LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
BH60A4000 Ympäristötekniikan kandidaatintyö ja seminaari

JÄTEVESIPUMPPAAMOJEN ENERGIATEHOKKUUS

Energy efficiency of wastewater pumping stations

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka
Työn ohjaaja: Laboratorioinsinööri Simo Hammo

Lappeenrannassa 6.12.2015
Anni Viitala

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO 2
1 JOHDANTO 4
1.1 Työn taustoja 4
1.2 Työn tavoite ja rakenne 5
2 JÄTEVESIVERKOSTON RAKENNE, PUMPPAAMOT JA PUMPPUJEN TEORIA ... 6
2.1 Jätevesiverkosto 6
2.1.1 Viemärijärjestelmät 7
2.1.2 Jätevesimäärät 7
2.2 Jäteveden pumppaus 8
2.2.1 Keskipakopumppu 9
2.2.2 Nostokorkeus 10
2.2.3 Ominaiskäyrä 10
2.2.4 Pumpun teho 12
2.2.5 Kytkentätavat 12
3 ENERGIATEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT 13
3.1 Mitoitus 13
3.2 Hyötysuhde ja ominaisenergia 14
3.3 Säätötavat 15
3.3.1 Kuristussäätö 15
3.3.2 On/off- säätö 15
3.3.3 Pyörimisnopeussäätö 16
3.4 Pumppujen rakenne ja toimintavarmuus 18
3.5 Elinkaarimallinnus 19
4 JÄTEVESIPUMPPAAMOJEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN JA ARVIOINTI 20
4.1 Haastattelun tulokset; jäteveden pumppauksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät 20
4.1.1 Uuden pumppaamon tai pumppaamokoneiston hankinta 21
4.1.1.1 Ylimitoitus 21
4.1.1.2 Pumppaamon toimintavarmuus ja tukkeutumattomat pumput 21

4.1.1.3 Energiataloudellisen laitehankintaprosessin kehittäminen 22
4.1.2 Pumppaamon energiatehokkuuden lisääminen 23
4.1.2.1 Säätö- ja ajotavan muuttaminen 23
4.1.2.2 Energia- analyysit ja suorituskyvyn mittaukset 23
4.1.2.3 Muita huomioita 24
4.2 Pumppaamon energiatehokkuuden määritysmenetelmä 24
4.3 Summanlahden jätevesipumppaamo 27
4.3.1 Nykyinen tila 27
4.3.2 ETpu- menetelmän käyttö jätevesipumppaamolla 29
4.4 Lepikön jätevesipumppaamo 31
4.4.1 Nykyinen tila 31
4.4.2 Tulokset 34
4.4.2.1 Skenaario 1 34
4.4.2.2 Skenaario 2 36
5 JOHTOPÄÄTÖKSET 37
5.1 Energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät 37
5.2 Jätevesipumppaamojen energiatehokkuuden määritys 37
6 YHTEENVETO 39
LÄHTEET 41

LIITTEET

Liite I Haastattelun kysymykset
Liite II Lähtöarvot ja Energiatehokkuuden määritysmenetelmällä lasketut arvot

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset

c_p	paikallishäviökerroin	
g	putoamiskiihtyvyys	9,81 m/s^2
E_s	ominaisenergia	kWh/m^3
H	nostokorkeus	m
h	painehäviö	m
k	nimellistehontarve	kW
n	pyörimisnopeus	rpm
P	teho	W
p	paine	pa, bar
t	aika	s, h
Q	tilavuusvirta	m^3/s, m^3/h, m^3/d
q	tilavuusvirta	l/s
v	keskinopeus	m/s

Kreikkalaiset

η	hyötysuhde	
ρ	tiheys	kg/m^3

Alaindeksit

e	sähkö, electricity
geod	geodeettinen
i	imupuoli
m	moottori
nim	nimellis
p	painepuoli
pka	painotettu keskiarvo
pump	pumppu
teor	teoreettinen
tod	todellinen

tot	kokonais
v	vesi

Lyhenteet

LCC	Life cycle cost
ETpu	Energiatehokkuuden tunnusluku
KA	Keskiarvo
CO_2	Hiilidioksidi

1 JOHDANTO

1.1 Työn taustoja

Energiatehokkuuden parantamisella tarkoitetaan uutta tekniikkaa, asenteita ja toimenpiteitä, joilla vaikutetaan tuotteen tai tuloksen energiapanokseen (L 30.12.2014/1429, § 3). Kansainvälisen energiajärjestön mukaan energiankäytön tehostamisella olisi mahdollista kattaa jopa puolet ilmastonmuutoksen hidastamiseen tarvittavasta kasvihuonekaasujen vähentämistarpeesta (IEA 2009, 46). Suomen tavoitteena on vähentää energiankulutusta 37 TWh vuoteen 2020 mennessä, mikä tarkoittaa energiatehokkuuteen panostamista usealla sektorilla. Myös kuntia ohjataan muuttamaan toimintaansa energiatehokkaammaksi ja vähentämään toiminnan ilmastovaikutuksia. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2009, 6; Motiva 2015.)

Kuntien tehtävänä on lain mukaan vesihuollon suunnitteleminen siten, että ihmisillä on tasavertaisesti mahdollisuus laadukkaaseen talousveteen sekä viemärivesien poistamiseen ympäristöä ja terveyttä vaarantamatta. Vesihuollon järjestämisestä kunnassa säädetään vesihuoltolaissa ja sen mukaan vesihuollosta vastaa vesihuoltolaitos toiminta-alueellaan. (L 9.2.2001/119, § 5–6, 13–14.) Vesihuolto käsittää yhdyskuntien vedenhankinnan ja käsittelyn, vedenjakelun kuluttajille, viemäröinnin ja jätevedenpuhdistuksen (Karttunen 2013, 41, 49).

Erilaiset pumppausprosessit kuluttavat tutkimuksien mukaan noin 20 % kaikesta sähkömoottorien kuluttamasta energiasta. On myös tutkittu, että pumppujen kuluttamasta energiasta voitaisiin säästää noin 50 %. (Aranto 2010, 5.) Pumppaussysteemien energiatehokkuutta olisi siis runsaasti parannettavissa. Vesihuollossa pumppausta tarvitaan vesien siirrossa.

Haminan kaupungin alueella vesihuollosta vastaa Haminan Vesi- liikelaitos. Haminan Vedellä oli vuonna 2014 noin 253 km vesijohtoverkostoa ja 225 km jätevesiverkostoa. Teollisuusyritykset muodostavat merkittävän asiakaskunnan vesilaitokselle. Haminan Vedellä oli vuonna 2014 5238 kiinteistöä liittyneenä vesijohtoverkostoon ja 4500

jätevesiverkostoon. (Haminan Vesi 2014.) Vesilaitoksen toiminta-alueella viemäröitävät jätevedet johdetaan normaalisti Kymen Vesi Oy:n jätevedenpuhdistamolle, joka toimii Kotkan kaupungin alueella. Omaa jätevedenpuhdistamoa käytetään tällä hetkellä muutaman viikon ajan vuodessa. Koska omien vedenottamoiden vedenhankinta on vähäistä, noin 10 % hankitusta käyttövedestä, ja omaa jätevedenpuhdistamoa käytetään vain vähän, on suurin osa energiankulutuksesta vedensiirron pumppaamoilla. Haminan vesi on asettanut käyttöhallintasuunnitelmaan yhdeksi tavoitteeksi pumppaamojen energiatehokkuuden kehittämisen. Energiatehokkuutta parantamalla pyritään vähentämään vuosittaisia käyttökustannuksia ja ympäristövaikutuksia. (Haminan Vesi 2015, 10,16,24.)

1.2 Työn tavoite ja rakenne

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan jätevesipumppaamojen energiatehokkuuteen vaikuttavia ja sitä parantavia tekijöitä. Työ on tehty yhteistyössä Haminan Veden kanssa. Työn tavoitteena on löytää vesihuoltolaitoksen jätevesipumppaamoille energiatehokkuutta parantavia tekijöitä sekä määrittää pumppaamojen nykytilaa ja energiatehokkuuden parannuspotentiaalia. Oletuksena on, etteivät pumppaamot toimi tehokkaimmalla mahdollisella tavalla, vaan pumppauksen energiatehokkuutta voidaan parantaa. Kuvassa 1 on esitetty yleisesti vesihuollon toimintakaavio ja työn rajaus.

Kuva 1. Vesihuollon toimintakaavio ja työn rajaus (Karttunen 2013).

Ensiksi tarkastellaan luvussa kaksi teoreettisesti pumppaamon rakennetta ja pumppuja. Luvussa kolme käsitellään myös teoriapohjalta jätevesipumppaamojen energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Sen jälkeen käydään läpi työssä käytettävät menetelmät, sitten työn tulokset ja johtopäätökset.

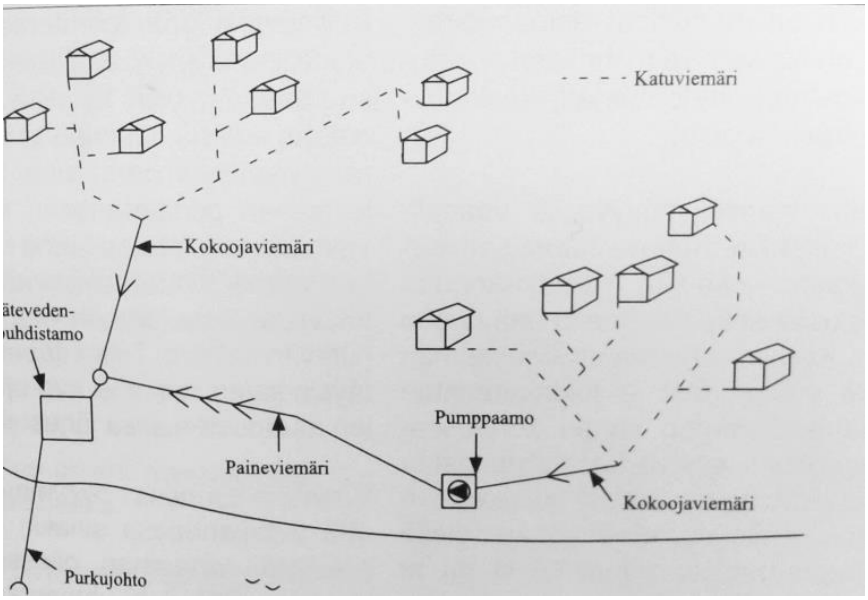
2 JÄTEVESIVERKOSTON RAKENNE, PUMPPAAMOT JA PUMPPUJEN TEORIA

Viemärilaitos koostuu jäte- ja hulevesien keräämiseen osallistuvista rakenteista eli erilaisista viemäreistä sekä pumppaamoista ja puhdistuslaitoksesta. Jätevesiä ovat kotitalouksien ja teollisuuden poisjohdettavat vedet. Hulevesiä taas ovat sateesta ja sulamisesta syntyvät vedet. (Karttunen 2003, 49–50.) Tässä luvussa kerrotaan lyhyesti jätevesiverkoston rakenteesta, erilaisista viemäröintijärjestelmistä sekä viemäröitävistä vesimääristä. Sen jälkeen käsitellään jätevesiverkoston pumppaamoja ja pumppauksen teoriaa.

2.1 Jätevesiverkosto

Jätevesiverkoston tehtävä on kerätä ja kuljettaa kaikki yhdyskunnassa syntyneet jätevedet puhdistuslaitokselle. Jätevesien lisäksi verkostoon siirretään osittain hulevedet, viemäröintijärjestelmästä riippuen. Putkiston ja pumppaamojen rakenteiden vioittuneisuuden takia sekä suoraan maaperästä viemäriverkostoon pääsee myös vuotovettä, joka lisää viemäröitävän veden määrää. (Karttunen 2004, 454, 464.)

Viemärissä vesi kulkeutuu eteenpäin gravitaation avulla eli painovoimaisesti, tai pumppaamalla. Tavoitteena on saada vesi kulkemaan painovoimaisesti viettoviemäreissä, jolloin veden siirtämiseen ei tarvita sähköenergiaa. Pumppausta paineviemäreissä tarvitaan maaston ollessa tasainen ja viemärin pitkä, korkeuden muuttuessa tai esimerkiksi vesistön alituksessa. (Karttunen 2004, 487.) Viemäriverkosto koostuu pääviemäreistä, kokooja- ja paineviemäreistä sekä kiinteistöjen tonttiviemäreistä, kuten kuvassa 2.



Kuva 2. Viemärilaitoksen osat ja toimintakaavio. (Karttunen 2003, 49.)

2.1.1 Viemärijärjestelmät

Viemärijärjestelmät jaetaan erillis- ja sekaviemäröintiin. Sekaviemäröinnissä hule- ja kuivatusvedet johdetaan samassa viemärissä kiinteistöltä johdettujen jätevesien kanssa. Erillisviemäröinnissä taas jäte- ja hulevedet johdetaan erillään omissa viemäreissään ja hulevesien kanssa johdetaan myös kuivatusvedet. Erillisviemäröinnissä hulevedet johdetaan yleensä suoraan vesistöihin avo-ojien avulla.(Karttunen 1999, 158- 159.)

2.1.2 Jätevesimäärät

Asumisvesiksi luetaan kuuluvan talouksien lisäksi joidenkin laitosten, kuten sairaaloiden jätevesi, sillä niiltä tulevan jäteveden laatu ei huomattavasti eroa kotitalouksien laadusta. Asumisessa syntyvä jäteveden määrä lasketaan kiinteistölle johdetun vesimäärän mukaisesti. Vedenominaiskäyttö on keskimäärin 250 litraa päivässä asukasta kohden. Vesimäärien arvioiminen ja muutoksien ennustaminen vähintään 20–40 vuodeksi on tärkeää, kun uusia viemäriputkistoja ja laitteistoa mitoitetaan, sillä viemärit asennetaan yleensä ainakin 40 vuodeksi. Kiinteistöjen vedenkulutus ja siten myös jäteveden syntyminen vaihtelevat vuorokauden sisällä. (Karttunen 1999, 139.)

