

# SUM MAR IES!

## HAJAUTETTUJEN AURINKO- SÄHKÖJÄRJESTELMIEN ROOLI KAUPUNKIEN ENERGIÄKÄÄNNÖKSESSÄ

Marco Lovati

## Urbaria Research Report 2021/14

# Hajautettujen aurinkosähköjärjestelmien rooli kaupunkien energiakäänteessä

Marco Lovati  
tutkijatohtori  
Aalto-yliopisto



- Kaupunki on hankalasti hahmotettava ja monimutkainen järjestelmä, jota on muutettava, jotta tasapaino vielä suuremman järjestelmän (maapallon ekosysteemin) kanssa voidaan palauttaa. Kaikki muutokset olisi kuitenkin tehtävä niin, että kaikkien osallisuutta ylläpidetään ja kaupungin oma tasapaino säilyy.
- Kehittyneissä maissa talouskasvu ja päästöjen kasvu on erotettu toisistaan, mutta kehitysmaissa ne korreloivat keskenään. **Maailmanlaajuinen päästöjen kokonaisvähennys edellyttää päästöjen jyrkkää vähentämistä kehittyneissä maissa ja päästöjen kasvun hillitsemistä kehitysmaissa.**
- Vähähiilisen sähkön tuotantoon on jo olemassa useita eri tekniikoita, ja tilallisen toteutuksen kannalta ne jakautuvat tällä hetkellä **kahteen paradigmaan: keskitettyihin ja hajautettuihin järjestelmiin**. Nämä kaksi paradigmaa vaikuttavat pikemminkin keskenään kilpailevilta kuin synergisiltä, ja niitä molempia on tutkittava ja kehitettävä, koska ei ole järkevää keskittyä yhteen ainoaan teknologiaan (katso kohta 1).
- Hajautettujen energijärjestelmien lupaavinta ja monipuolisinta teknologiaa edustavat **kaupunkien aurinkosähköjärjestelmät**.
- Kaupunkien aurinkosähköjärjestelmien ympärillä on runsaasti tilaa tutkimukselle, innovatiivisista sähkön varastointitekniologioista kysynnänohjausstrategioihin.

## Johdanto: Kaupunki on suuri ja monimutkainen, ymmärryksemme ylittävä, mutta silti meidän on korjattava se

Kaupunki on järjestelmä. Se on tehty erillisistä osista, joiden vuorovaikutus ja toiminta muodostavat kaupungin toiminnan ja pohjapiirroksen. Kaupunki on järjestelmä, joka on niin suuri, monimutkainen ja meille niin käsittämätön, että olisi typerää yrittää kuvitella sitä. Helsingin kaltainen kaupunki kuluttaa päivittäin yli 2 500 tonnia ruokaa (mikä on noin 500 aikuisen afrikannorsu-uroksen painon verran) ja 100 000 kuutiometriä juomavettä (mikä vastaa noin 40 olympiauima-allasta), ja se käsittelee samalla yli 1000 tonnia jätettä ja tuottaa tuhansia gigawattitunteja sähköenergiaa tarpeen mukaan (eli määrä on joka minuutti erilainen). Kukaan ei voi yksinään ymmärtää suuren kaupungin toimintaa, mutta laajamittainen järjestelmä pystyy ylläpitämään itseään kansalaistensa omistautumisen ja työn ansiosta. **Yhteistyö ja erikoistuminen ovat olennaisia elementtejä, ja vain ne kaupungit, jotka pystyvät valjastamaan osallistumisen valtavan voiman, voivat menestyä.**

Nykyaikainen kaupunki on huomattavan muutoksen tarpeessa. Kaupunki on epätasapainossa ympäristönsä kanssa. Mutta mitä kansalaiset voivat tehdä? Miten voimme muokata jotain, joka on niin monimutkaista, ettei sitä voi kukaan ymmärtää? Voimmeko muokata kaupunkia ja pitää sen toiminnassa?

