestävän kehityksen termi *sustainable*” saattoi esiintyä hakutuloksissa hieman eri kontekstissa kuin mitä alun perin tarkoitettiin, sillä energiankeruussa laitteita, jotka keräävät riittävästi energiaa toimiakseen täysin itsenäisesti ilman ulkoisia energiaresursseja kuvataan usein termillä *sustainable*”. Koehaut kuitenkin osoittivat, että joissakin tutkimusartikkeleissa ympäristönäkökulma nousi esiin nimenomaan kyseisen termin kautta, joten se päätettiin sisällyttää osaksi hakulausetta.

Taulukko 5.2: Englanninkielisten asiasanojen ja synonyymien muodostaminen PICO(C)-menetelmän avulla koostetuista käsitteistä.

Käsite	Englanninkieliset asiasanat ja synonyymit
IoT-sovellukset	<i>IoT, internet of things</i>
Pietsosähköisyys	<i>piezoelectric, piezoelectricity</i>
Energiankeruu	<i>energy harvesting, energy harvester</i>
Ympäristöystävällisyys	<i>eco-friendly, environmentally friendly, green, sustainable</i>

Tietokantojen osalta tutkimukseen valittiin alan suurimpien julkaisijoiden tietokannat: ACM Digital Library, IEEE Xplore, ScienceDirect ja SpringerLink. Verkkohakupalvelu Google Scholariin tehdyt koehaut osoittivat, että tutkimusaiheen kannalta suosituimmat tietokannat olivat ScienceDirect ja SpringerLink. Muut tietokannat sisällytettiin hakuun, sillä tutkimuksessa tavoiteltiin mahdollisimman laajaa otantaa ja esimerkiksi IEEE Xploresta löytyi koehauissa relevantteja artikkeleita, joita ei haluttu jättää tutkimusaineiston ulkopuolelle. Edellä mainittujen julkaisijoiden tietokantojen lisäksi valittiin vielä kaksi erillistä viitetietokantaa, Scopus ja Web of Science, noudattaen Petersenin, Vakkalankan ja Kuzniarzin [87] antamaa ohjeistusta.

Taulukossa 5.3 on esitetty tutkimuksessa käytetyn hakulauseen lopullinen muotoilu, jossa noudatetaan Boolean logiikkaa sekä sen operaattoreita OR ja AND. Saman aihepiirin sanat on asetettu sulkumerkkien sisään ja erotettu toisistaan OR-operaattorilla. Näin haku palauttaa tulokset, joihin sisältyy vähintään yksi osuma

sulkeiden sisällä olevista sanoista. Eri aihepiirit on puolestaan yhdistetty samaan hakulauseeseen AND-operaattorin avulla. Löytyneet artikkelit sisältävät siis vähintään yhden sanan jokaiselta sulkeiden sisään kirjoitetulta riviltä kyseisessä taulukossa. Jotkin hakulauseen sanat on laitettu lainausmerkkeihin, jotta haku huomioi sanojen olevan tietyssä muodossa. Käytännössä lainausmerkkien avulla voidaan hakea esimerkiksi välilyönneillä erotettuja sanoja halutussa järjestyksessä. Hakulauseen lopulliseen muotoon päädyttiin iteratiivisesti testihakujen kautta.

Taulukko 5.3: Tutkimuksessa käytetty hakulause.

(piezoelectric OR piezoelectricity)	AND
(sustainable OR "eco-friendly" OR "environmentally friendly" OR green)	AND
(IoT OR "internet of things")	AND
("energy harvesting" OR "energy harvester")	

Kaikki valitut tietokannat käyttivät Boolean logiikkaa ja operaattoreita yhdenmukaisesti. **Taulukossa 5.3** esitettyä hakulauseetta pystyttiin käyttämään sellaisenaan kaikissa muissa tietokannoissa paitsi ScienceDirectissa, jossa Boolean operaattoreiden määrä yhtä hakukenttää kohden on rajoitettu maksimissaan kahdeksaan. Tämän tutkielman hakulauseessa operaattoreita on yhdeksän, joten haku kyseiseen tietokantaan piti suorittaa kahdessa osassa: hakulause katkaistiin viimeisen OR-operaattorin kohdalta niin, että ensimmäisestä hausta jäi pois fraasi "energy harvesting" ja seuraavasta hausta puolestaan "energy harvester". Lopuksi näiden kahden hakulauseen avulla saadut hakutulokset yhdistettiin ja joukosta poistettiin useat saman artikkelin esiintymät eli duplikaatit.

5.2 Aineiston haku ja artikkelien valinta

Tietokantahaut toteutettiin 27.–28.2.2023. Hakutulosten lukumäärät on esitetty **taulukossa 5.4**. Huomionarvoista on, että näissä tuloksissa on mukana kaikki löytyneet artikkelit — myös tietokantojen väliset duplikaatit ja erillisen maksumuurin takana olevat artikkelit. Artikkeleiden kokonaismäärä oli joka tapauksessa suuri ja joukkoon mahtui myös paljon kohinaa. Hakuprotokollaa päätettiin rajata vielä artikkelien tyyppin perusteella, jotta artikkelien lukumäärä ja niiden läpikäyntiin liittyvä työmäärä pysyisivät kohtuullisina. Testihaut osoittivat, että tutkimusongelman

näkökulmasta relevantit artikkelit olivat pääosin tutkimusartikkeleita; esimerkiksi katsausartikkelit tai kirjojen luvut eivät vastanneet tutkimuskysymyksiin. Artikkelin tyyppiä koskeva rajausta lisättiin hyväksymis- ja hylkäämiskriteereihin (ks. **kuva 5.5**), mutta se huomioitiin jo hakujen aikana, sillä useimmissa tietokannoissa artikkelien rajaaminen niiden tyyppin perusteella onnistui helposti. Tämä hakutulosten rajaaminen tietokantojen hakukoneissa vähensi löytyneiden artikkelien määrää merkittävästi, erityisesti ScienceDirectin ja SpringerLinkin osalta, mikä puolestaan vähensi hyväksymis- ja hylkäämiskriteerien manuaalisen soveltamisen työmäärää aineiston valintaan liittyvässä vaiheessa.

Taulukko 5.4: Hakutulosten määrät tietokannoissa ennen rajauksia

Tietokanta	Hakutulokset
ACM Digital Library	54
IEEE Xplore	14
ScienceDirect	1083
SpringerLink	806
Scopus	77
Web of Science	64
Yhteensä:	2098

Hakutulosta arvioitiin varmistamalla, että haku kattoi ennalta määritetyistä relevanteista artikkeleista koostuvan testijoukon, johon kuuluivat artikkelit: [33], [64], [85], [103], [115] ja [135]. Testijoukko koottiin analysoimalla aikaisempien kirjallisuuskatsausten ([67], [100], [94]) lähteitä suhteessa tämän tutkimuksen ongelmanasetteluun. Yleisellä tasolla aikaisempien katsausten lähteiden ja tavoitellun hakutuloksen suurin erottava tekijä oli IoT:n painotus energiankeruun toimintaympäristönä. Testijoukon artikkeleiden valinnassa sovellettiin myös alustavasti potentiaalisia hyväksymis- ja hylkäämiskriteerejä, jotta voitiin varmistaa, että kyseiset artikkelit päätyisivät varmasti myös lopulliseen tutkimusaineistoon. Testijoukko osoitti osaltaan hakustrategian kattavuuden.

Kun hakustrategia oli määritelty, tehtiin päätös hyödyntää viitehallintaohjelmistoja aineiston hallinnassa. Viitehallintaohjelmistot on nähty hyödylliseksi apuvälineeksi kirjallisuuskatsauksissa, sillä niiden avulla viitteiden käsittely on nopeampaa

ja tarkempaa, varsinkin aineistojen ollessa suuria [110]. Tämän kirjallisuuskartoituksen viitehallintaohjelmistoksi valittiin avoimen lähdekoodin ilmainen sovellus JabRef. JabRef soveltuu erityisen hyvin BibTeX-muotoisten lähteiden hallintaan, mikä oli tärkeää, sillä formaatti oli ennestään tuttu ja tutkielma ladottiin käyttäen LaTeXia. JabRef on myös yksi yleisimmin käytetyistä viitehallintaohjelmistoista [110] [31].

Tietokannoista saatujen hakutulosten viitetiedot ja abstraktit ladattiin paikalliselle kovalevylle BibTeX-muodossa kaikista tietokannoista, lukuun ottamatta SpringerLinkiä, josta tiedot olivat saatavilla ainoastaan CSV-tiedostona. Jotta tätä CSV-tiedostoa voitiin käyttää JabRefissa, piti se ensin muuttaa BibTeX-muotoon. Tiedosto muutettiin toisen suosituksen viitehallintaohjelmiston (Zotero) avulla, joka mahdollistaa artikkeleiden liittämisen CSV-tiedostosta DOI-tunnisteiden perusteella. Kun artikkelikirjasto oli tallennettu oikeassa muodossa, varmistettiin sen tietojen eheys vertailulla alkuperäisen CSV-tiedoston tietojen kanssa.

Tutkimusartikkelien valintaprosessi perustui ennalta määritettyihin hyväksymis- ja hylkäämiskriteereihin, jotka on esitetty **taulukossa 5.5**. Näiden valintakriteerien avulla varmistettiin, että aineistoksi valikoitui vain tutkimusongelman kannalta relevantit artikkelit. Koska valintaprosessi suoritettiin yksilötyönä, pyrittiin valintakriteerien muotoiluissa mukailemaan selkeiden päätössääntöjen muotoa. Valintakriteereissä pyrittiin siis välttämään subjektiivisia tai tulkinnanvaraisia kysymyksiä ja keskityttiin niiden sijaan sellaisiin kysymyksiin, joihin löytyisi suora vastaus artikkelin tekstistä tai julkaisutiedoista. Huolellisesta suunnittelusta huolimatta yksilötyönä suoritettu valintaprosessi on edelleen altis monenlaisille virheille, kuten jonkin valintakriteerin tahattomalle sivuuttamiselle tai kirjoitusvirheille sanahakujen yhteydessä.

Hyväksymis- ja hylkäämiskriteerien määrittäminen oli iteratiivinen prosessi. Hyväksymiskriteerit muodostettiin pääasiassa sen perusteella, että ne täyttävät artikkelit pystyisivät vastaamaan tutkimusongelmaan. Hakutulos sisälsi paljon artikkeleita, joissa hakulauseen termit eivät osuneet artikkelien pääasialliseen tekstiin, vaan esimerkiksi viiteluettelossa mainittujen lähteiden otsikoihin. Hyväksymiskriteereissä aineistoa kohdennettiin tällaisten virheosumien osalta edellyttämällä IoT:n ja ympäristöstävällisyyden mainitsemista itse tutkimuksen leipätekstissä (*hyväksymiskriteerit 1 ja 2*). Käytännössä näiden kriteerien toteutuminen varmistettiin sanahakujen avulla.

Hakutuloksessa oli myös lukuisia artikkeleita, joiden tutkimuskohteena oli jo-

Taulukko 5.5: Hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit

Hyväksymiskriteerit	Hylkäämiskriteerit
<p data-bbox="288 575 794 667">Hyväksytään, jos kaikki seuraavat täyttyvät:</p> <ol data-bbox="336 696 794 1738" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="336 696 794 824">1. Tutkimuksen pääasiallisessa tekstissä on maininta esineiden internetistä. <li data-bbox="336 853 794 981">2. Tutkimuksen pääasiallisessa tekstissä on maininta ympäristöystävällisyydestä. <li data-bbox="336 1010 794 1279">3. Tutkimuksen otsikko tai abstrakti sisältää maininnan jostakin pietsosähköisestä materiaalista, pietsosähköisyydestä tai liike-energiaan perustuvasta energiankeruusta. <li data-bbox="336 1308 794 1525">4. Tutkimuksen otsikon tai abstraktin perusteella voidaan päätellä, että tutkimus keskittyy ensisijaisesti energiankeruuseen, ei esimerkiksi anturiteknologiaan. <li data-bbox="336 1554 794 1738">5. Tutkimus on julkaistu alkuperäisartikkelina tieteellisessä aikakauslehdessä tai artikkelina konferenssijulkaisussa. 	<p data-bbox="801 575 1394 622">Hylätään, jos täyttyy jokin seuraavista:</p> <ol data-bbox="895 651 1394 965" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="895 651 1394 786">1. Tutkimuksen koko teksti ei ole saatavilla ilmaiseksi Jyväskylän yliopiston opiskelijatunnuksilla. <li data-bbox="895 815 1394 898">2. Tutkimusta ei ole julkaistu englannin kielellä. <li data-bbox="895 927 1394 965">3. Tutkimus ei ole primääritutkimus.

kin muu energiankeruumenetelmä kuin pietsosähköinen energiankeruu. Nämä tutkimukset päätyivät hakutulokseen, sillä niissä pietsosähköistä menetelmää käytettiin vertailukohtana jollekin toiselle energiankeruumenetelmälle, kuten esimerkiksi tribosähköiselle energiankeruulle. Tältä pohjalta hyväksymiskriteereihin kirjattiin edellytys, että pietsosähköisyys tulee mainita artikkelin otsikossa tai abstraktissa (*hyväksymiskriteeri 3*). Tämä kriteeri varmistaa, että pietsosähköisyys on keskeisessä roolissa aineistoon valituissa tutkimuksissa. Kyseistä kriteeriä laajennettiin vielä koskemaan ylipäättään liike-energiaan perustuvaa energiankeruuta, sillä joissakin artikkeleissa käytettiin tällaista yleisemmän tason muotoilua — ilman varsinaista mainintaa pietsosähköisyydestä — vaikka tutkimus perustui nimenomaan pietsosähköisiin materiaaleihin.

Monet hakutuloksen artikkeleista keskittyivät ensisijaisesti pietsosähköisiin aitureihin. Nämä artikkelit rajattiin kategorisesti pois (*hyväksymiskriteeri 4*), jotta aineisto kohdistuisi paremmin pietsosähköistä energiankeruuta soveltaviin tutkimuksiin. Käytännössä pietsosähköisten energiankeruu- ja anturisovellusten erottaminen toisistaan ei ole täysin yksiselitteistä. Erityisesti omavoimaisia aitureita käsittelevistä tutkimuksista on vaikea päätellä pelkän sananhaun perusteella, keskittyykö tutkimus energiankeruuseen vai anturimekanismiin. Tämä johtuu siitä, että omavoimaiset pietsosähköiset anturit voivat toisaalta käyttää energiankeruuta virtalähteenään, mutta niitä käsittelevien tutkimuksen painopiste voi olla anturimekanismin toiminnassa. Tämän hyväksymiskriteerin osalta jouduttiin siis nojaamaan tutkimuksen otsikon tai abstraktin perusteella tehtävään päätelyyn.

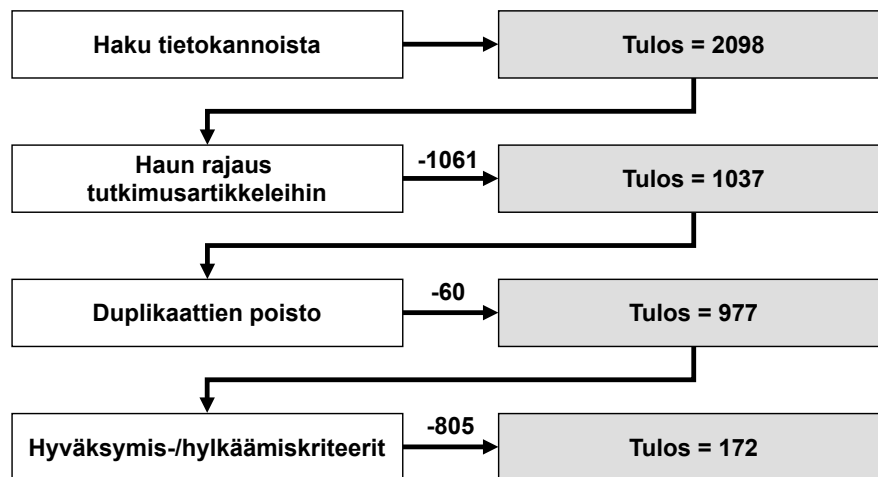
Lopullinen hakutulos palautti suuren määrän (2098 kpl) artikkeleita, jossa oli mukana primääritutkimusten lisäksi mm. katsausartikkeleita ja kirjojen lukuja. Jotta läpikäytävien artikkeleiden lukumäärä saatiin pidettyä kohtuullisena, artikkelien tyyppi rajattiin tutkimusartikkeleihin (*hyväksymiskriteeri 5*). Kuten aiemmin todettiin, tätä hyväksymiskriteeriä sovellettiin jo tietokantahakujen yhteydessä — niissä tietokannoissa missä hakutuloksen rajaaminen artikkelin tyyppin perusteella oli mahdollista — valitsemalla artikkelien tyyppiä ”research article” tai ”article”. Manuaalisessa valintavaiheessa *hyväksymiskriteeri 5:n* osalta nojattiin Suomen opetusministeriön tyyppiluokitteluun [84], jotta kriteerit pysyivät yhtenäisinä myös eri tietokantojen välillä. Tutkimusartikkelit tunnistettiin tutkimusongelman kannalta keskeiseksi artikkelityypiksi koehakujen yhteydessä.

Kaikki hylkäämiskriteerit liittyvät pitkälti tutkimusprosessin käytännöllisyyteen. Hylkäämiskriteerien pääasiallisena tarkoituksena oli varmistaa, että aineistolle pys-

tytään tekemään seuraavan vaiheen tiedonkeruu riittävällä tarkkuudella. Tutkimusten tuli siis olla saatavilla kokonaisuudessaan ilmaiseksi Jyväskylän yliopiston opiskelijatunnuksilla (*hylkäämiskriteeri 1*). Tutkimusaineiston kieleksi määritettiin englanti (*hylkäämiskriteeri 2*), joka on yleisimmin käytetty kieli valituissa tietokannoissa. Rajoittamalla aineisto yhteen kieleen valintaprosessista tuli suoraviivaisempi ja esimerkiksi sanahakuja pystyttiin toteuttamaan yhtenäisemmin. Testihakujen aikana tunnistettiin, että tutkimusongelmaan pystyvät vastaamaan vain primääritutkimukset eli tutkimukset, joissa tieto on kerätty suoraan tutkimuskohteesta (*hylkäämiskriteeri 3*). Tämän kriteerin avulla onnistuttiin karsimaan pois kaikki sekundääritutkimukset, kuten kirjallisuuskatsaukset ja meta-analyysit.

Kuva 5.1 näyttää valintaprosessin vaiheiden vaikutukset aineistoon valittujen artikkelien lukumäärään. Ensimmäisen hakutuloksen todettiin olevan liian laaja ja sisältävän liikaa kohinaa, joten haku rajattiin jo tietokantojen hakukoneissa koskemaan vain tutkimusartikkeleita. Tämän rajauksen seurauksena hakutuloksesta saatiin karsittua noin puolet, mikä teki laajuudesta sopivan kirjallisuuskartoituksen seuraavaa vaihetta ajatellen. Kun eri tietokannoista saadut hakutulokset yhdistettiin, niistä poistettiin ohjelmallisesti yhteensä 60 kaksoiskappaletta eli duplikaattia. Tietokantojen julkaisuissa ei ollut juurikaan päällekkäisyyksiä, sillä suurin osa duplikaateista tuli aineistoon viitetietokantojen, Scopus ja Web of Science, myötä. Aineiston kokoamisen viimeisessä vaiheessa valintakriteerijä sovellettiin 977 artikkeliin, joista vain 172 selvitti tiensä lopulliseen aineistoon. Tutkimuksen suunnittelu- ja testausvaiheen perusteella odotettiin, että hakulauseen avulla löydetään kattava hakutulos, josta valintakriteerit läpäisisivät noin 20–25 % artikkeleista. Lopullisen aineiston valintaprosentti jäi hieman odotettua alhaisemmaksi, noin 17,6 %:iin. Yleisimmät hylkäysperusteet liittyivät siihen, ettei artikkelin otsikossa tai abstraktissa ollut mainintaa pietsosähköisyydestä tai mistään pietsosähköisestä materiaalista.