Teollisuuden jätevesimäärien arvioiminen on vaikeampaa kuin asumisjätevesien, sillä vedentarve riippuu tuotantoalasta, tuotannon laadusta ja määrästä, vuodenajasta sekä siitä, paljonko taloudelliseen vedenkäyttöön on panostettu. Kaupungeissa teollisuuden vedenkulutus on keskimäärin 20- 30 % kaikesta vedenkäytöstä. Suuret teollisuusyritykset tavallisesti huolehtivat itse viemäröinnin järjestämisestä. (Karttunen 2004, 459.)

Huleveden määrä vaikuttaa jäteveden määrään sekaviemäreissä. Tärkein arviointikohde on mitoitussade eli suurin sadevesimäärä, jolle viemärit mitoitetaan. Maaperän tai pinnan laadulla on myös vaikutusta viemärin mitoitukseen, sillä pinnoilla on erilainen vesien imeytymistä vaimentava vaikutus. Hulevesien määrä vaihtelee paljon vuodenaikojen mukaan. Suurimmat hulevesimäärät syntyvät keväällä lumen sulamisvesien vuoksi Myös vuotoveden määrä kasvaa sateiden ja sulamisvesien vuoksi keväällä ja syksyisin. (Karttunen 1999, 141- 142; Karttunen 2004, 459, 465.)

2.2 Jäteveden pumppaus

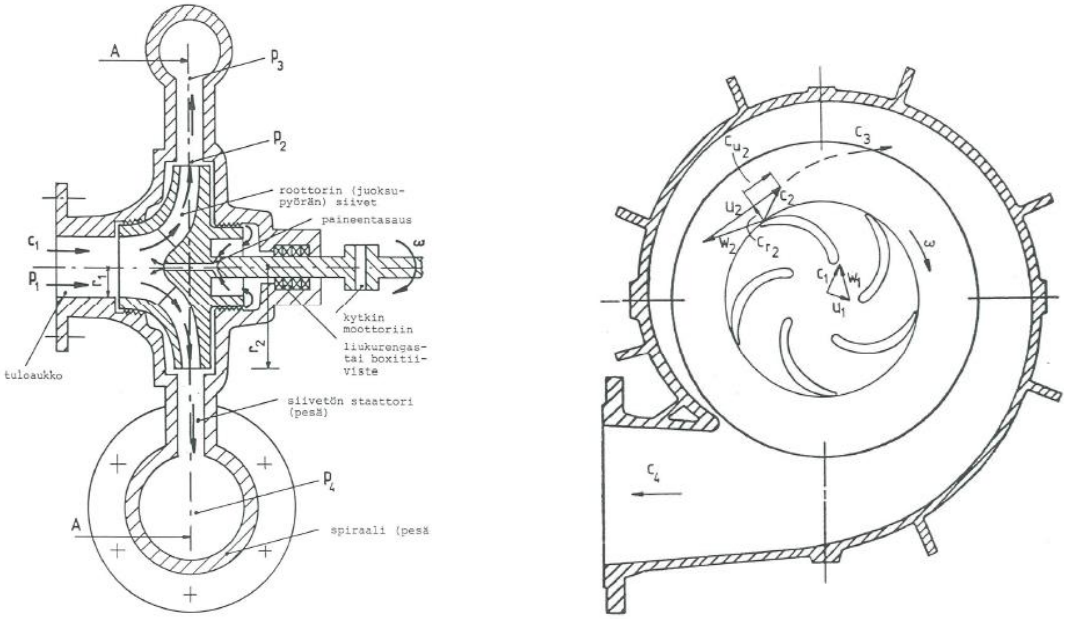
Viemäriverkostossa vedensiirtoa varten asennetut pumput sijoitetaan pumppaamoihin. Pumppaamo on laitos, joka rakentuu koneistosta ja pumppaamorakennuksesta. Koneistoon sisältyvät pumput, joita on yleensä ainakin kaksi, sekä moottorit, käynnistin-, lämmitys- ja hälytyslaitteet. Pumppaamot rakennetaan kokonaan tai osittain maanalaisiksi. Pakettipumppaamoiksi sanotaan pumppaamoita, jotka valmistaja on suunnitellut ja koonnut valmiiksi. Pumppaamojen pumput ovat joko kuiva- tai uppopumppuja. Pienissä pumppaamoissa voidaan käyttää vesialtaan lattialla sijaitsevia uppopumppuja, mutta suurissa yleensä kuivapumppuja, jotka sijaitsevat altaan yläpuolella. (Karttunen 2004, 249, 487; Hammer 2012, 285–286.) Pumppaamojen rakennuttaminen ja ylläpito on kallista, minkä vuoksi ne pyritään verkostosuunnittelulla korvaamaan vaihtoehtoisilla ratkaisuilla, jos mahdollista (Hammer 2012, 285).

Keskipakopumppu on yleisesti kaikista käytetyin pumpputyyppi (Grundfos, 12). Keskipakopumppujen suosiminen johtuu niiden yksinkertaisuudesta, edullisuudesta ja laajasta käyttöalasta (Hammer 2012, 80). Myös Haminan Vedellä kaikki jätevesipumppaamojen pumput ovat keskipakopumppuja (Suurnäkki 2015). Tässä työssä

pumpun teoriatarkastelu keskittyy siten keskipakopumppuihin. Käytännössä pumpun valinnassa huomioidaan esimerkiksi pumpattavan vedenmäärä, kokonaisnostokorkeus, toimintavarmuus, ohjaustapa ja taloudellisuus (Karttunen 2004, 255–256).

2.2.1 Keskipakopumppu

Keskipakopumput kuuluvat dynaamisiin eli nopeusperiaatteella toimiviin pumppuihin. Pumpun tärkeimmät osat ovat juoksupyörä, sitä pyörittävä akseli ja pumppukammio. Kuvassa 3 on esitetty pumpun rakenne. Keskipakopumpun perusperiaate on, että moottori pyörittää pumpun juoksupyörää, jolloin juoksupyörälle johdetun nesteen virtauksen kineettinen energia muutetaan hydrauliseksi eli paine-energiaksi. Pumpun toiminnasta aiheutunut paine-ero pumpun suulla ja lähtöpuolella aiheuttaa nesteen virtauksen systeemiin. (Grundfos, 12.)



Kuva 3. Keskipakopumpun rakenne poikkileikkauskuvassa ja edestä katsottuna. (Larjola *et al*. 2015, 53- 54.)

Keskipakopumput voidaan jakaa virtaussuunnan mukaan aksiaali-, radiaali- ja diagonaalipumppuihin. Radiaalipumpuissa vedenvirtaus on pumpun akselia vastakkainen, aksiaalispumpuissa akselinsuuntainen ja diagonaalipumpuissa vinossa akseliin nähden Juoksupyörän mallin valinta riippuu paineen, virtauksen ja asennuksen määrittämistä vaatimuksista. (Karttunen 2004, 27–28; Grundfos, 15–16.)

2.2.2 Nostokorkeus

Pumpun nostokorkeus muodostuu staattisesta ja dynaamisesta nostokorkeudesta. Staattinen nostokorkeus muodostuu nestepinnan ja pumpun välisestä staattisesta imukorkeudesta sekä pumpun ja nostotason välisestä staattisesta painekorkeudesta. Dynaaminen korkeus muodostuu virtaus- ja paikallisvastuksien aiheuttamista painehäviöistä.(Karttunen 1999, 35-36.) Nostokorkeus voidaan laskea kaavalla 1.

$$H = \left(H_{geod} + \frac{\Delta p_{tot}}{\rho g}\right) + h_p + h_i + \frac{v^2}{2g} + c_p \frac{v^2}{2g} \quad \text{[m] (1)}$$

missä,

c_p = paikallishäviökerroin

H_{geod} = geodeettinen nostokorkeus [m]

h_i= imupuolen painehäviö [m]

h_p = painepuolen häviö [m]

v= keskinopeus putkessa [m/s]

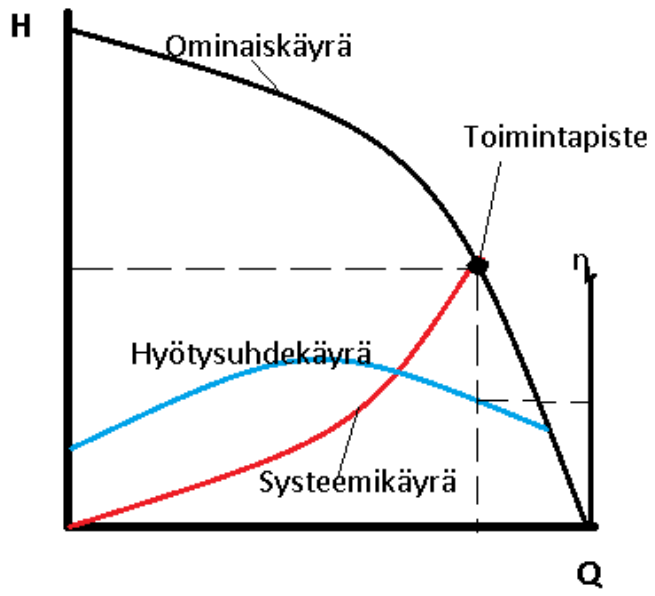
Δp_{tot} = systeemin kokonaispaine-ero [m]

ρ = nesteen tiheys [kg/m³]

g = putoamiskiihtyvyys [m/s²]. (Karttunen 2004, 256–257.)

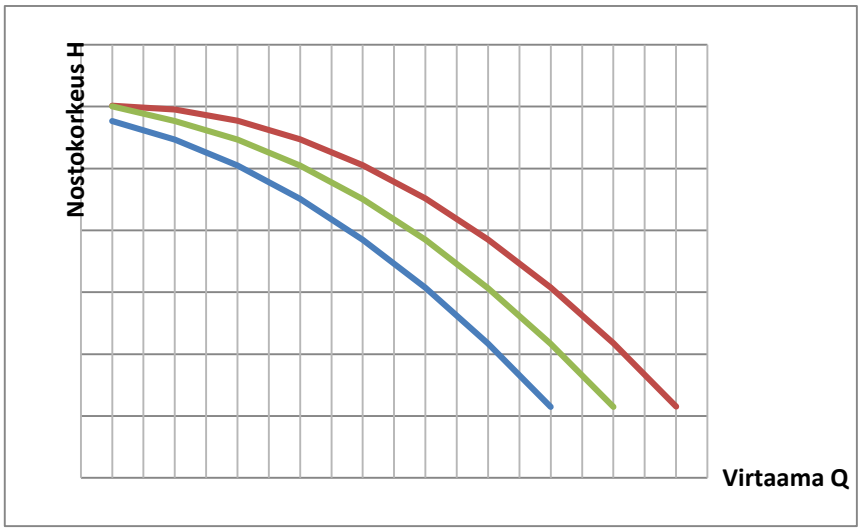
2.2.3 Ominaiskäyrä

Pumppuvalmistajat muodostavat pumpuille ominaiskäyriä, joita tarvitaan pumpun valintaa tehdessä. Ominaiskäyrä kertoo pumpun toiminta- alueen. Käyrän tekijät ovat nostokorkeus H ja pumpun tuotto eli virtaama Q, jotka asetetaan QH-koordinaatistoon. Systeemikäyrä kuvaa virtauksen vastusta putkistossa. Ominaiskäyrä, johon on liitetty putkiston systeemikäyrä, kertoo pumpun toimintapisteen, joka on käyrien leikkauspisteessä. (Hammer 2012, 82–83.) Ominaiskäyrä, systeemikäyrä ja toimintapiste ovat esitetty kuvassa 4. Kuvassa on myös pumpun hyötysuhdekäyrä, jolta nähdään toimintapisteen hyötysuhde.



Kuva 4. Keskipakopumpun ominaiskäyrä (QH- käyrä), johon on liitetty systeemi- ja hyötysuhdekäyrä, sekä merkitty pumpun toimintapiste. (Mukaillen Larjola *et al*. 2015, 61.)

Kuvasta 4 voi havaita, että keskipakopumpun nostokorkeus pienenee, kun tilavuusvirta kasvaa. Käyrä voidaan myös asettaa esimerkiksi Q, P- koordinaatistoon, josta nähdään pumpun teho virtauksen funktiona. Kuvaajaan voidaan myös merkitä pumpun ominaiskäyriä useammille juoksupyörän halkaisijoille tai pyörimisnopeuksille, kuten kuvassa 5. Pyörimisnopeuden ollessa vakio nostokorkeus, hyötysuhde ja pumpun tarvitsema teho riippuvat tuotosta.(Motiva 2011, 7, 9–10.)



Kuva 5. Erään pumpun ominaiskäyrät kolmelle pyörimisnopeudelle. (Mukaillen Larjola *et al*. 2015, 65.)

2.2.4 Pumpun teho

Pumpun teoreettinen tehontarve P lasketaan kaavalla 2.

$$P = \frac{\rho g Q H}{3{,}6 * 10^6} \quad \text{[kW]} \tag{2}$$

Pumpun todellinen tehontarve P_{tod}, johon on huomioitu tässä pumpun hyötysuhteen lisäksi myös sähkömoottorin hyötysuhde, voidaan laskea kaavalla 3.