## Taloukasvu ja kasvihuonekaasupäästöjen kasvu korreloivat keskenään, mutta vain kehitysmaissa

Kaikkialla maailmassa tiedemiehet, käsityöläiset, insinöörit, poliitikot ja muut asiantuntijat työskentelevät niin sanotun kestävä kasvun parissa ja sen ympärillä. Heidän tavoitteenaan on irrottaa taloukasvu energiankulutuksen tai ainakin kasvihuonekaasupäästöjen kasvusta. De Bruynen ja muiden esittämä näyttö osoittaa, että valtion kehityksen alkuvaiheessa taloukasvu ja energiankulutus korreloivat (eli jos yksi kasvaa, kasvaa myös toinen). Toisaalta korkealla kehitystasolla nämä kaksi erkanevat toisistaan tuotannossa ja kulutuksessa tapahtuvien muutosten vuoksi.

### Kehitys tarvitsee energiaa, ei päästöjä

Wang ja muut analysoivat energiankulutuksen, taloukasvun ja hiilidioksidipäästöjen välistä suhdetta Kiinassa (maailman suurimmassa teräksentuottajamaassa) yhdistelmätietojen perusteella ja päättelivät, että taloukasvu stimuloi energian kysyntää ja päinvastoin. Lisäksi he totesivat, että energian kysynnän kasvu edistää hiilidioksidipäästöjen kasvua. Näistä lähtökohdista voidaan odottaa hiilidioksidipäästöjen seuraavan vuosikymmenen aikana kasvavan kehitysmaissa, pysyvän ennallaan tai vähenevän Kiinassa ja vähenevän kehittyneissä maissa. **Tämä viittaa siihen, että globaalilla tasolla alueiden olisi käsiteltävä ilmastonmuutoskysymystä kahdella täysin erillisellä tavalla.**

### Kehittyneet maat ja kehitysmaat kohtaavat erilaisia haasteita, mutta maapallo kuuluu kaikille

Kehittyvillä alueilla energian kysyntä kasvaa väistämättä, mikä uhkaa lisätä päästöjä. **Sen vuoksi näiden alueiden olisi pyrittävä vähentämään energiantuotantomenetelmiensä hiili-intensiteettiä.** Vakiintuneemat teollistuneet ja jälkiteollistuneet alueet ovat pystyneet vähentämään taloutensa hiili-intensiteettiä, joten niiden olisi vastedes kehitettävä teknologioita ja rahoitusvälineitä nopeuttaakseen tätä vähenemistä ja auttaakseen kehittyviä alueita saavuttamaan tavoitteensa. Vuonna 1994, kuvatessaan Voyager 1:n ottamaa kuvaa kaukaisesta maapallosta, Sagan kirjoitti: "Katso tuota pistettä uudelleen. Se on tässä. Se on koti. Se on me. Sen kamaralla ovat kaikki, joita rakastat, jotka tunnet, joista olet koskaan kuullut, kaikki ihmiset, jotka ovat koskaan olleet, eläneet elämänsä." Ensimmäistä kertaa historiassa voimme onnistua vain työskentelemällä yhdessä yhteisen tavoitteen saavuttamiseksi, riippumatta erilaisista talousjärjestelmistä, uskonnosta ja kehitystasoista.

## Miksi meillä on keskitettyjä sähköenergiajärjestelmiä?

Sähkögeneraattoreita alkoi ilmestyä käyttöön 1800-luvun lopussa Yhdistyneessä kuningaskunnassa: vuonna 1878 ensimmäinen vesivoimalaitos, vuonna 1881 ensimmäinen hiilivoimalaitos. Kyky muuttaa mekaaninen energia sähköksi avasi mahdollisuuden sähkönsiirtoon. Tämä uusi toimintamalli, jota johti Thomas Edisonin, Nicola Teslan ja George Westinghouse Jr.:n kuuluisa kolmikko, edusti perinteisten keskitettyjen energiajärjestelmien syntyä. Aikaisemmin käytännöllisen energiansiirtomenetelmän puuttuminen oli merkinnyt sitä, että energia tuli kuluttaa siellä, missä se tuotettiin, joten tehtailla ja teollisuuskomplekseilla oli aina oma generaattori (tuuliturbiini, vesiturbiini tai termodynaaminen lämpömoottori). Sähköverkko, suurten generaattorien parempi tehokkuus ja yhteenlaskettujen kuormien (eli tuhansista kotitalouksista tai toiminnoista koostuvien kuormien) ennakoinnin helppous suosivat perinteisen keskitetyn verkon hallitsevaa asemaa. Keskitetyssä verkossa energia toimitettiin yksisuuntaisesti keskitetyistä voimalaitoksista kuluttajille. Tarve vastata kysyntäkäyrään suosi ohjelmoitavia energialähteitä, kuten hiiltä, kaasua ja vesivoimaa.

