

Kuva: Istocok

# Kirjallisuusselvitys sähkökäytöstä

11/2020

# Kirjallisuusselvitys sähkökäytöstä

---

Ei julkaista painotuotteena

Kirjallisuusselvitys sähkökäytöstä

Motiva Oy

Copyright Motiva Oy, Helsinki, 11/2020

## Esipuhe

---

Sähkökäyttäjien sekä pumppaus- ja puhallinjärjestelmien osuus globaalista sähkönkulutuksesta on hyvin merkittävä. Arvion mukaan sähkökäyttäjien osuus teollisuuden sähkönkäytöstä on noin 70 % ja vastaavasti toimitila- ja liikekiinteistöjen sähkönkäytöstä noin 35 %. Pelkästään pumppausjärjestelmien energiankulutuksen arvioidaan olevan noin 20 % koko maailman sähkönkulutuksesta. Sähkökäyttäjien, pumppujen ja puhaltimien elinkaaren aikaisista kustannuksista yli 90 %:a tulee energiankulutuksesta.

EU:n Ecodesign-direktiivi antaa puitteet energiaa käyttävien tuotteiden suunnittelulle ja vaatimustasolle. Direktiivin perusteella on annettu velvoittavia asetuksia, jotka määrittävät minimaaliset vaatimukset uusien moottorien, pumppujen ja puhaltimien hyötysuhteille ja energiatehokkuuksille. Sen lisäksi myös Suomen rakentamismääräyskokoelmassa on asetettu vaatimuksia puhallinjärjestelmien ominaisuuksille.

Arvioiden mukaan uudet ja olemassa olevat teknologiat mahdollistavat sähkömoottorijärjestelmissä 20 – 30 %:n energiansäästöpotentiaalin. Suomen teollisuuden osalta tämä tarkoittaisi noin 6.8 TWh vuosittaista säästöpotentiaalia. Vaihtovirtamoottoreiden osalta viimeisemmät kehitysaskelot hyötysuhteen parantamiseksi on otettu kestopagneetti- ja tahtireluktanssimoottoreilla. Osa valmistajista on näiden turvin jo julkaissut IE5 luokan sähkömoottorit. Näillä saavutetaan 20 % parempi hyötysuhde IE4 luokkaan nähden ja nämä ovat 10 % energiatehokkaampia kuin IE3 luokan moottorit. IE3 hyötysuhdeluokka on Ecodesign direktiivin mukaisesti minimivaatimus 0.75-375 kW:n teholuokan vaihtovirtamoottoreille. Vuodesta 2021 alkaen IE3 vaatimus kattaa 0.75-1000 kW:n moottorit ja IE2 vaatimus 0.12 – 0.75 kW:n moottorit. Vuodesta 2023 eteenpäin tietyiltä moottorityypeiltä- ja kokoluokilta edellytetään luokkaa IE4.

Tutkimusten mukaan pumppaus- ja puhallinjärjestelmien energiatehokkuudessa on paljon parannettavaa. Järjestelmien hyötysuhteen uskotaan olevan heikoimmillaan vain 50 – 60 %. Heikkoon hyötysuhteeseen vaikuttaa eniten järjestelmän mitoituksen epäonnistuminen. Pumppaus- ja puhallinjärjestelmien säästöpotentiaalin arvioidaan olevan keskimäärin 30 %. Tämän perusteella voidaan Suomen teollisuuden osalta arvioida säästöpotentiaaliksi noin 2.9 TWh/a. Yleisimmille kiertovesi- ja paineenkorotuspumpuille on määritelty Ecodesign -direktiivissä minimivaatimukset pumpun hyötysuhteille. Myös ilmanvaihtojärjestelmien puhaltimille on omat energiatehokkuusvaatimuksensa. Tämä varmistaa, että hyötysuhteiltaan heikoimmat pumput ja puhaltimet poistuvat markkinoilta. Pumppujen ja puhaltimien kehitystyössä panostetaan moottorin ja pumpun/puhaltimen integrointiin, joilla haetaan modulaarista ja kompaktia rakennetta. Hyötysuhteen osalta pumpun/puhaltimen pesän geometriaa ja materiaaleja kehitetään edelleen mm. kitkahäviöiden pienentämiseksi.

Sen lisäksi, että keskitytään pelkästään yksittäisien laitteiden, kuten moottoreiden ja pumppujen tehokkuuden optimointiin, viedään kehitystyön fokusta järjestelmäkokonaisuuksien optimointiin. Näin energiatehokkuuden kehitystyössä huomioidaan myös säätömenetelmät, systeemin kuormituskäyrät ja mitoitus.

Kirjallisuusselvityksen on toteuttanut Elomatic Oy Motiva Oy:n tilauksesta. Selvitys on osa Motivan ja yritysten yhteisen Energiatehokkaat sähkökäytöt-hankkeen tulosmateriaaleja. Hankkeen tulosten avulla tuetaan energiatehokkuussopimuksen toimeenpanoa. Hankkeessa olivat mukana Ahlstrom-Munksjö Glassfibre Oy, Metsä Board Oy, Sinebrychoff Supply Company Oy, ABB Oy, Koja Oy ja Sulzer Pumps Finland Oy. Hanketta rahoittivat Sähkötekniikan ja energiatehokkuuden edistämiskeskus STEK ry, Energiavirasto sekä hankkeeseen osallistuneet yritykset.

# Sisällysluettelo

---

<b>Esipuhe</b>	<b>3</b>
<b>Sisällysluettelo</b>	<b>5</b>
<b>1 Sähkökäyttöjen hyötysuhteet ja kehitysnäkymät</b>	<b>6</b>
1.1 Sähkösäädin	6
1.2 Vaihtovirtamoottorin hyötysuhdeluokat ja Ecodesign vaatimukset	9
1.3 Voimansiirto	12
1.4 Taajuusmuuttajat	13
1.5 Sähkökäyttöjen kehitysnäkymiä	14
<b>2 Pumppaus- ja puhallinjärjestelmien energiatehokkuus ja kehitysnäkymät</b>	<b>18</b>
2.1 Pumput	18
2.2 Pumppausjärjestelmät, Ecodesign-vaatimukset	19
2.3 Pumppausjärjestelmien hyötysuhde ja kehitysnäkymiä	21
2.4 Puhaltimet	22
2.5 Puhallinjärjestelmät, Ecodesign-vaatimukset ja rakentamismääräykset	23
2.6 Puhallinjärjestelmät, Kehitysnäkymiä	24
<b>3 Säästöpotentiaalin arviointi (kirjallisuuskatsaus)</b>	<b>25</b>
<b>4 Laskentatyökalut</b>	<b>26</b>
<b>Lähteet</b>	<b>27</b>

## **Liitteet:**

LIITE 1. Laskentatyökalut, sähkökäytöt ja taajuusmuuttajat

# 1 Sähkökäyttöjen hyötysuhteet ja kehitysnäkymät

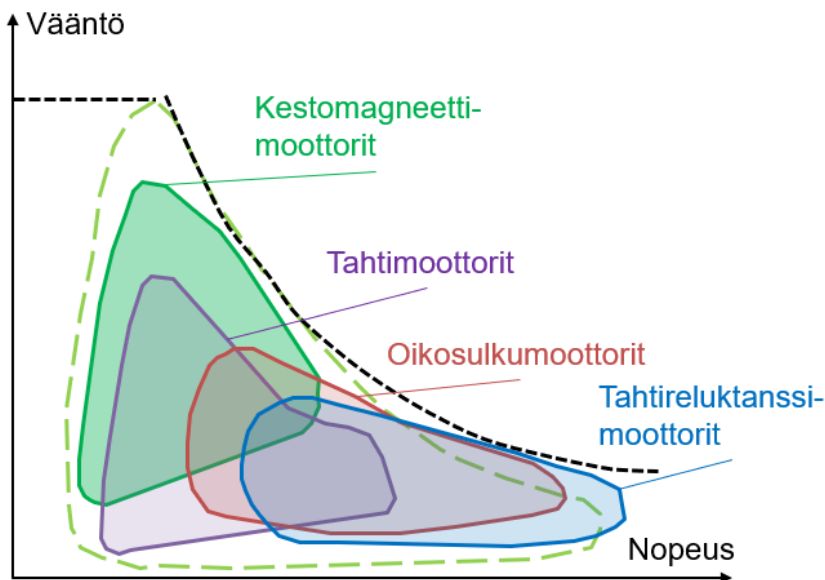
Sähkökäyttöillä tarkoitetaan yleisesti mekaanisen liikkeen ohjausta sähköenergian avulla. Sähkökäytöt koostuvat tyypillisesti sähkömoottorista ja sitä ohjaavasta komponentista, kuten taajuusmuuttajasta. Energiatehokkuuden näkökulmasta sähkökäyttöjen tulee muuntaa sähköenergia liike-energiaksi mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Tähän vaikuttavat sekä sähkömoottorin että taajuusmuuttajan hyötysuhteet.

## 1.1 Sähkömoottorit

Sähkömoottori on sähkökäyttöjen pääkomponentti. Sähkömoottorityyppejä on useita, kuten

- Oikosulku-/induktiomoottorit
- Kestomagneettimoottorit
- Tahtireluktanssimoottorit
- Tasavirtamoottorit / EC-moottorit
- Tahtimoottorit

Kuvassa 1 moottorityyppejä on jaoteltu niiden tyypillisten vääntö- ja nopeusominaisuuksien perusteella.