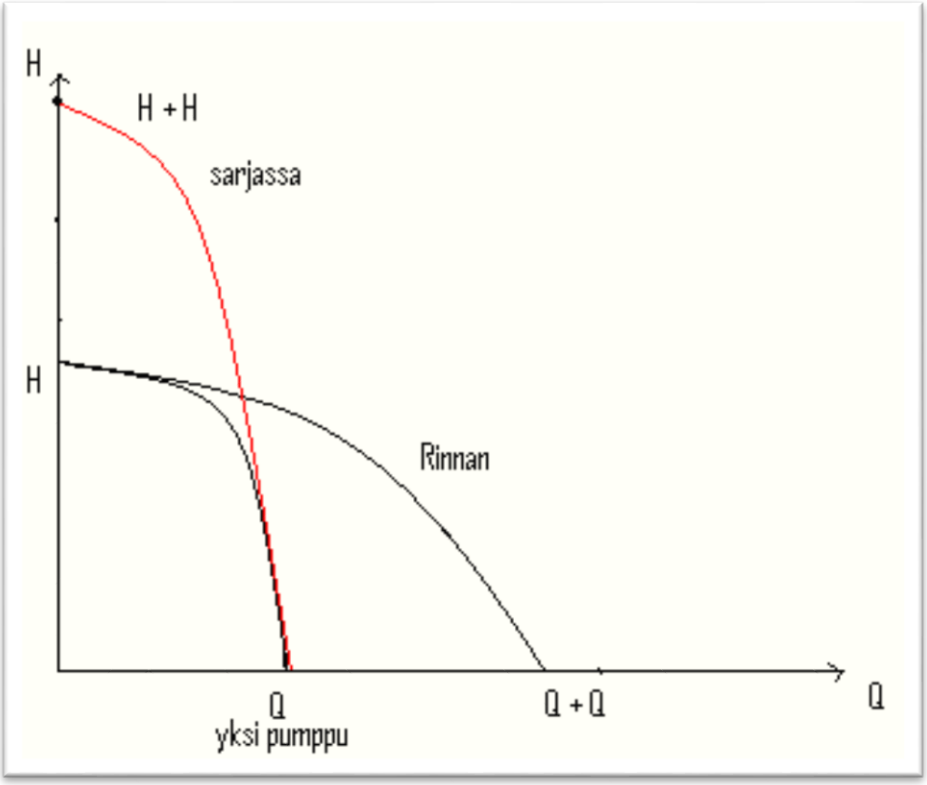
$$P_{tod} = \frac{\rho g Q H}{3{,}6 * 10^6 \eta_m \eta_{pump}} \quad \text{[kW]} \tag{3}$$

missä (kaavat 2 ja 3),

ρ = tiheys [kg/m^3]
g = putoamiskiihtyvyys, 9,81 m/s$^{2'}$
H = nostokorkeus [m]
Q = virtaama [m^3/h]
η_m = sähkömoottorin hyötysuhde
η_{pump} = pumpun hyötysuhde. (Portoni *et al*. 2008, 168.)

2.2.5 Kytkentätavat

Jos pumppaamossa on useampia pumppuja, voidaan ne kytkeä ja ajaa rinnan tai sarjassa. Kytkentätapa vaikuttaa pumppujen tuottoon, hyötysuhteeseen ja tehontarpeeseen. Rinnan kytkettyjen, samanlaisten pumppujen, nostokorkeus ajettaessa pysyy samana, mutta tuotto kasvaa lähes kaksinkertaiseksi. Sarjaan kytkettynä nostokorkeus kasvaa lähes kaksinkertaiseksi, kun taas tuotto pysyy samana. (Karttunen 1999, 37, 38.) Edellä mainittujen kytkentätapojen vaikutuksia ominaiskäyrään havainnollistaa kuva 6.



Kuva 6. Pumpun yhteiskäyttökäyrät, kun kaksi samanlaista pumppua on kytketty sarjaan tai rinnan. (Mukaillen Portoni *et al*. 2008.)

3 ENERGIATEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä luvussa käsitellään teoreettisesti jätevesipumppaamojen energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä. Energiatehokkuus koostuu pumppaamokoneiston asennukseen ja ominaisuuksiin liittyvistä seikoista, mutta siihen vaikuttaa myös energiatehokkuuden huomioiminen jo hankintavaiheessa.

3.1 Mitoitus

Mitoituksella tarkoitetaan pumppaamon suunnittelua, jossa pumppaamon koneikko eli pumput ja moottorit, suunnitellaan toimimaan vaadittavalla tuotolla ja nostokorkeudella. Yleensä mitoituksen suorittaa pumppaamotoimittaja tilaajan antamien lähtötietojen eli tuoton ja nostokorkeuden perusteella. Suunnittelussa otetaan huomioon maksimituotto, jonka pumppaamon on pystyttävä tuottamaan.

Oikea mitoitus on tärkeää pumppujen energiatehokkuuden kannalta. On yleistä, että pumput ja/tai niiden moottorit mitoitetaan tulevaisuutta ajatellen ylisuuriksi eli suuremmille jätevesimäärille kuin olisi. Ylimitoituksen syitä voivat olla myös nostokorkeuden väärin laskenta tai väärän ominaiskäyrän käyttäminen. Väärin mitoitettu pumppausjärjestelmä ei toimi tehokkaasti todellisessa toimintapisteessä. Ratkaisuna mitoitusongelmiin ovat pumpun uusiminen, juoksupyörän koon muuttaminen tai juoksupyörän pyörimisnopeussäätö taajuusmuuttajalla. (Federley 2008, 6.)

3.2 Hyötysuhde ja ominaisenergia

Pumppauksen hyötysuhde lasketaan pumpun teoreettisen tehon ja pumppauksen todellisen tehontarpeen, P_{in}, avulla. Pumppaussysteemin hyötysuhde η_{syst} saadaan siten kaavalla 7, missä Q on tuotto [m^3/s], ρ tiheys [kg/m^3], g putoamiskiihtyvyys ja H nostokorkeus [m].

$$\eta_{syst} = \frac{Q\rho gH}{P_{in}} \qquad (7)$$

Pumppaussysteemin kokonaishyötysuhde muodostuu pumpun hyötysuhteen lisäksi ainakin moottorin ja säätötavan hyötysuhteista. Systeemin kokonaishyötysuhde voidaan esittää kaavalla 8.

$$\eta_{syst} = \eta_{pumppu} * \eta_{moottori} * \eta_{nopeudensäätö} \qquad (8)$$ (Viholainen 2014, 29.)

Pumpun ominaiskäyrään liitetty yksittäinen hyötysuhdekäyrä näyttää pumpun hyötysuhteen virtauksen funktiona. Hyötysuhdekäyrältä ilmenee piste, jolla pumppu toimii parhaimmalla nimellishyötysuhteellaan. Hyötysuhde voidaan esittää myös käyrästöllä, jos kuvassa on pumpun ominaiskäyriä usealle pyörimisnopeudelle. Pumpun ominaiskäyrän ja siihen liitettyjen hyötysuhde- ja systeemikäyrän perusteella voidaan arvioida pumpun tehokkuutta ja soveltuvuutta haluttuun käyttöön. (Portoni *et al*. 2008, 168; Vogelesang 2008, 26.)

Toinen väline energiatehokkuuden tutkimiseen on pumppauksen ominaisenergian laskenta. Ominaisenergioilla voidaan arvioida pumppuyhdistelmien ja pumppaamojen

energiatehokkuutta. Pumppauksen ominaisenergialla tarkoitetaan energiaa, jonka yhden kuution siirtäminen vaatii. Ominaisenergia E_s lasketaan kaavalla 9 siten

$$E_s = \frac{E}{V} = \frac{P_{in}t}{V} = \frac{P_{in}}{Q} = [\mathrm{kWh/m^3}] \qquad (9)$$

missä,

E_s = sähköenergia [kWh]

t = aika [h]

P_{in} = tehontarve [kW]

V = tilavuus [m^3]

Q = virtaama [m^3/h]. (Viholainen 2014, 29.)

3.3 Säätötavat

Säätömekanismeilla mahdollistetaan pumpun tuoton ja nostokorkeuden säätö ajon aikana. Säätötarvetta aiheuttaa esimerkiksi virtaamien muutokset. Pumpun säätötavoista käsitellään kuristussäätö, on/off-säätö ja pyörimisnopeussäätö. Säätötavoilla on vaikutusta pumppaamon energiankulutukseen.

3.3.1 Kuristussäätö

Kuristussäätö tapahtuu paineviemärin sulkuventtiiliä kiristämällä, jolloin virtaus pienenee ja painehäviöt lisääntyvät. Kuristussäätö pienentää pumppauksen hyötysuhdetta, sillä venttiilin sulkemisen aiheuttamien painehäviöiden vuoksi nostokorkeus pumpulle kasvaa suuremmaksi ja toimintapiste siirtyy pumpun ominaiskäyrällä vasemmalle. Kuristussäätö on kuitenkin yksinkertainen toteuttaa, sillä siihen tarvitaan vain kuristava venttiili. (Vogelesang 2009, 26, 29.) Sitä voidaan käyttää pienille pumpuille (Karttunen 2004, 252).

3.3.2 On/off- säätö

On/off-säädöllä pumppu säädetään joko toimimaan tai pois toiminnasta. Käynnissä ollessaan pumppu toimii vakiotuotolla ja pois-kytkennässä pumpun toiminta ja

energiankulutus lakkaavat. Tätä suositellaan vain virtaamille ja prosesseille, joille pumpun portaaton säätö ei ole tarpeellinen. (Ruuskanen 2007, 41; Motiva 2011, 8.) Tästä säätötavasta voi olla hyötyä pienikokoisten pumppujen rinnan kytkennässä. Isoille pumpuille on/off-säätöä ei suositella. (Grundfos, 52.) On/off-tyyppinen säätötapa lisää painehäviöitä sekä käynnistyksien energiankulutusta. Yhtäjaksoisella ja tasaisella pumppauksella voidaan säästää merkittävästi energiaa, verrattuna on/off- säätöön. (Pulli. 2012, 35.)

3.3.3 Pyörimisnopeussäätö

Pumpulle voidaan muodostaa ominaiskäyriä useille pyörimisnopeuksille, kuten oli kuvassa 5. Kun pyörimisnopeus pienenee, ominaiskäyrä laskeutuu. Nopeuden suurentuessa käyrä nousee ylöspäin. Affiniteettisäännön mukaan pyörimisnopeuden n muutos vaikuttaa pumpun tuottamaan tilavuusvirtaan *Q*, nostokorkeuteen *H* ja tehoon *P* kaavojen 10, 11 ja 12 mukaisesti. (Hammer 2012, 83.)

$$Q_2 = Q * \frac{n_2}{n} \qquad (10)$$

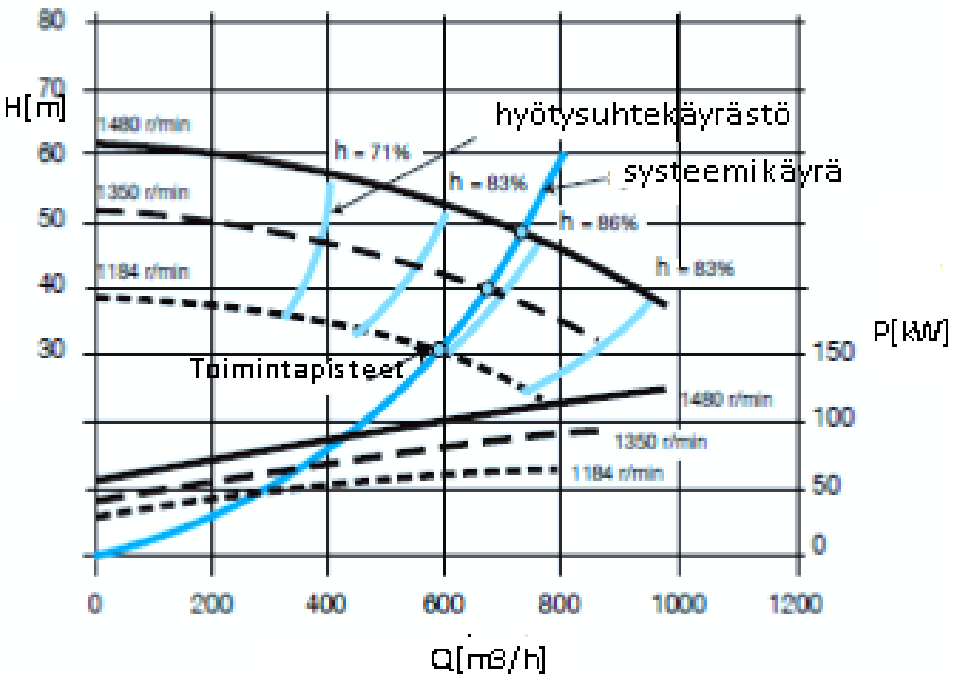
$$H_2 = H * (\frac{n_2}{n})^2 \qquad (11)$$

$$P_2 = P * (\frac{n_2}{n})^3 \qquad (12)$$

Pumpun juoksupyörän pyörimisnopeussäätö tehdään yleensä taajuusmuuttajalla. Taajuusmuuttaja on nykyään energiatehokkuutensa vuoksi yleisin pumppauksen säätötapa. Sillä voidaan pyörimisnopeutta säätää portaattomasti laajalla alueella. Taajuusmuuttaja säätää sähkömoottorille syötettävää jännitettä ja näin kontrolloi pumpun juoksupyörän pyörimisnopeutta. (Karttunen. 2004, 255.) Taajuusmuuttajilla saadaan uudelleensovitettua pumppaussysteemiä nykyisiin vaatimuksiin ylimitoitetuissa systeemeissä. Taajuusmuuttajilla saavutettavat energiasäästöt ovat useissa asennuksissa 30–50 %. Energiasäästöjen lisäksi etuina ovat muutoksien kontrolloinnin tehostuminen. Taajuusmuuttajat mahdollistavat nopean systeemin muutoksiin reagoimisen. Lisäksi ne parantavat laakereiden ja venttiilien toimintavarmuutta, sillä nopeuksien aleneminen lisää niiden käyttöikää. Haittana on mahdollinen pumpun ja tukirakenteiden ominaisvärähtely,

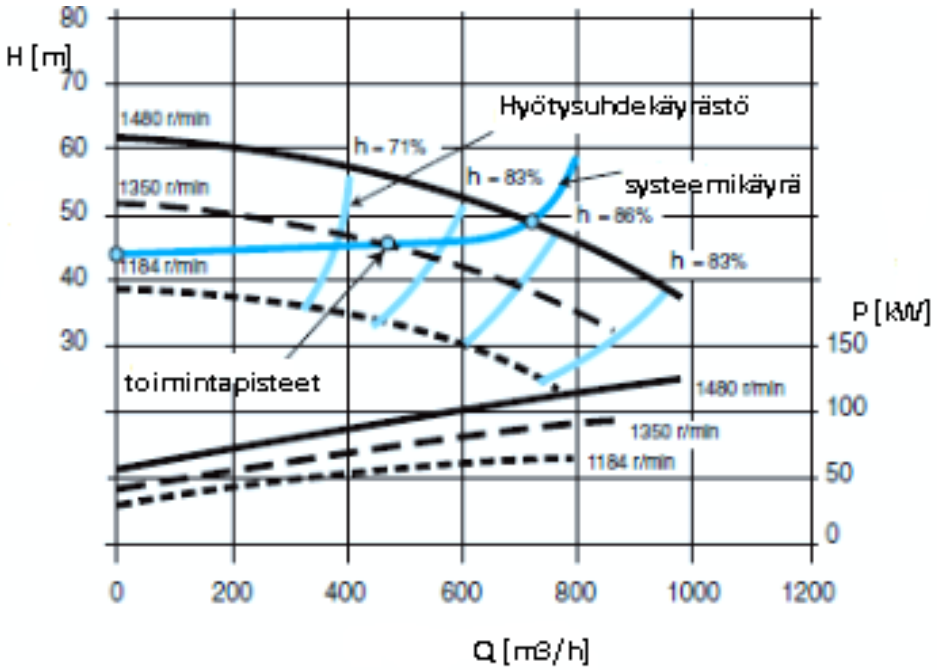
jota taajuusmuuttaja voi resonoida ja vahvistaa. (Euro Pump and Hydraulic institute 2004, 12.) Taajuusmuuttaja myös heikentää hieman pumppaussysteemin hyötysuhdetta. Hyötysuhde taajuusmuuttajilla on kuitenkin hyvä, usein jopa 0,97–0,99. Moottorin tehokkuus huomioiden voidaan taajuusmuuttaja- ajon hyötysuhteeksi saada yli 0,80. (Ruuskanen 2007, 54.)