Valintaprosessi toteutettiin käytännössä siten, että artikkelit avattiin tietokantojen omissa palveluissa ja valintaa koskevat päätökset kirjattiin ylös käyttäen JabRef-viitehallintaohjelmistoa. Artikkelit luokiteltiin valintakriteerien perusteella JabRefissa luotuihin ryhmiin: "valitut", "hylätyt" ja "epävarmat". Valintakriteereistä tarkistettiin ensin hylkäämiskriteerit, jonka jälkeen siirryttiin työlämmiin selvitettäviiin hyväksymiskriteereihin. Hyväksymiskriteerien tarkistaminen alkoi otsikkoon ja abstraktiin liittyvien ehtojen tarkistamisella, siirtyen lopulta tekstin laajempaan lukemiseen sekä systemaattisesti tehtyihin sanahakuihin. Hylättyjen artikkelien hylkäämisperusteet kirjattiin kunkin tietueen kommenttisarakeeseen JabRefissa. Yli-



Kuva 5.1: Aineiston artikkeleiden lukumäärät valintaprosessin eri vaiheissa.

voimaisesti yleisin hylkäysperuste oli se, että artikkelin otsikossa tai abstraktissa ei ollut mainintaa pietsosähköisyydestä (*hyväksymiskriteeri 3*). Kun yksi tietokanta oli käyty läpi, lisättiin seuraavan tietokannan hakutulokset samaan JabRef-kirjastoon. Tällä menetelmällä pystyttiin varmistamaan, että läpikäytävään aineistoon ei päädy duplikaatteja. Ohjelmakohtaisten virheiden välttämiseksi, duplikaattien suodatus varmistettiin myös Zotero-viitehallintaohjelmalla.

Valintaprosessin tulos on esitetty tietokannoittain **taulukossa 5.1**. Selkeästi merkittävin osa (74,4 %) aineistoon valikoituneista artikkeleista löytyi ScienceDirectistä. ScienceDirect vaikuttaa olevan erityisessä asemassa tutkimusongelmaan liittyen, kattaen monia keskeisiä julkaisuja materiaalitieteen ja energiankeruun erikoisaloilta, kuten "Nano Energy", "Applied Energy" ja "Energy Conversion and Management". Valintaprosessi osoitti, etteivät muut tietokannat painottaneet materiaalikeskeisyyttä samalla relevanssilla. Esimerkiksi SpringerLink antoi myös kattavan hakutuloksen, mutta tarkemman läpikäynnin jälkeen suurin osa tietokannan artikkeleista hylättiin, sillä ne eivät fokuoituneet riittävällä tarkkuudella pietsosähköiseen energiankeruuseen. Samasta syystä ACM Digital Libraryn artikkeleista yksikään ei päätenyt lopulliseen aineistoon. IEEE Xploresta sekä viittaustietokannoista Scopus ja Web of Science löytyi joitakin relevanteja tutkimuksia, mutta niiden merkitys jäi lopulta marginaaliin ScienceDirectin kattavan aineiston rinnalla.

Taulukko 5.6: Yhteenvedo artikkelien valintaprosessista eri tietokannoista

Tietokanta	Läpikäytyt artikkelit	Valittu	Hylätty
ACM Digital Library	42	0	42
IEEE Xplore	14	5	9
ScienceDirect	637	128	509
SpringerLink	229	23	206
Scopus	24	12	12
Web of Science	31	4	27
Yhteensä:	977	172	805

5.3 Tiedonkeruu ja karttojen muodostaminen

Valittujen tutkimusartikkelien avainsanoittaminen ja luokittelu toteutettiin seuraan Petersenin et al. [87] menetelmäohjeistuksessa käyttämää mallia. Luokittelua varten muodostettiin siis taulukkopohja, johon kirjattiin ylös artikkeleista kerättävät tietoalkiot. Tietoalkiot perustuivat tutkimuskysymyksille, jotta niiden avulla kerätyllä informaatiolla pystyttäisiin vastaamaan tutkimusongelmaan. Tietoalkiot ja niitä vastaavat tutkimuskysymykset on esitetty **taulukossa 5.7**. Varsinainen taulukkopohja toteutettiin Google Sheets -taulukkolaskentaohjelmassa.

Tietojen keräämiseen käytetyt menetelmät riippuivat siitä, mitä tietoalkiota ja tutkimuskysymystä tarkasteltiin. Julkaisutietoihin liittyvät tiedot, kuten *artikkelin otsikko*, *kirjoittaja(t)* ja *julkaisuvuosi*, saatiin suoraan kunkin artikkelin metadatatista, jonka oikeellisuus tarkistettiin vertaamalla kyseisiä tietoja varsinaisen julkaisun vastaaviin. *Julkaisutyypin* selvitetiin tarkastelemalla julkaisutietoja suhteessa Suomen opetusministeriön julkaisutyypiluokitteluun [84]. *Tutkimusartikkelin tyypin* selvittämiseen käytettiin Petersenin et al. [87] päätöstaulua, joka helpottaa Wieringan et al. [124] tutkimustyyppiluokkien tulkitsemista. Käytännössä jokaista artikkelia luettiin riittävästi, jotta saatiin selvitettyä, mitkä päätöstaulun kriteerit kukin niistä täytti. Päätöstaulun tulkitsemista helpotti huomattavasti se, että aineiston valintakriteerit rajasivat mahdollisiksi luokiksi vain kolme kategoriaa: validointitutkimukset, ratkaisuehdotukset ja arviointitutkimukset.

Aihekohtaisten tietoalkioiden kohdalla — *energianlähde*, *energiankeräysrakente* ja

Taulukko 5.7: Tiedonkeruukaavion tietoalkiot

Tietoalkio	Arvotyyppi	Tutkimuskysymys
ID	Kokonaisluku	-
Artikkelin otsikko	Artikkelin nimi julkaisutiedoissa	-
Kirjoittaja(t)	Kirjoittajien nimet	-
Julkaisuvuosi	Vuosiluku	TK1
Julkaisutyyppi	Perustuen Suomen opetusministeriön luokittelujärjestelmään [84]	TK2
Tutkimusartikkelin tyyppi	Perustuen Wieringan et al. [124] luokittelujärjestelmään	TK2
Energianlähde	Käytetyn energianlähteen kuvaus	TK3
Energiankeräysrakenne	Pietsosähköisen materiaalin muoto	TK4
Pietsosähköinen materiaali	Materiaalin nimi	TK5
Mainittiinko pietsosähköisen materiaalin ympäristöystävällisyys?	Kyllä/Ei	TK6
Tuotetun sähkön määrä	Tutkimuksessa ilmoitettujen virta-arvojen huippulukemat	TK7
Muita mahdollisia avainsanoja	Aineistossa toistuvat käsitteet	-

pietsosähköinen materiaali — tiedonkeruussa jouduttiin soveltamaan hieman eri menetelmiä riippuen artikkelin raportointityylistä. Joissakin tutkimuksissa *energianlähde* raportoitiin yksiselitteisesti, kun toisissa energiankeruuta testattiin laboratoriovälineillä ja lopullinen sovelluskohde jätettiin yleisesti mekaanisen liike-energian tasolle. Tällaisten tutkimusten osalta energianlähteen tulkinnassa käytettiin apuna muuta saatavilla olevaa informaatiota, kuten energiankeräysrakennetta. Energiankeräysrakenne saattoi paljastaa esimerkiksi sen, soveltuiko pietsosähköinen materiaali paremmin iskukuorman vai resonanssivärähtelyn piiriin. *Energianlähteen* selvittäminen siis vaihteli huomattavasti artikkelikohtaisesti: se saattoi tulla ilmi heti abstraktissa tai sitten sen selvittämiseen vaadittiin artikkelin laajempaa lukemista. Artikkeleista tunnistetut *energianlähteisiin* liittyvät avainsanat vastasivat laajalti tutkimuskirjallisuudessa yleisesti käytettyjä termejä.

Energiankeräysrakenteiden osalta avainsanojen tunnistaminen ja luokittelu oli hankalampaa, sillä ainutlaatuiset ja innovatiiviset rakenteet nimettiin usein omaperäisesti. Lisäksi joissakin artikkeleissa samanlaisia rakenteita kuvattiin käyttäen eri termejä, kun esimerkiksi pinorakennetta (engl. stack) kutsuttiin myös kerrostetuksi (engl. multilayer) materiaaliksi. Tästä syystä *energiankeräysrakenteen* määrittäminen

tapahtui ensisijaisesti sen kautta, miten pietsosähköisen materiaalin muotoa kuvailtiin tai kuvattiin artikkelissa — monissa artikkeleissa energiankeräysrakente esitettiin kaikkein selvimmin rakenteen toimintaa esittävien kuvien kautta. Artikkeleissa mainitut energiankeräysrakenteet luokiteltiin laajojen ja kattavien avainsanojen alle, jotka tunnistettiin aikaisemman tutkimuskirjallisuuden perusteella. Esimerkiksi moninaiset kalvorakenteet, kuten ”membrane”, ”film” ja ”diaphragm”, luokiteltiin kaikki yhtenäisesti kalvoiksi.

Pietsosähköinen materiaali mainittiin usein jo otsikossa tai abstraktissa, mutta tiettyissä artikkeleissa käytetyn materiaalin osalta viitattiin lisämateriaaliin tai tekniisiin liitteisiin. Tämä kuvasti myös eroja tutkimusten lähtökohdissa, kun joissakin artikkeleissa itse materiaali sai pääroolin ja toisissa korostettiin yleisellä tasolla pietsosähköistä energiankeruuta. Materiaalia koskevan maininnan löytymisen jälkeen artikkelit olivat lopulta melko helppo luokitella, sillä suurin osa materiaaleista oli jo entuudestaan tuttuja aiemmasta kirjallisuudesta. Enemmän vaivaa aiheutti ei-pietsosähköisten täyteaineiden tunnistaminen, jotta ne pystyttiin pitämään luokittelun ulkopuolella.

Edellä mainitun luokittelun lisäksi aineistosta pyrittiin tunnistamaan sellaiset pietsosähköiset materiaalit, joita pidettiin erityisen ympäristöystävällisinä. Ongelmanasettelu ei ollut täysin yksinkertainen, sillä lähes kaikissa artikkeleissa korostettiin yleisesti sovelluksen tai energiankeruun ekologisuutta. Lisäksi tiedon keräämiseen tarvittiin mahdollisimman yksiselitteinen ja systemaattisesti toimiva ratkaisu. Tiedonkeruussa päädyttiin lopulta dikotomiseen kysymyksenasetteluun, jossa artikkeleista etsittiin suoraa mainintaa pietsosähköisen materiaalin ympäristöystävällisyydestä. Tietoalkioon *mainittiinko pietsosähköisen materiaalin ympäristöystävällisyys?* vastattiin siis kyllä tai ei. Selvittämällä ympäristönäkökulmaa materiaalien kautta päästiin ikään kuin siirtymään ympäristöystävällisen energiankeruun yleiseltä makrotasolta tarkemmalle mikrotasolle. Näin pystyttiin muodostamaan alakategoria erityisen ympäristöystävällisinä pidetyistä pietsosähköisistä materiaaleista. Artikkeleissa materiaalin ympäristöystävällisyyttä korostettiin pääasiassa kahdella tapaa: 1) materiaali mainittiin suoraan ympäristöystävälliseksi tai 2) materiaalia korostettiin ympäristön kannalta parempana vaihtoehtona verrattuna aikaisempiin materiaaleihin. Maininta löytyi pääsääntöisesti artikkelin johdannosta tai johtopäätöksistä.

Sähköarvojen osalta aineistosta oli alun perin tarkoitus kerätä energiatiheyteen liittyvät suureet, mutta tutkimuksen pilotointivaiheessa kuitenkin huomattiin, et-

tä energiatiheys ilmoitettiin artikkeleissa vaihtelevissa mittayksiköissä. Näitä olivat esimerkiksi pinta-alan tai tilavuuden yksiköt, joiden yhdenmukaistaminen niin, että tutkimuksia voitaisiin vertailla keskenään, nähtiin erittäin työläänä. Sähköarvoja koskevaan tietoalkioon, *tuotetun sähkön määrä*, päädyttiin keräämään helposti käsiteltävät suureet: jännite, sähkövirta ja sähköteho. Tiedonkeruuvaiheessa tiedostettiin, etteivät tutkimukset olisi suoraan vertailukelpoisia näiden arvojen perusteella, mutta niiden avulla saataisiin kuitenkin yleiskuva aineiston energiankeruun mitta-luokasta. Tutkimusartikkeleissa sähköarvot ilmoitettiin usein pietsosähköisen materiaalin tai sovelluksen testaamisen yhteydessä. Ilmoitustavasta riippumatta, oli kyseessä sitten huippuarvot tai tehollisarvot, tutkimuksista kerättiin jokaisen sähköarvon osalta korkeimmat pietsosähköiseen materiaaliin liittyvät suureet. Joissakin tapauksissa sähköarvojen löytämistä helpotti sähköyksiköiden käyttäminen sanahakujen hakutermeinä.

Tiedonkeruuvaiheessa haluttiin pitää auki mahdollisuus sellaisille avainsanoil-le ja luokille, joita ei osattu ennakoida tiedonkeruukaavaketta suunniteltaessa. Tältä osin luotiin tietoalkio *muita mahdollisia avainsanoja*, johon kirjattiin ne termit, mitkä toistuivat aineistossa usein tai vaikuttivat muuten merkityksellisiltä. Käytännös-sä tämän tietoalkion avulla tunnistettiin erilaisia hybridijärjestelmiä, joita aineistos-ta löytyi huomattava määrä. Hybridijärjestelmän kaikki energiankeruumuodot kir-jattiin ylös, jotta niiden perusteella voitiin muodostaa selkeät luokat systemaattisia kartoja varten. Hybridijärjestelmät tunnistettiin yleensä heti abstraktista.

Tietojen keräämisen ja luokittelemisen jälkeen tuloksista laadittiin visuaaliset esitykset eli systemaattiset kartat. Esitystapana käytettiin pääasiassa ympyrädia-grammeja, jotka kuvaavat selkeästi eri luokkien väliset keskinäiset suhteet ja osuu-det kokonaisuudesta. Tietotekniikan alalla tehdyissä systemaattisissa kirjallisuus-kartoituksissa ympyrädiagrammit ovat yksi suosituimmista visualisointimenetel-mistä yhdessä kupla- ja pylväsdiagrammien kanssa [87]. Pylväsdiagrammeja käy-tettiin puolestaan niissä visualisoinneissa, jotka edellyttivät yksittäisten pietsosäh-köisten materiaalien esiin nostamista. Näin esimerkiksi pietsosähköisten materiaa-lien esiintymistiheyksiä kuvaava kartta muodostaa samalla myös listan aineistos-sa esiintyneistä materiaaleista sekä niiden suhteesta ympäristöystävällisyyteen. Sa-moin meneteltiin sähköarvoihin liittyvien kaavioiden osalta, jotka kuvattiin luokit-telujärjestelmän vuoksi pinotuilla pylväsdiagrammeilla. Valmiit systemaattiset kar-tat löytyvät luvusta 6.

5.4 Tutkimuksen validiteetin arviointi

Tutkimuksen viimeisessä vaiheessa arvioidaan sen validiteettia Petersenin et al. [87] menetelmäohjeistusta seuraten, neljän luokittelujärjestelmän avulla: **1) kuvaileva validiteetti**, **2) teoreettinen validiteetti**, **3) yleistettävyys** ja **4) tulkinnallinen validiteetti**. Nämä erilaisiin validiteetin tyyppeihin perustuvat kategoriat on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2.4. Lisäksi arvioinnin tueksi tutkimuksen vaiheet täytettiin tarkistuslistaan (ks. **taulukko A.1**) ja arviointirubriikkeihin (ks. **taulukot A.2–A.6**), jotka perustuvat Petersenin et al. ohjeistuksessa esitettyihin pohjiin.

Kuvailevassa validiteetissa arvioidaan tutkimuksessa tehtyjen havaintojen tarkkuutta ja objektiivisuutta. Tässä tutkimuksessa kuvailevaa validiteettia parannettiin muodostamalla tutkimuskysymyksille perustuva tiedonkeruukaavake, jonka osat alueet on kuvattu **taulukossa 5.7**. Petersenin et al. [87] mukaan tiedonkeruukaavakkeen käyttö tekee tietojen keräämisestä objektiivisempää ja auttaa pitämään kuvailevaan validiteettiin liittyvät uhat kontrollissa. Tiedonkeruukaavake standardisoi tiedonkeruuprosessia ja paransi sen arvioitavuutta niin, että eri tietoalkioihin kerättyjä tietoja pystyttiin arvioimaan tehokkaasti. Esimerkiksi jokaisesta artikkelista ylös kirjattu pietsosähköinen materiaali pystyttiin vahvistamaan melko nopeasti tarpeen vaatiessa. Kuvailevaan validiteettiin liittyvät uhat olivat edelleen olemassa, mutta tiedonkeruukaavion huolellisen arvioinnin perusteella prosessissa ei havaittu merkittäviä virheitä.

Systemaattisessa kirjallisuuskartoituksessa **teoreettisen validiteetin** uhat koskevat erityisesti aineiston valintaan ja tiedonkeruuseen liittyviä tutkimusharhoja [87]. Näiden tutkimusharhojen uhkaa voidaan pitää suurena, sillä tämä tutkimus toteutettiin täysin yksilötyönä. Asetelma huomioitiin tutkimuksen eri vaiheissa ja uhkaa pyrittiin lieventämään huolellisella suunnittelulla. Esimerkiksi aineiston valintakriteerit (ks. 5.5) pyrittiin muotoilemaan niin, että niiden vastaukset nähdään eksplisiittisesti suoraan kunkin artikkelin tekstistä. Eksplisiittisiä vastauksia edellyttävästä muotoilusta jouduttiin kuitenkin joustamaan hyväksymiskriteeri 4:n kohdalla, jonka tarkoituksena oli suunnata aineiston valinta kohti energiankeruuta käsitteleviä tutkimuksia. Tämä johtui siitä, että pietsosähköisen energiankeruun erottaminen esimerkiksi anturiteknologiasta ei ollut täysin yksiselitteistä. Pietsosähköisen ilmiön mekanismeja nimittäin hyödynnetään molemmissa sovelluskohteissa käytännössä samalla tavalla ja tutkimuksissa saatetaan käyttää hyvin samankaltaista terminologiaa. Hyväksymiskriteeri 4:n lopullinen vaikutus aineiston karsintaan oli

melko pieni verrattuna muihin valintakriteereihin, joten kyseiseen kriteeriin liittyvien tulkintaerojen ei pitäisi vaikuttaa lopullisiin tutkimustuloksiin merkittävästi.

Tutkimuksessa artikkelien tietokantahakua ei täydennetty muilla menetelmillä, kuten esimerkiksi Petersenin et al. [87] suosittelemalla lumipallotekniikalla. Lumipallotekniikka arvioitiin liian työlääksi, ottaen huomioon, että valintakriteerit läpikäyvien artikkelien lukumäärä oli kohtuullisen suuri (977 kpl). Aineiston valinnan osalta tutkimusharjoja pyrittiin kompensoimaan iteroimalla tietokantahakua ja pitämällä artikkeliotanta mahdollisimman laajana, jotta tärkeitä tutkimuksia ei jäisi aineiston ulkopuolelle. Huolellisesta suunnittelusta ja systemaattisesta toteutuksesta huolimatta, yksittäisen tutkijan inhimillisten virheiden mahdollisuus on kuitenkin olemassa sekä aineiston valinnassa, että tiedonkeruussa. Lisäksi näiden virheiden uhkaa on hankalaa arvioida, kun tutkimuksen toteutuksesta ja validiteetin arvioinnista vastaa sama henkilö.

Tutkimustulosten **yleistettävyyttä** arvioidaan tarkastelemalla niiden selitysvoimaa aineiston ulkopuolelle jääneisiin tutkimuksiin, jotka edustivat joko samaa populaatiota (sisäinen yleistettävyyys) tai kuuluivat täysin erilliseen populaatioon (ulkoisen yleistettävyyys) [87]. Tämän tutkimuksen kohde pyrittiin pitämään tarkoituksellisesti mahdollisimman laveana, jotta se kattaisi ympäristöystävälliseen pietrosähköiseen energiankeruuseen liittyvät IoT-sovellukset monipuolisesti. Tulosten perusteella voidaan todeta, että aineisto koostuu laaja-alaisesta joukosta erilaisia energiankeräysrakenteita, energianlähteitä ja pietrosähköisiä materiaaleja. Tässä mielessä sisäistä yleistettävyyttä voidaan pitää hyvänä. Ulkoisen yleistettävyyden osalta tuloksia tulee tarkastella suhteessa valitun populaation ulkopuolisiin tutkimuksiin, kuten energiankeruusovelluksiin, jotka eivät kuulu IoT:hen tai huomioi ympäristönäkökulmaa. Myös ulkoisen yleistettävyyys vaikuttaa hyvältä, sillä tulokset ovat johdonmukaisia niin pietrosähköiseen mekanismiin liittyvien realiteettien kuin muilla rajauksilla tehtyjen tutkimusten kanssa.