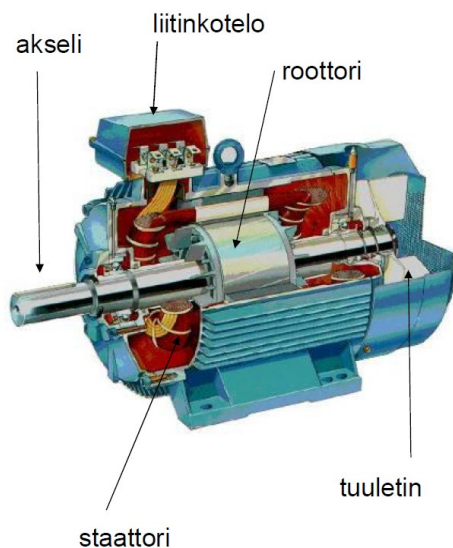


Kuva 1 Moottorityypit esitettynä nopeus-vääntö -kuvaajassa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Electric Motor Engineering. Artikkel. <https://www.electricmotorengineering.com/electric-motor-what-is-the-real-innovation/>

## Oikosulkumoottori

Tyypillisin teollisuuden käyttämä moottorityyppi on vaihtovirralla toimiva oikosulku- eli induktiomootori. Moottorin roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa staattorikäämityksen kehittämän pyörivän magneettikentän kanssa. Moottorin perusrakenne on esitettyinä kuvassa 2.



Kuva 1 Oikosulkumoottorin yleisrakenne [5]

Moottorin hyötysuhde kertoo moottorin kyvystä muuttaa sähköenergia mekaaniseksi työksi. Oikosulkumoottorin tapauksessa häviöt koostuvat tyypillisesti seuraavista kokonaisuuksista<sup>2 3</sup>:

- Staattorin rautahäviöt (käämien rakenne ja materiaalit)
- Tuuletus-, kitka- ja laakerihäviöt (materiaalit, geometria)
- Staattorin kuparihäviöt (Käämitys)
- Roottorihäviöt (Materiaalit)
- Lisähäviöt (Staattori- ja roottoriurien geometria)

Edellä mainittujen häviöiden jakautumisesta on annettu esimerkki Taulukossa 1. Sen mukaan merkittävimmät tekijät häviöiden muodostumisessa ovat staattorin ja roottorin häviöt.

---

<sup>2</sup> Arun Shankar et al., A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system, Applied Energy, 2016

<sup>3</sup> Ellä J., Häviöjakauma korkeanhyötysuhteen sähkömoottorissa, DI-työ, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015



**Taulukko 1 Esimerkki häviöiden jakautumisesta IE2 –luokan oikosulkumoottorissa**

			4-napainen 30 kW IE2 moottori $\eta = 92 \%$	4-napainen 110 kW IE2 moottori $\eta = 95 \%$
Tyhjäkäyntihäviöt	Staattorin rautahäviöt	18 %	0,4 kW	1,0 kW
	Tuuletus-, kitka- ja laakerihäviöt	10 %	0,2 kW	0,6 kW
	Staattorin kuparihäviöt	34 %	0,8 kW	1,9 kW
Kuormitushäviöt	Roottorihäviöt	24 %	0,6 kW	1,3 kW
	Lisähäviöt	14 %	0,3 kW	0,8 kW

Viime vuosina induktimoottorien hyötysuhdetta on kasvatettu mm. seuraavilla kehityskohteilla ja toimenpiteillä<sup>4</sup>:

- Käämitystekniikoiden kehitys
- Kuparin määrän kasvattaminen käämeissä
- Staattorin ja roottorin materiaalien ja näiden välisen geometrian kehitys
- Staattorin urarakenteiden ja geometrian kehitys
- Laakereiden kitkan pienentäminen

Usein hyötysuhteen noston lähtökohtana on virrankulun varmistaminen sekä resistiivisten ja mekaanisten lämpöhäviöiden minimointi.

### **Kestomagneettimoottori**

Kestomagneettimoottorin roottorissa on kestomagneetit, jotka luovat magneettikentän moottoriin. Muuten ne ovat rakenteeltaan samankaltaisia oikosulkumoottorin kanssa. Kestomagneettien hyödyntäminen mahdollistaa paremman tehokertoimen verrattuna oikosulkumoottoriin. Kestomagneettimoottoreilla päästään pieniin kierroslukuihin menettämättä vääntömomenttia. Tämä mahdollistaa kestomagneettimoottorin hyödyntämisen ilman alennusvaihdetta esimerkiksi teollisuuden käyttökohteissa, joissa vaaditaan alhaisia kierrosnopeuksia. Tämä parantaa järjestelmän hyötysuhdetta, koska voimansiirrosta voidaan jättää häviöitä aiheuttava vaihde pois. Kestomagneettimateriaalit ovat pääosin harvinaisia maametalleja ja niiden saatavuus vaikuttaa myös niiden hintaan. Näiden metallien kaivaus on myös ympäristöä kuormittavaa.

Kestomagneetit jaetaan kaupallisesti neljään eri pääluokkaan, joita ovat

- AlNiCo (Alumiini-Nikkeli-Koboltti-yhdisteet)
- Ferriitit
- NdFeB (Neodyymi-Rauta-Boori –yhdiste)
- SmCo (Samarium-koboltti yhdiste)

### **Tahtireluktanssimoottori**

Sykoninen tahtireluktanssimoottori (SynRM) on niin ikään vaihtovirtamoottori, mutta toiminta poikkeaa oikosulkumoottorista roottorin magneettisen epäsymmetrian takia. Roottori on täysin käämitön, mikä johtaa parempaan hyötysuhteeseen induktimoottoriin verrattuna. Roottorihäviöiden poistuminen leikkaa moottorin häviöistä jopa 30 – 40 % osuuden. Suorituskyvyltään

<sup>4</sup> Enomoto Y. et al., Amorphous Motor with IE5 Efficiency Class, Hitachi Review Vol. 64 (2015), No. 8

tahtireluktanssimoottori on kestopagneettimoottorin tasolla, mutta ilman kestopagneettisia materiaaleja<sup>5</sup>. Tahtireluktanssimoottorit soveltuvat korvaamaan oikosulkumoottorikohteita, etenkin vaihtelevan kuorman kohteisiin taajuusmuuttajan kanssa. Laitetoimittajista etenkin ABB on kehittänyt SynRM moottoreita ja on lanseerannut niistä hiljattain korkean hyötysuhteen maljeja.

### **EC moottori**

EC moottori on elektronisesti kommutoitu (EC) tasavirtamoottori. Se on tyypiltään kestopagneettimoottori. Niitä käytetään usein puhallinsovelluksissa, etenkin kiinteistöjen ilmanvaihtopuhaltimissa ja jäähdytysjärjestelmien lauhdutinpuhaltimissa. EC-moottorin elektroniikka muuttaa vaihtovirran tasavirraksi ja säätelee puhaltimen kierrosnopeutta muuttamalla moottorin saamaa virtaa. EC-moottorin etuna on sen kompakti koko ja integroitavuus puhaltimeen. Se on myös melutasoltaan alhainen ja mahdollistaa puhallusnopeuden säädön ilman taajuusmuuttajaa. Sen sovelluskohteet ovat kuitenkin tällä hetkellä rajoittuneet verrattain pieniin teholuokkiin, alle 5.5 kW<sup>6</sup>.

### **Tahtimoottori**

Tahtikone muodostuu käämeillä varustetusta staattorista ja sen sisäpuolella pyörivästä roottorista. Tahtikoneessa roottori pyörii staattorikentän kehittämän kiertävän magneettikentän kanssa samassa tahdissa. Ilman kestopagneetteja varustettuja tahtikoneita käytetään tavanomaisesti generaattoreina, mutta ne soveltuvat myös moottorikäyttöön. Niitä käytetään suuremman kokoluokan kohteissa, joissa akseliteho on tyypillisesti yli 1 MW<sup>7</sup>.

### **Kaksinopeuskoneet**

Kaksinopeuskoneita käytetään esimerkiksi ilmanvaihtojärjestelmissä tehostetun ja normaalin puhalluksen aikaansaamiseksi. Tavanomaisesti nämä ovat oikosulkumoottoreita, joiden staattorissa on kaksi erillistä käämitystä tai yksi käämitys, jonka kytkentä on vaihdettavissa. Käämitystä vaihtamalla voidaan vaikuttaa moottorin napalukuun, jonka vaikutuksesta akselin pyörimisnopeus muuttuu, vaikka syöttöverkon taajuus pysyy samana<sup>8</sup>.