Taajuusmuuttaja ei sovellu tehokkaasti käytettäväksi kaikille pumppaamoille. Pumpuille, joiden nostokorkeus koostuu vain dynaamisesta nostokorkeudesta, eli virtauksien aiheuttamista painehäviöistä, pyörimisnopeus voidaan taajuusmuuttajalla säätää niin, että pumpun toimintapiste on jokaisella pyörimisnopeudella hyvän hyötysuhteen alueella. Näin pumpun tehokkuus ei laske pyörimisnopeuden muutoksista. Kuvassa 7 on havainnollistettu pumppaussysteemi, jossa nostokorkeus muodostuu vain dynaamisesta nostokorkeudesta. Systeemikäyrä lähtee origosta ja kolmen pyörimisnopeuden toiminatapisteet ovat samalla hyötysuhdealueella.



Kuva 7. Systeemikäyrä, jossa pumppaussysteemin nostokorkeus muodostuu vain virtauksien aiheuttamista painehäviöistä. Vaaleansiniset käyrät ovat hyötysuhdekäyriä. Pumpun kolmen pyörimisnopeuksien ominaiskäyrien toimintapisteet ovat samalla hyötysuhteella eli tehokkuus ei kriittisesti vähene pyörimisnopeuden ja virtaaman laskiessa (Muokattu EuroPump and Hydraulic institute 2004.)

Jos pumpun nostokorkeus muodostuu vain staattisesta nostokorkeudesta, ei nopeussäätö ole yhtä hyvä ratkaisu. Staattisen nostokorkeuden tulisi olla maksimissaan puolet nostokorkeudesta, jotta taajuusmuuttajasta saataisiin hyötyä. Kuvassa 8 näkyy korkean staattisen nostokorkeuden vaikutus systeemikäyrään.



Kuva 8. Systeemikäyrä pumpulle, jolla suurin osa kokonaisnostokorkeudesta muodostuu staattisesta nostokorkeudesta. Pumppauksen hyötysuhde laskee pyörimisnopeuden vähentyessä. (Muokattu Europump and Hydraulic institute 2004.)

Korkean staattisen nostokorkeuden vuoksi tehokkuus laskee, sillä eri pyörimisnopeuksien toimintapisteiden hyötysuhteet ja tuotto laskevat rajusti alemmille pyörimisnopeuksille mentäessä. (Europumps and hydraulic institute 2004, 7; Pulli 2009, 67.)

3.4 Pumppujen rakenne ja toimintavarmuus

Jätevesipumppaamon toimintavarmuutta ei voida heikentää, jos tavoitteena on parantaa energiatehokkuutta. Toimintavarmuuteen vaikuttaa jäteveden pumppaussysteemeissä pumpun tukkeutuminen. Siihen vaikuttavat pumpun juoksupyörän rakenne ja jäteveden koostumus. Jätevesi sisältää vettä ja kiintoainesta, joka on yleensä orgaanista ainesta, esimerkiksi kuituja. Jätevesi voi sisältää myös synteettisesti valmistettua kangasta, kuten

rättejä ja pyyhkeitä, jotka tukkivat helposti juoksupyörän jäädessään kiinni sen solan etureunaan. Pumppu voi tukkeutua täysin, jolloin se lakkaa toimimasta, ja korjaukseen on usein kutsuttava ulkopuolista huoltoapua. Osittain tukkeutunut pumppu toimii edelleen, mutta sen tuotto laskee ja tehonotto kasvaa. Veden pumppaamiseen kuluu siten enemmän aikaa kuin puhtaalla pumpulla. Osittain tukkeutunut pumppu toimii myös alemmalla hyötysuhteella, jolloin energiatehokkuuden voidaan huomata heikentyvän. Kokonaan ja osittain tukkeutunut pumppu lisää käyttö- ja kunnossapitokustannuksia. (Xylem 2012, 1- 3.)

Jätevesipumpuille on suunniteltu jäteveden vaatimuksiin esimerkiksi kaksisiipisiä, yksisolaisia juoksupyöriä, sekä niin sanottuja pyörrevirtaus- eli vortex- juoksupyöriä. Viimeisessä juoksupyörä sijoitetaan virtaustilan ulkopuolelle, jolloin se ei tukkeudu herkästi. (Karttunen 2004, 488–489.) Näiden juoksupyörämallien haittana on heikko hyötysuhde. On myös esitetty, että suurella läpäisykyvyllä, joka on ominaista juuri yksisolaisille ja vortex-mallisille jätevesipumpuille, ei olisi suurta vaikutusta tukkeutumattomuuteen.(Xylem 2012, 1.)

3.5 Elinkaarimallinnus

Kuntien ja kunnallisessa omistuksessa olevien yritysten on lain mukaan kilpailutettava hankinnat usealla yrityksellä. Kilpailutuksen perusteella syntyneistä tarjouksista on valittava hinnaltaan tai kokonaistaloudellisesti edullisin. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2015.) Investointien energiatehokkuutta arvioidessa apuvälineenä voidaan käyttää elinkaarilaskentaa (LCC, Life Cycle Cost). LCC- laskenta huomioi investoinnin koko elinkaaren aikaiset kustannukset ja antaa kokonaiskuvan investoinnin suunnittelijalle. LCC:tä voidaan käyttää päätöksenteon tukena hankintoja tehdessä; sen avulla voidaan vertailla eri vaihtoehtoja ja löytää kokonaistaloudellisesti edullisin investointikohde. LCC:n muodostamien kustannusten, C, laskukaava voidaan esittää kaavalla 13;

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_0 + C_m + C_s + C_{env} + C_d \quad (13)$$

missä kustannusten alaindeksit suomennettuna,

ic = hankinta

in = asennus

e = energia

o = toiminta

m= ylläpito

s = seisonta- aika, tuottamaton aika

env = ympäristö

d = lopetus.

Hankintakustannukset muodostavat tyypillisessä jätevesipumppaussysteemeissä usein vain pienen osan elinkaaren kokonaiskustannuksista. Suurimman osan elinkaarikustannuksista muodostavat energia- ja ylläpitokustannukset. Energiakustannukset muodostavat usein jopa kolmasosan. (EuroPump and hydraulic institute 2001, 1–6.)

4 JÄTEVESIPUMPPAAMOJEN ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN JA ARVIOINTI

Tässä luvussa käsitellään menetelmiä jätevesipumppaamoiden energiatehokkuuden lisäämiseen ja arviontiin. Työtä varten haastateltiin vesihuolto- ja pumppaamoalan ammattilaisia energiatehokkuuteen liittyvissä asioissa. Haastattelut olivat ensimmäinen menetelmä, jolla pyrittiin löytämään vesihuoltolaitokselle energiatehokkuutta lisääviä tekijöitä. Haastattelun tulokset on esitetty kohdassa 4.1. Energiatehokkuuden määrittämisen välineeksi tutkitaan Summanlahden pumppaamolle patenttiin perustuvaa menetelmää, joka esitellään kohdassa 4.2. Toiselle, Lepikön jätevesipumppaamolle, energiatehokkuuden parannuspotentiaalia arvioidaan saatavilla olleiden tietojen avulla kahdessa skenaariossa.

4.1 Haastattelun tulokset; jäteveden pumppauksen energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Kaikki luvussa 4.1 olevat tiedot on koottu kyselyjen vastauksista, jotka tehtiin työtä varten. Lähdeviittauksia ei sen vuoksi ole laitettu erikseen. Kysymykset on esitetty liitteessä I.

4.1.1 Uuden pumppaamon tai pumppaamokoneiston hankinta

Haastattelujen mukaan uutta pumppaamoa hankittaessa tärkeää on huomioida koko pumppaussysteemin hyötysuhde siten, että se on mahdollisimman korkea. Pumpun hydraulinen hyötysuhde on ensisijaisesti oltava korkea, minkä jälkeen voidaan systeemin tehokkuutta nostaa muilla tekijöillä. Haastatteluissa kysyttiin pumppaamon iän vaikutusta pumppujen uudistamistarpeeseen. Vastauksissa ilmeni, ettei uudistamistarpeessa kannata huomioida niinkään ikää, vaan tehokkuuden ja suorituskyvyn, kuten pumppauksen hyötysuhteen, laskua.

4.1.1.1 Ylimitoitus

Haastatteluissa ilmeni, että ylimitoitusta pidetään tilaajan suurimpana virheenä pumppujen/pumppaamojen hankintavaiheessa. Ylimitoituksen syinä pidettiin tulevaisuuden jätevesimäärien yliarvioinnin lisäksi esimerkiksi painehäviöiden yliarviointia, ja varautumista muutoksiin. Lisäksi pumppaamojen mitoittaminen maksimituoton mukaan johtaa ylimitoitukseen. Ylimitoitusta voidaan välttää mitoittamalla pumput keskitason tuotolle ja käyttämällä suuremmille virtaamille useampia pumppuja. Hankintoja tehdessä usein vaikuttavaa puhtaasti hankintahinta, mikä voi myös johtaa huonosti soveltuvan laitteiston valintaan. Myös putkiston jo painelinjan mitoitus vaikuttaa energiatehokkuuteen. Ylimitoitettu putkisto vaatii suurempaa pumppauskapasiteettia putkiston huuhtoutumisen varmistamisen vuoksi, kuin mitä vesimäärät vaatisivat siirtyäkseen.

4.1.1.2 Pumppaamon toimintavarmuus ja tukkeutumattomat pumput

Haastatteluissa energiatehokkuuteen liittyen tärkeänä nähtiin pumppaamon luotettavuus eli toimintavarmuus. Pumppujen on toimittava yhtäjaksoisesti ilman turhia, toimintavikojen aiheuttamia huoltoja. Energiatehokkaat pumppaussysteemit eivät tuo kokonaiskustannussäästöjä, jos niiden toimintavarmuus on heikko ja niitä on jatkuvasti korjattava. Tärkeänä huomioitavana seikkana energiatehokkuuden kannalta nähtiin pumpun

tukkeutumattomuus. Haastatteluissa korostettiin pumpun juoksupyörän rakenteen vaikutusta tukkeutumisalttiuteen. Markkinoilla on erilaisia pumppuja erilaisiin käyttökohteisiin ja jätevesipumpuiksi olisi tärkeää valita sellaiset, joissa juoksupyörä ei tukkeudu herkästi. Tukkeutumaton juoksupyörä myös mahdollistaa taajuusmuuttajakäytön sekä pitkäaikaisen tasaisen pumppauksen, joka aiheuttaa energiankulutuksen vähenemisen.

4.1.1.3 Energiataloudellisen laitehankintaprosessin kehittäminen

Haastateltavilta kysyttiin kuinka tilaaja, esimerkiksi vesihuoltolaitos, voisi kehittää laitehankintaprosessiaan saadakseen toimivimman ja kokonaiskustannuksiltaan edullisimman pumppaamon. Haastattelun tulokset koottiin kuvaan 9.

Kuva 9. Haastattelujen perusteella muodostettu kaavio hankintaprosessin kehittämisestä.

Merkittäväksi kehityskohteeksi mainittiin lähtötietojen oikeellisuus. Lähtötiedoilla tarkoitetaan tietoja esimerkiksi halutusta tuotosta ja nostokorkeudesta. Pumppauksen pysyvyystietojen selvittäminen virtaamista ja energiankulutuksesta nähtiin oleellisena selvittää ennen hankintaprosessia. Lähtö- ja pysyvyystietojen perusteella pumppaamo ja sen koneikko voidaan mitoittaa oikein.

Tärkeänä nähtiin hankintojen elinkaarikustannusten määrittäminen eli LCC- laskenta, johon sisältyvät ainakin hankinta-, käyttö- ja kunnossapitokustannukset. Haastateltavien mukaan on paljon tilanteita, joissa uusi pumppu/pumppaamo valitaan vain hankintakustannusten perusteella. Tilaajalle, kuten vesihuoltolaitokselle, olisi eduksi hankintoja tehdessä saada vertailussa olevien laitteiden energiankulutus- ja energiakustannuslaskelmat pitkälle aikavälille, jotta kokonaistaloudellisesti paras ja energiatehokkain laite osattaisiin valita. Pisteytyksellä tarkoitetaan menetelmää, jossa kilpailutuksessa oleville tarjouksille annetaan

niiden ominaisuuksien perusteella pisteitä. Eniten pisteitä saanut tarjous valitaan. Haastatteluissa myös kerrottiin laitteiden hankinnan jälkeisestä seurannasta, jolla varmistettaisiin suorituskykylupausten toteutuminen ja laitteiden oikeanlainen asennus. Haastatteluissa ehdotettiin myös suorituskykyvaatimuksien sisällyttämistä pumppu-/pumppaamojen toimittajille.

