

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkötekniikan koulutusohjelma
BL10A1000 Kandidaatin työ ja seminaari

Kylmätilojen kuljetinkäyttöjen energiatehokkuus

Nevaranta Niko
Parkkinen Jukka
Lappeenrannassa 01.02.2010

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energia, sähkötekniikan koulutusohjelma

Niko Juhani Nevaranta, Jukka Petteri Parkkinen

Kylmätilojen kuljetinkäyttöjen energiatehokkuus

Kandidaatintyö, 2010

32 sivua, 17 kuvaa, 1 taulukko

Tarkastaja: Professori Juha Pyrhönen

Hakusanat: kuljetinkäyttö, vaihdemoottori, kylmätila, energiakustannus, energiatehokkuus

Työssä tutkitaan kylmätiloihin sijoitettavien kuljetinkäyttöjen vaikutusta kokonaisenergiakustannuksiin. Tutkittavina kuljetinkäyttöinä ovat erityyppiset vaihdemoottorikäytöt. Kuljetinkäyttöille suoritetaan hyötysuhdemittauksia käyttäen suoraa mittausmenetelmää ja saatujen tulosten perusteella arvioidaan käyttöjen aiheuttamia energiakustannuksia kylmätilassa.

Mittaustulosten ja kustannusarvioiden pohjalta saadaan selkeä näkemys siitä, kuinka kuljetinkäytön hyötysuhteella on suuri merkitys muodostuviin kokonaiskustannuksiin erityisesti suurilla käyttötuntimäärillä. Energiatehokkaalla kuljetinkäytöllä vähennetään moottorin sähkökulutuksen lisäksi myös kylmätilan jäähdytysenergian tarvetta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT Energy, Department of Electrical Engineering

Niko Juhani Nevaranta, Jukka Petteri Parkkinen

Energy efficiency of conveyor drives in refrigerating rooms

Thesis for the Degree of Bachelor of Science in Technology, 2010

32 pages, 17 figures, 1 table

Examiner: Professor Juha Pyrhönen

Keywords: conveyor drive, gear motor, refrigerating room, energy cost, energy efficiency

We study how conveyor drives in refrigerating rooms affect total energy costs. Studied conveyor drives are different types of gear motor drives. Energy efficiencies of the conveyor drives are determined by using direct torque measurement and energy costs of the conveyor drives are approximated from these results.

From the measurement results and the approximated total costs it can be seen how the energy efficiency of a conveyor drive has a considerable influence on the total costs, especially, with large operating hours. An energy efficient conveyor drive can minimize the total energy costs by reducing the energy consumption of the conveyor motor while cooling costs in refrigerated rooms are also reduced.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	4
2 KYLMÄTILA	5
2.1 Kompressorijäähdytys	6
3 TUTKITTAVAT KULJETINKÄYTÖT	6
3.1 Kuljettimen vaihdemoottori	6
3.2 Taajuusmuuttaja kuljetinkäytössä	8
3.3 Kierukkavaihdemoottori	9
3.4 Kartiohammasvaihdemoottori	9
3.5 Lieriöhammasvaihdemoottori	10
3.6 Rumpumoottori	11
3.7 Kuljetinkäytön hygieenisuus	12
4 MITTAUSJÄRJESTELYT	13
4.1 Hyötysuhteen mittaamenetelmät	13
4.2 Hyötysuhteen mittaaminen	14
5 MITTAUSTULOKSET	16
5.1 Kierukkavaihdemoottorin kuormituskoe	16
5.2 Lieriövaihdemoottoreiden kuormituskokeet	17
5.3 Kartiovaihdemoottoreiden kuormituskokeet	21
5.4 Rumpumoottorin kuormituskoe	23
5.5 Vaihteiden vertailu	24
6 TALOUDELLISET VAIKUTUKSET	25
6.1 Kustannusvertailu teholuokan 0,37 kW moottoreille	26
6.2 Kustannusvertailu teholuokan 0,75 kW moottoreille	29
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	31
LÄHTEET	32

Käytetyt merkinnät

E	energia [kWh]
I	virta [A]
i	välityssuhde
K	energiakustannus [€]
n	pyörimisnopeus [1/min]
P	teho [W]
Q	lämpömäärä [J]
T	vääntömomentti [Nm]
t	käyttöaika [h]
U	jännite [V]
W	työ [J]
x	käyttöjen määrä
z	hammasluku
Γ	harmonissisältökerroin
ε	kylmäkerroin
η	hyötysuhde
φ	vaihesiirtokulma
Ω	kulmanopeus [rad/s]