## Hajautettu lämmitys on tekemässä paluuta, mutta sitä voi olla vaikea integroida olemassa olevaan järjestelmään

Hajautetut energialähteet ovat viime vuosina kasvattaneet suosiotaan sekä yleisön silmissä että energialähteiden tarjonnassa. Tämä johtuu kustannusten laskusta ja ei-ohjelmoitavan uusiutuvan energian kasvavasta kysynnästä sekä mahdollisuudesta parantaa häiriönsietokykyä ja vähentää samalla siirtokustannuksia. Keskitetyt ja hajautetut energiajärjestelmät ovat erilaisia ja jossain määrin toisiaan poissulkevia järjestelmiä. Viime aikoina useat kirjoittajat, kuten Liu ja muut, ovat yrittäneet optimoida sellaisten energiajärjestelmien toimintaa, joissa on sekä keskitettyjä että hajautettuja lähteitä. Keskitetyt järjestelmät tuottavat usein valtavia määriä lämpöä sähkön rinnalla. Korkeilla leveysasteilla, kuten Helsingissä, tämä on edistänyt keskitetyn kaukolämmön kehittämistä. Helsingin yleisimpien lämmitysenergiälähteiden sijaintia tarkastelemalla (ks. kuva 1, kuva 2 ja kuva 3) voidaan havaita, että kaukolämmön merkitys on hieman pienempi alueilla, joilla hajautetut lämmitysenergiälähteet ovat yleisempiä. Tämä viittaa siihen, että **keskitetyt ja hajautetut lämmityslähteet olisivat pikemminkin kilpailevia kuin synergisiä.**

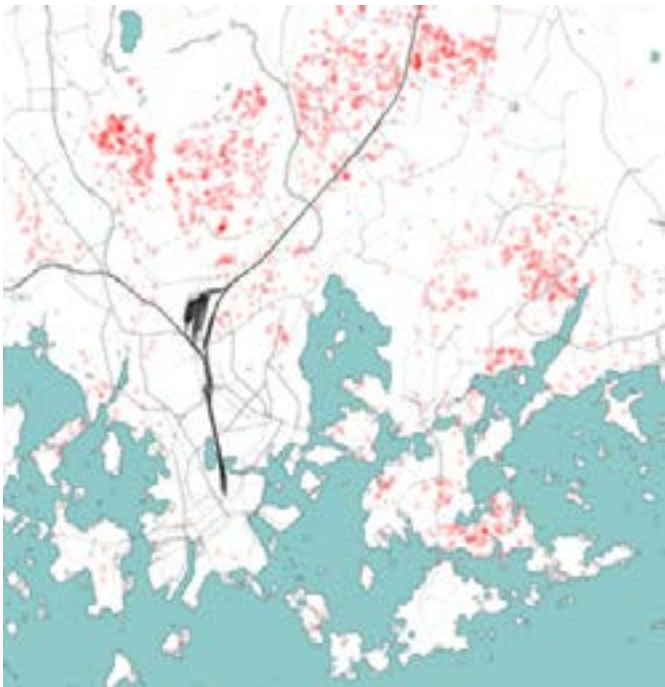
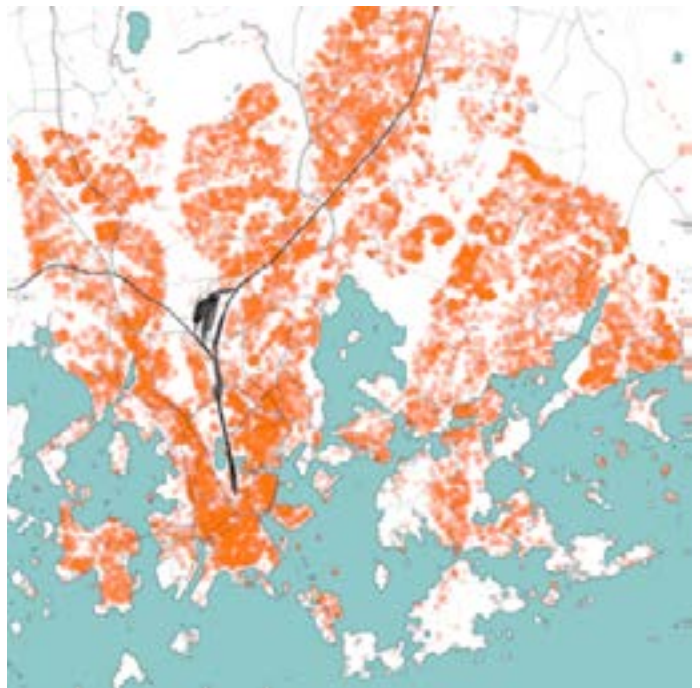
## Hajautetun sähköntuotannon erilaiset tekniikat