Tulkinnallisen validiteetin uhat liittyvät kerättyjen tietojen pohjilta tehtyihin johtopäätöksiin [87]. Systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa johtopäätökset perustuvat avainsanoitusvaiheessa luotuihin kategorioihin. Tässä tutkimuksessa nämä kategoriat pyrittiin juontamaan aiemmasta tutkimuskirjallisuudesta. Mahdollisuuksien mukaan yksittäisiä irrallisia luokkia myös koottiin laajempien yläkäsitteiden alle. Yläkäsitteiden muodostamisessa on vaarana, että erilaisia luokkia saatetaan yhdistää virheellisesti samaan kategoriaan, vaikka ne eivät todellisuudessa kuulu yhteen. Tätä uhkaa pyrittiin lieventämään valitsemalla yläkäsitteiksi vain

sellaisia konsepteja, joiden yhteys aineiston artikkeleihin voidaan tunnistaa yksiselitteisesti. Esimerkiksi energiankeräysrakenteiden luokat voidaan erottaa toisistaan helposti niiden rakenteellisten ominaisuuksien perusteella, jotka käyvät ilmi myös yläkäsitteiden nimityksistä: *kalvot* ovat joustavia ja *ulokepalkit* puolestaan vankempia, vain toisesta päädystään kiinnitettäviä rakenteita. Kalvorakenne ei voi olla ulokepalkki, sillä tällainen rakenne olisi ns. lippurakenne, jotka on nyt luokiteltu tarkoituksellisesti *kalvo*-kategorian alle. Yläkäsitteisiin sisällytetyt luokat on avattu tarkemmin tulosten yhteydessä.

Yleisellä tasolla tulosten tulokinnassa pyrittiin laajojen suuntausten ja trendien havaitsemiseen. Johtopäätöksille haettiin tukea tutkimuskysymysrajat ylittävällä tarkastelulla, jonka tarkoituksena oli paitsi vahvistaa tulkintojen pätevyyttä myös tuoda esiin tutkimusaluetta ohjaavia ilmiöitä. Tällaisissa havainnoissa uhkatekijänä on se, ettei eri tutkimuskysymyksiä käsittelevien systemaattisten karttojen samansuuntaisuuden taustalla olekaan todellista kausaaliteettia. Kyseinen uhka pidettiin mielessä johtopäätöksiä tehtäessä ja varsinaiset tulkinnat pyrittiin perustamaan vankasti karttojen esittämään informaatioon.

Validiteettia arvioitiin myös täyttämällä tutkimuksessa suoritettut toimet Petersenin et al. [87] ohjeistuksessa esittämään tarkistuslistaan (**taulukko A.1**) ja arviointirubriikkeihin (**taulukot A.2–A.6**). Petersenin et al. mukaan tarkistuslista koostuu tutkimusmenetelmän toteuttamisen kannalta keskeisimmistä toimenpiteistä. Toteutuneet vaiheet merkataan tarkistuslistaan oikein-merkillä (!), jonka jälkeen niiden lukumäärää voidaan verrata oleellisina pidettyjen toimenpiteiden kokonaismäärään. Tästä vertailusta saadaan tutkimuksen pätevyyttä kuvaava suhdeluku. Esimerkiksi Petersenin et al. oman tutkimuksen suhdeluku oli 31 % ja heidän aineistonsa systemaattisten kirjallisuuskartoitusten mediaani suhdeluku oli 33 %. Petersen et al. huomauttavat lisätutkimuksen tarpeesta, joka selvittäisi luotettavan tutkimuksen suhdeluvun pisterajat. Suhdeluvun osalta ei ole tarkoitus tavoitella maksimaalia, sillä tietyn pisteen jälkeen tutkimusten laatu ei parane enää merkittävästi. Tämän tutkimuksen suhdelukua verrataan Petersenin et al. menetelmäohjeistuksessa esitettyihin systemaattisiin kirjallisuuskartoituksiin.

Käsillä olevassa tutkimuksessa toteutettiin 10 toimenpidettä tarkistuslistan 26 kohdasta, mikä vastaa reilua 38 %:in suhdelukua. Verrattuna Petersenin et al. [87] esittämiin suhdelukuihin tutkimus on lähempänä ylimmän neljänneksen rajaa (40 %) kuin keskitasoa (33 %). Voidaan siis todeta, että tutkimusmenetelmän toteuttamisen kannalta tärkeimpiä toimenpiteitä noudatettiin riittävässä määrin. Toimenpiteet

myös jakautuivat tasaisesti tutkimuksen eri vaiheisiin, joten tarkistuslistan perusteella tutkimusmenetelmän noudattamisesta ei paljastu selkeitä puutteita.

Tutkimuksen yksittäisiä vaiheita voidaan arvioida vielä tarkemmin Petersenin et al. [87] laatimien arviointirubriikkien avulla. Arviointirubriikit ovat arviointia helpottavia taulukoita, jotka pisteyttävät eri tutkimusvaiheet toteutuneiden toimenpiteiden perusteella. Tämän tutkimuksen pisteet on merkattu **taulukoihin A.2–A.6** korostamalla ja alleviivaamalla saadut tulokset. Kokonaisuutena arvioituna tutkimuksen pistemäärä (4 pistettä) on lähellä Petersenin et al. [87] tutkimuksen pistemäärää (5 pistettä). Keskeinen ero tutkimusten välillä liittyy valittuun hakustrategiaan (**taulukko A.3**), sillä tässä tutkimuksessa noudatettiin vain yhtä hakumenetelmää, kun Petersenin et al. tutkimuksessa tietokantahakua tuettiin lumipallotekniikan avulla.

Hakustrategiaan liittyvässä arviointirubriikissa haun luotettavuutta arvioidaan tarkastelemalla valittujen hakumenetelmien määrää kolmesta vaihtoehdosta: tietokantahaku, manuaalinen haku ja lumipallotekniikka. Jos tutkimuksessa noudatetaan vain yhtä hakustrategiaa, se jää ilman pisteitä. Arviointirubriikissa siis korostuu haun tukeminen vaihtoehtoisilla hakustrategioilla. Tältä osin tämän tutkimuksen luotettavuutta olisi voitu parantaa. Useaa hakumenetelmää hyödyntämällä varmistetaan, ettei relevantteja artikkeleita jää aineiston ulkopuolelle. Tässä tutkimuksessa aineisto oli määrällisesti melko kattava, mutta sen edustavuus olisi voitu varmistaa tukemalla tietokantahakua lumipallotekniikalla tai manuaalisella haulla. Yhden hakumenetelmän soveltaminen näyttää kuitenkin olevan melko tyypillistä systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa, sillä Petersenin et al. [87] aineiston tutkimuksista yli puolet jäivät ilman pisteitä kyseisen arviointirubriikin osalta.

6 Tulokset

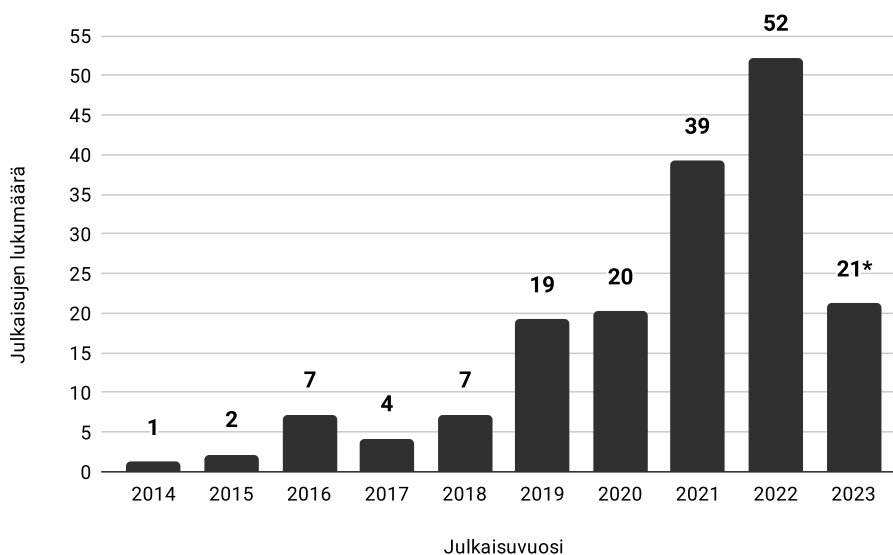
Tässä luvussa esitetään ympäristöystävällistä pietsosähköistä energiankeruuta esi-
neiden internetissä havainnollistavat systemaattiset kartat, joiden avulla tutkimus-
ongelmaan vastataan tutkimuskysymyksittäin. Luvussa systemaattisia karttoja tar-
kastellaan laajassa kontekstissa ja tulosten taustalla vaikuttavia syitä sekä selittäviä
tekijöitä pyritään ottamaan huomioon. Tuloksissa esiintyy runsaasti pietsosähköis-
ten materiaalien lyhenteitä, jotka on selitetty tarkemmin liitteessä B.

6.1 Julkaisutiheys (TK1)

Kuvassa 6.1 on esitetty aineistoon valikoituneiden ensisijaisten tutkimusten luku-
määrät julkaisuvuosittain. Tutkimukset ajoittuvat vuoden 2014 alusta vuoden 2023
helmikuun loppuun. Tällä aikavälillä julkaistiin yhteensä 172 tutkimusta. Ympäris-
töystävälliseen pietsosähköiseen energiankeruuseen IoT:ssa liittyvä tutkimus näyt-
tää kasvaneen maltillisesti vuoteen 2018 asti, jonka jälkeen julkaisujen lukumäärä
kasvoi merkittävästi vuosina 2019 ja 2020. Kiinnostus aiheeseen näyttää lisäänty-
neen edelleen kiihtyvässä tahdissa vuosina 2021, 2022 ja 2023, jotka suhteellisen
lyhyestä aikavälisestä huolimatta muodostavat yhdessä yli puolet kaikista aineiston
tutkimuksista. Mikäli vuoden 2023 julkaisutahti pysyy samana kuin sen kahtena
ensimmäisenä kuukautena, jatkaa se kasvutrendiä ylittäen selkeästi edellisen vuo-
den julkaisumäärän. Aihealueen kiinnostavuuden voidaan siis todeta olevan erit-
tään merkittävässä nosteessa.

Tutkimusten julkaisumäärän kasvutrendi ilmentää osaltaan aktiivisten IoT-lait-
teiden räjähdysmäistä kasvua, jonka on arvioitu nousseen alle neljästä miljardista
laitteesta vuonna 2014 yli 16 miljardiin vuonna 2023 [47] [109]. Mikäli ennustukset
IoT-laitteiden lukumäärän kasvusta pitävät paikkansa, voidaan olettaa, että myös
aihealueeseen liittyvä tutkimus jatkaa kasvu-uralla. Vaikka julkaisumäärien vuosi-
kohtaisille kasvueroilte on vaikea löytää yksittäisiä selittäviä tekijöitä, sijoittuvat jot-
kin havainnot juuri niille vuosille, joina julkaisumäärien kasvu oli merkittävää. Esi-
merkiksi vuonna 2018 EU määrittä RoHS-direktiiviin [26] poikkeuksen lyijypohjais-
ten pietsosähköisten materiaalien käytön osalta. Julkaisumäärien perusteella tämä

ei vähentänyt lyijypohjaisia materiaaleja koskevaa tutkimusta, mutta saattoi lisätä kiinnostusta lyijyttömiä vaihtoehtoja kohtaan. Lisäksi tutkimusmäärien kasvuun voi jossain määrin vaikuttaa vuonna 2021 alkanut globaali energiakriisi, joka lisää laitteiden omavoimaisuuden mahdollistavien energiankeruumenetelmien merkittävyyttä entisestään.



Kuva 6.1: Tutkimusten julkaisumäärät vuosittain. *Sisältää 28.2.2023 mennessä julkaistut artikkelit.

6.2 Julkaisualustojen ja tutkimusten tyypit (TK2)

Tutkimusten julkaisutietoja on luokiteltu ympyrädiagrammeissa julkaisualustan tyyppin osalta (**kuva 6.2**) ja tutkimustyyppin osalta (**kuva 6.3**). Julkaisualustat (engl. venue type) noudattavat yleistä luokittelumallia, perustuen Suomen opetusministeriön julkaisutyypiluokittelulle [84]. Tässä kirjallisuuskartoituksessa käytetyt hyväksymiskriteerit rajasivat mahdolliset julkaisutyypiluokat journal-julkaisuihin ja konferenssijulkaisuihin. **Kuvasta 6.2** voidaan nähdä, että tutkimusten julkaisutyypin oli pääasiassa *alkuperäisartikkeli tieteellisessä aikakauslehdessä*, sillä vain 6 artikkelia koko aineistosta oli julkaistu *konferenssijulkaisuissa*.

Tutkimustyyppien luokittelun osalta noudatettiin Wieringan et al. [124] yleistä tutkimustyyppiluokittelua. Aineiston ensisijaisten tutkimusten tutkimustyyppit ja

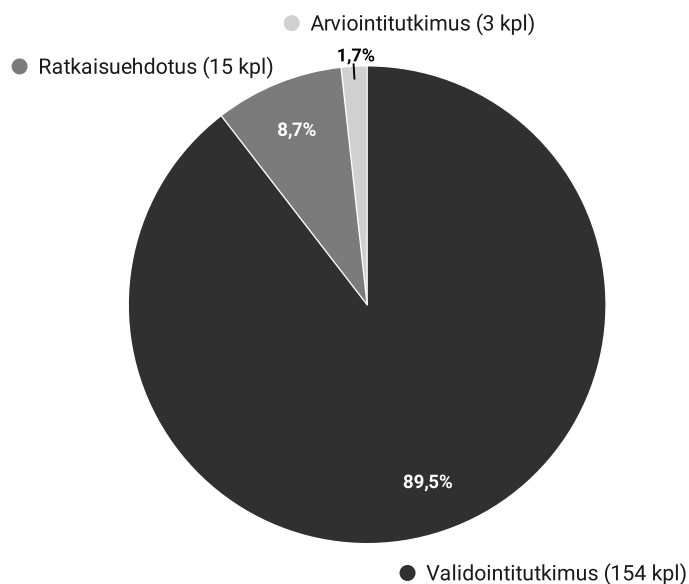
kautuivat kolmeen luokkaan — *validointitutkimuksiin*, *ratkaisuehdotuksiin* ja *arviointitutkimuksiin* — pääasiassa sen perusteella, kuinka pitkälle empiirinen vaihe tai validointi oli tutkimuksissa viety. *Ratkaisuehdotuksissa* empiiristä validointia ei tehty lainkaan. *Validointitutkimuksissa* tulokset vahvistettiin esimerkiksi laboratorioympäristössä, ja *arviointitutkimuksissa* puolestaan edettiin empiirisen arvioinnin kanssa jo käytännön sovelluskohteen tasolle. Muita tutkimustyyppisiä, kuten *filosofisia artikkeleita*, *mielipideartikkeleita* tai *kokemusartikkeleita* aineistoon ei kertynyt.



Kuva 6.2: Tutkimusten jakautuminen julkaisualustan perusteella.

Julkaisutietoihin liittyvät ympyrädiagrammit osoittavat, että tutkimuksista ylivoimainen enemmistö oli validointitutkimuksia vertaisarvioituissa journal-julkaisuissa. Yleistäen voidaan todeta, että aineiston tutkimukset keskittyivät joko uusien pietsosähköisten materiaalien kehittämiseen tai olemassa olevien materiaalien ominaisuuksien parantamiseen sekä näiden prosessien validointiin laboratorioympäristössä. Kaikki *arviointitutkimuksen* tasolle yltäneet tutkimukset sisälsivät vakiintuneessa asemassa olevaa lyijypohjaista PZT-keräämiä. Aineiston perusteella ympäristöystävällisiä pietsosähköisiä materiaaleja tutkitaan ja kehitetään paljon, mutta käytännön energiankeruusovellusten tasolle tutkimuksissa ei päädytä samaan tahtiin. Tämä jako voi osittain johtua kirjallisuuskartoituksessa käytössä olleista valintaja hakukriteereistä, joita sovellettaessa *arviointitutkimusten* määrä jäi ylipäättään todella vähäiseksi (3 kpl). Pietsosähköisten materiaalien ja tutkimustyyppien välisiä

suhteita olisi kuitenkin arvokasta tarkastella tarkemmin tulevaisuudessa, sillä se voi antaa perusteellisemman kuvan ”lyijyttömän siirtymän” tilasta.



Kuva 6.3: Tutkimusten jakautuminen tutkimustyyppin perusteella.

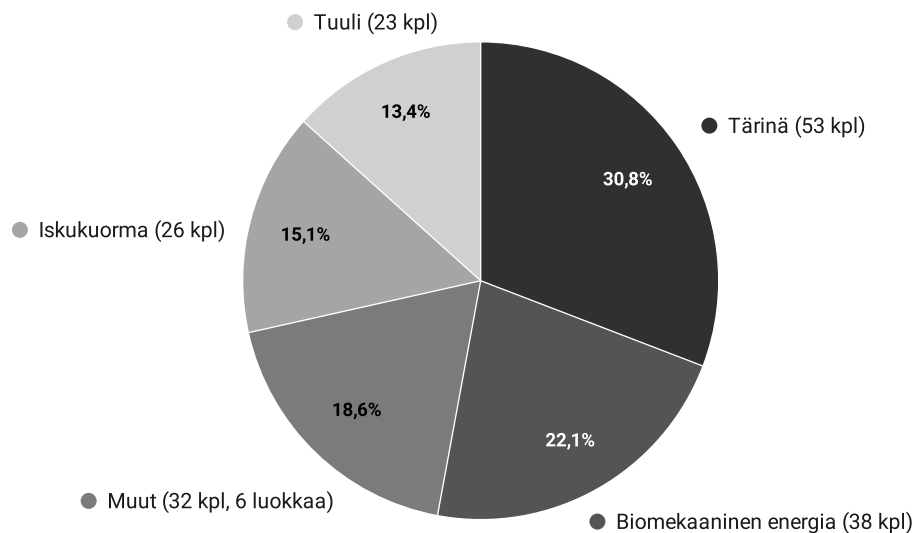
6.3 Energianlähteet (TK3)

Kuva 6.4 esittää tutkimusten jakautumisen energianlähteiden perusteella. Luokkia tarkasteltaessa on huomioitava tutkimusten luonne, jossa empiirinen testaus saataan tehdä napauttamalla materiaalia sormella tai erillisen laboratorio-ravistelijan avulla. Tällaisen materiaalin lopullisen sovelluskohteen energianlähde ei ole vielä tarkkaan määritetty tai kiveen hakattu. Luokittelussa onkin pyritty selvittämään tutkimuksissa mainitun energianlähteen lisäksi käytössä ollut energiankeruurakenne, joka saattaa viitata siihen, millaisiin olosuhteisiin materiaali parhaiten soveltuu.

Suurin osa tutkimusten energianlähteistä liittyy *tärinään*. Energian kerääminen tärinästä on tavallaan jokaisen aineiston tutkimuksen lähtökohta ja termiä ”tärinä” (engl. vibration) käytetään usein ylipäätään mekaanisen energian synonyyminä. Myös muut **kuvassa 6.4** esitetyt luokat voidaan ymmärtää erilaisina tärinän lähteinä. Esimerkiksi virtausenergiat, kuten tuuli, saavat pietsosähköisen rakenteen värähtelemään siinä missä teollisuuden tärisevät moottoritkin. Energianlähteiden tarkempi luokittelu on kuitenkin perusteltua, sillä erilaiset energianlähteet edellyttävät

erilaisia pietsosähköisiä ominaisuuksia ja rakenteita.