## **1.2 Vaihtovirtamoottorin hyötysuhdeluokat ja Ecodesign vaatimukset**

---

Moottorin hyötysuhde kertoo moottorin kyvystä muuttaa sähköenergia mekaaniseksi työksi. Moottorin elinkaaren aikaisista kustannuksista yli 95 % tulee energiankäytöstä, joten sen hyötysuhde näyttelee tärkeää roolia moottorin käyttökustannuksissa. Vaihtovirtamoottoreille on olemassa standardiin (IEC/EN 60034-30-1:2014) perustuvat hyötysuhdeluokat IE1-IE4. Standardi kattaa:

- 2-, 4-, 6- ja 8-napaiset moottorit
- Tehoalueet 0,12 – 1000 kW

---

<sup>5</sup> Koppanen V., Säädettävien sähkömoottoreiden vertailu, Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2015

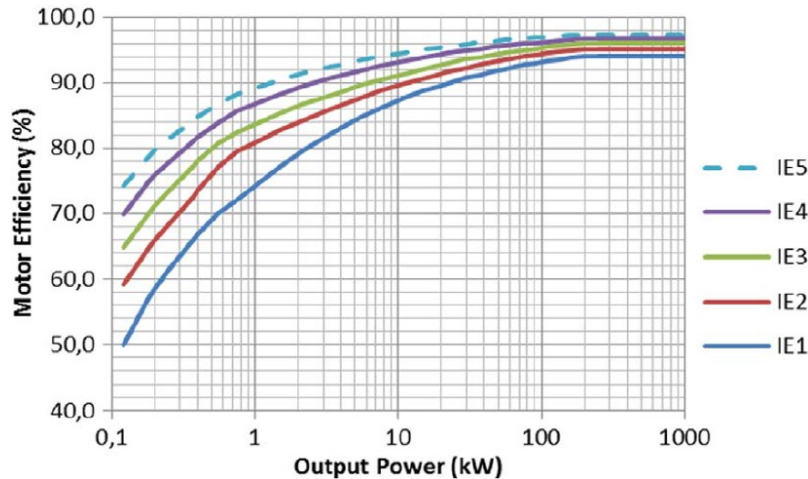
<sup>6</sup> Ks. alaviite <sup>5</sup>

<sup>7</sup> Hietalahti, L. Teollisuuden sähkökäytöt. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. 2013

<sup>8</sup> Ks. alaviite <sup>7</sup>

- Jännitteet 50...1000 V,
- Taajuudet 50 Hz ja 60 Hz.

Mitä suurempi hyötysuhdeluokka on, sitä korkeampi on niiden hyötysuhde. Eri luokille määritellyt hyötysuhteet ovat riippuvaisia moottorin tehosta (Kuva 3). Kuten nähdään, hyötysuhde laskee jokaisessa hyötysuhdeluokassa mitä pienemmäksi moottorikoko laskee. Syynä tähän on kitkailmiöiden ja resistiivisten häviöiden korostuminen moottorin koon pienentyessä.



Kuva 2 Hyötysuhdeluokat 4-napaiselle oikosulkumoottorille taajuudella 50 Hz<sup>9</sup>

Hyötysuhdeluokka on yksi moottorin hintaan vaikuttavista monista osatekijöistä. Taulukossa 2 on esitetty VEM -moottorivalmistajan hintojen vaihteluväliä eri teho- ja hyötysuhdeluokissa. Vertailuun on pyritty ottamaan muilta ominaisuuksiltaan keskenään vastaavia moottoreita.

Taulukko 2 Hintavertailua VEM Motors Finland Oy:n tarjoamille taajuusmuuttajakäyttöön soveltuville moottoreille<sup>10</sup>

Teho [kW]	Hinta IE2 [€]	Hinta IE3 [€]	Hinta IE5 [€]
0...1,1	500...1 500	500...1 700	1 100...1 600
1,5...5,5	900...3 400	7 00...4 500	1 500...4 000
7,5...18,5	2 300...10 000	1 800...12 000	4 200...9 100
22...45	6 300...20 000	5 000...21 000	6 400...16 000
55...75	13 000...27 000	12 000...34 000	16 000...18 000*
90...110	20 000...41 000	18 000...42 000	
132...160	30 000...47 000	31 000...47 000	
200...250	40 000...50 000	41 000...51 000	

\*suurin saatavilla oleva koko 55 kW

<sup>9</sup> Anibal T. de Ameida et al., Policy Options to Promote Energy Efficient Electric Motors and Drives in the EU, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017

<sup>10</sup> VEM Motors Finland Oy. <https://www.vem.fi/hinnastot/>

EU:n Ecodesign-direktiivi on asettanut minimivaatimukset vaihtovirtamoottoreiden hyötysuhteille. Vuoden 2017 alusta alkaen teholuokan 0.75 – 375 kW kolmivaihemoottoreiden tulee täyttää.

- IE3 luokan vaatimukset
- IE2 luokan vaatimukset, jos moottori on varustettu taajuusmuuttajalla

Vuoden 2021 heinäkuusta alkaen vaatimukset tiukentuvat:

- 0,75 - 1000 kW:n moottorit: IE3-luokan vaatimukset
- 0,12 - 0,75 kW:n moottorit: IE2-luokan vaatimukset

Aikaisempaan verrattuna asetus laajenee kattamaan Ex -luokan moottorit (pois lukien Ex eb -tyypin korotetun räjähdesuojan moottorit), jarrumoottorit ja 8-napaiset moottorit. Taajuusmuuttajaohjauksissa vaatimus muuttuu siten, että nimellisteholtaan 0,12 – 1000 kW:n moottoreihin yhdistettynä koko systeemin (taajuusmuuttaja + moottori) tehohäviöt tulee olla IE2-luokan mukaisia.

Vuoden 2023 heinäkuusta alkaen:

- 0,12 – 1000 kW:n Ex eb -tyypin moottorit: IE2-luokan vaatimukset
- 75 – 200 kW:n 2-, 4-, ja 6-napaiset moottorit, jotka eivät ole jarrumoottoreita tai räjähdysuojattuja: IE4-luokan vaatimukset<sup>11</sup>

Alla olevassa taulukossa (Taulukko 3) on tehty esimerkkilaskelma moottorin hyötysuhteen vaikutuksesta elinkaaren aikaisiin käyttökustannuksiin. Moottorin käyttökohde on prosessiteollisuuden sekoitussäiliö, joka käy koko tuotannon ajan. Vanha moottori on jo yli 20 vuotta vanha. Esimerkkitapauksessa uuden IE2 luokan moottorin hankintahinta on arviolta noin 15 000 Eur, hyötysuhdeluokkien IE2 ja IE3 välillä hintaero on noin 10 – 15 %. Vanhojen jatkuvasti käyvien moottoreiden uusinnassa saavutetaan merkittäviä säästöjä.

---

<sup>11</sup> EU komission asetus (1781/2019). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2019.272.01.0074.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.272.01.0074.01.ENG)

**Taulukko 3 Moottorin hyötysuhteen vaikutus 75 kW-moottorin käyttökustannuksiin. Tarkastelukohteena on prosessiteollisuuden sekoitussäiliön moottori**

	Vanha	IE2	IE3	IE4
Hyötysuhde [%]	85	94,5	95,5	96,5
Ottoteho [kW]	88,2	79,4	78,5	77,7
Käyttötunnit [h/a]	7 200	7 200	7 200	7 200
Energiankulutus [MWh/a]	635	571	565	560
Energiakustannukset [€/a] (50 €/MWh)	31 800	28 600	28 300	28 000
Energiakustannussäästö suhteessa vanhaan moottoriin [€/a]		3 200	3 500	3 800
Energiakustannussäästö 10 v. aikana [€]		32 000	35 000	38 000

0,75 kW kokoluokassa vastaava laskenta ei tuota niin merkittäviä kustannussäästöjä. Moottorihinnat VEM WE-sarja IE2 512 €, VEM W4-sarja IE3 689 €, VEM IE5 (PMS) 1330 €.

**Taulukko 4 Moottorin hyötysuhteen vaikutus 0,75 kW-moottorin käyttökustannuksiin.**

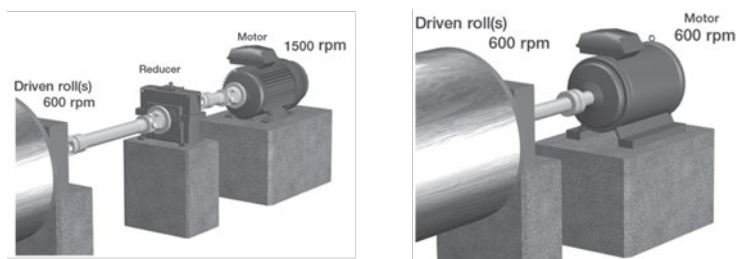
	Vanha	IE2	IE3	IE5
Hyötysuhde [%]	72	80	82	88
Ottoteho [kW]	1,0	0,9	0,9	0,9
Käyttötunnit [h/a]	7 200	7 200	7 200	7 200
Energiankulutus [MWh/a]	8	7	7	6
Energiakustannukset [€/a] (50 €/MWh)	380	340	330	310
Energiakustannussäästö suhteessa vanhaan moottoriin [€/a]		40	50	70
Energiakustannussäästö 10 v. aikana [€]		400	500	700

### 1.3 Voimansiirto

Teollisuuden sähkökäyttökohteissa moottorin mekaaninen työ välitetään käyttökohteelle useimmiten jollain alla esitetystä menetelmästä. Menetelmän tyypillinen hyötysuhdealue on esitetty suluissa.

- Suorakäyttö
- Hihnakäyttö
  - kiilahina (92 – 94 %)
  - lattahihna (96 – 98 %)
  - hammashihna (96 – 98 %)
- Ketju (96 – 98 %)
- Vaihde
  - suorahammas (n. 98 %)
  - kartiohammas (n. 98 %)
  - kulunut hammas (n. 50 – 96 %)
- Nestekytkin (93 – 96 %)

Suorakäytössä moottorin akseli kytkeytyy suoraan liikutettavaan kohteeseen ilman mekaanista välitystä. Tämä on häviöiden minimoinnin kannalta usein paras vaihtoehto. Mutta esimerkiksi teollisuuslaitteissa vaaditaan usein laajaa kierrosnopeusalueetta ja paljon vääntömomenttia. Oikosulkumoottoreilla tämä voidaan toteuttaa asentamalla moottorin ja pyöritettävän laitteen väliin alennusvaihte. Tämä mahdollistaa laitteen käytön alhaisilla kierrosnopeuksilla menettämättä vääntömomenttia. Kestomagneettimoottoreilla päästään parempaan vääntömomenttiin alhaisilla pyörimisnopeuksilla. Tämä mahdollistaa suorakäyttömahdollisuuden laajemmalla pyörimisnopeusalueella. Esimerkiksi oikosulkumoottorin käyttöalue alkaa kierrosnopeuksista 700 – 800 rpm. Tyypillisesti tämän alle menevät kierrosnopeusalueet on hoidettu 1500 rpm kierrosnopeuden oikosulkumoottoreilla ja alennusvaihteella. Kestomagneettimoottorit mahdollistavat suoran käytön alle 700 rpm kierrosnopeusalueella (ks. kuva 4).