**Hajautettujen energiajärjestelmien käyttöönoton lisäämiseksi on tärkeää ymmärtää, mitkä teknologiat ovat muita lupaavampia.** Tuulisähkön leviäminen kaupunkikäyttöön on edelleen epätodennäköistä pienimuotoisten turbiinien alhaisen hyötysuhteen, tehokkuuden ja melun vähentämisen välisen kompromissin sekä tiettyjen kaupunkialueiden ilmanvastuksen mallintamisen vaikeuden vuoksi (Tummala ym.). Kaupunk-

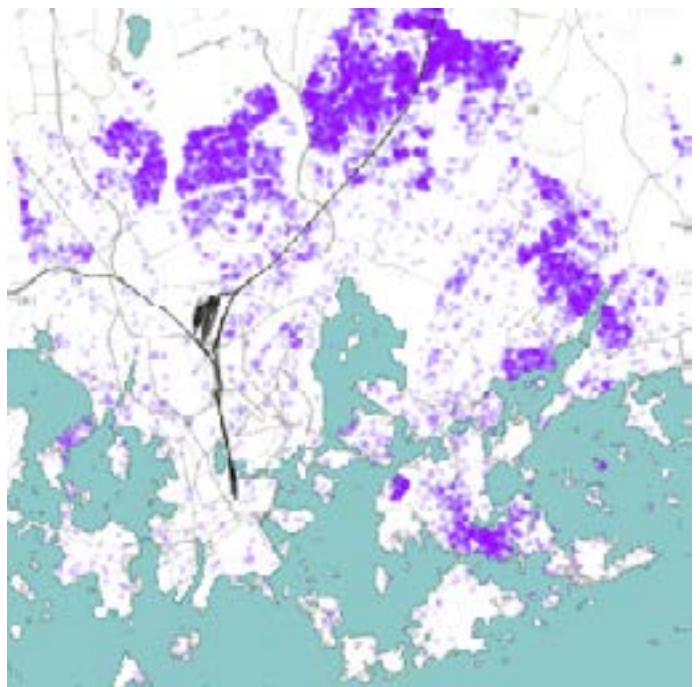
i vesivoima merkitsisi jäännösenergian talteenottoa veden käsittelystä ja jakelusta. McNabolan ja muiden mukaan vesiteollisuudesta löytyy merkittäviä mahdollisuuksia energian talteenottoon. Useimmissa aiemmissä tutkimuksissa ei kuitenkaan ole otettu huomioon sellaisia keskeisiä muuttujia kuin virtojen vaihtelua tai turbiinien tehokkuutta. Myöskään tarkkoja kustannuslaskelmia ja sijoitusten tuottotietoja ei usein ole tai niistä puuttuu herkkyysanalyysi. Ydinvoima ja biopolttoaineet soveltuvat paremmin keskitettyihin kuin hajautettuihin hankkeisiin, sillä niitä on vaikea säännellä ja jakaa. **Hajautettujen energiajärjestelmien ainoaksi vähähiiliseksi teknologiaksi jää aurinkovoima. Miten se toimii Helsingissä?**



Kuva 1. (oik.) Kartta Helsingin maalämpöjärjestelmistä. Tämä on huomattava energiamuoto Hakuninmaan, Puistolán tai Jollaksen alueilla mutta puuttuu lähes kokonaan kaupungin keskustasta. Tiedot on kerätty Helsingin Energia- ja ilmastoatlaksesta.