Tärinän jälkeen suosituimmat yksittäiset kategoriat ovat *biomekaaninen energia*, *iskukuorma* ja *tuuli*. *Biomekaanisen energian* edellytykset — myrkyttömyys ja joustavuus — sopivat hyvin tutkimusasetelmaan, joten tähän luokkaan kuuluvien tutkimusten lukumäärä ei yllätä. *Iskukuormaan* liittyvä luokka käsittää mekaanisen jännityksen, vetojännityksen, törmäysvoimien ja taittumisen kautta tapahtuman energiankeruun. Kategoria *muut* sisältää 6 luokkaa, joihin kuuluu: *rotaatioenergia* (9 kpl), *magneettinen energia* (8 kpl), *vesivoima* (8 kpl), *äänienergia* (4 kpl), *hukkalämpö* (2 kpl) ja *ei mainintaa* (1 kpl). Yhteenvetona voidaan todeta, että vaikka pietsosähköinen energiankeruu perustuu lähtökohtaisesti tärinälle, voidaan tämä tärinä synnyttää hyvin monipuolisesti erilaisten energianlähteiden avulla.

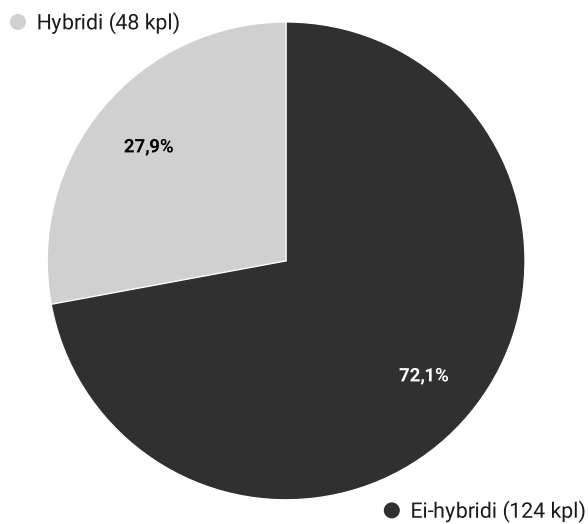


Kuva 6.4: Tutkimusten jakautuminen energianlähteen perusteella.

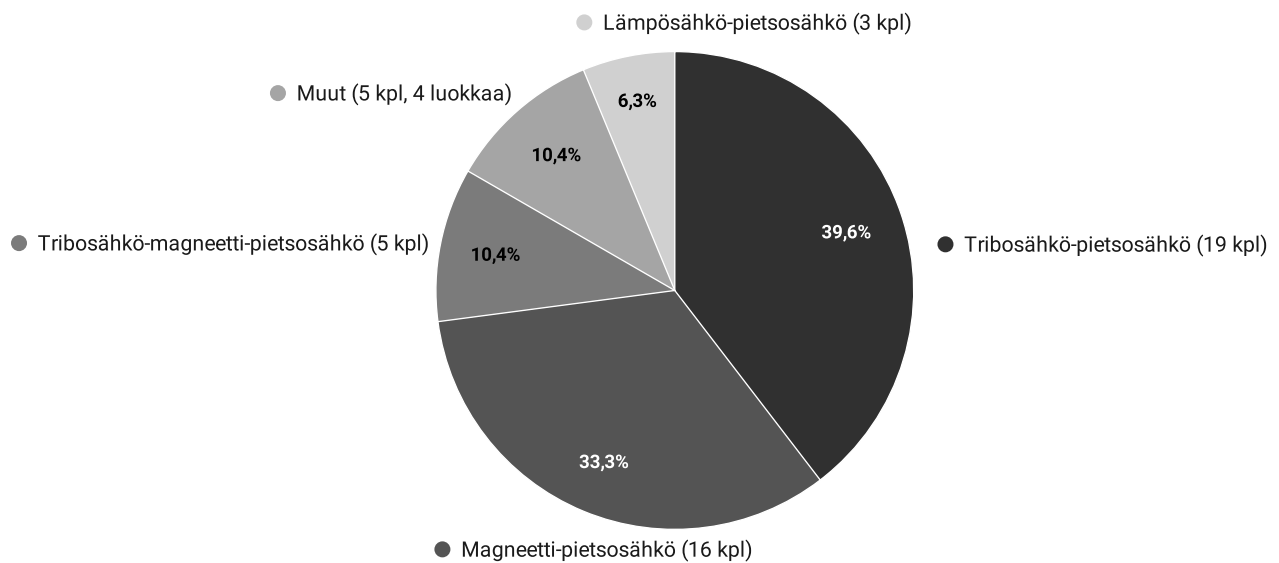
Energianlähteisiin liittyen osasta tutkimuksia tunnistettiin, että niissä käytettiin yhtäaikaaisesti useampaa kuin yhtä energiankeruumenetelmää. Ne muodostivat siis ns. *hybridijärjestelmiä*, joiden osuus oli reilu neljäsosa kaikista tutkimuksista (**kuva 6.5**). *Hybridien* kohtalainen määrä osoittaa, että erilaisten energiankeruumenetelmien yhdistäminen on potentiaalinen lähestymistapa ympäristöystävällisyyteen tähtäävässä energiankeruussa. Muiden menetelmien materiaalit eivät siis ole välttämättä ainakaan vähemmän ympäristöystävällisiä kuin pietsosähköiset materiaalit.

Hybridijärjestelmät luokiteltiin avainsanoittamisen avulla omiin kategorioihinsa, jotka on esitetty **kuvassa 6.6**. Suurin osa järjestelmistä hyödynsi joko *tribosäh-*

köistä ilmiötä tai *magneettista energiaa* yhdessä pietsosähköisen energiankeruun kanssa. Tulos ei yllätä, sillä nämä menetelmät muodostavat pääasialliset värähtelyenergian keruumenetelmät. Lähtökohtaisesti tähän joukkoon kuuluisi myös *sähköstaattinen menetelmä*, mutta sen osuus jää aineiston tutkimuksissa yllättävän pieneksi (1 kpl, luokassa *muut*). Saattaa olla, että sähköstaattisen ja pietsosähköisen hybridin valmistaminen on muita menetelmiä monimutkaisempi prosessi: sähköstaattinen menetelmä nimittäin edellyttää ulkoista jännitelähdettä, mikä saattaa lisätä virtapiirin ja komponenttien välistä kompleksisuutta. Aineistosta kolmanneksi suurimman yksittäisen luokan muodostavat kahden yleisimmän hybridiluokan yhdistelmät eli *tribosähkö-magneetti-pietsosähköiset* hybridit. Pienemmät luokat muodostuivat lämpötilaerojen avulla sähkövirtaa synnyttävästä *lämpösähkö-pietsosähkö* kategoriasta sekä *muut* kategoriasta, johon kuuluu *valojänniteilmiö-pietsosähkö* (2 kpl), materiaalin lämpenemisellä jännitteitä tuottava *pyrosähkö-pietsosähkö* (1 kpl), jo mainittu *sähköstaattinen-pietsosähkö* (1 kpl) ja useaa menetelmää samanaikaisesti yhdistävä *tribosähkö-magneetti-valojänniteilmiö-lämpöenergia-pietsosähkö* (1 kpl).



Kuva 6.5: Hybridijärjestelmien esiintyvyys tutkimuksissa.



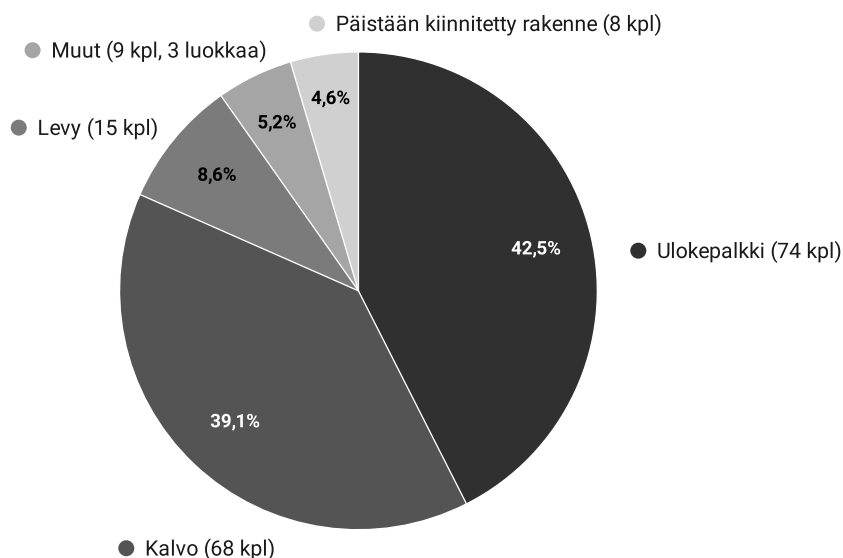
Kuva 6.6: Hybridijärjestelmien jakautuminen esiintymistiheyden perusteella.

6.4 Energiankeräysrakenteet (TK4)

Tutkimusten jakautuminen energiankeräysrakenteiden mukaan on esitetty **kuvas- sa 6.7**. Energiankeräysrakenteiden systemaattinen selvittäminen tutkimuksista oli haastavaa, sillä uudenlaiset kekseliäät rakenneratkaisut nimetään usein omaperäisesti. Tästä syystä luokittelu perustui ensisijaisesti pietsosähköisen materiaalin toimintaperiaatteeseen. Näin ollen esimerkiksi spiraalinmuotoinen rakenne luokiteltiin ulokepalkiksi (engl. cantilever), mikäli sen toimintaperiaate oli käytännössä ulokepalkkia vastaava. Lisähaastetta toi myös se, ettei tutkimuksissa noudatettu mitään yhtenäistä nimeämistapaa energiankeruurakenteiden osalta. Esimerkiksi pino- rakenne (engl. stack) saatettiin kuvata monikerroksisena rakenteena (engl. multi-layer).

Luokittelussa käytetyt kategoriat määrittyivät seuraavasti: *Ulokepalkki* kuvaa kaikkia yhdellä kiinnityspisteellä tuettuja palkkirakenteita. *Kalvo* kattaa kaikki joustavat rakenteet ja siihen liittyviä tyypillisiä englanninkielisiä termejä olivat ”membrane”, ”film” ja ”diaphragm”. *Levy* sisältää erilaiset palkkirakenteet, jotka on kokonaan tuettu yhdeltä puolelta. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi ei-joustavat pino- ja laminaattirakenteet. *Päistään kiinnitetty rakenne* (engl. clamped-clamped) tunnistettiin omaksi luokakseen, jonka toimintaperiaatteena on rasituksen kohdistuminen päis-

tään tuetun materiaalin keskiosaan. *Symbaali* (engl. cymbal) ja *kiekko* (engl. disk) luokat tunnistettiin aikaisemman tutkimuskirjallisuuden perusteella. *Symbaalista* saatiin käyttää myös termiä ”bridge-type”.



Kuva 6.7: Tutkimusten jakautuminen energiankeräysrakenteiden perusteella.

Kuva 6.7 näyttää, että tutkimuksissa käytettiin energiankeräysrakenteina pääasiassa *ulokepalkkia* ja *kalvoa*. Tulos on yhdenmukainen aikaisemman tutkimuskirjallisuuden kanssa, joka toteaa ulokepalkin olevan yleisimmin käytetty pietsosähköinen energiankeräysrakenne [76] [65]. *Kalvojen* merkittävä lukumäärä kuitenkin korostaa ympäristöystävällisiä pietsosähköisiä materiaaleja joustavina rakenteina, jotka erottuvat perinteisistä hauraista keraameista valmistusmenetelmien ja kalvo- maisten rakenteidensa ansiosta. Näiden rakenteiden joustavuus johtuu todennäköisesti ympäristöystävällisten materiaalien luonteesta: ne koostuvat luonnonpolymeereistä tai sisältävät polymeerejä komposiittimateriaalin osana. Vähemmälle huomiolle jäivät erilaisista isku- ja törmäysvoimista energiaa keräävät rakenteet, kuten *levy* ja *päistään kiinnitetyt rakenteet*. Näiden luokkien vähäinen esiintyvyys on linjassa sen havainnon kanssa, että pietsosähköinen energiankeruu perustuu ennen kaikkea värähtelyyn ja värinään. Luokka *muut* sisältää 3 luokkaa: *kiekko* (5 kpl), *symbaali* (2 kpl) ja *ei mainintaa* (2 kpl). *Kiekko*- ja *symbaalirakenteita* esiintyi odotettua vähemmän, mikä saattaa johtua siitä, että joustavat kalvorakenteet ovat vieneet niiden aseman ympäristöystävällisessä energiankeruussa: esimerkiksi kengänpohjassa kal-

vo voi taipua kävelyn yhteydessä ilman mitään erityistä rakenteellista elementtiä tai muotoa.

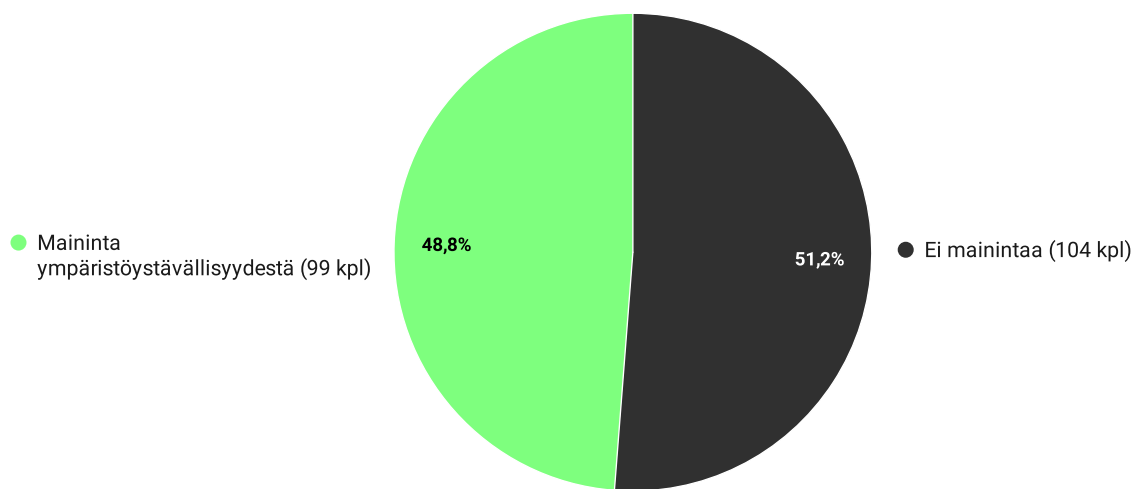
6.5 Pietsosähköiset materiaalit (TK5 ja TK6)

Aineiston ensisijaisista tutkimuksista kirjattiin ylös niissä käytetyt pietsosähköiset materiaalit. Lisäksi näistä materiaaleista eroteltiin sellaiset, jotka mainittiin tutkimuksissa korostetusti ”ympäristöystävällisiksi”. Tällä tavoin päästiin käsiksi materiaaleihin liittyviin ympäristökysymyksiin, muuten laajasti ympäristöystävällisenä pidetyn energiankeruun kattokäsitteen sisällä. Ympäristöystävällisyyttä korostettiin tutkimuksissa laajasti perusteluna energiankeruun käytön puolesta. Tutkimuksia, joissa pietsosähköinen materiaali todettiin ympäristöystävälliseksi, oli lopulta 32 kappaletta. Näissä ympäristönäkökulma ilmaistiin pääasiassa kahdella tapaa: joko materiaali todettiin suoraan ympäristöystävälliseksi (engl. eco-friendly) tai sen nähtiin vähentävän ympäristökuormaa verrattuna muihin materiaaleihin. Mikäli pietsosähköinen materiaali mainittiin jossakin tutkimuksessa ympäristöystävälliseksi, tulkittiin se sellaiseksi myös muiden samaa materiaalia käyttävien tutkimusten osalta. Nämä ympäristöystävällisiksi mainitut materiaalit on esitetty kuvissa korostetusti vihreällä värillä. Ympäristöystävälliseksi mainittuja materiaaleja oli lähes puolet kaikista tutkimusten materiaaliesiintymistä (**kuva 6.8**). Alalla on siis selkeästi kiinnostusta ympäristöystävällisenä pidettyjä materiaaleja kohtaan.

Kuvassa 6.9 on esitetty tarkemmin tutkimuksissa käytetyt pietsosähköiset materiaalit. Näiden materiaaliluokkien osalta on huomioitava, että komposiittimateriaaleissa käytetyt yksittäiset pietsosähköiset materiaalit pyrittiin jakamaan omiin luokkiinsa. Näin ollen esimerkiksi BTO/PVDF-komposiitti purkautuu edustamaan materiaaliesiintymiä sekä BTO:n, että PVDF-polymeerin osalta. Sen sijaan materiaali-seokset, kuten PZT-PZNN, luokiteltiin yhdeksi materiaaliksi, sillä niissä materiaalit ovat lienneet tai sekoittuneet toisiinsa niin, että seos muodostaa oman erillisen materiaalinsa. Tämän luokittelumenetelmän vuoksi materiaaliesiintymien yhteismäärä (203 kpl) ylittää aineiston ensisijaisten tutkimusten lukumäärän (172 kpl).

Materiaalien luokittelun pohjalta (**kuva 6.9**) voidaan todeta, että ympäristöystävällisiksi materiaaleiksi on tutkimuksissa mainittu ainoastaan lyijyttömiä materiaaleja: PVDF, ZnO, BTO, P(VDF-TrFE), KNN, nanoselluloosa, AlN, BCZT, BCTZ, kitoosaani, silkin fibroiini, BCT, BZT, FASnBr₃, LN, Rochelle-suola ja ZnAl:LDH. Tähän saattaa olla vaikutuksensa kansainvälisillä ympäristöasetuksilla, kuten RoHS:illa

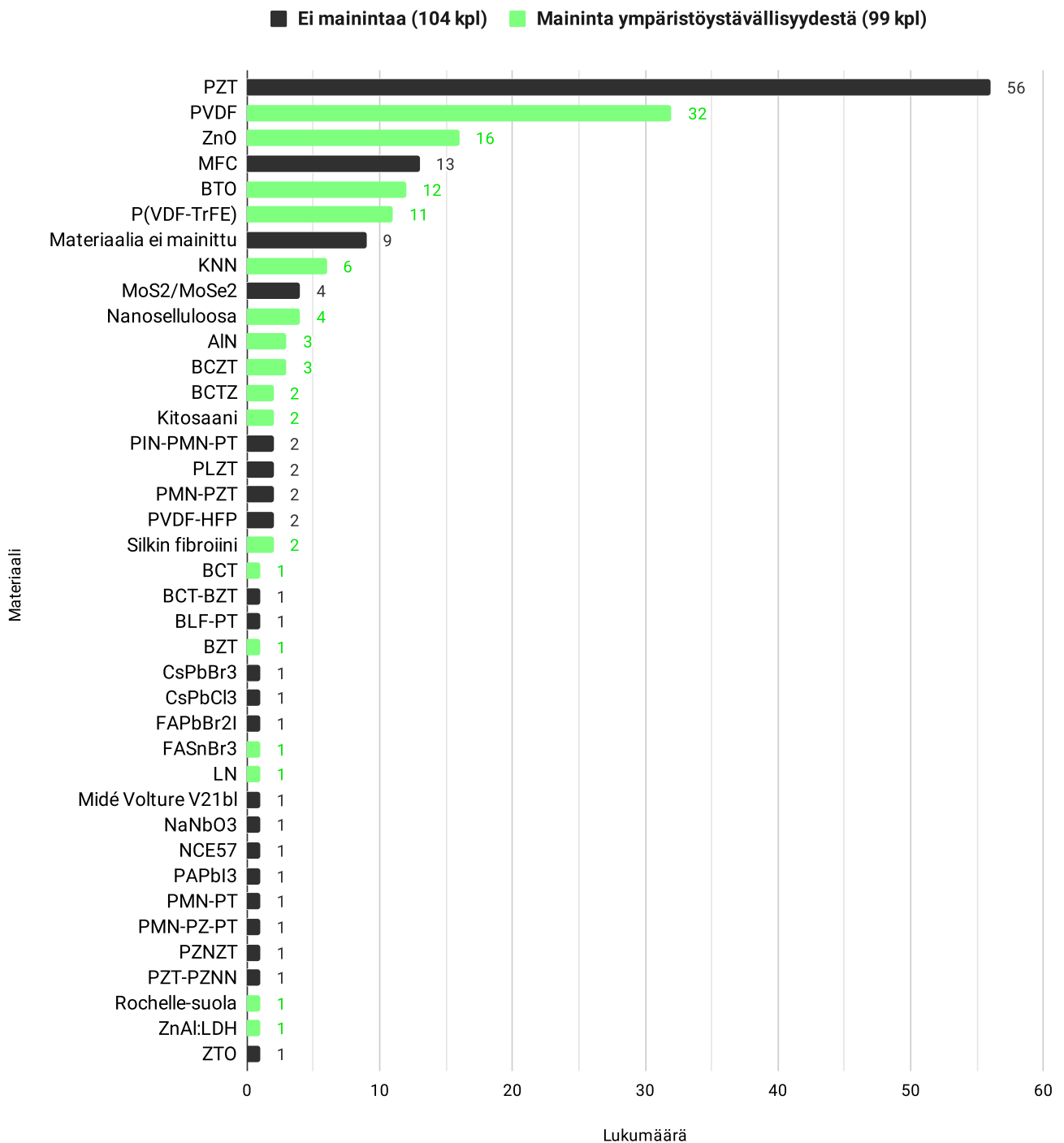
[25] [26], jotka pyrkivät rajoittamaan lyijyn käyttöä sen myrkyllisyyden ja haitallisten ympäristövaikutusten vuoksi. Kyseiset asetukset motivoivat lyijyttömien pietsosähköisten materiaalien tutkimukseen, mutta samalla ne saattavat muodostaa paradigman, jossa pietsosähköisten materiaalien ympäristöystävällisyyttä perustellaan ensisijaisesti lyijyttömyydellä. Lyijyttömyys ei kuitenkaan ole ympäristöystävällisyyden synonyymi. Todellisten ympäristövaikutusten huomioiminen edellyttää materiaalin valmistusprosessien ja käytön kokonaisvaltaista analyysiä, mikä jäi aineiston tutkimuksissa taka-alalle. Esimerkiksi elinkaariarviointi mainittiin vain yhdessä tutkimuksessa.