**Kuva 3** Vaihteellinen käyttömoottori (vasen) ja vaihteeton suorakäyttömoottori (ABB)

#### 1.4 Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajaa käytetään tyypillisesti vaihtovirtamoottorin ja sähköverkon välissä ohjaamaan moottorin kierrosnopeutta ja momenttia. Tämä mahdollistaa moottorin ja siihen kytketyn prosessilaitteen tarpeen mukaisen käytön. Taajuusmuuttajalla voidaan muuttaa moottorin nopeutta ja momenttia portaattomasti moottorin syöttöjännitteen taajuuden avulla. Tämä mahdollistaa moottorin tarkan ja energiatehokkaan säätötavan. Tyypillisesti taajuusmuuttajien hyötysuhde on 95 – 98 %. Investointikustannuksiltaan taajuusmuuttaja on noin 20 – 80 % moottorin investointikustannuksista. Pienimmissä teholuokissa taajuusmuuttajan kustannukset ovat suhteessa korkeammat moottorin investointikustannuksiin nähden. Taajuusmuuttajan säätötapoja ovat mm. skalaari, vektori- ja suoramomenttisäädöt<sup>12</sup>.

Skalaarisäädössä moottorilta ei ole takaisinkytkentää pyörimisnopeuden mittaukseen, eikä se huomioi moottorin ominaisuuksia. Moottorin pyörimisnopeuden ohjaus tapahtuu muuttamalla lähtötaajuutta. Skalaarisäätö on yksikertainen ja aiheuttaa vähän muutoshäviöitä. Sen sijaan sen momenttivaste ja tarkkuus ovat heikkoa. Skalaarisäätöä käytetään yksinkertaisissa kohteissa, kuten pumpeissa ja puhaltimissa<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> Arun Shankar et al., A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system, Applied Energy, 2016

<sup>13</sup> Ks. alaviite <sup>12</sup>

Vektorisäädössä moottorilta on takaisinkytkentä, jonka avulla taajuusmuuttajalle tuodaan tietoa moottorin staattorin virtakomponenteista ja roottorin pyörimisnopeudesta. Virtakomponenttien avulla säädetään käämivuota ja momenttia erikseen. Tämä tekee vektorisäädöstä skalaarisäätöä tarkemman<sup>14</sup>.

Suoramomenttisäätö (DTC) on vektorisäätö, jossa ohjataan suoraan vääntömomenttia. Kyseisellä säädöllä saadaan aikaiseksi erinomainen tarkkuus. DTC reagoi erittäin nopeasti kuorman muutokseen. Täten momentin muutos on erittäin nopeaa ja pienellä lähtötaajuudella tarkkaa. Tämä mahdollistaa pehmeät moottorin kiihdytykset sekä pysäytykset. DTC optimoi osakuormilla moottorin magneettivuota nopeuden sekä kuormituksen perusteella. Tämä parantaa huomattavasti hyötysuhdetta sekä vähentää moottorin melutasoa pumppu- ja puhallinsovelluksissa. Esimerkiksi 25 % kuormituksella kokonaishyötysuhde paranee jopa 10 % ja vastaavasti 50 % kuormituksella noin 2% verrattuna skalaarisäätöön. DTC:llä aikaansaadaan nopeampi säätö ja tätä kautta prosessien turvallisuustaso paranee, koska äkilliset nykäykset jäävät pois<sup>15</sup>. Pumppu ja puhallinsovelluksissa, joissa virtausalueet vaihtelevat paljon tai tulee paljon pysäytyksiä ja käynnistyksiä, on kannattavaa soveltaa DTC -säätöä. Tämä lisää järjestelmän energiatehokkuutta.

## 1.5 Sähkökäyttöjen kehitysnäkymiä

---

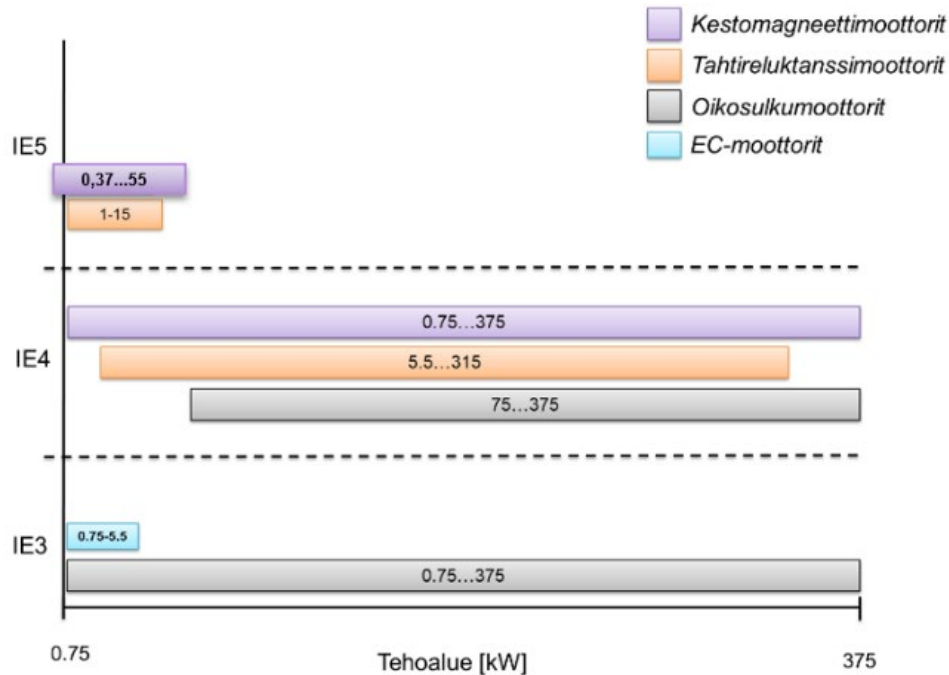
### **Moottorit**

Vaihtovirtamoottoreiden osalta uusin hyötysuhdeluokka IE5 on tulossa. Tämän luokan moottoreilla häviöt ovat noin 20 % pienemmät kuin IE4-luokan moottoreilla ja energiatehokkuuden odotetaan paranevan noin 10 % verrattuna IE3 luokan moottoreihin. Osa valmistajista on jo lanseerannut IE5 luokan moottorin 0.25 – 55 kW tehoalueille (esim. ABB, WEG, Grundfos, Hitachi, VEM). Tyypiltään uudet IE5 luokan moottorit ovat tahtireluktanssimoottoreita (ABB) ja kestopagneettimoottoreita (WEG, Grundfos, Hitachi, VEM). Kuvassa 5 on esitetty kootusti vuoden 2020 tilanne markkinoilla olevista pienjännitemoottorityypeistä sekä niiden sijoittumisesta hyötysuhdeluokissa ja tehoalueissa.

---

<sup>14</sup> Anibal T. de Almeida et al., Policy Options to Promote Energy Efficient Electric Motors and Drives in the EU, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017

<sup>15</sup> Ks. alaviite <sup>14</sup>



Kuva 4 Tarjolla olevat pienjännitemoottorityypit IE3-IE5 hyötysuhdeluokissa.

Kestomagneettimoottorien kehityksessä määrävänä tekijöinä ovat kestomagneettimateriaalit sekä niiden hyödyntämismahdollisuudet. Yhtenä kehityssuuntana on myös amorfisten metalliseosten hyödyntäminen moottorin rakenteissa. Näiden ympärillä on menossa paljon kehitystyötä, ja tuloksena onkin syntynyt jo IE5 luokan moottoreita. Haasteena tässä teknologiassa on kestomagneettimateriaalien harvinaisuus. Niiden louhiminen on kallista ja kuormittaa ympäristöä nostamalla moottorin kustannustasoa<sup>16</sup>. Kestomagneettimoottorit ovat hyötysuhteeltaan tehokkaita ratkaisuja hitaasti pyöriviin sovelluksiin, joissa sitä voidaan hyödyntää ilman erillistä alennusvaihdetta.

Tahtireluktanssimoottorin kehityksessä etuna on induktimoottoreita pienemmät häviöt ja korkeampi tehohyötysuhde. Etuna on myös, että siinä voidaan hyödyntää halvempia ferriittisiä materiaaleja verrattuna kestomagneettimoottoriin<sup>17</sup>.