Kuva 2. (yllä) Kartta Helsingin kaukolämpöjärjestelmistä. Tämä on laajimmalle levinnyt lämmönlähde, etenkin kaupungin keskustassa. Se näyttää selvästi harvenneen paikoissa, joissa muut lähteet ovat yleisempiä, mikä osoittaa, että keskitetty ja hajautettu lämmitysjärjestelmä ovat toinen toisensa pois-sulkevia. Tiedot on kerätty Helsingin Energia- ja ilmastoatlaksesta.



Kuva 3. (oik.) Kartta Helsingin sähkölämmitysjärjestelmistä. geotermisen lämmityksen ja muiden hajautettujen lämmityslähteiden tavoin tämä lämmöntuotantomuoto puuttuu keskustasta lähes kokonaan. Tiedot on kerätty Helsingin Energia- ja ilmastoatlaksesta.

## Aurinkoenergia Helsingissä

Todellisuudessa ”aurinkoenergia” on yleistermi, joka sisältää hyvin erilaisia teknologioita. Näitä ovat **termisen aurinkoenergia, termodynaaminen aurinkoenergia ja aurinkosähköenergia**. Termisen aurinkoenergian ei ole tarkoitus tuottaa sähköä, ainoastaan kuumaa vettä: se tarkoittaa veden kiertoa (usein sekoitettuna pakkasnesteseen) putkissa, joita lämmitetään suoralla auringonvalolla. Tämä tekniikka on helposti hajautettavissa, jopa siinä määrin, että sitä voidaan käyttää myös auringon lämmittämiin suihkuihin rannoilla ja telttailussa. Termodynaamiset aurinkoenergiajärjestelmät puolestaan voivat tuottaa sähköä: ne käyttävät keskitettyä auringonvaloa höyryn tuottamiseen ja pyörittävät siten sähkögeneraattoriin kytkettyä turbiinia.

Termodynaamista aurinkoenergiaa voidaan järjestelmän suuren mittakaavan ja ylläpidon monimutkaisuuden vuoksi käyttää vain keskitettynä järjestelmänä. Suomessa ei tällä hetkellä ole esimerkkejä termodynaamista aurinkoenergiaa käyttävistä järjestelmistä. Nämä järjestelmät eivät ole taloudellisesti kannattavia kosteassa ilmastossa, koska ne eivät toimi hajavalossa. Sähköntuotantoon liittyvän termisen aurinkoenergian pääasiallinen käyttötarkoitus Suomessa olisi lämmöntuotannon polttoainetehokkuuden parantaminen olemassa olevissa fossiili- tai biomassageneraattoreissa (ks. Hakkarainen ym.). Viimeisenä mutta ei vähäisimpänä on aurinkosähköenergia: tässä tekniikassa sähkön tuotto perustuu valosähköiseen vaikutukseen (joka syntyy elektronien vapautuessa auringonvalolle altistetuista metalleista). Aurinkosähköjärjestelmät ovat tulleet tunnetuiksi hajautettujen energiajärjestelmien perikuvina. Niiden skaalautuvuus on vertaansa vailla, sillä ne vaihtelevat gigawattijärjestelmistä aina pieniin, esimerkiksi retkeilyssä, kelloissa ja taskulaskimissa käytettäviin generaattoreihin asti.

## Kaupunkien aurinkosähköjärjestelmät

Siinä missä termodynaaminen aurinkoenergia korkean lämpöhitautensa ansiosta pysyy tuottavana kellon ympäri, aurinkosähköjärjestelmissä sähköntuotanto määräytyy lähes kokonaan auringon säteilyn perusteella (lämpötilasta ja auringon kulmasta johtuvat vaikutukset ovat vähäisiä). Näin ollen aurinkosähköjärjestelmän sähköntuotantoa on mahdotonta säännellä ympäristön sähköntarpeen mukaan.