4.1.2 Pumppaamon energiatehokkuuden lisääminen

4.1.2.1 Säätö- ja ajotavan muuttaminen

Haastattelussa kysyttiin, kuinka pumppauksen energiatehokkuutta voisi lisätä ilman uuden pumppaamon tai pumppaamokoneiston hankkimista. Vastauksien perusteella tärkeitä asioita ovat taajuusmuuttajien asentaminen ja tasainen pumppaus. Taajuusmuuttajiin liittyen on huomioitava, että ne eivät sovellu kaikkiin pumppaussysteemeihin (kohta 3.2.3.). Lisäksi taajuusmuuttajien käyttö vaatii vaikeasti tukkeutuvat pumput, sillä tasainen ja jatkuva pumppaus alhaisilla kierrosnopeuksilla altistaa pumput tukkeutumiselle. Tukkeutumiseen voidaan vaikuttaa pumpun juoksupyörän ominaisuuksilla tai nopeuttamalla virtausta esimerkiksi kerran päivässä yli 0,7 m/s tukkeutumisen ehkäisemiseksi. Ajettaessa pumppuja alhaisilla kierrosnopeuksilla on huomioitava, että myös painelinjan tukkeutumisen ehkäisemiseksi on suoritettava nopealla virtaamalla huuhtelujaksoja säännöllisin väliajoin. Taajuusmuuttajakäyttöön liittyen on huomioitava myös oikeanlainen asennus ja käyttötapa, mikä mahdollistaa niiden energistehokkaan käytön pumppaamoilla.

4.1.2.2 Energia- analyysit ja suorituskyvyn mittaukset

Vastauksissa nousi esiin energia-analyysit, joita suositeltiin tekemään pumppaamoille. Energia-analyyseilla ja suorituskyvyn mittauksilla voidaan saada selville mahdollinen ylimitoitus, epäedullinen asennus tai käyttötapa ja väärät toimintapisteet. Energia-analyysiin tarvittavia tietoja ovat pumppaamon teho ja energiankulutus, virtaamat, nostokorkeus sekä pumpputyypin tiedot. Esimerkiksi energiankulutuksien, hyötysuhteiden tai ominaisenergioiden vertailu voi osoittaa kohteet, joissa energiatehokkuudessa voi olla parannettavaa.

4.1.2.3 Muita huomioita

Haastatelluista nousi lisäksi energiatehokkuuteen liittyen muita huomioita, joita olivat esimerkiksi

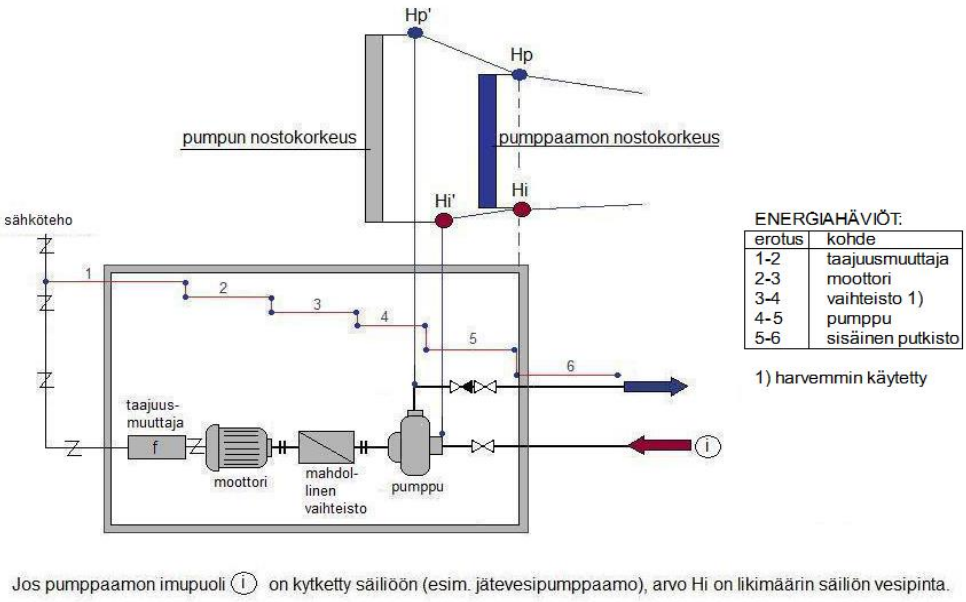
- venttiilien tarkistaminen
- pumppujen huolto ja puhtaanapito
- paineenkorotuspumppaamoiden käyttö jätevesiverkostossa.

Venttiilien tarkistamisella tarkoitetaan tässä sitä, että venttiilien tulee normaalitilanteessa olla auki, ja sellaisia jotka eivät päästä ilmaa putkistoon.

4.2 Pumppaamon energiatehokkuuden määritysmenetelmä

Martti Pullin energiatehokkuuden määritysmenetelmä antaa välineet vesihuoltolaitoksen pumppaamojen energiatehokkuuden määrittämiseen ja kehittämiseen. Patentin FI 124877 menetelmä perustuu energiatehokkuuden arvioimiseen pumppaamon hyötysuhteen ja nimellishyötysuhteen välisen suhteen, ETpu- eli energiatehokkuuden tunnusluvun, perusteella. Mitä lähempänä todellinen hyötysuhde on nimellishyötysuhdetta, sitä parempi ETpu- luku on. ETpu-menetelmällä siis verrataan energiatehokkuuden tilaa parhaaseen mahdolliseen.

Energiatehokkuuden tunnusluvun määrittämistä varten valitaan mittausajan ja -jakson pituus. Mittausaika voi usein olla 24–48 tuntia ja mittausjakso 1–30 minuuttia, riippuen pumppaamosta. ETpu- luvun määrittämistä varten tarvittavia suureita ovat mittaushetken vesiteho *P*v (kW), joka lasketaan virtaaman *Q* (l/s) ja pumppaamon nostokorkeuden *H* (m) avulla. Kuvat 10 havainnollistaa, kuinka pumppaamon nostokorkeus muodostuu.



Kuva 10. Pumppaamokaavio. Pumppaamoissa on tavallisesti useita pumppuja, joten laskennassa käytetään pumppaamon nostokorkeutta, H_p- H_i, pumpun nostokorkeuden sijasta. Nostokorkeuden määrittämistä varten tarvitaan painemittaus pumppaamon ja lähtevän painelinjan rajalta, imualtaan vesipinnankorkeus ja virtausnopeus painemittauskohdassa. Pumppujen nostokorkeudet voivat olla erilaisia, johtuen putkistojen aiheuttamista painehäviöistä. (Pat. FI 124877.)

Vesiteho *P*v lasketaan kuten teoreettinen teho, kaavalla 2, käyttäen nostokorkeutena pumppaamon nostokorkeutta. Pumppaamon nostokorkeus lasketaan painepuolen painekorkeuden *H*p, ja imupuolen painekorkeuden *H*i erotuksella. *H*p ja *H*i lasketaan kaavalla 14. Jos pumppaamo on suoraan imualtaasta imevä, voidaan *H*i arvona käyttää imualtaan vesipinnan korkoa mittaushetkellä.

$$H = \frac{p}{\rho g} + Z + \frac{v^2}{2g} \qquad (14)$$

missä

ρ = nesteen tiheys [kg/m^3]

g = putoamiskiihtyvyys 9,81 m/s^2

p = paine [Pa]

Z = painemittaus kohdan korko [m]

v = virtausnopeus [m/s]. (Pat. FI 124877.)

Lisäksi tarvitaan mittaushetkeltä sähköteho *P*e. Pumppaamon hyötysuhde η_{pas} mittaushetkellä saadaan kaavalla 15.

$$\eta_{pas} = \frac{P_V}{P_e} \qquad (15)$$

Pumppaamon nimellishyötysuhde saadaan pumppujen nimellishyötysuhteiden painotetulla keskiarvolla, joka lasketaan pumppujen nimellishyötysuhteiden η ja -tehontarpeiden k avulla kaavan 16 mukaisesti.

$$\eta_{pka} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} k_i} \cdot \sum_{i=1}^{n} k_i \cdot \eta_i \qquad (16)$$

missä,

η_{pka} = nimellishyötysuhteiden painotettu keskiarvo

k = pumpun nimellistehontarve

n = pumppujen lukumäärä

η = pumpun nimellishyötysuhde.

ETpu- luku mittaushetkellä lasketaan kaavalla 17.

$$ETpu = \frac{\eta_{pas}}{\eta_{pka}} \qquad (17)$$

(Pat. FI 124877.)

ETpu- luku arvotetaan taulukon 1 mukaisesti.

Taulukko 1. ETpu- luvun arvostusasteikko. (Pat. FI 124877.)

ETpu	Arvotus
> 0,9	Erinomainen
0,8- 0,9	Hyvä
0,7- 0,8	Tyydyttävä
0,6- 0,7	Välttävä
0,5- 0,6	Heikko
< 0,5	Erittäin heikko

ETpu- luku kertoo siis pumppaamon energiatehokkuuden tilan mittaushetkellä verrattuna asennetulla laitteistolla parhaaseen mahdolliseen tilaan. ETpu- luvun ollessa välttävä tai alhaisempi suurelta osin mittausaikana, suositellaan korjaustoimenpiteisiin ryhtymistä. Korkea ETpu- luku ei aina tarkoita pumppaamon olevan energiatehokas, sillä se ei ota huomioon, että pumppujen nimellishyötysuhde voi olla normaalia heikompi. Patenttiselostuksessa suositellaan yleisesti hyvän nimellishyötysuhteen käyttämistä, jos käytössä olevilla pumpuilla on selvästi normaalia heikompi nimellishyötysuhde. (Pat. FI 124877.)

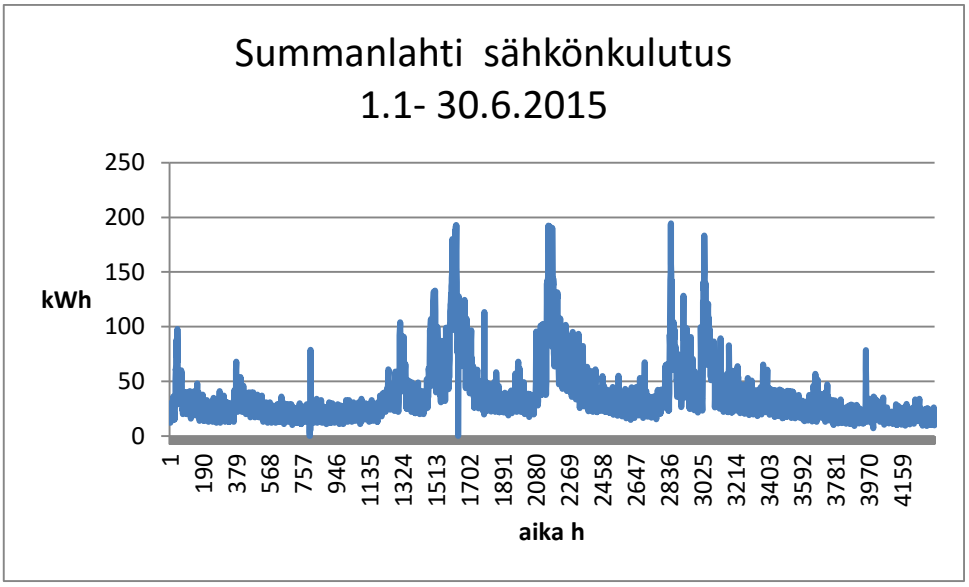
Patenttiselostuksessa (Pat. FI 124877) esitetään menetelmän käyttöohjeistuksen lisäksi esimerkkejä käyttökohteista; menetelmän mukainen laskenta voidaan asentaa mittauslaitteistoon ja laskentaohjelmaan, josta pumppaamon energiatehokkuutta voidaan seurata reaaliajassa. Useille pumppaamoille asennettuna sillä voidaan vertailla verkoston pumppaamoja, huomata parannuspotentiaalia omaavat kohteet, sekä osoittaa korjaustoimenpiteiden aiheuttamat muutokset energiatehokkuudessa.

4.3 Summanlahden jätevesipumppaamo

Tässä luvussa kerrotaan ensin lyhyesti perustietoja kohteesta. Sen jälkeen käydään läpi energiatehokkuuden määritysmenetelmän käytön valmiudet ja toteutus pumppaamolla.

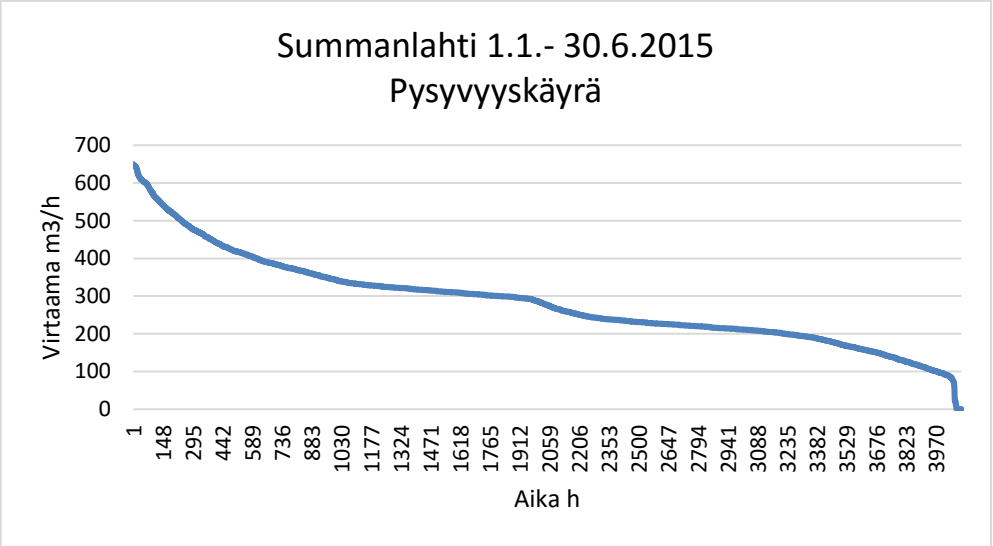
4.3.1 Nykyinen tila

Summanlahden jätevesipumppaamo on Haminan Veden suurin pumppaamo. Pumppaamon läpi pumpataan kaikki Haminasta Mussalon jätevedenpuhdistamolle johdettavat jätevedet. Pumppaamon koneisto on asennettu vuonna 2010. Pumppuja on kolme ja ne ovat märkäasennettuja keskipakopumppuja. Pumppuja ajetaan pääsääntöisesti vuorotellen, mutta tarvittaessa, jätevesimäärien kasvaessa, yhtä aikaa rinnan. Pumppaamoa ohjataan taajuusmuuttajalla pinnankorkeuden mukaan. Alarajataajuus on 30 Hz ja yläraja 50 Hz. Pumppaamoaltaan pohjan rakenteessa uskotaan olevan rakenteellinen virhe, sillä liete kerääntyy pohjalle ja noustessaan sillä on taipumusta tukkia käynnissä oleva pumppu. (Suurnäkki 2015.) Pumppaamon sähkönkulutus puolen vuoden ajalta on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Sähkönkulutus 1.1.- 30.6.2015 Summanlahden jätevesipumppaamolla.