Tahtireluktanssi- ja kestomagneettimoottorit on suunniteltu käytettäväksi taajuusmuuttajien kanssa. Useimmat toimittajat myyvätkin näitä moottoreita valmiina paketteina taajuusmuuttajien kanssa. Näin pyritään varmistamaan moottorin korkea hyötysuhde koko säätöalueella. Tahtireluktanssimoottorin tehokerroin on kuitenkin suhteellisen alhainen, minkä vuoksi ne vaativat tehokkaamman taajuusmuuttajan verrattuna muihin moottorityyppeihin. Tehokertoimen ja väännön parantamiseksi tahtireluktanssimoottoreita on kehitetty lisäämällä niihin kestomagneettimoottoreiden ominaisuuksia<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> A. T. de Almeida et al., Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU, Renewable and Sustainable Energy Reviews 74, 2017

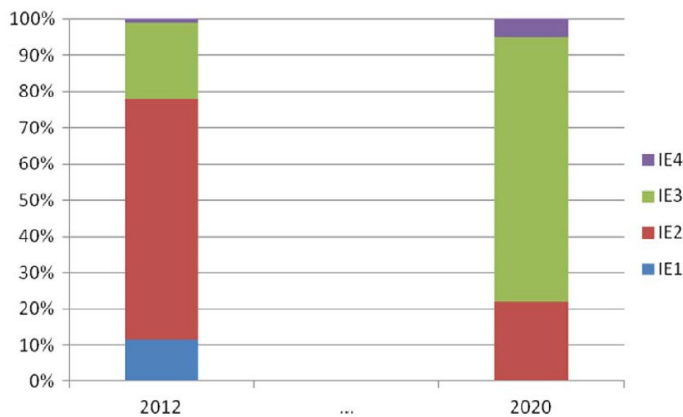
<sup>17</sup> Ks. alaviite <sup>16</sup>

<sup>18</sup> ABB. Saving Energy with VSD systems. Artikkel. Hydrocarbon Engineering 2019.

<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A2928&Language-Code=en&DocumentPartId=&Action=Launch>



Vaikka moottoreiden hyötysuhdeluokat kehittyvät koko ajan, ottaa niiden käyttöönotto markkinoilla oman aikansa. Moottoreiden suhteellisen pitkä elinikä vaikuttaa tähän oleellisesti. Korkeampien hyötysuhteen moottoreiden markkinoille tuloa on pyritty nopeuttamaan regulaatiolla, jolloin ainakin heikoimman hyötysuhteen moottorit jäävät pois markkinoilta. Alla olevassa kuvassa (Kuva 6) on arvio vuonna 2020 vallitsevasta vaihtovirtamoottoreiden jakaumasta hyötysuhdeluokittain<sup>19</sup>.



**Kuva 5 Arvio markkinoilla olevista moottoreista ja niiden hyötysuhdeluokista<sup>20</sup>**

Ajoneuvoteollisuuden puolella sähkömoottoreiden ympärillä on myös meneillään paljon tutkimusta. Siellä tavoitellaan paremman hyötysuhteen ratkaisuja, jotta sähköautojen toimintamattakaa ja ajo-ominaisuuksia saataisiin parannettua. Myös Suomessa on jo kehitelty erilaisia moottorimalleja sähköajoneuvoihin, ja sitä kautta on syntynyt uusia start-up yrityksiä (Egear Oy, Quantum Electric). Näissä on hyödynnetty mm. kestäväneettirakenteita ja uusia vaihdeteknologioita<sup>21</sup>.

### Taajuusmuuttajat

Taajuusmuuttajien kehitysnäkymät perustuvat pääosin niiden ohjaustekniikoiden kehitykseen. Taajuusmuuttajien globaalien markkinoiden odotetaan kasvavan vuosittain 7 %:a aikavälillä 2016-2026, joten jo pelkästään nykytekniikan soveltaminen on vielä käyttöönottovaiheessa [14].

Tutkimuksia on tehty mm. taajuusmuuttajaohjattujen pumppu-/puhallinjärjestelmien mallipohjaisten ohjausmenetelmien epätarkkuuksien vähentämisestä. Siinä hyödynnetään pumppun/puhaltimen ominaiskäyriä, järjestelmän mittaustietoja sekä taajuusmuuttajan ominaisuuksia pumppun/puhaltimen toimintapisteen ennustamiseen<sup>22</sup>. Tämä mahdollistaa järjestelmän kokonaishyötysuhteen ja energiatehokkuuden kasvun.

EC-moottorin ja taajuusmuuttajakäyttöisten induktiomootorin vertailuista on kahta erilaista näkemystä riippuen laiteominaisuuksien tutkimuksista. Selkeää voittajaa näiden välillä ei ole

<sup>19</sup> A. T. de Almeida et al., Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU, Renewable and Sustainable Energy Reviews 74, 2017

<sup>20</sup> Ks. alaviite <sup>19</sup>

<sup>21</sup> Oleynikov, A., Modular electric motor-generator technology associated with electric gears, EE-MODS conference, 2015

<sup>22</sup> Tamminen J. et al, Comparison of model-based flow rate estimation methods, EEMODS, 2015

pystytty esittämään. EC-moottoreiden on todettu joissain tutkimuksissa olevan hyötysuhteeltaan parempia alle 5 kW puhallinsovelluksissa, kun verrataan induktiomootorin ja taajuusmuuttajan yhdistelmään. Lisäksi ne ovat usein edullisimpia, kun moottorin kokoluokka jää alle 1 kW<sup>23</sup>.

Taajuusmuuttajien ominaisuuksia ja tekniikkaa hyödynnetään ja tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa yhä enemmän, esim.:

- Sähkön ”kysyntäjousto –ilmiöiden” ympärillä, jolloin sähkökuormaa voidaan sopeuttaa taajuusmuuttajien avulla sähkön hintatason ja sähkömarkkinoiden vaatimusten mukaisesti.
- Taajuusmuuttajan tekniikka hyödynnetään myös aurinkosähköjärjestelmissä tasasähkön muuttamiseen vaihtosähköksi, jolloin sitä voidaan syöttää takaisin valtakunnan verkkoon
- Liike-energian talteenotossa. Esimerkkinä tästä on sähköajoneuvon jarrutusenergian talteenotto ja sen siirtäminen sähkömoottorin hyötykäyttöön tai varastoon sähköakkuun.

---

<sup>23</sup> Koppanen V., Säädettävien sähkömoottoreiden vertailu, Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2015

## 2 Pumppaus- ja puhallinjärjestelmien energiatehokkuus ja kehitysnäkymät

---

Pumppaus- ja puhallinjärjestelmien arvioidaan kattavan globaalisti 25 % teollisuuden sähkönkäytöstä<sup>24</sup>. Globaali ekologinen vaikuttavuus, poliittiset paineet ja kustannustehokkuus ovat asettaneet näille järjestelmille energiatehokkuusvaatimuksia ja edesauttaneet laitteiden sekä järjestelmien kehittymistä. Pumpuille ja puhaltimien energiatehokkuuksille on EU:n Ecodesign-direktiivi määrännyt tiettyjä kriteereitä, jotka ajavat markkinoilta pois hyötysuhteeltaan heikoimpia pumppuja ja puhaltimia.

### 2.1 Pumput

---

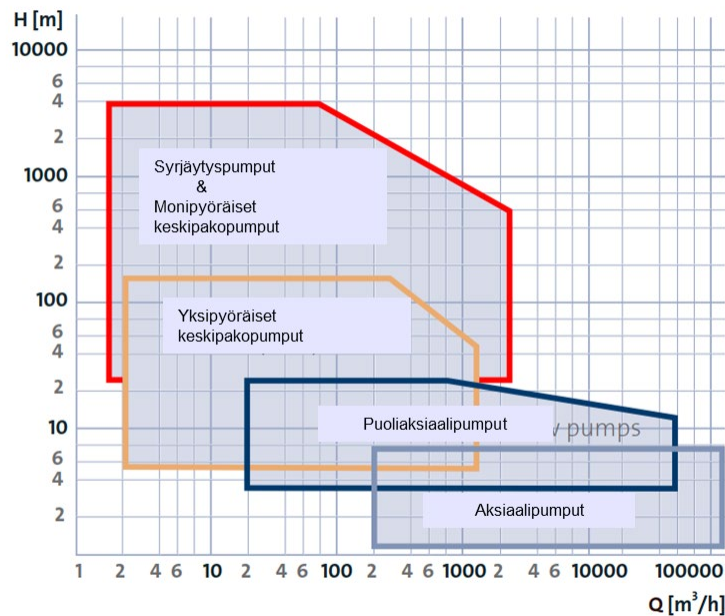
Teollisuuden eri tarkoituksiin löytyy useita eri pumpputyyppejä. Tyypillisimpiä ovat

- Aksiaalipumput
- Keskipakopumput (yksipyöräiset / monipyöräiset) ja
- Syrjäytyspumput

Aksiaalipumput ovat virtaaman tuotoltaan tehokkaimpia, kun taas paineen korotuksen kannalta heikoimpia. Syrjäytyspumpuille ominaista on sen sijaan hyvä paineen nostokyky. Keskipakopumput sijoittuvat toiminta-alueeltaan näiden väliin ja ne ovatkin yleisimpiä pumpputyyppejä. Pumpputyypien jakaumaa tilavuusvirran ja nostokorkeuden suhteen on esitetty Kuvassa 7.

---

<sup>24</sup> Koppanen V., Säädettyjen sähkömoottoreiden vertailu, Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2015



Kuva 6 Pumpputyypin toiminta-alue tilavuusvirran ja nostokorkeuden suhteen<sup>25</sup>

## 2.2 Pumppausjärjestelmät, Ecodesign-vaatimukset

Ecodesign-direktiivin vaatimukset koskevat nykyisellään keskipakovesipumppuja sekä akselitiivisteettömiä kiertovesipumppuja. Näistä on säädetty Euroopan komission asetuksilla EY N:o 547/2012 ja 641/2009.