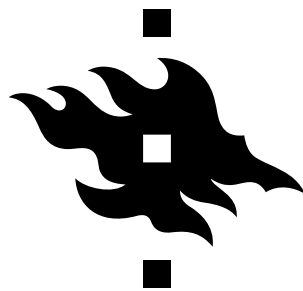
Yksi ratkaisu on asentaa sähkövarasto aurinkosähköjärjestelmän rinnalle: Näin alhaisen kysynnän aikoina tuotettu ylimääräinen sähkö voidaan varastoida ja ylijäämä voidaan hyödyntää alhaisen tuotannon aikoina. Valitettavasti sähkövarastoinnin yksikkökustannukset ovat edelleen niin korkeat, että jo suhteellisen pieni varastointi lisäisi koko järjestelmän kustannuksia, mikä puolestaan rajoittaisi joustavuutta. Huang ja muut ovat kehittäneet menetelmää, jonka suunnittelin väitöstutkimuksessani (ks. Lovati et al.). Menetelmässä hahmotetaan aurinkosähköjärjestelmiä ja sähkövarastointia. Menetelmän tavoitteena on vastata rakennuksen/alueen kysyntäkäyrää mahdollisimman hyvin ja säilyttää samalla hyväksyttävä taloudellinen suorituskyky. Tulokset ovat rohkaisevia, sillä on taloudellisesti mahdollista kattaa yli 20 prosenttia alueen vuotuisesta kumulatiivisesta sähköntarpeesta aurinkosähköllä, mutta parantamisen varaa on.

## Kaupunkien aurinkosähkön uudet teknologiat ja innovatiiviset mallit

Huangin ja muiden artikkelissa huomioidaan sähköautojen läsnäolo: puhtaasti asuinkäytössä olevalla alueella ajoneuvojen lataamisen sähköntarpeen oletettiin olevan Grahnin ja muiden ehdottaman mallin mukainen. Tämä oletamus ei välttämättä ole edullinen alueilla, joilla sähköajoneuvojen käyttö (lataus) ajoittuu vuorokauden keskeisille tunneille. Piter ja muut ovat huomanneet Helsingin kaupungin polkupyörätelineissä kaksi erilaista käyttömallia: toisessa näkyy polkupyörien läsnäolo päivän keskeisinä tunteina, toisessa käyttö tapahtuu yöaikaan. On kohtuullista olettaa, että tällaiset mallit pätevät myös moottorikäyttöisiin ajoneuvoihin, joten latausajoneuvojen sähkönkulutus voisi luoda lisäkuormituksen tunneille, jolloin aurinkosähköjärjestelmän tuotanto on käynnissä. Tämä ilmiö puolestaan kannustaisi suurempiin laitoksiin. Toinen mielenkiintoinen käyttömahdollisuus on geotermisen lämmön varastointi, kun otetaan huomioon aurinkosäteilyn voimakas kausivaihtelu Helsingin leveysasteella. Tämä antaisi mahdollisuuden siirtää kesällä ylimääräistä energiaa maan alle lämmön muodossa ja käyttää sitä talven aikana maalämpöpumppujen höyrystimien lämmittämiseen. On olemassa koko joukko uusia energian varastointitekniikoita, jotka mullistavat kausittaisen varastoinnin: uusiutuva vety (esim. Proost ym.), ammoniakki polttoaineena (esim. Xiao ym.), redox-virtausakut (ks. Parasuraman ym.), painovoimaan perustuvat akut (Moore) ja nesteilma-akut (esim. Sciacovelli ym.), vain muutamia mainitakseni. Viimeaikaisten teknologioiden räjähdysmäinen kehitys edellyttää aurinkosähköjärjestelmien tuotannon lisäämistä. Tulevaisuuden energiajärjestelmä on kokonainen toisiaan täydentävien teknologioiden ekosysteemi, ja on tärkeää pysyä kehityksen kärjessä. Jotta tulevien varastointitekniologioiden käyttö olisi kustannustehokasta, on olennaisen tärkeää, että käytettävissä on runsaasti varastoitavaa energiaa.