Alaindeksit

K	kylmävarasto
L	kuumavarasto
l	kuorma
m	mekaaninen
max	maksimaalinen, suurin arvo
min	minimaalinen, pienin arvo
n	nimellinen
s	sähköinen

v	vaihteisto
μ	kitka
1	ensiöpuoli
2	toisiopuoli

1 JOHDANTO

Elintarviketeollisuuden kuljetinkäytöt ovat tyypillisesti taajuusmuuttajaohjattuja pienitehoisia vaihdemoottoreita. Vaihteella pienitehoisen sähkömoottorin vääntömomenttia saadaan kasvatettua ja pyörimisnopeutta pienennettyä kuljettimelle sopivaksi. Vaihdemoottorissa kokonaiskäytön hyötysuhdetta laskevat moottorissa ja vaihteessa syntyvät häviöt, jotka muuttuvat lämmöksi. Kuljetinkäyttöjen sijaitessa kylmätilassa hyötysuhteen merkitys korostuu koska kuljetinkäytön koko ottoteho täytyy poistaa kylmätilasta jäähdytyskoneistolla.

Työn tavoitteena on selvittää erilaisten kuljetinkäyttöjen vaikutusta kylmätilojen energiankulutukseen. Kuljetinkäytöissä kaikki ottoteho muuttuu lämmöksi kuljettimen eri osissa, jos oletetaan, ettei kuljettimia käytetä nostotyön tekemiseen. Lämmön syntyminen kuljettimessa vaikuttaa kylmätilan jäähdytykseen tarvittavan energian määrään. Energiatehokkaalla kuljetinkäytöllä vähennetään moottorin sähkökulutuksen lisäksi myös kylmätilan jäähdytysenergian tarvetta.

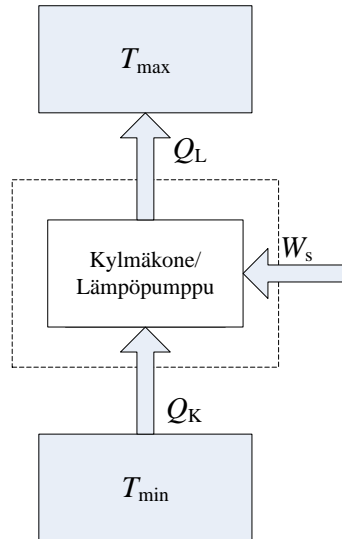
Työssä vertaillaan eri kuljetinkäyttövaihtoehtoja kylmätiloihin hyötysuhteen ja kustannustekijöiden perusteella. Vertailtavina kuljetinkäyttöinä ovat erilaiset vaihdemoottorikäytöt ja yksi rumpumoottorikäyttö. Tutkittaville kuljetinkäytöille suoritetaan useita kuormituskokeita hyötysuhteen määrittämiseksi eri toimintapisteissä. Mittaustulosten pohjalta muodostetaan kuljetinkäytöille kustannusarviot, joissa otetaan huomioon moottorien hankintahinta ja kokonaisenergiakustannukset kymmenen vuoden käyttöaikana.

Työn alkuosassa esitetään kylmäkoneen toimintaperiaate, tutkittavat kuljetinkäytöt ja hyötysuhteen määrittämiseen käytettävä mittausten menetelmä. Työn loppuosuudessa tarkastellaan kuormituskokeiden mittaustuloksia ja niiden pohjalta tehtyjä kuljetinkäyttöjen kustannusarvioita.

2 KYLMÄTILA

Kylmätilan jäähtyykseen tarvitaan kiertoprosessi, jossa on kaksi lämpövarastoa; kylmä- ja kuumavarasto. Kiertoprosessit luokitellaan avoimiin ja suljettuihin kiertoprosesseihin sen mukaan, kuinka työaine kiertää jäähtytysprosessissa. Kylmälaitoksen kiertoprosessi on suljettu, jos lämmön siirtämiseen käytetty sama työaine kiertää prosessissa vaihtumatta. Avoimessa kiertoprosessissa työaine vaihtuu ja se palautuu samaan tilaan, josta sitä syötetään prosessiin. (Aittomäki, 2009)

Termodynamiikan toisen pääsäännön mukaisesti lämmön siirtyminen matalammasta lämpötilasta korkeampaan ei voi tapahtua ilman ulkopuolista työtä. Kiertoprosessissa tämä työ tehdään lämpöpumpun tai kylmäkoneen avulla. Kylmäkoneella siirretään lämpöenergiaa pois jäähdytettävästä kohteesta ja lämpöpumpulla siirretään lämpöenergiaa lämmitettävään kohteeseen. Kuvassa 2.1 on esitetty kylmäkoneen ja lämpöpumpun tasekuva.