Summanlahden pumppaamon virtaamista oli saatavilla tuntitarkkuudella tietoa, joten pumppaamolle pystyttiin muodostamaan niistä pysyvyyskäyrä, joka on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Pysyvyyskäyrä Summanlahden jätevesipumppaamon virtaamille puolen vuoden ajalta.

Keskimääräinen virtaama kuvan 12 ajalta oli 274 m^3/h.

4.3.2 ETpu- menetelmän käyttö jätevesipumppaamolla

Summanlahti oli henkilökunnan haastattelun perusteella työn suorituksen aikana Haminan Vedellä ainut jätevesipumppaamo, jolle menetelmän vaatimat mittauslaitteet oli asennettu. Mittausarvot olivat saatavilla automaatiojärjestelmästä. ETpu- menetelmän mukainen laskenta päätettiin tässä tehdä pienemmällä laajuudella Summanlahden pumppaamolle. Mittausarvot luettiin valvomon tietokoneelta käsin, ja tarvittavat arvot olivat

- pumpulle syötettävä sähköteho *P*e [kW]
- paine pumppaamon ja lähtevän paineputken rajalta *p* [bar]
- virtaama painemittauskohdassa *Q* [m^3/h]
- imualtaan vesipinnankorkeus [m]

Pumppaamon toiminnan tarkastelu suoritettiin 24.8 kahdeksan tunnin ajan ja 28.8.2015 2,5 tunnin ajan. Tiedot kerättiin noin viiden minuutin välein. 24.8 jälkeen havaittiin pumppaamon automaatiojärjestelmän tehotietojen asennuksissa virhe pumpuille 1 ja 3, jonka vuoksi mittausarvot 24.8 ja aikaisemmin eivät olleet todenmukaisia. Tehotiedot korjattiin 28.8 seurantaan. Taulukossa 2 on esitetty ETpu- menetelmän mukaisen laskennan tulokset Summanlahden jätevesipumppaamolle mittausaikana 28.8.2015. Laskennassa käytetyt lähtöarvot ja niillä saadut tulokset on taulukoituna liitteessä II (Liite II; taulukko 1 ja 2).

Tuloksista (taulukko 2) huomataan, että pumput 2 ja 3 toimivat mittausajan virtaamalla heikolla hyötysuhteella ja niiden ETpu- luku on mittausaikana välttävä. Korjaustoimenpiteet pumppaamolle olisivat siten suositeltuja. Kuvassa 13 on kuvattu ETpu- luvun muutos tarkasteluaikana 28.8.

ETpu- luku ei voi olla suurempi kuin 1, jonka vuoksi tuloksissa on virhe pumpulle 1. Syitä voivat olla esimerkiksi

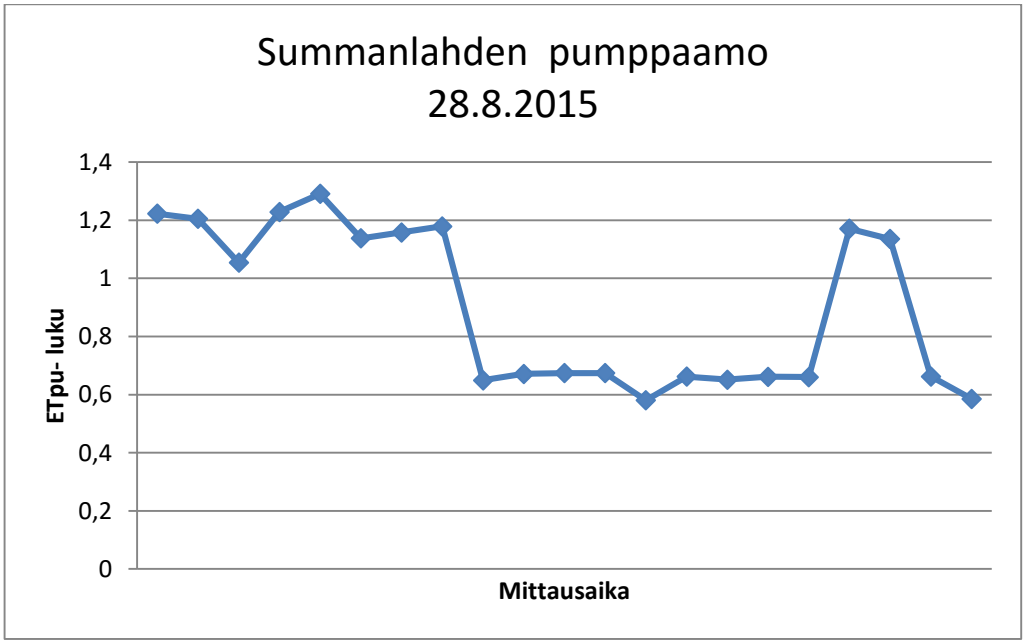
- Mittauslaitteita ei kalibroitu ennen mittausaikaa

- Mittausarvojen luku tietokoneelta, jolloin arvojen lukemisessa voi olla eriaikaisuutta.
- mittauslaitteita ei tarkistettu.

Taulukko 2. Summanlahden jätevesipumppaamon mittausajankohdan pumppausjärjestelmien hyötysuhteiden ja ETpu- lukujen tulokset. Taulukossa on hyötysuhteiden vaihteluväli, keskiarvohyötysuhde, ETpu- luvun vaihteluväli sekä keskiarvo.

Pumppuyhdistelmä	**pumppu 1**[1]	**pumppu 2**	**pumppu 3**
hyötysuhde	0,75- 0,92	0,46- 0.47	0,41- 0,47
KA hyötysuhde	0,84	0,47	0,45
ETpu	1,0- 1,23	0,63- 0,67	0,58- 0,66
KA ETpu	1,13	0,63	0,63

[1]ETpu- luku ei voi olla suurempi kuin 1, joten mittaustuloksissa on virheellisyyttä pumpun 1 kohdalla.



Kuva 13. ETpu- luvun muutos mittausaikana 28.8.

Mittausaikana kaikki pumput ehtivät käynnistyä useamman kerran. Koska jatkuvaa tiedonkeruuta ei ollut mahdollista tässä järjestää, eivät tulokset osoita pumppaamon käynnin aikaista kokonaistehokkuutta, vaan hetkittäisiä arvoja. Esimerkiksi kahden vuorokauden mittausaika jatkuvalla tiedonkeruulla ja laskennalla kertoisi kattavaa tietoa pumppaamon

tilasta. Lisäksi suuremman hyödyn menetelmällä saisi, jos pumput olisivat useasti aktivoituneita samanaikaisesti, jolloin erilaisten pumppausyhdistelmien tehokkuutta voisi arvioida.

4.4 Lepikön jätevesipumppaamo

Lepikön jätevesipumppaamolle ei sovellettu ETpu- menetelmää, sillä pumppaamolle ei ollut asennettu menetelmän vaatimia mittauksia ja tiedonkeruuta. Menetelmän käyttöä varten täytyisi Lepikön pumppaamolle asentaa

- tehomittaus
- paine- ja virtausmittaus pumppaamon ja lähtevän painelinjan rajalle
- imualtaan vesipinnan korkeuden mittaus.

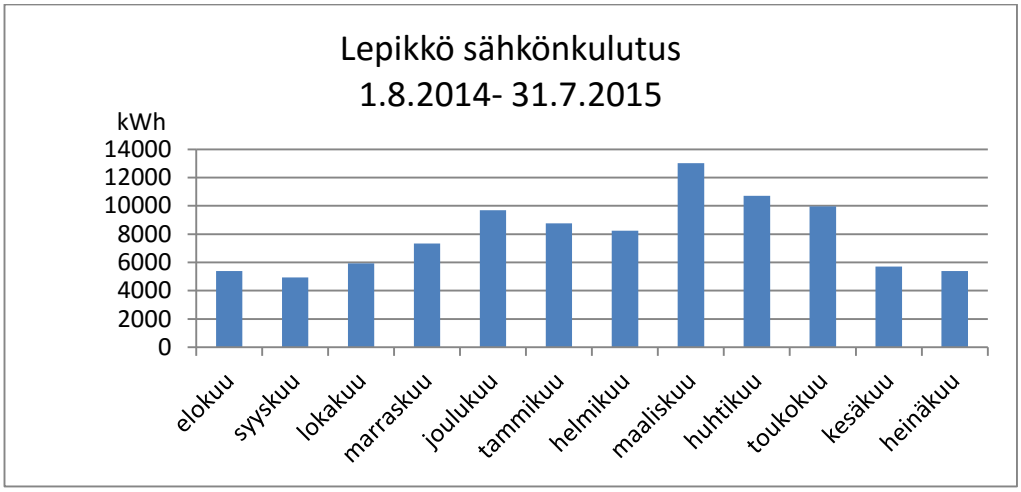
Lepikön pumppaamosta oli saatavilla tietoa virtaamista ja sähkönkulutuksesta sekä pumppujen käynnistymiskerroista. Virtaamatiedot haettiin päivän tarkkuudella järjestelmästä. Arviointia varten valmistajalta saatiin pumpun ominais-, hyötysuhde- ja tehokäyrät. Lisäksi pumppaamon käyntioloaikoja seurattiin automaatiojärjestelmän kautta.

4.4.1 Nykyinen tila

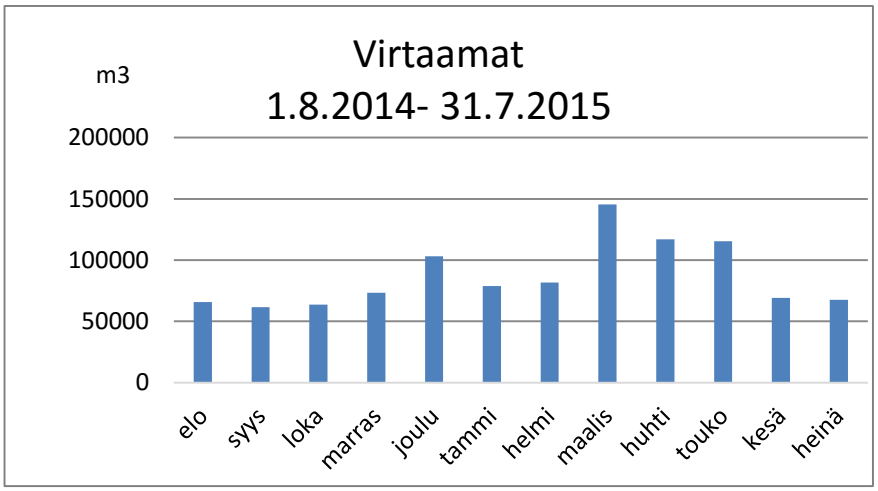
Lepikön jätevesipumppaamo koostuu kolmesta vuonna 2003 asennetusta märkäpumpusta. Pumppuja ajetaan pääsääntöisesti vuorotellen, mutta suurilla vesimäärillä yhtä aikaa rinnan. Pumppujen säätötapa on on/off-säätö, joka tehdään pintaohjauksella eli vesialtaan pinnankorkeuden mukaan. Käynnissä ollessaan pumppu toimii vakiotuotolla. Pumppujen sähkömoottorille on asennettu pehmokäynnistin, jolla käynnistys ja pysäytys saadaan tehtyä pienemmällä virransyötöllä. (Suurnäkki 2015.)

Lepikön jätevesipumppaamo on Haminan Veden kolmanneksi suurin jätevesipumppaamo. Se pumppaa keskimäärin 2750 m^3 jätevettä vuorokaudessa. Koska laitteisto on keskitasoa suurempi ja iältään jo 13 vuotta vanha, oletettiin pumppaamon tehokkuudessa olevan

parannuspotentiaalia. Pumppaamon vuoden aikainen sähkönkulutus on esitetty kuvassa 14 ja pumpatut vesimäärät kuvassa 15.



Kuva 14. Lepikön jätevesipumppaamon sähkönkulutus syyskuusta 2014 elokuuhun 2015. Yhteensä kulutus oli tältä ajalta noin 95 000 kWh.