Akselitiivisteettömille kiertovesipumpuille, joissa pumpattava neste on kosketuksissa moottorin kanssa, on olemassa oma energiatehokkuusluokitus, EEI-indeksi. Tälle on määritelty vähimmäisvaatimukset. Mitä pienempi EEI indeksi on, sitä parempi on sen energiatehokkuus. Elokuusta 2015 alkaen EEI indeksin vaatimuksena on ollut vähintään taso 0.23 ( $EEI \leq 0.23$ ). Tavoiteltavana (Benchmark) tasona pidetään arvoa  $EEI = 0.2$ .

EEI indeksin määritellään seuraavasti:

- EEI indeksin arvo on myytävän pumpun keskimääräisen ottotehon ja markkinoilla valitsevien mallien tyypillisen ottotehon suhde.
- Vertailupisteenä pidetään vuoden 2002 vastaavien pumppujen keskimääräistä tehoa, joille  $EEI = 1$
- Asetus koskee ”märkävesipumppuja” teholuokassa 1 – 2500 W. Käyttökohteet näille pumppuille ovat lämmitys- ja jäähdytyspiirit

Keskipakovesipumppujen energiatehokkuutta mitataan MEI-indeksin perusteella. Mitä korkeampi MEI-luku on, sitä energiatehokkaampi pumppu on. Referenssinä toimivat pumput, jotka kuuluvat hyötysuhteeltaan parhaimpaan kolmannekseen (MEI arvo on vähintään 0.7) MEI-arvo

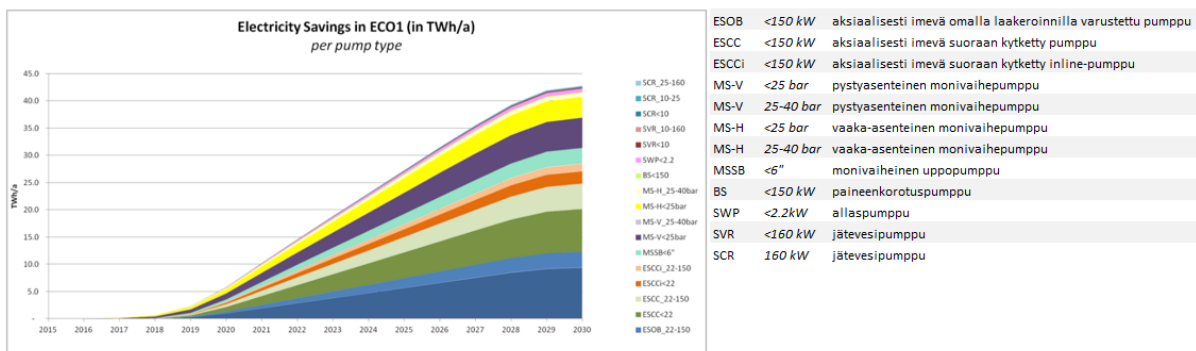
<sup>25</sup> Grundfos, verkko-opetusmateriaalit, <https://fi.grundfos.com/>

lasketaan parhaimman hydraulisen hyötysuhdepisteen mukaisesti, käyttäen 75 %, 100 % ja 110 % virtaaman toimintapistettä suhteessa parhaimman hyötysuhteen pisteeseen.

- 1.1.2015 alkaen vaatimus MEI arvolle on ollut vähintään 0.4. Tämä tarkoitti, että 40 % heikoimman hyötysuhteen pumpuista poistui markkinoilta tai niiden hyötysuhdetta joudutaan parantamaan.
- Mikäli pumpun hyötysuhdeindeksi on alle vaatimustason (0.4), sitä ei voida CE-merkitä.

Euroopan komissio on teettänyt selvityksen vesipumppuja koskevan Ecodesign sääntelyn toimituudesta ja kehittämisestä. Selvitysraportti on valmistunut joulukuussa 2018. Tarkastelussa on mukana nykyisen säädännön piirissä olevien vesipumppujen lisäksi allasvesipumput ja jätevesipumput. Suurin tehostamispotentiaali löydettiin taajuusmuuttajaohjauksien lisäämisestä. Tällä arvioitiin olevan EU-tasolla säästöpotentiaalia 51.5 TWh/a. Merkittävät säästökohde ovat yksivaiheiset keskipakopumput kokoluokassa 0...150 kW. Lainsäädännön laajentamisella allasvesi- ja jätevesipumppuihin ei selvityksen mukaan olisi merkittäviä vaikutuksia. Selvityksessä suositellaan, että nykyisin MEI-hyötysuhdeindeksin piirissä olevia pumppuja rajoitettaisiin tulevaisuudessa EEL-indeksillä. EEL ottaa huomioon koko pumppausjärjestelmän tehokkuuden ja näin ollen ohjaisi teknologiaa kokonaisvaltaisesti energiatehokkaampaan suuntaan<sup>26</sup>.

Selvityksessä on mallinnettu sähkön säästöä kolmelle eri skenaariolle (ECO1, ECO2 ja ECO3). Vuoteen 2030 mennessä saavutettu sähkösäästö näillä kolmella eri skenaariolla olisi 42.8 TWh, 47.3 TWh ja 48 TWh. Kuvassa 7 on esitetty sähkön säästön jakauma eri pumpputyypeittäin ECO1-skenaariolle.



Kuva 7 Sähkösäästö pumpputyypeittäin<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Ecodesign Pump Review. Study of Commission Regulation (EU) No. 547/2012. 2018  
[https://www.ecopumpreview.eu/downloads/Review\\_study\\_Water\\_pumps\\_547-2012\\_VM-VHK-ENER\\_Final\\_report.pdf](https://www.ecopumpreview.eu/downloads/Review_study_Water_pumps_547-2012_VM-VHK-ENER_Final_report.pdf)

<sup>27</sup> Ks. alaviite <sup>26</sup>

## 2.3 Pumppausjärjestelmien hyötysuhde ja kehitysnäkymiä

Erään tutkimuksen mukaan pumppausjärjestelmien häviöt muodostuvat oheisen taulukon (Taulukko 5) mukaisesti. Tämän mukaan merkittävin tekijä häviöiden muodostumiseen on putkistomitoituksen epätarkkuus<sup>28</sup>.

**Taulukko 5 Pumppausjärjestelmän häviöt**

Pumppausjärjestelmän komponentti	Hyötysuhde [%]	Häviöt [%]
Putkiverkosto	<b>50-60</b>	<b>40-50</b>
Pumput	<b>85-90</b>	<b>10-15</b>
Kytkenät	<b>~99</b>	<b>~1</b>
Moottorit	<b>&gt;90</b>	<b>&lt;10</b>
Taajuusmuuttajan kaapeloinnit	<b>~98</b>	<b>~2</b>
Taajuusmuuttajat	<b>95-98</b>	<b>2-5</b>
Muuntajat	<b>~99</b>	<b>~1</b>

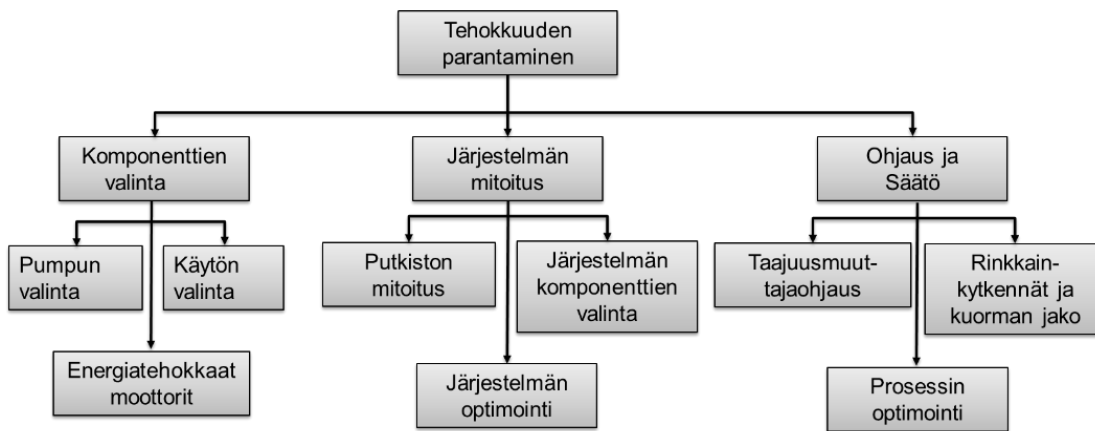
Pumpun rakenteiden osalta pumpun ja moottorin integraatiota ja rakenteiden yksinkertaistamista kehitetään eteenpäin. Samalla pumpun hyötysuhdetta pyritään parantamaan pumpun geometrian ja materiaalien avulla, joilla pyritään vaikuttamaan mm. kitkahäviöiden pienentämiseen. Kehitys- ja tutkimustyötä tehdään paljon myös pumppausjärjestelmien ohjauksen saralla ja niihin liittyvät vahvasti taajuusmuuttajat sekä käyttömoottorit.