Kuva 2.1 Kylmäkoneen ja lämpöpumpun tasekuva.

Kuvassa 2.1 kylmävaraston lämpötila on merkitty T_{\min} , kuumavaraston lämpötila T_{\max} , lämpömäärä kylmävarastosta koneelle Q_K , lämpömäärä koneelta kuumavarastolle Q_L ja koneelle tuotu sähköinen työ prosessin aikana W_s . (Aittomäki, 2009)

2.1 Kompressorijäähdytys

Kompressorijäähdytyksessä jäähdytystyö tehdään sähkökäytön avulla ja jäähdytysprosessi tapahtuu kiertävän työaineen eli kylmäaineen välityksellä. Kompressorilla puristetaan kylmäaine höyrystymispaineesta suurempaan paineeseen, minkä jälkeen se johdetaan lauhduttimen kautta höyrystimelle. Kylmäaine höyrystyy alemmpipaineisessa höyrystimessä sitoen ympäristöstään lämpöä. Tällöin tapahtuu kylmätehon tuottaminen. Yleisesti kylmäkoneiden toimintaa ja niiden tarvitseman ulkopuolisen energian määrää kuvataan kylmäkertoimella. Kylmäkerroin kuvaa kylmäkoneella tuotetun kylmätehon suhdetta siihen energiamäärään, joka on tuotu systeemiin jäähdytysprosessin aikana. Kompressorijäähdytyksen tapauksessa kylmäkerroin on

$$\varepsilon_s = \frac{Q_K}{W_s}. \quad (2.1)$$

Kylmäkertoimen ollessa suuri jäähdytysprosessi on tehokkaampi eli sähkötehoa tarvitaan vähemmän kylmätehon tuottamiseksi. Sähkötehoa kompressorissa kuluttavat moottori ja muut apulaitteet, kuten tuulettimet. (Ruohonen, 2009)

3 TUTKITTAVAT KULJETINKÄYTÖT

Tutkittavat kuljetinkäytöt ovat taajuusmuuttajalla ohjattuja vaihdemoottorikäyttöjä. Vaihdemoottorissa vaihde suurentaa moottorilta saatavaa vääntömomenttia ja pienentää pyörimisnopeutta vaihteen välityssuhteen mukaisesti. Taajuusmuuttajalla tehdään kuljettimen lopullinen nopeussäätö sekä saadaan aikaan hallitut käynnistykset ja pysäytykset. Vaihdemoottorin käytämissä on etuna, että kuljettimen tarvitsema vääntömomentti saadaan muodostettua pienemmän teholuokan moottorilla kuin käytettäessä suoravetoista moottoria.

3.1 Kuljettimen vaihdemoottori

Sähkömoottorilla muunnetaan sen ottama sähköinen teho mekaaniseksi tehoksi akselille. Sähkömoottorissa muodostuu häviöitä, jotka heikentävät energianmuunnon tehokkuutta eli hyötysuhdetta. Siirrettäessä moottorilta saatavaa mekaanista tehoa vaihteen kautta kuormalle, ta-

pahtuu häviöitä myös vaihteessa. Vakionopeudella pyörivän moottorin kuorma muodostuu moottorin omasta kitkavääntömomentistä T_μ ja kuorman aiheuttamasta vastavääntömomentistä T_1 yhtälön

$$T_s = T_1 + T_\mu \quad (3.1)$$

mukaisesti, jossa T_s moottorin sähköinen vääntömomentti. Kuorman vaikuttaessa vaihteen välityksellä, moottorille kohdistuvan vastavääntömomentin suuruus on

$$T_1 = \frac{T_m}{i \cdot \eta_v}, \quad (3.2)$$

jossa i on vaihteen välityssuhde, η_v vaihteen hyötysuhde ja T_m vaihteen välityksellä pyörivän kuorman aiheuttama vääntömomentti. Välityssuhde on vaihteessa käytettyjen hammaspyörien hampaiden lukumäärien suhde

$$i = \frac{z_2}{z_1}, \quad (3.3)$$

jossa z_2 on toisiohammaspyörän ja z_1 ensiöhammaspyörän hammasluku. Välityssuhde voidaan myös kirjoittaa ensiö- ja toisiopuolen pyörimisnopeuksien suhteena

$$i = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.4)$$

Edellä esitetyistä yhtälöistä nähdään, kuinka vääntömomentti ja pyörimisnopeus muuttuvat vaihteen ensiö- ja toisiopuolen välillä välityssuhteen mukaisesti. (Karhula, 2008), (Kokkonen, 2007)