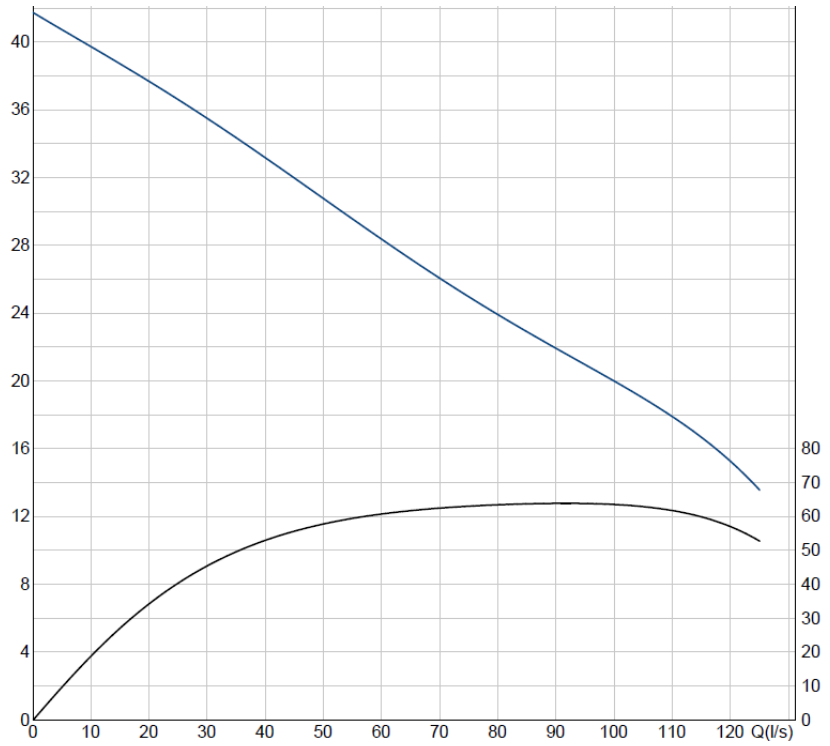


Kuva 15. Pumpatut jätevesimäärät Lepiköstä vuoden ajalta kuukausittain.

Virtaamatietoja haettiin järjestelmästä puolen vuoden ajalta tarkkuudella m^3/d ja niistä muodostettiin pysyvyyskäyrä, kuva 16. Käyrästä nähdään, että pumppaamon vuorokaudessa pumpatut vesimäärät vaihtelevat puolessa vuodessa 2000 m^3 ja 7000 m^3 välillä.

Kuva 16. Pysyvyyskäyrä vuorokauden virtaamista ajalta 4.1.- 30.6.2015.

Lepikön pumput ovat samanlaisia. Pumpun hyötysuhdekäyrästä kuvasta 17 voi suoraan havaita, että pumpun paras mahdollinen hyötysuhde on 0,64, joka voisi olla korkeampi. Myös On/Off- säätötapa viittaa siihen, että energiatehokkuutta olisi mahdollista parantaa. Taajuusmuuttajasäätö on yleensä energiatehokkaampi säätötapa.



Kuva 17. Lepikön jätevesipumppaamon pumppujen ominais- ja hyötysuhdekäyrät. (Grundfos 2015).

Tämän työn tarkasteluissa pumput oletetaan identtisiksi, vaikka todellisuudessa pumppujen tehokkuuksissa voi olla eroja, esimerkiksi kulumien vuoksi. Pumppaamon toimintaa seurattiin automaatiojärjestelmän kautta tunnin ajan. Käyntiaikojen ja virtaamien perusteella pumppaamon yhden pumpun vakiovirtaamaksi arvioitiin 107 l/s. Hyötysuhdekäyrän perusteella pumppauksen nimellishyötysuhde olisi arvioidulla virtaamalla ja sitä vastaavalla nostokorkeudella 18,2 m 0,62 eli lähellä parasta nimellishyötysuhdetta.

4.4.2 Tulokset

Energiatehokkuuden parantamispotentiaalia arvioidaan ensimmäisessä skenaariossa alentamalla pyörimisnopeutta ja muuttamalla pumppaus tasaiseksi ja yhtäjaksoiseksi. Toisessa skenaariossa pumppaamon pumput vaihdetaan paremmalla hyötysuhteella toimiviksi.

4.4.2.1 Skenaario 1

Nykyisen toimintapisteen tuoton 107 l/s ja nostokorkeuden 18,2 m avulla laskettu pumppauksen tehontarve on

$$P_1 = \frac{1000\frac{kg}{m^3} * 9{,}81\frac{m}{s^2} * \frac{107\frac{l}{s}}{1000\frac{l}{m^3}} * 18{,}2\ m}{0{,}62} = 30812 \text{ W} = 30,\ 8 \text{ kW}$$

Tasaisella ja yhtäjaksoisella pumppauksella sekä vuoden keskimääräisellä virtaamalla 2750 m^3 vuorokaudessa olisi pumpun vakiotuotto q_2 32 l/s. Kaavojen 10 ja 11 avulla lasketaan uudelle pumppukäyrälle nostokorkeus H_2 vastamaan toimintapistettä, jossa tuotto on 32 l/s. Tässä esimerkissä oletetaan pumpun nostokorkeuden koostuvan vain dynaamisesta nostokorkeudesta eli painehäviöistä.

$$H_2 = H * (\frac{q_2}{q})^2 = 18{,}2\ m * \left(\frac{32\ l^2}{107\ l^2}\right) = \ 1{,}6\ m$$

Tuotolla q_2 ja nostokorkeudella H_2 laskettu tasaisen pumppauksen tehontarve hyötysuhteella 0,62 on

$$P_2 = \frac{1000\frac{kg}{m^3} * 9{,}81\frac{m}{s^2} * \frac{32\frac{l}{s}}{1000\frac{l}{m^3}} * 1{,}6\ m}{0{,}62} = 810 \text{ W} = 0{,}810 \text{ kW}$$

Vuoden ajalta keskimääräinen energiankulutus olisi jatkuvalla pumppauksella vakiotuotolla 32 l/s siten

$$0{,}810\ kW * 24\frac{h}{d} * 365\frac{d}{a} = 7097\frac{kWh}{a}$$

Nykyisellä ajotavalla ja keskimääräisellä vuorokausivirtaamalla pumppaamon käyntiaika vuorokaudessa on 7,14 h. Tällä käyntiajalla pumppaamon vuodenajan sähkönkulutus olisi

$$30{,}8 \text{ kW} * 7{,}14\ \frac{\text{h}}{\text{d}} *\ 365\ \frac{\text{d}}{\text{a}} =\ 80\ 267\ \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

Säästö energiankulutuksessa olisi 80 267 – 7096 kWh = 73 171 kWh vuodessa. Jos sähkön hinnaksi katsotaan 0,07 e/ kWh, saataisiin vuodessa 0,07 e/ kWh * 73 171 kWh = 5121 e säästöä energiakustannuksissa. Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida CO_2-päästöjen kautta. Seuraavassa laskennassa käytetään päästökerrointa 190,16 gCO_2/kWh (Haminan Energia Oy). Hiilidioksidipäästöjä saataisiin vähennettyä vuodessa

$$73\ 171 \text{ kWh} *\ 190{,}16\ \frac{gC0_2}{\text{kWh}} = 13914 \text{ kg } CO_2$$

Todellisuudessa jätevesipumppaamoa ei voida yhtäjaksoisesti ajaa esimerkin mukaisella tilavuusvirralla tukkeutumisen vuoksi. Mahdollista on kuitenkin pienentää pyörimisnopeutta ja tehdä vain muutamia kertoja päivässä pumppausjaksoja nopeammalla virtaamalla, jotta pumppuja tukkiva aines liikkuisi. Taajuusmuuttaja mahdollistaisi Lepikön pumppaamolla pyörimisnopeuden pienentämisen ja tasaisemman pumppauksen, jolloin sähkönkulutus pienenisi. Tässä esimerkissä oletettiin hyötysuhteen pysyvän samana, mutta todellisuudessa

pyörimisnopeussäädöllä hyötysuhde vaihtelee, ja lisäksi taajuusmuuttaja laskee hieman systeemin hyötysuhdetta. Todellinen hyötysuhde olisi siten heikompi kuin tässä käytetty nimellishyötysuhde, ja sen vuoksi energiankulutuskin todellisuudessa suurempi.

4.4.2.2 Skenaario 2

Tässä skenaariossa pumppaamon säätö- ja ajotapaa ei muuteta, vaan pumput korvataan paremmalla hyötysuhteella toimiviin pumppuihin. Hyötysuhteella 0,70 pumpun tehontarve olisi

$$P_{0,70} = \frac{(107\,\frac{l}{s} * 18{,}2m * 9{,}81\,\frac{m}{s^2})}{0{,}70} = 27{,}3\ kW$$

Vuoden aikainen energiankulutus olisi keskimääräisellä käyntiajalla 7,14 h/d

$$E_{0,70} = 27{,}3\ kW * 7{,}14\,\frac{h}{d} * 365\,\frac{d}{a} = 71124\ kWh/\mathrm{a}$$

Sähkön hinnalla 0,07 €/ kWh olisi pumppaamon vuosittainen energiakustannus

$$0{,}07\,\frac{€}{kWh} * 71124\,\frac{kWh}{a} = \ 4979\ €/a$$

Samoin kuin edellä on taulukkoon 3 laskettu lisäksi hyötysuhteille 0,75 ja 0,8 energiankulutus, energiakustannus ja kustannussäästö nykytilaan verrattuna. Lisäksi ympäristövaikutusten vertailua varten on laskettu hiilidioksidin ominaispäästöt jokaiselle systeemille. Laskennassa on käytetty arvoa 190,16 gCO_2/kWh (Haminan Energia Oy).

Taulukko 3. Pumppauksen hyötysuhteen nostamisen vaikutus energiankulutukseen, kustannuksiin sekä CO_2-päästöihin.

Hyötysuhde	Teho [kW]	Energian-kulutus vuodessa [kWh]	Energian hinta vuodessa[1] [€]	Kustannussäästö[2] [€]	CO_2-päästöt vuodessa[3] [kg]
0,62	30,8	80268	5619	0	15264
0,7	27,3	71124	4979	640	13525
0,75	25,5	66456	4651	968	12637
0,8	23,9	62286	4360	1259	11834

[1] Energian hinta on tässä laskettu 0,07 €/kWh. [2] Kustannuksia verrataan nykyiseen, 0,62 hyötysuhteella toimivan pumppauksen kustannuksiin. [3]CO_2- päästöjen laskennassa käytetty päästökerrointa 190,16 gCO_2/kWh.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

5.1 Energiatehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Pumppaamon energiatehokkuus koostuu monista asioista, joiden suunnittelu alkaa ennen pumppaamon hankintaa. Ensisijaisesti on huomioitava pumppujen tehokkuus, mutta systeemin kokonaistehokkuus koostuu pumppujen hyötysuhteiden lisäksi moottorin, taajuusmuuttajan sekä putkiston hyötysuhteista. Oikea mitoitus on huomioitava suunnitteluvaiheessa, ja siihen tarvitaan oikeita lähtötietoja. Myös pumppaamon toimintavarmuus on osa energiatehokkuutta, ja siihen vaikuttavat juoksupyörän ja putkiston tukkeutumattomuus. Pumppaamon ja/tai pumppaamon laitteiston hankinnassa olisi tärkeää oppia joko itse tekemään tai teettämään laskelmat kokonaiskulutuksista. Haastateltavista yhtä lukuun ottamatta kaikki olivat pumppuyrityksien edustajia, joten vastauksista saatiin koottua heidän näkökulmastaan hyödyllistä tietoa vesihuoltolaitokselle.

5.2 Jätevesipumppaamojen energiatehokkuuden määritys

Työssä tutkittiin ETpu- menetelmän käyttöä jätevesipumppaamolla. Menetelmän mukaisen laskennan suorittaminen oli yksinkertaista. Suuremman hyödyn menetelmällä olisi tässä

saanut, jos mittausjärjestelyt olisivat olleet tarkasti suunniteltuja, mittauslaitteet tarkistettu ja mittausaika laajempi. Jatkuvalla ja automatisoidulla tiedonkeruulla sekä ETpu-laskentaohjelmalla olisi pumppauksen energiatehokkuus alusta loppuun seurattavissa. Jatkuva pumppaamon energiatehokkuuden mittaus voisi olla hyödyllinen, sillä se mahdollistaisi nopean reagoinnin epätaloudellisiin pumppauksiin ja muutoksiin, esimerkiksi pumppujen tukkeutumisiin. Järjestelmä olisi Haminan Vedellä käyttöhenkilökunnalle selkeä ja helppokäyttöinen työväline energiatehokkuuden seurantaan. Korjaustoimenpiteet olisi mahdollista osoittaa tarkasti oikealle hetkelle, ja korjaustoimenpiteiden suorittamisen jälkeen järjestelmä osoittaisi välittömästi niiden vaikutukset energiatehokkuuteen.

Tässä työssä keskityttiin vain yhden pumppaamon menetelmän mukaiseen tarkasteluun, mutta mittausjärjestelyillä menetelmää voisi käyttää usean suuren pumppaamon arviointiin. Menetelmä mahdollistaisi useiden pumppaamojen vertailun, ja sen avulla voisi kehittää koko jätevesiverkoston energiatehokkuuden seurantaa, ja sitä kautta parantaa energiatehokkuutta. Menetelmää hyödyntäessä on muistettava, että korkea ETpu-luku ei kuitenkaan välttämättä tarkoita pumppaamon olevan energiatehokas, sillä menetelmä vertaa pumppaamon tilaa asennetulla laitteistolla saatavaan tulokseen. Lisäksi menetelmän käyttö vaatisi mittauslaitteiden ja menetelmän mukaisen laskentaohjelman hankkimisen, mikä aiheuttaisi vesihuoltolaitokselle kustannuksia.

Lepikön jätevesipumppaamolle olisi hyvä järjestää tarkempaa energia-analyysia, esimerkiksi ETpu-menetelmää, varten ainakin teho- ja painemittaus, sekä korjata astiamittauksen perusteella tulevat virtaamatiedot verkostoautomaatiojärjestelmään. Pumppaamon energiatehokkuuden tarkasteluun käytettiin tässä saatavilla olleita tietoja, ja parannuspotentiaalia mietittiin kahdella tavalla. Skenaario 1 osoitti, että on/off-säätö on tasaiseen pumppaukseen verrattuna paljon energiaa kuluttava. Tasaisen pumppauksen energiankulutus oli noin 9 % on/off-säädöllä toimivan pumppauksen energiankulutuksesta. Säätötapaa muuttamalla voitaisiin siis huomattavasti parantaa pumppauksen energiatehokkuutta. Toisessa skenaariossa laskettiin nykyisellä ajotavalla, mutta paremmalla hyötysuhteella, toimivaa pumppausta. Hyötysuhteella 0,70, joka todennäköisesti on realistinen jätevesipumpulle, saataisiin vuodessa 640 € säästöä energiakustannuksissa. Se merkitsisi noin 11 %: n säästöä. Hiilidioksidipäästöjä saataisiin

vähennettyä noin 1740 kg. Luultavasti Lepikköön ei olla hankkimassa nykyisen pumppaussysteemin jälkeen on/off-säädöllä toimivaa systeemiä, mutta hyötysuhteen nostamisen vaikutus on kuitenkin hyvä pitää mielessä.