Kuva 6.8: Ympäristöystävälliseksi mainittujen materiaalien osuus kaikista aineiston materiaaliesiintymistä.

Aineiston ylivoimaisesti suosituin pietsosähköinen materiaali oli lyijypohjainen PZT-kerami (56 kpl) (**kuva 6.9**). PZT on tunnetusti käytetyin pietsosähköinen materiaali, jolla on erinomaiset sähköiset ominaisuudet. Ympäristöystävällisyyden konteksti ei ainakaan vielä ole sulkenut PZT:tä pois, vaikka suunta kohti lyijyttömyyttä on ympäristöasetusten auki kirjoitettu tavoite. Tosin ilman PZT:tä, ympäristöystävällisiksi mainitut materiaalit muodostaisivat selkeän enemmistön (66,89 %) aineiston materiaaleista. Tämä saattaa viitata käynnissä olevaan siirtymään kohti lyijyttömiä pietsosähköisiä materiaaleja. Ympäristöystävällisiksi mainituista materiaaleista selkeästi suosituin oli PVDF-polymeri, jota käytettiin usein komposiittimateriaalien osana. Kyseisellä materiaalilla saattaa olla, lyijyttömyyden ja hyvien pietsosähköisten ominaisuuksien lisäksi, hyvät ominaisuudet yhdisteiden valmistamisen

näkökulmasta, mikä selittäisi sen suosiota.



Kuva 6.9: Pietsosähköisten materiaalien esiintymistiheydet tutkimuksissa ja ympäristöystävällisiksi mainitut materiaalit.

Lähtökohtaisesti ympäristön kannalta sopusointuiset biomateriaalit tai biohajoavat materiaalit, kuten Rochelle-suola, silkin fibroiini, kitosaani ja nanosellulosa, muodostivat yhdessä todella pienen osan (9 kpl) aineiston materiaaleista ja selkeän vähemmistön myös ympäristöystävällisinä pidetyistä materiaaleista. Biomateriaalit ovat todennäköisesti ylipäätään vähemmän tutkittuja materiaaleja verrattuna sellaisiin, joiden korkeat pietsosähköiset ominaisuudet on todettu jo vuosikymmeniä sitten. Biomateriaalien sähköiset ominaisuudet saattavat myös rajoittaa niiden käyttöä, varsinkin sellaisten sovellusten osalta, joissa on totuttu käyttämään korkean pietsosähköisen kertoimen omaavia lyijypohjaisia materiaaleja. Tähän suuntaan viittaa myös sähköisten ominaisuuksien vertailu (**kuvat 6.10, 6.11 ja 6.12**), jossa yksittäiset biomateriaalit sijoittuivat kaavioiden häntäpäihin. Joka tapauksessa, kokonaisvaltaisen ympäristöystävällisyyden näkökulmasta lähes päästöttömät biomateriaalit ovat houkutteleva vaihtoehto, joten tulevaisuuden kannalta niihin liittyy paljon tutkimuspotentiaalia.

6.6 Sähköarvot (TK7)

Sähköarvojen luokittelun osalta systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tiedonkeruuvaiheessa tehtiin rajausta, joka vaikuttaa merkittävästi tulosten analyysiin. Energiankeruussa tyypillisesti tärkein yksittäinen suure on energiatiheys, joka kertoo tuotetun energian määrän suhteessa tilavuuteen tai painoon. Tämä korostuu erityisesti pienissä laitteissa, joissa virtayksikön fyysinen koko on rajallinen. Energiatiheys oli aineiston ensisijaisten tutkimusten pääasiallinen tapa kuvata pietsosähköisten materiaalien ja energiankeruusovellusten suorituskykyä. Tulosten muodostamisen kannalta tämän suureen yhtenäistäminen niin, että tutkimukset olisivat vertailukelpoisia keskenään, osoittautui kuitenkin hankalaksi ja työlääksi. Energiatiheys nimittäin ilmoitettiin erilaisissa mittayksiköissä, kuten esimerkiksi pinta-alan yksikkönä mW/mm^2 tai tilavuuden yksikkönä mW/cm^3 . Tästä syystä systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tiedonkeruuvaiheessa tutkimuksista kirjattiin ylös yleiset sähköiset suureet — jännite, sähkövirta ja teho — jotka mahdollistivat vertailukelpoisen perustan tutkimusten väliselle tarkastelulle.

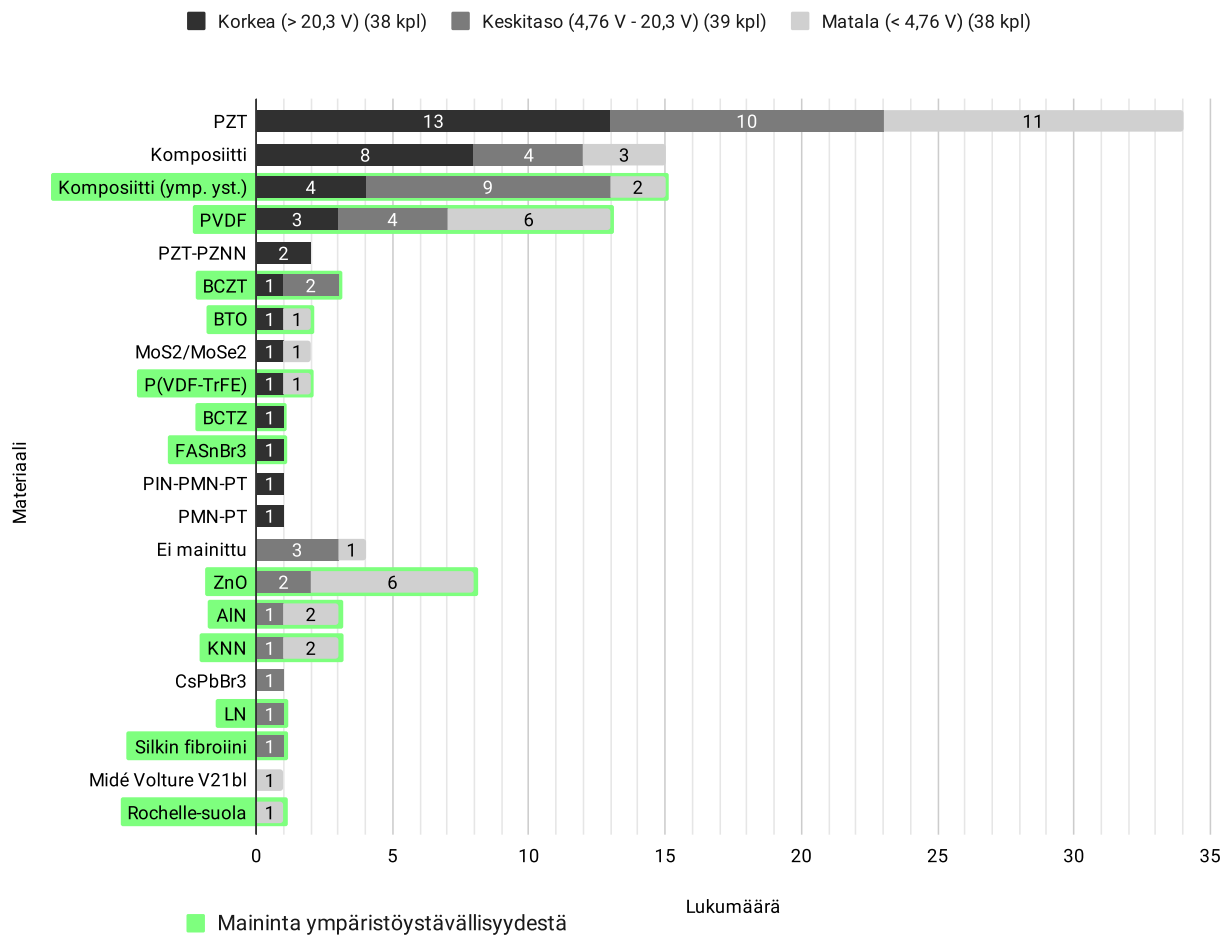
Sähköarvot muutettiin jokaisen suureen osalta samaan mittayksikköön ja ryhmiteltiin tertiileihin niin, että arvoja voidaan vertailla niiden suhteellisten suuruusluokkien perusteella. Näin tutkimuspopulaation keskinäinen suhde muodostaa raja-arvot, joita seuraten aineisto jaettiin kolmeen luokkaan: *matala*, *keskitaso* ja *korkea*.

Tertiilien raja-arvot ja tutkimusten lukumäärät on ilmoitettu **kuvissa 6.10, 6.11 ja 6.12**. Kuvien pinotut pylväsdiagrammit on järjestetty siten, että ensisijainen painotus on *korkean* luokan esiintymien lukumäärässä. Seuraavaksi painotetaan *keskitason* esiintymiä ja viimeisenä *matalan* luokan esiintymismäärää. Tällä tavalla suhteellisesti korkeita sähköarvoja tuottaneet materiaalit sijoittuvat pylväsdiagrammien yläosaan ja pääasiassa matalia arvoja tuottaneet alaosaan. Sähköarvojen luokittelun osalta on huomioitava vielä se, että tutkimuksissa ilmoitettiin joskus huippuarvot ja joskus keskiarvot, kuten tehollisarvo. Tästä syystä pylväsdiagrammeja ei ole tarkoitettu käyttämään materiaalien sähköisten ominaisuuksien väliseen kattavaan vertailuun, vaan ennemminkin sähköarvojen mittaluokkien ja aineiston tutkimusten käytäntöjen tarkasteluun yleisellä tasolla.

Kuva 6.10 esittää tutkimusten jakautumisen tertiileihin jännitearvojen perusteella. Aineiston pienimmän (11,1 mV, ZnO) ja suurimman (206 V, komposiitti) jännitearvon välinen ero on erittäin suuri, mikä johtuu pääasiassa tutkimusten lähtökohtien välisistä eroista. Lisäksi on huomattava, että aineisto koostuu yhtä lailla vähäisessä rasiuksessa testatuista pienikokoisista materiaaleista kuin suuresti kuormitetuista laajemmista energiankeruurakenteista. Pääasiassa jännitearvot (keskiarvo 25,58 V ja mediaani = 12 V) noudattavat pietsosähköiselle ilmiölle tuttua kaavaa, jossa tuotetaan IoT-laitteiden virrantarpeisiin nähden todella suuria jännitteitä.

Kuvan 6.10 perusteella *korkeita* jännitteitä onnistuttiin tuottamaan niin lyijypohjaisilla kuin lyijyttömilläkin materiaaleilla. Jotkin ympäristöystävällisiksi mainitut materiaalit, kuten ZnO ja KNN, sijoittuvat itsenäisissä kategorioissaan kaavion alaosaan, mutta yhdistelmä materiaalien osana (*komposiitti (ymp. yst.)*), ne onnistuivat muodostamaan myös *korkeaan* jänniteluokkaan kuuluvia materiaaleja. Tämä viittaa siihen, että näiden lyijyttömien materiaalien vahvuudet saattavat tulla esiin juuri komposiittimateriaaleissa. Komposiittimateriaalien potentiaalia korkeiden jännitteiden osalta tukee myös se, että kategoria *komposiitti (ymp. yst.)* sijoittui kaavion kärkikolmikkoon.

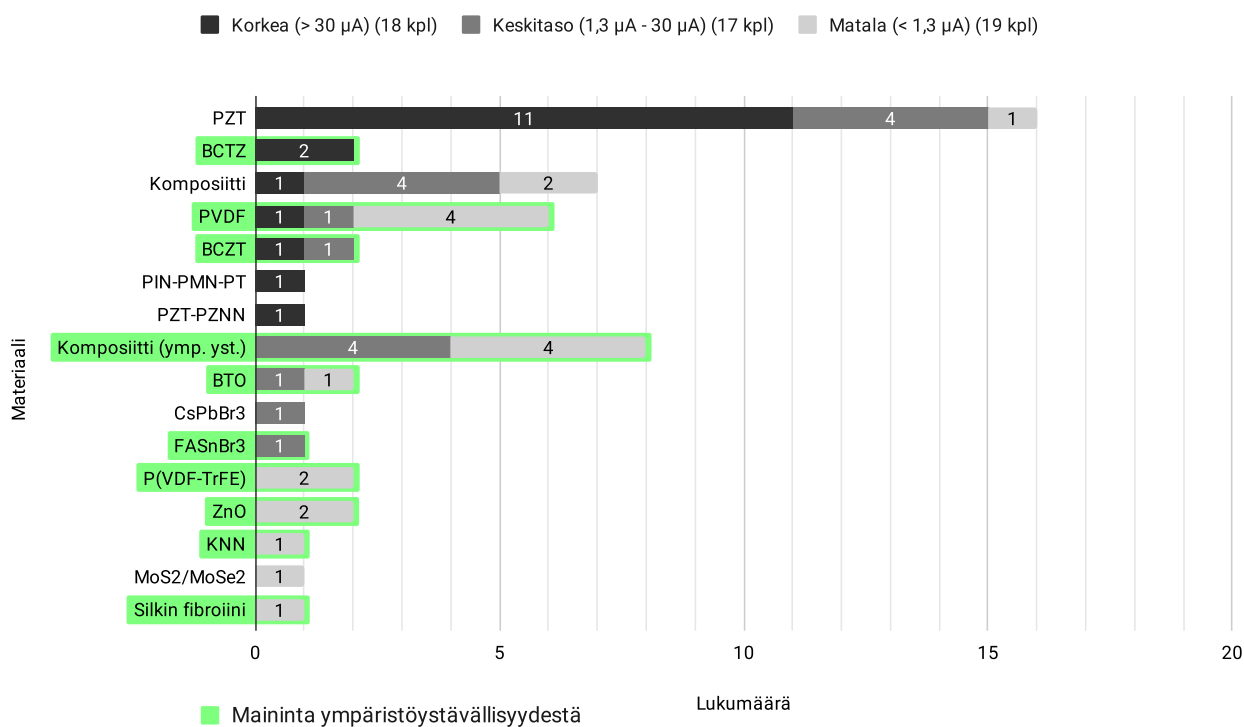
Sähkövirtaa koskeva luokittelu on esitetty **kuvassa 6.11**. Myös virran osalta tutkimuksissa ilmoitettujen ääripäiden — matalimman (4 nA, MoSe₂) ja korkeimman (93,04 mA, PZT) arvon — välinen ero on suuri, mikä korostaa edelleen eroja tutkimusten lähtökohdissa ja tavoitteissa. Kaikkiaan ilmoitettujen sähkövirtojen keskiarvo (n. 2509,2 mA) oli huomattavasti suurempi kuin aineiston mediaani (7 mA), mikä heijastelee *korkean* kategorian suurimpien virta-arvojen olevan poikkeuksellisen suuria (> 1000 mA) verrattuna muuhun aineistoon. Yleisesti voidaan todeta, että tut-



Kuva 6.10: Tutkimusten jakautuminen jännitearvojen perusteella

kimukset noudattavat pietsosähköisiin materiaaleihin liittyviä ennako-oletuksia myös virta-arvojen osalta, sillä korkeisiin jännitteisiin verraten sähkövirrat jäivät melko pieniksi.

Tutkimuksista ylivoimaisesti eniten virta-arvoja ilmoitettiin PZT-keraamin osalta. Tämä suosituin materiaali muodosti myös jopa yli puolet *korkean* kategorian tutkimuksista. Ympäristöystävälliseksi mainituista materiaaleista edustusta löytyi jokaisesta kolmesta virtakategoriasta. Näistä *korkeita* virta-arvoja ilmoitettiin barium-pohjaisten materiaalien (BCTZ ja BCZT) sekä PVDF-polymeerin yhteydessä. Kaikki aineiston materiaalit huomioiden on todettava, että virta-arvojen raportointi jäi selkeästi taka-alalle. Muihin sähköarvoihin verraten virtatiedot ilmoitettiin harvemmin ja aineiston tutkimusten painopiste oli kallellaan korkeita jännitteitä tavoittele-



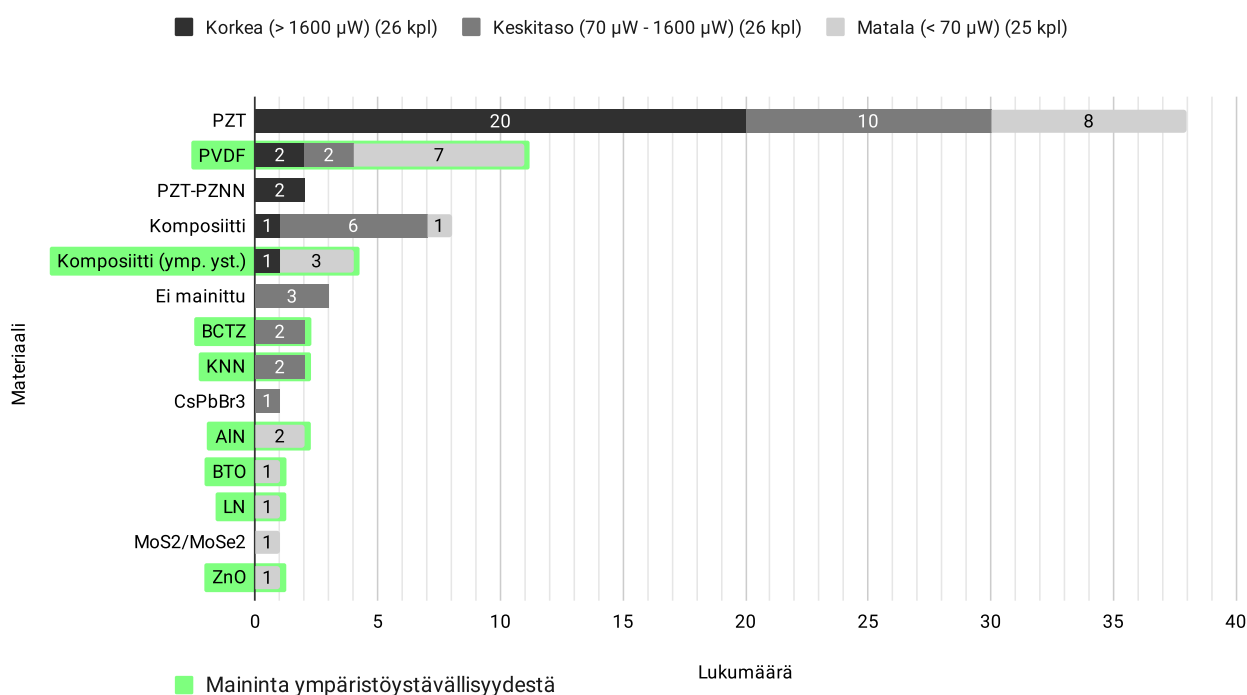
Kuva 6.11: Tutkimusten jakautuminen virta-arvojen perusteella

viin materiaaleihin. Vaikuttaa myös siltä, että energiankeruussa sähkövirran tuottaminen jää toissijaiseksi ominaisuudeksi: virta ei ollut minkään tutkimuksen ainut ilmoitettu sähköarvo, vaan sen rinnalla mainittiin aina joko jännite tai teho. Kun energiatiheys jätetään tarkastelun ulkopuolelle, pietsosähköinen tutkimuskenttä näyttää painottavan sähköarvojen osalta vahvuuksiaan eli korkeita jännitteitä.