Järjestelmien mitoitustarkkuus vaikuttaa oleellisesti järjestelmän hyötysuhteeseen. Mitoituksen osalta on tärkeää tunnistaa käyttökohteiden toimintavaatimukset etenkin virtaamavaihtelujen suhteen. Usein voi olla kannattavaa hyötysuhteen ja energiatehokkuuden näkökulmasta valita useampi rinnakkain kytkettävä pumppu ja toteuttaa niille tarpeen mukainen ohjaus, kuin valita yksi mahdollisimman iso pumppu kattamaan koko virtausalue. Suuret virtausaluevaihtelut ovatkin yksi mitoituksen haasteista, jolla voidaan oleellisesti vaikuttaa järjestelmän energiatehokkuuteen. Alla (Kuva 8) on vielä yhteen vedettynä pumppausjärjestelmän parannuskeinot:

- Energiatehokkaiden ja komponenttien valinnat (moottorityyppi ja -koko, pumput, kytkennät)

<sup>28</sup> Arun Shankar et al., A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system, Applied Energy, 2016

- Järjestelmän tarpeen mukainen ohjaus
- Järjestelmän mitoituksen tarkkuus<sup>29</sup>



Kuva 7 Pumppausjärjestelmän tehokkuuden parantamiskeinoja<sup>30</sup>

## 2.4 Puhaltimet

Teollisuuden ja kiinteistöjen puhallinjärjestelmissä on käytössä pääosin kolmea erityyppistä puhallintekniikkaa; aksiaal-, kammio- ja keskipakopuhaltimia (Kuva 9).

Aksiaalipuhaltimia käytetään mm. kiinteistöjen ilmanvaihtojärjestelmissä, savukaasujen poistopuhaltimina ja jäähdytysjärjestelmissä lauhdutinpuhaltimina. Aksiaalipuhaltimen etuna on, että se muodostaa tasaisen virtausprofiilin kanavassa, mikä minimoi virtaushäviöitä. Niissä voidaan käyttää myös integroituja EC-moottoreita, jotka mahdollistavat kompaktin rakenteen ja hyvän säädettävyyden ilman taajuusmuuttajaa. EC-moottorilla varustettu aksiaalipuhallin onkin hyötysuhteeltaan järkevä vaihtoehto, kun moottorin kokoluokka on alle 5 kW.

Radiaalipuhaltimia käytetään sovelluksissa, joissa tarvitaan suurempaa paineen tuottoa esimerkiksi kanavisto- ja lämmönvaihtimien aiheuttamien painehäviöiden voittamiseen. Radiaalipuhallinta suositetaan etenkin prosessi-ilmanvaihdon ratkaisuisissa, joissa olosuhteet voivat olla vaativia.

<sup>29</sup> Arun Shankar et al., A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system, Applied Energy, 2016

<sup>30</sup> Ks. alaviite <sup>29</sup>



**Kuva 8** Esimerkit aksiaalipuhaltimesta (vasen), keskipakopuhaltimesta (keskellä) ja kammio puhaltimesta<sup>31</sup>

## 2.5 Puhallinjärjestelmät, Ecodesign-vaatimukset ja rakentamismääräykset

Ecodesign-direktiivin vaatimukset ovat erilaiset puhaltimien ja ilmanvaihtokoneiden osalta. EU asetus N:o 327/2011 määrittää energiatehokkuuden minimivaatimukset 0,125...500 kW:n puhaltimille. Minimivaatimukset vaihtelevat riippuen puhallintyyppistä ja kytkentätavasta. Vaatimukset ovat astuneet voimaan vuosina 2013 – 2015. Vaatimuksia ei kuitenkaan sovelleta kohteisiin, joissa siirrettävän kaasun lämpötila on yli 100 °C:ttä, joka rajaa ulos esim. savukaasupuhaltimet. Myös räjähdysvaarallisten tilojen puhaltimet on rajattu pois. Asetus on parhaillaan uudelleentarkasteltavana.

EU asetuksessa N:o 1253/2014 on määritelty minimivaatimukset ilmanvaihtokoneiden energiatehokkuudelle. Nämä vaatimukset on otettu käyttöön vaiheittain vuosina 2016 – 2018. Vaatimukset on jaettu erikseen asuinkiinteistöille (RVU) ja muihin ”ei-asuinkiinteistö” kohteisiin (NRVU)<sup>32</sup>.

NRVU-kohteiden osalta ilmanvaihtokoneiden vaatimuksissa käytetään ominaistehoa eli SFP-lukua, joka kuvaa puhaltimen sähkötehoa vaihdettua ilmakeuutiota kohden (kW/m<sup>3</sup>/s). Direktiivissä on määritelty vaatimukset hyötysuhteille ja ohjaukselle. Sen mukaan ilmanvaihtokoneet on varustettava portaittaisella tai portaattomalla pyörimisnopeuden säädöllä. Portaittainen säätötapa tarkoittanee 2-nopeuksista puhallinta, joissa puhallinmoottoria voidaan käyttää täysi- tai puoliteholla. Vaatimuksissa on joitain poikkeuksia, kuten esim. räjähdysvaaralliset tilat<sup>33</sup>.

Asetuksessa on esitetty myös raja-arvo SFP-luvun ja lämmöntalteenottojärjestelmän hyötysuhteen väliselle suhdeluvulle. Kun lämmöntalteenotto toimii yli 67 % termisellä hyötysuhteella, sallitaan suurempi puhaltimen ominaisteho. Asetuksessa on omat vaatimuskohdat myös lämmöntalteenoton vaatimuksille.

Asuinkiinteistöjen osalta Ecodesign -vaatimukset ovat erilaisia ja niiden osalta puhaltimelle tarkastellaan energiankulutuslukua lämmitettyä asuinpinta-alaa kohden (SEC, kWh/m<sup>2</sup>.a). Tämä lasketaan ns. keskimääräisille ilmasto-olosuhteille. Tätä indeksilukua käytetään myös ilmanvaihtokoneen energialuokituksessa, joka on muotoa A+...G, jossa A+ on paras

<sup>31</sup> Tamminen J. et al, Comparison of model-based flow rate estimation methods, EEMODS, 2015

<sup>32</sup> Ekosuunnittelu Lot 6 pikaopas, Swegon Oy, www.swegon.fi

<sup>33</sup> Ks. alaviite <sup>32</sup>



energiatehokkuusluokka. Vuoden 2018 alusta alkaen SEC tulee olla  $-20 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ . Lisäksi suodatimilla varustetut ilmanvaihtojärjestelmät tulee varustaa suodattimen vaihdosta indikoivalla visuaalisella toiminnolla<sup>34</sup>.

Myös Suomen rakennuslainsäädäntö ottaa kantaa puhaltimien energiatehokkuuteen. Ympäristöministeriön asetuksessa (1010/2017) uuden rakennuksen tulo- ja poistoilmajärjestelmän SFP-luvun raja-arvoksi on määrätty  $1.8 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ . Vastaavasti pelkälle poistoilmajärjestelmälle raja-arvo on  $0.9 \text{ kW/m}^3/\text{s}$ <sup>35</sup>.

## 2.6 Puhallinjärjestelmät, Kehitysnäkymiä

---

Puhaltimien osalta kehitysnäkymät pohjautuvat lähinnä puhallinjärjestelmien ohjauksen kehitykseen ja kokonaisuuden hallintaan järjestelmien suunnittelun ja mitoituksen osalta. Tätä ohjaa voimakkaasti myös EU:n Ecodesign direktiivi. Yhtenä tärkeänä tekijänä on huolehtia puhallinjärjestelmien ominaiskulutuksesta etenkin ilmanvaihtojärjestelmissä, joihin lisääntyvät lämmöntalteenottoratkaisut tuovat puhaltimen näkökulmasta enemmän kapasiteettitarvetta lisääntyvien painehäviöiden muodossa.

---

<sup>34</sup> Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta ilmanvaihtokoneiden ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta, 4.7.2014

<sup>35</sup> 1010/2017 Ympäristöministeriön asetus, Uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, 27.12. 2017

### 3 Säästöpotentiaalin arviointi (kirjallisuuskatsaus)

---

Arvioiden mukaan uudet ja olemassa olevat teknologiat mahdollistavat sähkömoottorijärjestelmissä 20 – 30 %:n energiansäästöpotentiaalin lyhyellä takaisinmaksuajalla<sup>36</sup>. Jo pelkästään Suomen teollisuuden osalta tämä tarkoittaisi noin 6.8 TWh:n vuosittaista sähkön säästöpotentiaalia<sup>37</sup>. Tämä on noin 17 % koko teollisuuden sähkön käytöstä (2017).

Tutkimusten mukaan pumppaus- ja puhallinjärjestelmien energiatehokkuudessa on paljon parannettavaa. Järjestelmien hyötysuhteen uskotaan olevan heikoimmillaan jopa 50 – 60 %<sup>38</sup>. Suurin yksittäinen tekijä heikkoon hyötysuhteeseen on mitoituksen epätarkkuus. Pumppaus- ja puhallinjärjestelmien säästöpotentiaalin arvioidaan olevan keskimäärin 30 %. Jos tätä potentiaalia peilataan Suomen teollisuuden sähkönkäyttöön ja arvioidaan pumppaus- ja puhallinsovellusten osuudesta teollisuuden sähkönkäytöstä (25 %), voidaan teollisuuden osalta arvioida säästöpotentiaaliksi noin 2.9 TWh/a. Tämä kattaisi noin 43 % edellä lasketusta Suomen teollisuuden sähkönkäyttöjen säästöpotentiaalista.