### Lähteet:

- De Bruyn SM, van den Bergh JC, Opschoor JB. Economic growth and emissions: reconsidering the empirical basis of environmental Kuznets curves. *Ecological Economics*. 1998 May 1;25(2):161-75.
- Grahn, Pia, Joakim Munkhammar, Joakim Widén, Karin Alvehag, and Lennart Söder. "PHEV home-charging model based on residential activity patterns." *IEEE Transactions on Power Systems* 28, no. 3 (2013): 2507-2515.
- Hakkarainen, Timo, Eemeli Tsupari, Elina Hakkarainen, and Jussi Ikäheimo. "The role and opportunities for solar energy in Finland and Europe." *VTT Technology* 217 (2015): 6-16.
- Huang, Pei, Marco Lovati, Xingxing Zhang, Chris Bales, Sven Hallbeck, Anders Becker, Henrik Bergqvist, Jan Hedberg, and Laura Maturi. "Transforming a residential building cluster into electricity prosumers in Sweden: Optimal design of a coupled PV-heat pump-thermal storage-electric vehicle system." *Applied Energy* 255 (2019): 113864.
- Liu, Wen Hui, Sharifah Rafidah Wan Alwi, Haslenda Hashim, Zarina A. Muis, Jiri J. Klemeš, Nor Erniza M. Rozali, Jeng Shiun Lim, and Wai Shin Ho. "Optimal design and sizing of integrated centralized and decentralized energy systems." *Energy Procedia* 105 (2017): 3733-3740.
- Lovati, Marco, Graziano Salvalai, Giulia Fratus, Laura Maturi, Rossano Albatici, and David Moser. "New method for the early design of BIPV with electric storage: A case study in northern Italy." *Sustainable Cities and Society* 48 (2019): 101400.
- McNabola, Aonghus, Paul Coughlan, Lucy Corcoran, Christine Power, A. Prysor Williams, Ian Harris, John Gallagher, and David Styles. "Energy recovery in the water industry using micro-hydropower: an opportunity to improve sustainability." *Water Policy* 16, no. 1 (2014): 168-183.
- Moore, Samuel K. "The Ups and Downs of Gravity Energy Storage: Startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage." *IEEE Spectrum* 58, no. 1 (2020): 38-39.
- Parasuraman, Aishwarya, Tuti Mariana Lim, Chris Menictas, and Maria Skyllas-Kazacos. "Review of material research and development for vanadium redox flow battery applications." *Electrochimica Acta* 101 (2013): 27-40.
- Piter, Andreas, Philipp Otto, and Hamza Alkhatib. "A Spatiotemporal Functional Model for Bike-Sharing Systems--An Example based on the City of Helsinki." *arXiv preprint arXiv:2012.10746* (2020).
- Proost, Joris. "State-of-the art CAPEX data for water electrolyzers, and their impact on renewable hydrogen price settings." *International Journal of Hydrogen Energy* 44, no. 9 (2019): 4406-4413.
- Sagan, Carl. 1994. *Pale blue dot: a vision of the human future in space*.
- Sciacovelli, A., D. Smith, M. E. Navarro, A. Vecchi, X. Peng, Y. Li, J. Radcliffe, and Y. Ding. "Performance analysis and detailed experimental results of the first liquid air energy storage plant in the world." *Journal of Energy Resources Technology* 140, no. 2 (2018).
- Tummala, Abhishiktha, Ratna Kishore Velamati, Dipankur Kumar Sinha, V. Indrajaya, and V. Hari Krishna. "A review on small scale wind turbines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56 (2016): 1351-1371.
- Wang S, Li Q, Fang C, Zhou C. The relationship between economic growth, energy consumption, and CO2 emissions: Empirical evidence from China. *Science of the Total Environment*. 2016 Jan 15;542:360-71.
- Xiao, Hua, Agustin Valera-Medina, and Philip J. Bowen. "Modeling combustion of ammonia/hydrogen fuel blends under gas turbine conditions." *Energy & Fuels* 31, no. 8 (2017): 8631-8642.



**UNIVERSITY OF HELSINKI**

**TOIMITUS / EDIT**

Iiris Koivulehto  
Kaupunkitutkimusinstituutti Urbaria

**OTA YHTEYTTÄ / CONTACT**

urbaria@helsinki.fi  
0294150056 / 0504719810

**SEURAA / FOLLOW US**

@urbariahelsinki  
www.helsinki.fi/urbaria

PL 4 (Yliopistonkatu 3)  
00014 Helsingin Yliopisto