Kuva 6.12 näyttää aineiston jakautumisen sähkötehon perusteella. Sähkötehon osalta aineistossa on erittäin merkittävää vaihtelua, pienimmän arvon ollessa pikowattien mittaluokassa (62,72 pW, MoSe₂) ja suurimman arvon wateissa (4,3 W, PZT). Tämän suuntaista aineiston heterogeenisuutta oli havaittavissa jokaisen sähköisen suuren kohdalla, joten voidaan todeta, että pietsosähköistä energiankeruuta käsittelevissä tutkimuksissa tähdätään monipuolisesti mittaluokaltaan erilaisiin käyttöyhteyksiin. Sähkötehon kannalta yllättävää oli se, että kyseinen suure raportoitiin lopulta vain 77 tutkimuksessa koko aineiston 172 artikkelista. Ennako-oletuksena oli, että sähköteho olisi energiatheyden ja pietsosähköisen kertoimen rinnalla keskeinen tapa kuvata energiankeruusevölluksen tehokkuutta. Nyt yli puolet aineiston artikkeleista jätti tehokeman raportoimatta, mikä saattaa olla merkki sii-

tä, että iso osa tutkimuksista ei ollut vielä kehittynyt käyttövalmiin energiakeruusevelluksen tasolle. Sen sijaan ne perustuivat uudenlaisten pietsosähköisten materiaalien kehittämiseen, kuten julkaisualustoja ja tutkimustyyppettä tarkastellessa todettiin.

PZT dominoi sähkötehoa kuvaavaa diagrammia (kuva 6.12) sekä ilmoitusten lukumäärässä, että tehoarvojen voimakkuudessa. PZT:n ylivoimaa voidaan selittää kahdella tapaa. Ensinnäkin kyseisellä materiaalilla on erinomaiset pietsosähköiset ominaisuudet ja se on sähkötehon tuotannossa muita materiaaleja edellä. Toisaalta ja osin edellisen seurauksena, PZT on pietsosähköisen energiankeruun alalla pitkäaikainen ja vakiintunut materiaali, jonka tutkimus on kehittynyt pidemmälle kuin monilla muilla materiaaleilla. Tämä saattaa selittää sen, miksi ympäristöystävälliseksi mainittujen materiaalien osalta tehoarvot ilmoitettiin niin harvoin — ehkä niiden tutkimus ei ole vielä edennyt riittävän kypsään vaiheeseen. Kokonaisuutena tarkasteltuna ympäristöystävälliseksi mainittuja materiaaleja löytyi jokaisesta teholuokasta, mutta selkeästi suurin osa niiden ilmoittamista tehoarvoista kuului *matalaan* kategoriaan.



Kuva 6.12: Tutkimusten jakautuminen tehoarvojen perusteella

Yleisimpien IoT-laitteiden ja komponenttien virrantarpeisiin peilattuna pietsosähköisten materiaalien sähköarvoista nousee esiin kaksi huomiota, jotka sopivat hyvin yhteen tutkimusalalla yleisesti vallitsevien käsitysten kanssa. Materiaalien tuottamat jännitteet ovat pääsääntöisesti riittäviä — usein jopa liian korkeita — IoT-sovellusten energiankeruun tarpeisiin. Esimerkiksi suosituissa STM32-mikrokontrollereissa [111] jännitelähteen tulee toimia 1,65–3,6 V alueella. Myös pienikokoisissa superkondensaattoreissa edellytetään usein matalia jännitteitä, kuten Eatonin valmistamassa KW -mallistossa [27], joka kestää parhaimmillaan 6,3 V syöksyjännitettä. Jännitteiden osalta tulee siis huomioida epäsäännöllisten jännitteiden säätöloinnin lisäksi se, että energiankeruupiiri kykenee muuntamaan jännitteen tason IoT-laitteille sopivaksi.

Toinen huomio liittyy energiankeruun mallintamiseen (engl. energy harvesting modeling), jossa huolehditaan siitä, että järjestelmä kykenee tuottamaan riittävästi virtaa laitteen tärkeimmille toiminnoille: datan käsittelyyn, tiedonsiirtoon ja lepotiloihin [98]. Energiankeruun mallintamisen kannalta aineiston kerätyistä sähköarvoista ei voi suoraan päätellä, miten tehot riittäisivät minkäkin IoT-laitteen tai komponentin virrantarpeisiin. Kyseisten arvojen suuri vaihtelu kuitenkin korostaa energiankeruun mallintamisen tärkeyttä, kun ympäristöystävällisessä pietsosähköisessä energiankeruussa materiaalien runsaus ja yksilölliset ominaisuudet tuovat omat haasteensa kerätyn energian ennustettavuudelle. IoT-laitteiden energiankeruussa karkeana tavoitteena voidaan pitää esimerkiksi Sanislavin et al. [98] esittämää arviota 50–60 mAh energiabudjetista, joka kattaisi tyypillisten vähävirtaisten laitteiden virrantarpeet. Tämän tavoitteen kannalta monet aineiston tutkimukset ilmoittivat mittaluokaltaan sopivan suuruisia arvoja, varsinkin kun huomioidaan, että ylös kirjatut sähköarvot kuvasivat usein hetkellistä tehokkuutta.

7 Johtopäätökset ja pohdinta

Tässä luvussa esitetään johtopäätökset tutkielman keskeisistä tuloksista, jonka jälkeen tuloksia pohditaan laajemmassa kontekstissa. Lisäksi käytetyn tutkimusmenetelmän soveltuvuutta ja rajoituksia arvioidaan. Rajoituksiin liittyvää validiteettia on käsitelty kattavammin luvussa 5.4. Lopuksi esitetään mahdollisia aiheita ja suuntia jatkotutkimukselle.

7.1 Ympäristöystävällinen pietsosähköinen energiankeruu IoT:ssa

Tämän tutkielman tarkoituksena oli selvittää pietsosähköisen energiankeruun erityispiirteitä ja ominaisuuksia IoT-laitteiden energiantuotannossa sekä hahmotella kyseisen tutkimuskentän julkaisujen luonnetta. Tulokset osoittivat, että kiinnostus aiheita kohtaan on räjähdysmäisessä kasvussa vuodesta 2019 lähtien. Aineisto koostui luonteeltaan pääasiassa validointitutkimuksista, jotka oli julkaistu alkuperäisartikkeleina tieteellisissä aikakauslehdissä.

Ympäristöystävällistä pietsosähköistä energiankeruuta käytetään monipuolisesti erilaisiin liike-energian lähteisiin, joiden yhdistävänä tekijänä on usein liikkeen jaksoittaisuus. Pietsosähköinen energiankeruu soveltuu hyvin yhteistoimintaan muiden energiankeruumenetelmien kanssa. Erityisesti sitä käytettiin hybridijärjestelmissä erilaisten kineettisen energian muuntomekanismien eli tribosähköisen ilmiön ja sähkömagneettisen menetelmän kanssa. Enemmistö pietsosähköisistä energiankeräysrakenteista toteutettiin ulokepalkki- tai kalvorakenteina, mutta myös erilaisia luovia ja uniikkeja energiankeräysrakenteita tutkitaan.

Tutkimuskentällä esiintyy toisaalta materiaaleja, joiden ympäristövaikutuksia pidetään ekologisina ja toisaalta materiaaleja, joiden ympäristövaikutuksiin ei oteta kantaa. Ympäristöystävällisinä pidettyjä materiaaleja yhdistää laajalti niiden lyijytömyys. Ylivoimaisesti käytetyin pietsosähköinen materiaali on kuitenkin lyijypohjainen PZT-kerami. Myös PVDF-polymeeriä esiintyi paljon ja sitä käytettiin usein yhdistelmäateriaalien osana. Muita melko usein esiintyneitä materiaaleja olivat ZnO, MFC, BTO ja P(VDF-TrFE)-kopolymeeri. Aineistossa oli lukuisia materiaaleja, jotka esiintyivät vain kerran, mikä viestii paitsi materiaalien runsaudesta myös sii-

tä, että uusia erilaisia pietsosähköisiä materiaaleja sekä yhdisteiden osia etsitään ja valmistetaan aktiivisesti.

Oikeanlaiseen laitteistoarkkitehtuuriin yhdistettynä pietsosähköinen energiankeruu tuottaa riittävästi sähköä tyypillisten vähävirtaisten IoT-laitteiden virrantarpeisiin. Tuotetun sähkön määrään vaikuttaa moni muuttuja — mm. pietsosähköinen materiaali, energiankeruusovelluksen komponentit ja energianlähteen ominaisuudet — mikä heijastuu sähköarvojen suuressa vaihtelussa myös yksittäisten materiaalien osalta. Ilmoitettujen sähköarvojen korkeimpia tertiilejä dominoi useimmiten PZT-kerami, mutta kyseiseen kategoriaan yllettiin jokaisen tarkastellun sähköarvon osalta myös ympäristöystävällisinä pidetyillä materiaaleilla.

Teknologisen kehityksen mittapuulla pietsosähköinen energiankeruu esineiden internetissä on jo pitkään tutkittu aihe. Sähkönkulutuksen, laitteiden lukumäärän, jätteiden sekä päästöjen kasvaessa vuosi vuodelta, ekologisuuden merkitys korostuu entisestään myös yhä pienemmissä muuttujissa. Pietsosähköisen energiankeruun osalta näitä muuttujia ovat paitsi nanotason energiankerääjät myös yksittäisten materiaalien valmistuksen tai hävityksen yhteydessä muodostuvat molekyylit. Tämän tutkielman tulosten perusteella pietsosähköisiin materiaaleihin liittyviin ympäristökysymyksiin herättiin toden teolla vasta lyijyttömyyteen tähtäävien direktiivien myötä. Lyijyttömyystavoitteilla on merkittävät seuraukset pietsosähköiselle energiankeruulle, kun valta-asemaa hallitsee lyijypohjainen PZT-kerami. Tämä dilemma heijastuu tutkimuskentällä tietynlaisena ympäristöparadoksina.

Tulosten mukaan ympäristöystävällisinä pietsosähköisinä materiaaleina pidetään ensisijaisesti lyijyttömiä vaihtoehtoja, mutta samaan aikaan käytetyin materiaali ympäristöystävällisessä pietsosähköisessä energiankeruussa on lyijypohjainen PZT-kerami. Teoriaosuuden perusteella voidaan todeta, että tämä ristiriita on todennäköisesti seurausta tutkimusalan aktiivisesta siirtymävaiheesta kohti lyijyttömyyttä — alalla, jossa lyijypohjaiset materiaalit ovat olleet pitkään suosiossa. Ottaen huomioon PZT:n suosion ja RoHS-direktiivissä määritetyt, vääjäämättömästi lähestyvät aikarajat lyijyn käyttöä koskeville rajoituksille, voidaan siirtymästä ennustaa pietsosähköisten materiaalien osalta haasteellista. Käytännössä nämä haasteet ovat jo nähtävissä laitevalmistajien vetoimuksissa RoHS-poikkeusten jatkamisen puolesta. Poikkeuksia tullaan todennäköisesti jatkamaan, mikäli tehokkuus- ja ympäristövaatimukset täyttävää korvaavaa materiaalia ei löydetä. Tässä mielessä tutkielman tulokset auttavat päättäjiä hahmottamaan pietsosähköisten materiaalien tilannetta ja haasteita ympäristöpäätösten noudattamisessa sekä siirtymävaiheen to-

teuttamisessa.

Lyijyttömyyteen ohjaavat direktiivit ovat muodostaneet tutkimuskentällä paradigman, jossa pietsosähköisten materiaalien ympäristöystävällisyyttä arvioidaan ensisijaisesti lyijypitoisuuden kautta. Lyijyn ympäristöhaitat ja myrkyllisyys huomioiden, voidaan suuntaa pitää oikeana. Erityisesti IoT:hen liittyvässä energiankeruussa lyijy muodostaa todellisen haasteen sellaisten sovellusten osalta, joissa komponenttien kierrätys ei ole mahdollista. Tällaisissa sovelluksissa lyijypohjainen pietsosähköinen materiaali ei voi olla vihreä ratkaisu paristoista aiheutuviin elektroniikkajätteisiin.

Lyijyttömät materiaalit eivät kuitenkaan ole oletusarvoisesti ympäristöystävällisiä. Tällä hetkellä lyijyttömyysparadigma näyttää ohjaavan tutkimusten ympäristönäkökulmaa laitteen elinkaaren loppuvaiheeseen. Todellisen kestävä kehityksen periaatteiden mukaisesti materiaalien ympäristövaikutuksia tulisi kuitenkin tarkastella kokonaisvaltaisesti ”kehdosta hautaan”. Ympäristömeriittien julistaminen kaavamman näkökulman perusteella voi johtaa harhaan, jossa ympäristöprofiililtaan jopa PZT:ta haitallisempia materiaaleja aletaan pitää ekologisina. Samaan aikaan aidosti ympäristöystävälliset materiaalit — kuten biomateriaalit — jäävät vähemmälle huomiolle. Tästä näkökulmasta tulokset peräänkuuluttavat alan tutkijoilta huolellisuutta ja tarkkuutta ympäristötermien käytössä.

Joka tapauksessa tutkimusyhteisö näyttää ottaneen lyijyttömyystavoitteet tosisaan, sillä PZT:lle etsitään aktiivisesti korvaavia vaihtoehtoja. Saattaa olla, että tämä innovatiivinen ja aidosti ympäristöystävällinen materiaali löytyy jo tuloksissa esitettyjen materiaalien joukosta. Voi myös olla, ettei yksittäistä suoraa korvaajaa PZT:lle löydy, vaan ratkaisuna on suunnitella ekologisia materiaaleja sovelluskohdeiden ja käyttötarkoitusten tarpeiden mukaan. Merkittäväksi haasteeksi nousee se, miten uusien materiaalien tuotantoketju ja markkinoille pääsy saadaan riittävälle tasolle. Pelkästään hyvä ympäristöprofiili tai erinomaiset pietsosähköiset ominaisuudet eivät riitä, vaan korvaavan materiaalin on myös sovittava hyvin yhteen alan standardien ja käytössä olevien teknologioiden kanssa. Vuosien saatossa nämä käytännöt ovat hioutuneet PZT:n osalta, tehden siitä vakiintuneen vaihtoehdon. Nyt alalla on kysyntää uusille ratkaisuille, jotka tarjoavat mahdollisuuden määritellä pietsosähköisen energiankeruun tulevaisuuden suunnan.

7.2 Tutkimuksen rajoitukset ja jatkotutkimusehdotukset

Systemaattinen kirjallisuuskartoitus osoittautui helposti lähestyttäväksi ja suoraviivaiseksi menetelmäksi tutkimusongelman ratkaisemiseksi. Menetelmän ohjeistukset on kuvattu riittävällä tarkkuudella ja konkreettisia esimerkkejä niiden soveltamisesta käytännössä löytyy paljon. Tästä oli apua tutkimusprosessin suunnittelussa ja läpiviennissä.

Menetelmäohjeistuksessa korostettua tutkimusmenetelmän iteratiivisuutta sovellettiin erityisesti tutkimuksen alkuvaiheessa. Iteratiivisen prosessin avulla hakulauseesta saatiin toimiva ja tutkimuksen tavoitteisiin sopiva. Prosessiin liittyi kuitenkin omat haasteensa, kun pietsosähköiseen energian keräämiseen liittyvää kirjallisuutta löytyi niin runsaasti. Haasteena oli, että hakulauseen muodostamisessa jouduttiin tasapainottelemaan relevanttien artikkelien osumatarkkuuden ja haun tuottaman kokonaisartikkelimäärän välillä. Sopivan rajauksen löytäminen edellytti useita testihakuja, perehtymistä tutkimuskenttään sekä analyysia julkaistujen artikkeleiden erityispiirteistä. Tämä iteratiivinen hakulauseen kehittäminen oli työläs ja aikaavievä prosessi, mutta lopulta se varmisti, että käytettävä hakuprotokolla löytäisi oikeat artikkelit ja että tutkimuksen seuraavat vaiheet pysyivät hallittavissa.

Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen menetelmäohjeistuksen noudattamisen suurimmat haasteet liittyivät siihen, että tutkimus toteutettiin yksilötyönä. Yksin toteutettuna aineiston valinta ja tiedonkeruu jäivät täysin yhden näkökulman varaan. Menetelmän ohjeistuksessa tähän haasteeseen vastataan käytännössä usean tutkijan välisellä yhteistyöllä — mikä ei kuitenkaan ole aina mahdollista, varsinkaan jos tutkimus toteutetaan opinnäytteenä.

Tässä työssä aineiston valinnan ja tiedonkeruun objektiivisuutta pyrittiin parantamaan suunnittelemalla valintakriteerit ja tiedonkeruukaavio niin, että ne edellyttivät mahdollisimman eksplisiittisiä vastauksia. Näin artikkeleita tarkasteltiin puhtaasti suoraan tekstistä löytyvän informaation tasolla, mikä vähensi subjektiivisen tulkinnan tarvetta ja paransi tutkimuksen objektiivisuutta. Toisaalta tällainen eksplisiittinen tarkastelu tuo mukanaan myös omia rajoitteitaan, kuten edellytyksen artikkelien yhdenmukaisesta esitystavasta sekä haasteet monitulkintaisten termien osalta. Eksplisiittisiä vastauksia edellyttävä tutkimusprotokolla saattaa olla hyvä keino parantaa yksin toteutettavan systemaattisen kirjallisuuskartoituksen luotettavuutta, kunhan siihen liittyvät rajoitteet otetaan huomioon jo tutkimusongelman asettelussa. Oikein suunnitellulla tutkimusasetelmalla voidaan varmistaa, ettei tiuk-

ka kriteeristö ohjaa tutkimusta virheelliseen suuntaan tai rajaa keskeisiä artikkeleita aineiston ulkopuolelle. Valintakriteerien ja tiedonkeruuprotokollan soveltuvuutta voidaan arvioida iteratiivisesti ennen varsinaista kartoitusprosessia, esimerkiksi testihakujen yhteydessä.

Yksittäisen tutkijan suorittamaan tutkimukseen liittyy aina myös aika- ja resurs-sirajoitteita. Systemaattisessa kirjallisuuskartoituksessa nämä rajoitteet ovat melko selkeästi ennakoitavissa, sillä työmäärä ja ajankäyttö liittyvät suoraan läpikäytävien artikkeleiden lukumäärään. Työmäärään vaikuttavat myös valintakriteerien muotoilut ja tiedonkeruukaavion tietoalkioiden lukumäärä, jotka määrittävät sen, kuinka perusteellisesti artikkeleita käydään läpi. Tässä tutkielmassa tietoja kerättiin laajasti ottaen huomioon, että läpikäytäviä artikkeleita oli paljon (172 kpl). Lisäksi myös valintakriteerejä sovellettiin merkittävään määrään artikkeleita (977 kpl). Suuren työmäärän ja aikarajoitteiden vuoksi menetelmäohjeistuksessa esitetty lumipallotekniikka jätettiin kokonaan tutkimusprosessin ulkopuolelle. Lumipallotekniikka olisi saattanut kuitenkin olla toteutettavissa kohtuullisen työmäärän puitteis-sa, mikäli suunnitteluvaiheen priorisoinnissa olisi suhteutettu tietoalkioiden määrä läpikäytävien artikkeleiden lukumäärään. On tärkeää huomioida, että artikkeleista kerättävän informaation laajuus vaikuttaa myös tulosten analysointivaiheen työ-määrään. Yksin toteutettuna tutkimusmenetelmän suhteen on siis tarpeellista arvioida, millaiseen tärkeysjärjestykseen eri vaiheet asetetaan ja saadaanko esimerkiksi tärkeimmät tutkimusalueeseen kuuluvat artikkelit mukaan ilman lumipallo-tekniikkaa.