Yksittäisten komponenttien lisäksi järjestelmäkokonaisuuksien tarkemmalla mitoituksella ja kehittyneillä ohjausmenetelmillä vaikutetaan oleellisesti järjestelmien hyötysuhteeseen ja edelleen energiatehokkuuteen. Tutkimusteemat aihealueen ympärillä voidaan jakaa seuraaviin kokonaisuuksiin

- Komponenttien materiaali- ja geometriakehitys häviöiden pienentämiseksi
- Useamman pumpun/puhaltimen järjestelmät ja niiden energiatehokkaat säätö- ja mitoitusmenetelmät

Sen sijaan, että keskitytään pelkästään yksittäisien laitteiden, kuten moottoreiden ja pumppujen tehokkuuden optimointiin, viedään fokusta järjestelmäkokonaisuuksien optimointiin. Näin mukaan tulevat säätömenetelmät ja systeemin kuormituskäyrät ja mitoitus.

Direktiivi onkin jo määritellyt ilmanvaihtojärjestelmille koko systeemiä koskevia määräyksiä ja minimivaatimuksia. Nämä pitävät sisällään lämmöntalteenoton hyötysuhteen ja puhaltimien ominaiskulutuksien välisiä relaatioita. Määräyksissä huomioidaan esimerkiksi, että korkeammalla lämmöntalteenoton hyötysuhteella sallitaan korkeampia ilmanvaihtopuhaltimien ominaiskulutuksia, koska järjestelmä sisältää enemmän virtausvastusta aiheuttavia talteenottoratkaisuja<sup>39</sup>.

---

<sup>36</sup> EEMODS2017, esite- ja ohjelma, <http://eemods17.org/wp-content/uploads/2017/08/emoods17-17-08-2017-web-.pdf>

<sup>37</sup> Suomen teollisuuden sähkönkäyttö vuonna 2016, Tilastokeskus, [https://www.stat.fi/til/tene/2016/tene\\_2016\\_2017-11-03\\_tau\\_003\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tene/2016/tene_2016_2017-11-03_tau_003_fi.html)

<sup>38</sup> Arun Shankar et al., A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system, Applied Energy, 2016

<sup>39</sup> Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta ilmanvaihtokoneiden ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta, 4.7.2014

Sähkökäyttösovellusten energiatehokkuuden edistämiseen tarkoitettuja laskentasovelluksia on tarjolla etenkin laitetoimittajien internet-sivustoilla. Laskentasovelluksia on listattuna liitteessä 1. Laskennoissa on mukana sähkömoottoreiden hyötysuhdeluokat ja taajuusmuuttajaohjatut moottorit sekä niiden vertaaminen vanhoihin moottoriluokkiin ja erilaisiin säätötapoihin. Osassa annetaan käytön toimintapisteet ja valitaan hyötysuhdeluokat. Kehittyneimmissä laskentasovelluksissa lähdetään laskemaan säästöjen vaikutuksia puhallin- tai pumppausprosessin mitoitustietojen ja säätötapojen avulla. Sovelluksia löytyy selainpohjaisena, asennettavina Windows-ohjelmistoina, mobiilisovelluksina sekä Excel-tiedostoina. Näistä mobiilisovellus on nykyaikaisin muoto ja on myös helppokäyttöinen. Huonona puolena tässä on datan liikuttelun hankaluus eri sovellusten välillä, kun verrataan esim. Excel-pohjaiseen laskentasovellukseen.

Em. laskentasovellusten lisäksi pumppu- ja puhallintoimittajilla on myös ilmaisia mitoitussovelluksia, joilla voidaan myös tehdä erilaisten sovelluskohteiden laskelmia energiatehokkuuden edistämiseen. Nämä eivät kuitenkaan tee vertailua energiatehokkuusvaikutuksista esimerkiksi eri säätötapojen tai hyötysuhdeluokkien välillä.

Laskentasovelluksilla voidaan tehdä energiansäästölaskelmia ja vertailuja erilaisten säätötapojen ja moottorien hyötysuhdeluokkien vaikutuksista tarkasteltavan järjestelmän toiminnasta. Tärkeää on kuitenkin tietää järjestelmän todelliset toimintapisteet ja mitoitustiedot laskelmia tehdessä, jotta laskelmia voidaan tehdä luotettavasti. Laskentasovellusten käyttö vaatii ammattitaitoa. Parhaaseen lopputulokseen päästään, jos laskelmat tehdään yhdessä esimerkiksi laitetoimittajan kanssa.

## Lähteet

---

Anibal T. de Ameida et al., Policy Options to Promote Energy Efficient Electric Motors and Drives in the EU, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017

Arun Shankar et al., A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system, Applied Energy, 2016

Kinnunen J., ABB:n pienjännitemoottorit, koulutusmateriaali, 2014

Ellä J., Häviöjakauma korkeanhyötysuhteen sähkömoottorissa, DI-työ, Tampereen teknillinen yliopisto, 2015

Enomoto Y. et al., Amorphous Motor with IE5 Efficiency Class, Hitachi Review Vol. 64 (2015), No. 8

Koppanen V., Säädettävien sähkömoottoreiden vertailu, Opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu, 2015

Tamminen J. et al, Comparison of model-based flow rate estimation methods, EEMODS, 2015

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2009/125/EY täytäntöönpanosta ilmanvaihtokoneiden ekologisen suunnittelun vaatimusten osalta, 4.7.2014

H. Kettunen, Taajuusmuuttajan parametrioheen laatiminen, Insinööriyö, JAMK, 2015

A. T. de Almeida et al., Policy options to promote energy efficient electric motors and drives in the EU, Renewable and Sustainable Energy Reviews 74, 2017

Future Market Insights, Advantages of Variable Frequency Drives and Future Trends in the Market 2016 – 2026, 2016

Oleynikov, A., Modular electric motor-generator technology associated with electric gears, EEMODS conference, 2015

1010/2017 Ympäristöministeriön asetus, Uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, 27.12.2017

Hietalahti, L. Teollisuuden sähkökäytöt. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka. 2013

### Internet-lähteet

- Ekosuunnittelu Lot 6 pikaopas, Swegon Oy, [www.swegon.fi](http://www.swegon.fi)

- EEMODS2017, esite- ja ohjelma, <http://eemods17.org/wp-content/uploads/2017/08/eemods17-17-08-2017-web-.pdf>
- Suomen teollisuuden sähkönkäyttö vuonna 2016, Tilastokeskus, [https://www.stat.fi/til/tene/2016/tene\\_2016\\_2017-11-03\\_tau\\_003\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/tene/2016/tene_2016_2017-11-03_tau_003_fi.html)
- EU komission asetus (1781/2019). [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2019.272.01.0074.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.272.01.0074.01.ENG)
- ABB. Saving Energy with VSD systems. Artikkel. Hydrocarbon Engineering 2019. <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A2928&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Ecodesign Pump Review. Study of Commission Regulation (EU) No. 547/2012. 2018 [https://www.ecopumpreview.eu/downloads/Review\\_study\\_Water\\_pumps\\_547-2012\\_VM-VHK-ENER\\_Final\\_report.pdf](https://www.ecopumpreview.eu/downloads/Review_study_Water_pumps_547-2012_VM-VHK-ENER_Final_report.pdf)
- Grundfos, verkko-opetusmateriaalit, <https://fi.grundfos.com/>
- Electric Motor Engineering. Artikkel. <https://www.electricmotorengineering.com/electric-motor-what-is-the-real-innovation/>
- VEM Motors Finland Oy. <https://www.vem.fi/hinnastot/>
- Fläktwoods, [www.flaktwoods.fi](http://www.flaktwoods.fi), Ahlsell, [www.ahlsell.fi](http://www.ahlsell.fi)

## Liite 1. Laskentatyökalut, Sähkökäytöt ja taajuusmuuttajat

Työkalun toteuttaja	Sovelluskohteet	Alusta	Linkki
ABB	Sähkömoottorit, taajuusmuuttajat, pumppu/puhallin, kompressorit	Selain, Mobiilisovellus	<a href="https://new.abb.com/drives/energy-efficiency/energysave-calculator">https://new.abb.com/drives/energy-efficiency/energysave-calculator</a>
Danfoss	Sähkömoottorit, taajuusmuuttajat	Mobiilisovellus	<a href="http://ecosmart.danfoss.com">http://ecosmart.danfoss.com</a>
Siemens	Sähkömoottorit, taajuusmuuttajat, pumppu/puhallin	Mobiilisovellus	<a href="https://www.sinasave.siemens.com/#/en/pump">https://www.sinasave.siemens.com/#/en/pump</a>
Eaton, Energy Saving Estimator	Sähkömoottorit, taajuusmuuttajat	Ohjelma, Windows	<a href="http://www.moeller.net/en/products_solutions/motor_applications/switch_protect/frequency_inverter/energy_savings_estimator.jsp">http://www.moeller.net/en/products_solutions/motor_applications/switch_protect/frequency_inverter/energy_savings_estimator.jsp</a>
Honeywell	Sähkömoottorit, taajuusmuuttajat	Excel	<a href="https://customer.honeywell.com/en-US/support/commercial/se/vfde/Pages/default.aspx">https://customer.honeywell.com/en-US/support/commercial/se/vfde/Pages/default.aspx</a>
Rockwell automation	Puhallin	Selain	<a href="https://ab.rockwellautomation.com/drives-motors/kwsavings.page">https://ab.rockwellautomation.com/drives-motors/kwsavings.page</a>
SEAI, Sustainable Energy Authority of Ireland	Sähkömoottorit, pumppausjärjestelmät	Excel	<a href="https://www.seai.ie/resources/tools/">https://www.seai.ie/resources/tools/</a>
U.S Department of Energy	Pumppaus-järjestelmät	Excel	<a href="https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/draft-pei-calculator">https://www.energy.gov/eere/buildings/downloads/draft-pei-calculator</a>