6 YHTEENVETO

Tässä työssä selvitettiin jätevesipumppaamojen energiatehokkuuteen vaikuttavia ja sitä parantavia tekijöitä. Näitä käsiteltiin teoreettisesti sekä etsittiin haastattelujen avulla. Työssä tutkittiin myös Energiatehokkuuden tunnusluku- menetelmän käyttöä ja sen mahdollisuuksia lisätä energiatehokkuutta Haminan Veden jätevesipumppaamoilla. Lisäksi tutkittiin yhden pumppaamon energiatehokkuuden parantamismahdollisuuksia tasaisen ja yhtäjaksoisen pumppauksen sekä tehokkaamman pumpun hankinnan kautta.

Energiatehokkaan jätevesipumppaamon saavuttaminen on prosessi, joka alkaa uuden pumppaamon hankinnan suunnittelusta. Hankintaprosessin onnistuminen energiatehokkuuden kannalta vaatii pysyvyystietojen selvittämistä ja lähtötietoja pumppaamon vaatimuksista. Ylimitoitus oli haastattelujen perusteella yleisin virhe uutta pumppaamoa ja/tai pumppuja hankittaessa. Hankintaa tehdessä LCC-laskelmaa voitaisiin käyttää apuvälineenä hahmottamaan kokonaistaloudellisesti edullisin ja vähiten energiaa kuluttava pumppaussysteemi.

Pyörimisnopeussäätö on energiatehokkuuden kannalta merkittävä tekijä. Taajuusmuuttajilla saadaan portaattomasti säädettyä moottorille syötettävää jännitettä ja kierrosnopeutta vastaamaan virtaamaa. Taajuusmuuttaja mahdollistaa yhtäjaksoisen ja tasaisen pumppauksen, mikä vähentää energiankulutusta on/off- tai kuristussäätöön verraten. Lepikön pumppaamo, jolle laskettiin tasaisen pumppauksen energiankulutusta, osoittaa tasaisen virtaaman energiasäästöpotentiaalin verrattuna on/off-säätöön.

Pumppaamon energiatehokkuutta kannattaa tarkastella energia-analyyseilla, joilla varmistetaan oikein asennettu koneisto ja säätötapa. Energia- analyysien perusteella voidaan huomata energiatehokkuuden parannuspotentiaalia. ETpu- menetelmä voisi olla hyödyllinen väline energiatehokkuuden määrityksessä ja jatkuvaan seurantaan, sillä automatisoitu

energiatehokkuuden seuranta mahdollistaisi nopean reagoinnin muuttuviin tilanteisiin. Jotta energiatehokkuutta pystyttäisiin tutkia, tarvitaan pumppaamoille mittauksia, jotka kertovat pumppaamon tilasta. Hyödyllisiä mittauksia tässä työssä olivat teho-, virtaus- ja painemittarit sekä imualtaan pinnankorkeusmittari. Ilman mittausjärjestelyjä ei energiatehokkuutta voida tarkasti tutkia, vaan esimerkiksi hyötysuhteen arviointi pumppukäyrien avulla jää karkealle tasolle.

LÄHTEET

Aranto Nina. 2010. Teollisuuden ja yhdyskuntien energiatehokkuusselvitykset, auditoinnit 2008 – 2010.[Tutkimusraportti]. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Europump and Hydraulic institute. 2004. A guide to successful applications, variable speed pumping executive summary. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.6.2015.] Saatavilla: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/variable_speed_pumping.pdf.

Europump and Hydraulic institute. 2001. Pump life cycle costs: a guide to LCC analysis for pumping systems. [Verkkkodokumentti.] [Viitattu 13.10.2015.] Saatavilla: https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/pumplcc_1001.pdf

Federley, Jaana.2008. Energiatehokas pumppausjärjestelmä. Koulutusmateriaali. [Verkkojulkaisu.] [Viitattu 4.9.2015.] Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/7810/Energiatehokas_pumppausjarjestelma_KOULUTUSAINEISTO.pdf.

Grundfos. a.s. The Centrifugal pump. [Verkkojulkaisu.] [Viitattu 23.6.2015]. Saatavilla: https://dk.grundfos.com/content/dam/Global%20Site/Industries%20%26%20solutions/Industry/pdf/The_Centrifugal_Pump.pdf s.12,15,16,52

Grundfos. 2015.CAPS- tuloste[2012.02.041]).[Vastaanotettu sähköpostilla yrityksestä]

Haminan Energia Oy. Sähkön alkuperä 2014. [Haminan Energia Oy:n www- sivut.] [Viitattu 10.10.2015.] Saatavilla: http://www.haminanenergia.fi/fi/tuotteet/sahko/sahkonalkupera

Haminan Vesi. 2015. Käyttöomaisuuden hallintasuunnitelma.

Haminan Vesi. 2014. Tilinpäätösraportti.

Hammer, Mark J. & Hammer, Mark J. Jr.Water and wastewater technology. Pearson edition 7. painos. 460 s. ISBN-13: 978-0-13–511404-9

International Energy Agency.2009. World Energy Outlook. [Viitattu 10.10.2015.] 691 s. Saatavilla: http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebsite/2009/WEO2009.pdf

Karttunen, Erkki. 1999. Vesihuoltotekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus. 206 s. ISBN 952-13-0407-3

Karttunen, Erkki. 2003. Vesihuolto I. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL r.y 314 s. ISBN 951-758-431-8. s.314

Karttunen, Erkki. 2004. Vesihuolto II. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL r.y 684 s. ISBN 951-758-438-5.

L 30.12.2014/1429. Energiatehokkuuslaki.

L 9.2.2001/119. Vesihuoltolaki.

Larjola, Jaakko *et* al. 2015. Pumput, Puhaltimet ja kompressorit- kurssin luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 106 s.

Motiva 2011. Energiatehokkaat pumput. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.6.2015]. Saatavilla: http://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf

Motiva. 2015. Julkinen sektori. [Motivan- verkkosivut]. [päivitetty 28.7.2015]. [Viitattu 10.10.2015] Saatavilla: http://motiva.fi/julkinen_sektori

Pat. FI 124877. 2015. Pumppaamon energiatehokkuuden määritysmenetelmä. Pulli, Martti.

Portoni *et al*. 2008. Optimization of parallel variable-speed-driven centrifugal

pumps operation. Energy efficiency 2008. ss.167- 173.

Pulli, Martti.2009. Virtaustekniikka, Vedensiirtojärjestelmien toiminnallinen suunnittelu nykyaikaisin menetelmin. Tammertekniikka. 248 s. ISBN 978-952-5491-58-6.

Pulli, Martti. 2012. Energiatehokkuus vesien siirrossa osa I. [Artikkeli.] Vesitalous 1/2012 ss.32- 37.

Ruuskanen, Anne.2007. Optimization of energy consumption of wastewater pumping. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto: Ympäristötekniikan koulutusohjelma.

Suurnäkki, Matti. 2015. Käyttömestari. Haminan Vesi. Haastattelut 6/2015

Työ- ja elinkeinoministeriö. Julkiset hankinnat. päivitetty 5.9.2015 [Työ- ja elinkeinoministeriön www-sivut.] [Viitattu 5.9.2015.] Saatavilla: https://www.tem.fi/kuluttajat_ja_markkinat/julkiset_hankinnat

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2009. Energiatehokkuustoimikunnan mietintö: Ehdotus energiansäästön ja energiatehokkuuden toimenpiteiksi. [Verkkodokumentti.] [Viitattu 10.10.2015.] Saatavilla: http://www.tem.fi/files/23350/TEM_ETT_Mietinto_8_6_2009.pdf

Viholainen, Juha. 2014. Energy-efficient control strategies for variable speed driven parallel pumping systems based on pump operation point monitoring with frequency converters. Väitöskirja. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. s.120. ISBN 978-952-265-550-9

Vogelesang Hans. 2008. Energy savings in pump systems. World Pumps. 8/2008. ss. 26-30.

Vogelesang, Hans. 2009. Two approaches to capacity control. World Pumps. 9/2009 ss.26–29.

Xylem. 2012. Flygt: Jäteveden pumppauksen tukkeutumattomuutta ei voida määrittää läpäisykoon perusteella. [Artikkeli.]

Sähköposti-haastattelut:

Auterinen, Timo. Jokiranta, Antti.3.7.2015

Levälampi, Jaakko. 18.8.2015

Pulli, Martti. 25.6.2015

Tamsi, Kari 23.6.2015.

Haastattelukysymykset

JÄTEVEDEN PUMPPAUKSEN ENERGIATEHOKKUUTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

1. Uutta pumppaamoa / pumppaamokoneistoa hankkiessa, millaisia asioita on otettava huomioon energiatehokkuuden maksimoimiseksi?

2. Mitkä ovat yksinkertaisimmat tai yleisimmät tavat lisätä jäteveden pumppauksen energiatehokkuutta ilman uusien pumppujen hankkimista?

3. Mikä on merkittävin/yleisin energiatehokkuutta heikentävä virhe, jonka tilaaja tekee uutta pumppua hankkiessa?

4. Miten tilaaja voisi kehittää hankintaprosessia saadakseen pumppaamon elinkaarelle kokonaiskustannuksiltaan edullisimman ja toimivimman pumppaamon?

5. Minkä ikäisissä pumppaamoissa kannattaisi harkita pumppujen uusimista kokonaiskustannusten vähentämiseksi? Mitkä tekijät vaikuttavat tähän?

6. Onko pumpun rakenteellisilla ominaisuuksilla vaikutusta pumppaamon energiatehokkuuteen tai toiminnollisuuteen?

7. Muita mahdollisia ajatuksia energiatehokkuuteen liittyen?

ETpu- lukujen laskennassa käytetyt alkuarvot ja tulokset Summanlahden jätevesipumppaamolla 28.8.2015

Laskennassa käytetyt alkuarvot

Taulukko 1. Arvot, jotka kerättiin automaatiojärjestelmän tietokoneelta pumppaamon valvomosta.

Pumppu	Q [m³/h]	P [Pa]	Vesipinnan korkeus [m]	Pe [kW]	η_{nim}
yksi	239	40000	0,77	8,7	0,748
yksi	240	40000	0,82	8,7	0,748
yksi	274	50000	0,80	12,4	0,748
yksi	187	130000	2,02	11,3	0,748
yksi	270	90000	1,98	12,3	0,748
yksi	271	70000	1,81	12,3	0,748
yksi	272	70000	1,62	12,3	0,748
yksi	274	70000	1,36	12,4	0,748
kaksi	221	40000	1,17	14,4	0,710
kaksi	227	40000	1,18	14,3	0,710
kaksi	231	40000	1,02	14,7	0,710
kaksi	236	40000	1,18	14,8	0,710
kolme	223	30000	1,00	15,0	0,710
kolme	228	40000	1,08	14,7	0,710
kolme	228	40000	1,18	14,8	0,710
kolme	228	40000	1,01	14,8	0,710
kolme	225	40000	1,03	14,6	0,710
yksi	266	70000	1,27	12,2	0,748
yksi	284	60000	1,33	12,4	0,748
kaksi	236	40000	1,30	14,9	0,710
kolme	228	30000	1,34	14,7	0,710

Lisäksi tiedetään virtaus- ja painemittauskohdalla putken sisähalkaisija D = 0,35 m.

Alkuarvojen perusteella lasketut arvot

Taulukko 2. Arvot, jotka saatiin ETpu-menetelmän laskukaavoilla, jotka on esitetty luvussa 4.2, ja taulukon 1 arvoilla.

Pumppu	q [m³/s]	q_2 [l/s]	Hp [m][1]	Hi [m][2]	Hp-Hi [m]	Pv [kW]	η_{pas}	ETpu
yksi	0,066	66,4	11,6	0,120	11,4	7,45	0,856	1,22
yksi	0,067	66,7	11,6	0,170	11,4	7,44	0,856	1,14
yksi	0,076	76,1	12,6	0,150	12,4	9,28	0,748	1,00
yksi	0,052	51,9	20,7	1,370	19,3	9,86	0,872	1,17
yksi	0,075	75,0	16,7	1,330	15,3	11,3	0,917	1,23
yksi	0,075	75,3	14,6	1,160	13,5	9,94	0,808	1,08
yksi	0,076	75,6	14,6	0,970	13,6	10,1	0,822	1,10
yksi	0,076	76,1	14,6	0,710	13,9	10,4	0,837	1,12
kaksi	0,061	61,4	11,5	0,520	11,0	6,64	0,461	0,65
kaksi	0,063	63,1	11,5	0,530	11,0	6,82	0,477	0,67
kaksi	0,064	64,2	11,6	0,370	11,2	7,04	0,479	0,67
kaksi	0,066	65,6	11,6	0,530	11,0	7,09	0,479	0,67
kolme	0,062	61,9	10,5	0,350	10,2	6,19	0,412	0,58
kolme	0,063	63,3	11,5	0,430	11,1	6,91	0,470	0,66
kolme	0,063	63,3	11,5	0,530	11,0	6,85	0,463	0,65
kolme	0,063	63,3	11,5	0,360	11,2	6,95	0,470	0,66
kolme	0,063	62,5	11,5	0,380	11,2	6,85	0,469	0,66
yksi	0,074	73,9	14,6	0,620	14,0	10,1	0,832	1,11
yksi	0,079	78,9	13,6	0,680	12,9	10,0	0,806	1,08
kaksi	0,066	65,6	11,6	0,650	10,9	7,01	0,471	0,66
kolme	0,063	63,3	10,5	0,690	9,84	6,11	0,416	0,59

1 Hp:n laskennassa Z:n arvona käytetty 7, 45 m.

2 Hi:n laskennassa vedenpinnan korkeuteen on lisätty pumppaamon lattian korkotaso merenpinnalta sekä pinnan korkeuden mittauksessa ulkopuolelle jäävä osa korkeudesta. Lattian korkotaso on -1,15 m ja mittauksesta pois jäävä osa 0,5 m.