Systemaattisissa kirjallisuuskartoituksissa ilmenee myös sekundääritutkimuk-sille yleisesti tyypillisiä haasteita, kun tutkimus perustuu pääasiassa alkuperäisar-tikkeleihin ja niissä raportoituun tietoon. Tämän haasteen vuoksi tutkielmassa ei kartoitettu ympäristöystävällisiä pietsosähköisiä materiaaleja sinänsä, vaan tarkas-telu rajoittui ekologisuuden osalta kielellisen havainnoinnin tasolle: mitkä ovat niitä materiaaleja, joiden yhteydessä ympäristöystävällisyyden käsitteeseen liittyviä ter-mejä esiintyy? Tämä lähes tekstianalyysiä muistuttava menetelmä osoittautui lopul-ta erittäin toimivaksi tavaksi havainnollistaa ympäristönäkökulmiin liittyviä tren-dejä aineistossa, jossa ympäristöystävällisyys oli valmiiksi korostunut lähtökohta. Systemaattista kirjallisuuskartoitusta voidaan siis pitää käteväenä menetelmänä, kun halutaan selvittää, millaisia asioita ympäristökäsitteiden yhteydessä korostetaan tai markkinoidaan. Tulevaisuuden kannalta tällainen informaatio saattaa auttaa var-mistamaan, että kehitys on ja pysyy oikeansuuntaisena.

Jatkoa ajatellen ympäristöystävällisessä pietsosähköisessä energiankeruussa on vielä paljon tutkittavaa ja tehtävää. Energiankeruun tarjoamat ratkaisut paristojäteistä aiheutuviin haasteisiin eivät välttämättä ole täysin yksiselitteisiä tai helposti sovellettavia. Lisäksi energiankeruussa käytettyjen materiaalien ympäristövaikutuksilla on myös oma roolinsa, varsinkin jos laitteita ei voida kierrättää tai ne päätyvät elinkaarensa loppuvaiheessa luontoon. Tämän tutkimuksen perusteella pietsosähköisten materiaalien todellista ekologisuutta ei ole arvioitu riittävän kattavasti, vaan alan ympäristönäkökulma painottuu ennen kaikkea lyijyttömyyteen. Jatkotutkimuksena olisi arvokasta selvittää ja luokitella erilaisten pietsosähköisten materiaalien ympäristöprofiileja, esimerkiksi elinkaariarviointeja kartoittamalla. Näin saataisiin merkityksellistä tietoa siitä, mihin suuntaan materiaalien kehityksessä kannattaisi edetä. Tutkimuskentän kehityssuuntien seuraaminen on erityisen tärkeää juuri nyt, kun ”kultaryhtäys” lyijypohjaisen PZT-keramiin korvaamiseksi on jo käynnissä.

Lähteet

- [1] AABID, A., RAHEMAN, M. A., IBRAHIM, Y. E., ANJUM, A., HRAIRI, M., PARVEEZ, B., PARVEEN, N., JA MOHAMMED ZAYAN, J. A systematic review of piezoelectric materials and energy harvesters for industrial applications. *Sensors* 21, 12 (2021), 4145.
- [2] ABO-ZAHHAD, M., FARRAG, M., JA ALI, A. A comparative study of energy consumption sources for wireless sensor networks. *International Journal of Grid Distribution Computing* 8, 3 (2015), 65–76.
- [3] ADU-MANU, K. S., ADAM, N., TAPPARELLO, C., AYATOLLAHI, H., JA HEINZELMAN, W. Energy-harvesting wireless sensor networks (eh-wsns) a review. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 14, 2 (2018), 1–50.
- [4] AKYILDIZ, I. F., SU, W., SANKARASUBRAMANIAM, Y., JA CAYIRCI, E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine* 40, 8 (2002), 102–114.
- [5] ALI, N. B., JA PETERSEN, K. Evaluating strategies for study selection in systematic literature studies. Julkaisusarjassa *Proceedings of the 8th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement* (New York, NY, USA, 2014), ESEM '14, Association for Computing Machinery.
- [6] ALI, O., ISHAK, M. K., OOI, C. A., JA BHATTI, M. K. L. Battery characterization for wireless sensor network applications to investigate the effect of load on surface temperatures. *Royal Society Open Science* 9, 2 (2022), 210870.
- [7] ANTON, S. R., JA SODANO, H. A. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart materials and Structures* 16, 3 (2007).
- [8] APC INTERNATIONAL, LTD. Restriction of Hazardous Substances (RoHS) Exemption for Lead Update. URL <https://www.americanpiezo.com/blog/rohs-exemption-for-lead-update/>, viitattu 9.2.2024.
- [9] ARKSEY, H., JA O'MALLEY, L. Scoping studies: towards a methodological framework. *International journal of social research methodology* 8, 1 (2005), 19–32.

- [10] ASHTON, K. That 'internet of things' thing. *RFID journal* 22, 7 (2009), 97–114.
- [11] BAIRAGI, S., SHAHADAT, M., MULVIHILL, D. M., ALI, W., ET AL. Mechanical energy harvesting and self-powered electronic applications of textile-based piezoelectric nanogenerators: A systematic review. *Nano Energy* (2023), 108414.
- [12] BAKER, J., ROUNDY, S., JA WRIGHT, P. Alternative geometries for increasing power density in vibration energy scavenging for wireless sensor networks. *Julkaisusarjassa 3rd international energy conversion engineering conference* (2005), 5617.
- [13] BEEBY, S. P., TUDOR, M. J., JA WHITE, N. M. Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. *Measurement Science and Technology* 17, 12 (oct 2006), R175.
- [14] BRISCOE, J., JA DUNN, S. Piezoelectricity and ferroelectricity. *Kirjassa Nanostructured Piezoelectric Energy Harvesters*. Springer, 2014, luku 2, ss. 3–17.
- [15] BRISCOE, J., JA DUNN, S. Piezoelectric nanogenerators—a review of nanostructured piezoelectric energy harvesters. *Nano Energy* 14 (2015), 15–29.
- [16] BUDGEN, D., TURNER, M., BRERETON, P., JA KITCHENHAM, B. A. Using mapping studies in software engineering. *Julkaisusarjassa PPIG* (2008), vol. 8, 195–204.
- [17] CADY, W. G. *Piezoelectricity: An Introduction to the Theory and Applications of Electromechanical Phenomena in Crystals*, 1 ed. McGraw-Hill Book Company, 1946.
- [18] CALIÒ, R., RONGALA, U. B., CAMBONI, D., MILAZZO, M., STEFANINI, C., DE PETRIS, G., JA ODDO, C. M. Piezoelectric energy harvesting solutions. *Sensors* 14, 3 (2014), 4755–4790.
- [19] CHALLA, V. R., PRASAD, M., JA FISHER, F. T. Towards an autonomous self-tuning vibration energy harvesting device for wireless sensor network applications. *Smart Materials and Structures* 20, 2 (2011), 025004.
- [20] CHANDRASEKARAN, S., BOWEN, C., ROSCOW, J., ZHANG, Y., DANG, D. K., KIM, E. J., MISRA, R., DENG, L., CHUNG, J. S., JA HUR, S. H. Micro-scale to

- nano-scale generators for energy harvesting: Self powered piezoelectric, triboelectric and hybrid devices. *Physics Reports* 792 (2019), 1–33.
- [21] CHEN, J., LI, K., LIU, C., LI, M., LV, Y., JIA, L., JA JIANG, S. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures. *Energies* 10, 9 (2017).
- [22] CHEN, Y., ZHANG, Y., ZHANG, L., DING, F., JA SCHMIDT, O. G. Scalable single crystalline pmn-pt nanobelts sculpted from bulk for energy harvesting. *Nano Energy* 31 (2017), 239–246.
- [23] CLEMENTI, G., COTTONE, F., DI MICHELE, A., GAMMAITONI, L., MATTARELLI, M., PERNA, G., LÓPEZ-SUÁREZ, M., BAGLIO, S., TRIGONA, C., JA NERI, I. Review on innovative piezoelectric materials for mechanical energy harvesting. *Energies* 15, 17 (2022).
- [24] COVACI, C., JA GONTEAN, A. Piezoelectric energy harvesting solutions: A review. *Sensors* 20, 12 (2020), 3512.
- [25] DIREKTIIVI (EU) 2002/95/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2002/95/EY, annettu 27 päivänä tammikuuta 2003, tiettyjen vaarallisten aineiden käytön rajoittamisesta sähkö- ja elektroniikkalaitteissa, 2003. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32002L0095>, viitattu 9.2.2024.
- [26] DIREKTIIVI (EU) 2018/736. Komission delegoitu direktiivi (EU) 2018/736, annettu 27 päivänä helmikuuta 2018, Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2011/65/EU liitteen III muuttamisesta sen mukauttamiseksi tieteen ja tekniikan kehitykseen tiettyjä lyijyä lasissa tai keraamisessa aineessa sisältäviä sähkö- ja elektroniikkakomponentteja koskevan poikkeuksen osalta (ETA:n kannalta merkityksellinen teksti.), 2018. URL <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0736>, viitattu 9.2.2024.
- [27] EATON. *KW Supercapacitors – datasheet*, 2023. URL <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electronic-components/resources/datasheet/eaton-kw-supercapacitors-coincells-datasheet.pdf>, viitattu 9.2.2024.

- [28] ELVIN, N., JA ERTURK, A. Introduction and methods of mechanical energy harvesting. Kirjassa *Advances in energy harvesting methods*, N. Elvin ja A. Erturk, Eds. Springer, 2013, luku 1, ss. 3–14.
- [29] ENABLES. Position paper. URL <https://www.enables-project.eu/outputs/position-paper/>, viitattu 9.2.2024.
- [30] ERTURK, A., JA INMAN, D. Two-stage energy harvesting circuits: Dc-dc conversion for impedance matching. Kirjassa *Piezoelectric Energy Harvesting*, 1 ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2011, ss. 331–336.
- [31] FEYER, S., SIEBERT, S., GIPP, B., AIZAWA, A., JA BEEL, J. Integration of the scientific recommender system mr. dlib into the reference manager jabref. Julkaisusarjassa *Advances in Information Retrieval: 39th European Conference on IR Research, ECIR 2017, Aberdeen, UK, April 8-13, 2017, Proceedings 39* (2017), Springer, 770–774.
- [32] FU, J., HOU, Y., GAO, X., ZHENG, M., JA ZHU, M. Highly durable piezoelectric energy harvester based on a pvdf flexible nanocomposite filled with oriented bati2o5 nanorods with high power density. *Nano Energy* 52 (2018), 391–401.
- [33] GAO, X., QIU, C., LI, G., MA, M., YANG, S., XU, Z., JA LI, F. High output power density of a shear-mode piezoelectric energy harvester based on pb (in1/2nb1/2) o3-pb (mg1/3nb2/3) o3-pbtio3 single crystals. *Applied Energy* 271 (2020), 115193.
- [34] GHAZANFARIAN, J., MOHAMMADI, M. M., JA UCHINO, K. Piezoelectric energy harvesting: A systematic review of reviews. *Actuators* 10, 12 (2021).
- [35] GREENGARD, S. *The Internet of Things, revised and updated edition*. The MIT Press Essential Knowledge series. MIT Press, 2021.
- [36] GUBBI, J., BUYYA, R., MARUSIC, S., JA PALANISWAMI, M. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems* 29, 7 (2013), 1645–1660.
- [37] GUPTA, B. B., JA QUAMARA, M. An overview of internet of things (iot): Architectural aspects, challenges, and protocols. *Concurrency and Computation: Practice and Experience* 32, 21 (2020), e4946.

- [38] HAO, J., LI, W., ZHAI, J., JA CHEN, H. Progress in high-strain perovskite piezoelectric ceramics. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 135 (2019), 1–57.
- [39] HARB, A. Energy harvesting: State-of-the-art. *Renewable Energy* 36, 10 (2011), 2641–2654.
- [40] HAZERI, S., JA MULLIGAN, C. N. Energy harvesting by piezo-tires and their life cycle assessment. *AIP Advances* 12, 6 (06 2022), 065112.
- [41] HE, J., WEN, T., QIAN, S., ZHANG, Z., TIAN, Z., ZHU, J., MU, J., HOU, X., GENG, W., CHO, J., ET AL. Triboelectric-piezoelectric-electromagnetic hybrid nanogenerator for high-efficient vibration energy harvesting and self-powered wireless monitoring system. *Nano energy* 43 (2018), 326–339.
- [42] HEHN, T., JA MANOLI, Y. *CMOS Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters: Efficient Power Extraction, Interface Modeling and Loss Analysis*. Springer, 2015.
- [43] HELLWEG, S., JA MILÀ I CANALS, L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. *Science* 344, 6188 (2014), 1109–1113.
- [44] HUET, F., BOITIER, V., JA SEGUIER, L. Tunable piezoelectric vibration energy harvester with supercapacitors for wsn in an industrial environment. *IEEE Sensors Journal* 22, 15 (2022), 15373–15384.
- [45] IBN-MOHAMMED, T., KOH, S., REANEY, I., ACQUAYE, A., WANG, D., TAYLOR, S., JA GENOVESE, A. Integrated hybrid life cycle assessment and supply chain environmental profile evaluations of lead-based (lead zirconate titanate) versus lead-free (potassium sodium niobate) piezoelectric ceramics. *Energy & Environmental Science* 9, 11 (2016), 3495–3520.
- [46] IBN-MOHAMMED, T., KOH, S., REANEY, I., SINCLAIR, D., MUSTAPHA, K., ACQUAYE, A., JA WANG, D. Are lead-free piezoelectrics more environmentally friendly? *MRS Communications* 7, 1 (2017), 1–7.
- [47] IOT ANALYTICS. State of iot 2023: Number of connected iot devices growing 16% to 16.7 billion globally, 5 2023. URL <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>, viitattu 9.2.2021.
- [48] JAFFE, B., COOK, W. R., JA JAFFE, H. *Piezoelectric Ceramics*. Academic Press, 1971.

- [49] JAYAKUMAR, H., LEE, K., LEE, W. S., RAHA, A., KIM, Y., JA RAGHUNATHAN, V. Powering the internet of things. *Julkaisusarjassa Proceedings of the 2014 international symposium on Low power electronics and design* (2014), 375–380.
- [50] JOUHARA, H., ABNIESKA GÓRA, A., KHORDEHGAH, N., DORAGHI, Q., AHMAD, L., NORMAN, L., AXCELL, B., WROBEL, L., JA DAI, S. Thermoelectric generator (teg) technologies and applications. *International Journal of Thermofluids* 9 (2021), 100063.
- [51] KARAN, S. K., MAITI, S., PARIA, S., MAITRA, A., SI, S. K., KIM, J. K., JA KHATUA, B. B. A new insight towards eggshell membrane as high energy conversion efficient bio-piezoelectric energy harvester. *Materials today energy* 9 (2018), 114–125.
- [52] KHAJURIA, R., JA GUPTA, S. Energy optimization and lifetime enhancement techniques in wireless sensor networks: A survey. *Julkaisusarjassa International Conference on Computing, Communication & Automation* (2015), IEEE, 396–402.
- [53] KHALILI, M., BITEN, A. B., VISHWAKARMA, G., AHMED, S., JA PAPAGIANNAKIS, A. Electro-mechanical characterization of a piezoelectric energy harvester. *Applied Energy* 253 (2019), 113585.
- [54] KIM, H. S., KIM, J.-H., JA KIM, J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International journal of precision engineering and manufacturing* 12 (2011), 1129–1141.
- [55] KIM, J. H., CHO, J. Y., JHUN, J. P., SONG, G. J., EOM, J. H., JEONG, S., HWANG, W., WOO, M. S., JA SUNG, T. H. Development of a hybrid type smart pen piezoelectric energy harvester for an iot platform. *Energy* 222 (2021), 119845.
- [56] KITCHENHAM, B. Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University* 33, 2004 (2004), 1–26.
- [57] KITCHENHAM, B., JA BRERETON, P. A systematic review of systematic review process research in software engineering. *Information and Software Technology* 55, 12 (2013), 2049–2075.

- [58] KITCHENHAM, B. A., JA CHARTERS, S. *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. Raportti EBSE 2007-001, Keele University and Durham University Joint Report, 07 2007.
- [59] KRISHNAMOORTHY, K., PAZHAMALAI, P., MANOHARAN, S., LIYAKATH ALI, N. U. H., JA KIM, S.-J. Recent trends, challenges, and perspectives in piezoelectric-driven self-chargeable electrochemical supercapacitors. *Carbon Energy* 4, 5 (2022), 833–855.
- [60] KUANG, Y., DANIELS, A., JA ZHU, M. A sandwiched piezoelectric transducer with flex end-caps for energy harvesting in large force environments. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50, 34 (2017), 345501.
- [61] LI, H., TIAN, C., JA DENG, Z. D. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. *Applied physics reviews* 1, 4 (2014).
- [62] LI, L. Rectifying the output of vibrational piezoelectric energy harvester using quantum dots. *Scientific Reports* 7, 1 (2017), 44859.
- [63] LI, L., XU, J., LIU, J., JA GAO, F. Recent progress on piezoelectric energy harvesting: structures and materials. *Advanced Composites and Hybrid Materials* 1 (2018), 478–505.
- [64] LI, S., CROVETTO, A., PENG, Z., ZHANG, A., HANSEN, O., WANG, M., LI, X., JA WANG, F. Bi-resonant structure with piezoelectric pvdf films for energy harvesting from random vibration sources at low frequency. *Sensors and Actuators A: Physical* 247 (2016), 547–554.
- [65] LI, T., JA LEE, P. S. Piezoelectric energy harvesting technology: from materials, structures, to applications. *Small Structures* 3, 3 (2022), 2100128.
- [66] LIANG, H., HAO, G., JA OLSZEWSKI, O. Z. A review on vibration-based piezoelectric energy harvesting from the aspect of compliant mechanisms. *Sensors and Actuators A: Physical* 331 (2021), 112743.
- [67] LIU, H., FU, H., SUN, L., LEE, C., JA YEATMAN, E. M. Hybrid energy harvesting technology: From materials, structural design, system integration to applications. *Renewable and sustainable energy reviews* 137 (2021), 110473.

- [68] LIU, H., HUA, R., LU, Y., WANG, Y., SALMAN, E., JA LIANG, J. Boosting the efficiency of a footstep piezoelectric-stack energy harvester using the synchronized switch technology. *Journal of intelligent material systems and structures* 30, 6 (2019), 813–822.
- [69] LIU, H., ZHONG, J., LEE, C., LEE, S.-W., JA LIN, L. A comprehensive review on piezoelectric energy harvesting technology: Materials, mechanisms, and applications. *Applied Physics Reviews* 5, 4 (2018).
- [70] MA, X., JA ZHOU, S. A review of flow-induced vibration energy harvesters. *Energy Conversion and Management* 254 (2022), 115223.
- [71] MAHARJAN, P., BHATTA, T., RASEL, M. S., SALAUDDIN, M., RAHMAN, M. T., JA PARK, J. Y. High-performance cycloid inspired wearable electromagnetic energy harvester for scavenging human motion energy. *Applied Energy* 256 (2019), 113987.
- [72] MAHMUD, M. P., HUDA, N., FARJANA, S. H., JA LANG, C. Environmental profile evaluations of piezoelectric polymers using life cycle assessment. *Julkaisusarjassa IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (2018), vol. 154, IOP Publishing, 012017.
- [73] MAITI, S., KARAN, S. K., KIM, J. K., JA KHATUA, B. B. Nature driven bio-piezoelectric/triboelectric nanogenerator as next-generation green energy harvester for smart and pollution free society. *Advanced Energy Materials* 9, 9 (2019), 1803027.
- [74] MAXWELL, J. Understanding and validity in qualitative research. *Harvard educational review* 62, 3 (1992), 279–301.
- [75] MILICHKO, V. A., SHALIN, A. S., MUKHIN, I. S., KOVROV, A. E., KRASILIN, A. A., VINOGRADOV, A. V., BELOV, P. A., JA SIMOVSKI, C. R. Solar photovoltaics: current state and trends. *Physics-Usp ekhi* 59, 8 (2016), 727.
- [76] MISHRA, S., UNNIKRISHNAN, L., NAYAK, S. K., JA MOHANTY, S. Advances in piezoelectric polymer composites for energy harvesting applications: a systematic review. *Macromolecular Materials and Engineering* 304, 1 (2019), 1800463.

- [77] MITCHESON, P. D., YEATMAN, E. M., RAO, G. K., HOLMES, A. S., JA GREEN, T. C. Energy harvesting from human and machine motion for wireless electronic devices. *Proceedings of the IEEE* 96, 9 (2008), 1457–1486.
- [78] MOHAMAD, T. N. T., SAMPE, J., JA BERHANUDDIN, D. D. Architecture of micro energy harvesting using hybrid input of rf, thermal and vibration for semi-active rfid tag. *Engineering Journal* 21, 2 (2017), 183–197.
- [79] MORETTI, G., ROSSET, S., VERTECHY, R., ANDERSON, I., JA FONTANA, M. A review of dielectric elastomer generator systems. *Advanced Intelligent Systems* 2, 10 (2020), 2000125.
- [80] MOSENIA, A., JA JHA, N. K. A comprehensive study of security of internet-of-things. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing* 5, 4 (2017), 586–602.
- [81] NAPOLEÃO, B., FELIZARDO, K. R., DE SOUZA, É. F., JA VIJAYKUMAR, N. L. Practical similarities and differences between systematic literature reviews and systematic mappings: a tertiary study. Julkaisusarjassa *SEKE* (2017), vol. 2017, 85–90.
- [82] NARITA, F., JA FOX, M. A review on piezoelectric, magnetostrictive, and magnetoelectric materials and device technologies for energy harvesting applications. *Advanced Engineering Materials* 20, 5 (2018), 1700743.
- [83] O. CARVALHO, E., FERNANDES, L., COSTA, C., JA LANCEROS-MÉNDEZ, S. Piezoelectric polymer composites for sensors and actuators. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (01 2020).
- [84] OPETUS- JA KULTTUURIMINISTERIÖ. Opetus- ja kulttuuriministeriön julkaisutyypiluokittelu. Käsikirja 2010, 2010. URL <https://www.ulapland.fi/loader.aspx?id=73f8ab70-c5e9-49e2-ba13-54dc489d956a>, viitattu 9.2.2024.
- [85] ORREGO, S., SHOELE, K., RUAS, A., DORAN, K., CAGGIANO, B., MITTAL, R., JA KANG, S. H. Harvesting ambient wind energy with an inverted piezoelectric flag. *Applied energy* 194 (2017), 212–222.

- [86] PETERSEN, K., FELDT, R., MUJTABA, S., JA MATTSSON, M. Systematic mapping studies in software engineering. *Julkaisusarjassa 12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE) 12* (2008), 1–10.
- [87] PETERSEN, K., VAKKALANKA, S., JA KUZNIARZ, L. Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. *Information and software technology* 64 (2015), 1–18.
- [88] PETTICREW, M., JA ROBERTS, H. *Systematic reviews in the social sciences: A practical guide*. John Wiley & Sons, 2008.
- [89] POPLAVKO, Y., JA YAKYMENKO, Y. *Functional Dielectrics for Electronics: Fundamentals of Conversion Properties*. Woodhead Publishing, 2020.
- [90] PRAUZEK, M., KONECNY, J., BOROVA, M., JANOSOVA, K., HLAVICA, J., JA MUSILEK, P. Energy harvesting sources, storage devices and system topologies for environmental wireless sensor networks: A review. *Sensors* 18, 8 (2018), 2446.
- [91] PRIYA, S. Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. *Journal of electroceramics* 19 (2007), 167–184.
- [92] RAHMANI, H., SHETTY, D., WAGIH, M., GHASEMPOUR, Y., PALAZZI, V., CARVALHO, N. B., CORREIA, R., COSTANZO, A., VITAL, D., ALIMENTI, F., ET AL. Next-generation iot devices: Sustainable eco-friendly manufacturing, energy harvesting, and wireless connectivity. *IEEE Journal of Microwaves* 3, 1 (2023), 237–255.
- [93] ROUNDY, S., JA WRIGHT, P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and structures* 13, 5 (2004), 1131.
- [94] SAFAEI, M., SODANO, H. A., JA ANTON, S. R. A review of energy harvesting using piezoelectric materials: state-of-the-art a decade later (2008–2018). *Smart materials and structures* 28, 11 (2019), 113001.
- [95] SAFAK, M. Wireless sensor and communication nodes with energy harvesting. *Journal of Communication, Navigation, Sensing and Services (CONASENSE)* 1, 1 (2014), 47–66.

- [96] SAFARI, A., JA AKDOĞAN, E. Piezoelectric composites by solid freeform fabrication: A nature-inspired approach. Kirjassa *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*, W. Heywang, K. Lubitz, ja W. Wersing, Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ss. 377–399.
- [97] SAFARI, A., JADIDIAN, B., JA AKDOĞAN, E. *Piezoelectric Composites for Transducer Applications*. Elsevier, 12 2000, ss. 533–561.
- [98] SANISLAV, T., MOIS, G. D., ZEADALLY, S., JA FOLEA, S. C. Energy harvesting techniques for internet of things (iot). *IEEE Access* 9 (2021), 39530–39549.
- [99] SARAVANAKUMAR, B., SOYOON, S., JA KIM, S.-J. Self-powered ph sensor based on a flexible organic–inorganic hybrid composite nanogenerator. *ACS applied materials & interfaces* 6, 16 (2014), 13716–13723.
- [100] SEZER, N., JA KOÇ, M. A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting. *Nano Energy* 80 (2021), 105567.
- [101] SHAIKH, F. K., JA ZEADALLY, S. Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55 (2016), 1041–1054.
- [102] SHIRVANIMOGHADDAM, M., SHIRVANIMOGHADDAM, K., ABOLHASANI, M. M., FARHANGI, M., BARSARI, V. Z., LIU, H., DOHLER, M., JA NAEBE, M. Towards a green and self-powered internet of things using piezoelectric energy harvesting. *IEEE Access* 7 (2019), 94533–94556.
- [103] SIDDIQUI, S., KIM, D.-I., NGUYEN, M. T., MUHAMMAD, S., YOON, W.-S., LEE, N.-E., ET AL. High-performance flexible lead-free nanocomposite piezoelectric nanogenerator for biomechanical energy harvesting and storage. *Nano Energy* 15 (2015), 177–185.
- [104] SINGH, B., PADHA, B., VERMA, S., SATAPATHI, S., GUPTA, V., JA ARYA, S. Recent advances, challenges, and prospects of piezoelectric materials for self-charging supercapacitor. *Journal of Energy Storage* 47 (2022), 103547.
- [105] SMITH, M., JA KAR-NARAYAN, S. Piezoelectric polymers: Theory, challenges and opportunities. *International Materials Reviews* 67, 1 (2022), 65–88.

- [106] SODANO, H. A., INMAN, D. J., JA PARK, G. A review of power harvesting from vibration using piezoelectric materials. *Shock and Vibration Digest* 36, 3 (2004), 197–206.
- [107] SRIPHAN, S., JA VITTAYAKORN, N. Hybrid piezoelectric-triboelectric nanogenerators for flexible electronics: Recent advances and perspectives. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 7, 3 (2022), 100461.
- [108] STATISTA. Number of internet of things (iot) connected devices worldwide from 2019 to 2021, with forecasts from 2022 to 2030, 2022. URL <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>, viitattu 9.2.2024.
- [109] STATISTA. Internet of things (iot) and non-iot active device connections worldwide from 2010 to 2025, 2023. URL <https://www.statista.com/statistics/1101442/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>, viitattu 22.1.2024.
- [110] STEELE, S. E. Bibliographic citation management software as a tool for building knowledge. *Journal of Wound Ostomy & Continence Nursing* 35, 5 (2008), 463–468.
- [111] STMICROELECTRONICS N.V. *Ultra-low-power 32-bit MCU Arm-based Cortex-M3 with 512KB Flash, 80KB SRAM, 16KB EEPROM, LCD, USB, ADC, DAC – STM32 datasheet*, 2021. URL <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l151qe.pdf>, viitattu 9.2.2024.
- [112] SUDEVALAYAM, S., JA KULKARNI, P. Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 13, 3 (2011), 443–461.
- [113] SUKUMARAN, S., CHATBOURI, S., ROUXEL, D., TISSERAND, E., THIEBAUD, F., JA BEN ZINEB, T. Recent advances in flexible pvdf based piezoelectric polymer devices for energy harvesting applications. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 32, 7 (2021), 746–780.
- [114] SULTANA, A., ALAM, M. M., PAVLOPOULOU, E., SOLANO, E., BERGGREN, M., CRISPIN, X., JA ZHAO, D. Toward high-performance green piezoelectric generators based on electrochemically poled nanocellulose. *Chemistry of Materials* 35, 4 (2023), 1568–1578.

- [115] SUN, Y., CHEN, J., LI, X., LU, Y., ZHANG, S., JA CHENG, Z. Flexible piezoelectric energy harvester/sensor with high voltage output over wide temperature range. *Nano Energy* 61 (2019), 337–345.
- [116] SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS. Elinkaariarviointi tukee kestävyysmurrosta. URL <https://www.syke.fi/elinkaariarviointi>, viitattu 9.2.2024.
- [117] TANG, M., GUAN, Q., WU, X., ZENG, X., ZHANG, Z., JA YUAN, Y. A high-efficiency multidirectional wind energy harvester based on impact effect for self-powered wireless sensors in the grid. *Smart Materials and Structures* 28, 11 (2019), 115022.
- [118] TEXAS INSTRUMENTS. EU RoHS Exemption and expiration statement. URL <https://www.ti.com/lit/cr/szzq119j/szzq119j.pdf?ts=1694400765361>, viitattu 9.2.2024.
- [119] TRAN, L.-G., CHA, H.-K., JA PARK, W.-T. Rf power harvesting: a review on designing methodologies and applications. *Micro and Nano Systems Letters* 5 (2017), 1–16.
- [120] UCHINO, K. The development of piezoelectric materials and the new perspective. Kirjassa *Advanced piezoelectric materials: Science and technology*, K. Uchino, Ed. Woodhead Publishing, 2017, luku 1, ss. 1–82.
- [121] WEI, C., JA JING, X. A comprehensive review on vibration energy harvesting: Modelling and realization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017), 1–18.
- [122] WEI, H., WANG, H., XIA, Y., CUI, D., SHI, Y., DONG, M., LIU, C., DING, T., ZHANG, J., MA, Y., ET AL. An overview of lead-free piezoelectric materials and devices. *Journal of Materials Chemistry C* 6, 46 (2018), 12446–12467.
- [123] WERSING, W. Small signal resonance methods. Kirjassa *Piezoelectricity: Evolution and Future of a Technology*, W. Heywang, K. Lubitz, ja W. Wersing, Eds. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, ss. 423–444.
- [124] WIERINGA, R., MAIDEN, N., MEAD, N., JA ROLLAND, C. Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion. *Requir. Eng.* 11 (03 2006), 102–107.

- [125] WU, C., WANG, A. C., DING, W., GUO, H., JA WANG, Z. L. Triboelectric nanogenerator: a foundation of the energy for the new era. *Advanced Energy Materials* 9, 1 (2019), 1802906.
- [126] WU, L., DO, X.-D., LEE, S.-G., JA HA, D. S. A self-powered and optimal sshi circuit integrated with an active rectifier for piezoelectric energy harvesting. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 64, 3 (2016), 537–549.
- [127] WU, L., ZHU, P., JA XIE, M. A self-powered hybrid sshi circuit with a wide operation range for piezoelectric energy harvesting. *Sensors* 21, 2 (2021), 615.
- [128] WU, Y., MA, Y., ZHENG, H., JA RAMAKRISHNA, S. Piezoelectric materials for flexible and wearable electronics: A review. *Materials & Design* 211 (2021), 110164.
- [129] YANG, G., JA PARK, S.-J. Deformation of single crystals, polycrystalline materials, and thin films: A review. *Materials* 12, 12 (2019), 2003.
- [130] YU, H., ZHOU, J., DENG, L., JA WEN, Z. A vibration-based mems piezoelectric energy harvester and power conditioning circuit. *Sensors* 14, 2 (2014), 3323–3341.
- [131] ZEADALLY, S., SHAIKH, F. K., TALPUR, A., JA SHENG, Q. Z. Design architectures for energy harvesting in the internet of things. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 128 (2020), 109901.
- [132] ZHANG, H., JEONG, C. K., SHEN, Z., WANG, J., SUN, H., JIAN, Z., CHEN, W., JA ZHANG, Y. Ultrahigh augmentation of flexible composite-based piezoelectric energy harvesting efficiency via polymer-impregnated nanoparticles network within 3d cellulose scaffold. *Composites Part B: Engineering* 236 (2022), 109813.
- [133] ZHANG, Y., ZHANG, Y., XUE, X., CUI, C., HE, B., NIE, Y., DENG, P., JA WANG, Z. L. PvdF-pzt nanocomposite film based self-charging power cell. *Nanotechnology* 25, 10 (2014), 105401.
- [134] ZHOU, W., DU, D., CUI, Q., LU, C., WANG, Y., JA HE, Q. Recent research progress in piezoelectric vibration energy harvesting technology. *Energies* 15, 3 (2022).

- [135] ZHOU, X., PARIDA, K., HALEVI, O., LIU, Y., XIONG, J., MAGDASSI, S., JA LEE, P. S. All 3d-printed stretchable piezoelectric nanogenerator with non-protruding kirigami structure. *Nano Energy* 72 (2020), 104676.

A Tutkimuksen validiteetin tarkistuslista ja arviointirubriikit

Taulukko A.1: Validiteetin arviointi Petersenin et al. [87] tarkistuslistan mukaisesti.

Phase	Actions	Applied
Need for map	Motivate the need and relevance	!
	Define objectives and questions	!
	Consult with target audience to define questions	
Study ident.	Choosing search strategy	
	Snowballing	
	Manual	
	Conduct database search	!
	Develop the search	
	PICO	!
	Consult librarians or experts	
	Iteratively try finding more relevant papers	
	Keywords from known papers	
	Use standards, encyclopedias, and thesaurus	
	Evaluate the search	
	Test-set of known papers	!
	Expert evaluates result	
	Search web-pages of key authors	
	Test-retest	
Inclusion and Exclusion		
Identify objective criteria for decision	!	
Add additional reviewer, resolve disagreements between them when needed		
Decision rules		
Data extr. and class.	Extraction process	
	Identify objective criteria for decision	!
	Obscuring information that could bias	
	Add additional reviewer, resolve disagreements between them when needed	
	Test-retest	
	Classification scheme	
	Research type	!
	Research method	
Venue type	!	
Validity discussion	Validity discussion/limitations provided	!

Taulukko A.2: Systemaattisen kirjallisuuskartoituksen tarpeen arviointi Petersenin et al. [87] arviointirubriikin mukaisesti.

Evaluation	Description	Score
No description	The study is not motivated and the goal is not stated	0
Partial evaluation	Motivations and questions are provided	<u>1</u>
Full evaluation	Motivations and questions are provided, and have been defined in correspondence with target audience	2

Taulukko A.3: Hakustrategian arviointi Petersenin et al. [87] arviointirubriikin mukaisesti.

Evaluation	Description	Score
No description	Only one type of search has been conducted	<u>0</u>
Minimal evaluation	Two search strategies have been used	1
Full evaluation	All three search strategies have been used	2

Taulukko A.4: Haun arviointi Petersenin et al. [87] arviointirubriikin mukaisesti.

Evaluation	Description	Score
No description	No actions have been reported to improve the reliability of the search and inclusion/exclusion	0
Minimal evaluation	At least one action has been taken to improve the reliability of the search xor the reliability of the inclusion/exclusion	<u>1</u>
Partial evaluation	At least one action has been taken to improve the reliability of the search and the inclusion/ exclusion	2
Full evaluation	All actions identified have been taken	3

Taulukko A.5: Tiedonkeruun ja luokittelun arviointi Petersenin et al. [87] arviointi-rubriikin mukaisesti.

Evaluation	Description	Score
No description	No actions have been reported to improve on the extraction process or enable comparability between studies through the use of existing classifications	0
Minimal evaluation	At least one action has been taken to increase the reliability of the extraction process	<u>1</u>
Partial evaluation	At least one action has been taken to increase the reliability of the extraction process, and research type and method have been classified	2
Full evaluation	All actions identified have been taken	3

Taulukko A.6: Tutkimuksen validiteetin arviointi Petersenin et al. [87] arviointi-rubriikin mukaisesti.

Evaluation	Description	Score
No description	No threats or limitations are described	0
Full evaluation	Threats and limitations are described	<u>1</u>

B Pietsosähköisten materiaalien sanasto

AlN	Alumiininitridi
BCT	Barium kalsium titaani,
BCT-BZT	Barium titaani barium zirkonium kalsium titaani sekoitus, $82\text{BaTiO}_3-10\text{BaZrO}_3-8\text{CaTiO}_3$
BCTZ	Barium kalsium titaani zirkonium, $\text{Ba}_{0.85}\text{Ca}_{0.15}\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}\text{O}_3$
BCZT	Barium kalsium zirkonium titaani, $(\text{Ba}, \text{Ca})(\text{Zr}, \text{Ti})\text{O}_3$
BLF-PT	Vismutti lantaani rauta lyijy titaani sekoitus, $0.57\text{Bi}_{0.8}\text{La}_{0.2}\text{FeO}_3-0.43\text{PbTiO}_3$
BTO	Barium titaani, BaTiO_3
BZT	Barium zirkonium titaani, BaZrTiO_3
CsPbBr3	Cesium lyijy bromi
CsPbCl3	Cesium lyijy kloridi
FAPbBr2I	Formamidiini lyijy bromi jodi
FASnBr3	Formamidiini tina bromi
Kitosaani	Kitiinistä johdettu biopolymeeri, saatavilla äyriäisten kuoresta
KNN	Kalium natrium niobium, KNaNbO_3
LN	Litium niobium, LiNbO_3
Midé V21bl	Midé Technologyn valmistama pietsokalvo
MFC	Macro Fiber Composite
MoS2	Molybdeenidisulfidi
MoSe2	Molybdeenidiselenidi
NaNbO3	Natrium niobium
Nanoselluloosa	Nanomittaluokan selluloosaa, pääasiassa nanoselluloosafibrillejä
NCE57	Noliacin valmistama pietsokeraami
PAPbI3	Propyyliammonium lyijy jodi
PIN-PMN-PT	Lyijy indium niobium lyijy magnesium niobium lyijy titaani sekoitus, $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3-\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$
PLZT	Lantaaniseostettu lyijy zirkonium titaani
PMN-PT	Lyijy magnesium niobium lyijy titaani sekoitus, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-\text{PbTiO}_3$
PMN-PZ-PT	Lyijy magnesium niobium lyijy zirkonium lyijy titaani sekoitus, $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{PbZrO}_3-\text{PbTiO}_3$
PMN-PZT	Lyijy magnesium niobium lyijy zirkonium titaani sekoitus

PVDF	Polyvinylideenifluoridi
PVDF-HFP	Polyvinylideenifluoridi heksafluoropropeeni sekoitus
P(VDF-TrFE)	Polyvinyylideenitrifluorieteeni, pietsosähköinen kopolymeeri
PZNZT	Lyijy zirkonium niobium zirkonium titaani, $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.2}(\text{Zr}_{1/2}\text{Ti}_{1/2})_{0.8}\text{O}_3$
PZT	Lyijy zirkonium titaani, PbZrTiO_3
PZT-PZNN	Lyijy zirkonium titaani lyijy sinkki nikkeli niobium sekoitus
Silkin fibroiini	Silkin proteiini, eläinkuitu, peräisin silkkikehrääjistä
ZnAl:LDH	Sinkki alumiini kerroksinen kaksoishydroksidi nanolevy
ZnO	Sinkkioksidi
ZTO	Sinkkitinaoksidi, ZnSnO_3