Vaihteiden haittapuolena ovat niissä syntyvät mekaaniset häviöt. Häviöt jakautuvat kitkahäviöihin hammaskosketuksissa, laakereissa tapahtuviin häviöihin ja voiteluöljyn pyörrehäviöihin, jotka johtuvat öljyn ja ilman sekoittumisesta pyörivien mekaanisten osien liikkeestä. Myös kuormituksen suuruus vaikuttaa vaihteen mekaanisiin häviöihin. Vaihteen hyötysuhde paranee kuormituksen aiheuttaman vääntömomentin kasvaessa. (Lynwader, 1982)

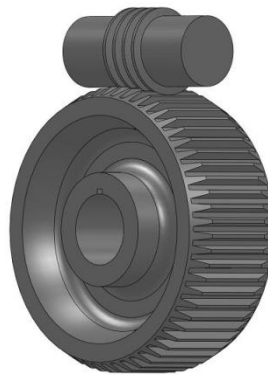
3.2 Taajuusmuuttaja kuljetinkäytössä

Kuljetin on moottorille tyypillisesti vakiomomenttikuorma. Moottorilta vaadittava teho on tällöin suoraan verrannollinen pyörimisnopeuteen. Sähkömoottorin pyöriessä sen rautaosissa ja käämityksissä syntyvät häviöt lämmittävät konetta. Moottoreissa syntyvän lämmön määrään vaikuttaa koneen kuormitus. Itsetuuletteisissa moottoreissa pyörimisnopeuden laskiessa moottorin pakotetun konvektion määrä laskee, eikä lämmön poistaminen tapahdu yhtä tehokkaasti, jolloin moottorin hyötysuhde laskee. Kuljettimissa käytetään taajuusmuuttajaohjattuja vaihdemoottoreita, jolloin vaihteen välityksellä nopeus lasketaan jo valmiiksi kuljettimelle sopivaksi ja taajuusmuuttajalla säädetään lopullinen nopeus. Taajuusmuuttajalla ohjatun moottorin hyötysuhde on parhaimmillaan, kun moottorille syötetään lähellä nimellistaajuutta olevaa taajuutta. Moottorikäyttö kuljettimissa kannattaa siis mitoittaa siten, että kuljettimelta vaadittu nopeus saavutetaan, kun moottorille syötetään lähellä nimellistaajuutta olevaa jännitettä. (Pyrhönen, 2009)

Taajuusmuuttajaohjauksessa saatavan tarkan nopeuden lisäksi, saadaan moottorille pehmeä käynnistys rajoittamalla moottorin käynnistysvirtaa. Tämä säästää moottorin ja kuljettimen mekaanisia osia, lisäten niiden käyttöikää ja vähentäen huollon tarvetta merkittävästi, kun moottori ei nykyise käynnistyessään hihnaa liikkeelle. Taajuusmuuttajan käyttö heikentää moottorin hyötysuhdetta, lisätessään moottorissa esiintyviä yliaaltoja. Yliaaltojen amplitudiin ja taajuuteen vaikuttaa taajuusmuuttajan kytkentätaajuus. Kasvattamalla kytkentätaajuutta saadaan moottorille syötetyn virran muoto lähemmäksi siniaaltoa, jolloin yliaaltojen vaikutus moottorin häviöihin pienenee. Kytkentätaajuuden kasvattaminen lisää taajuusmuuttajan kytkentähäviöitä ja laskee sen hyötysuhdetta. (Korpinen, 2009), (Pyrhönen, 2006)

3.3 Kierukkavaihdemoottori

Kierukkavaihdemoottori toimii siten, että sähkömoottorin pyörittämä kierukkaruuvi pyörittää kierukkapyörää, jonka välityksellä vääntömomentti ja pyörimisnopeus saadaan ulostuloakselille. Kierukkavaihdemoottorissa vaihde kääntää voiman suuntaa 90 astetta ja sen rakenne mahdollistaa myös kaksipuolisen ulostuloakselin käyttämisen. Kuvassa 3.1 on esitetty kierukkavaihteen periaatteellinen rakenne.



Kuva 3.1 Kierukkavaihteen periaatteellinen rakenne.

Kuvassa 3.1 esitetyn kierukkavaihteen välityssuhde saadaan yhtälöllä (3.3), jossa arvo z_1 on kierukkaruuvien rinnakkaisten kierteiden määrä ja arvo z_2 kierukkapyörän hampaiden lukumäärä. Vaihteen huono puoli on kierukkaruuvien ja kierukkapyörän välille niiden pyöriessä syntyvä suuri kitka ja tästä johtuen siinä syntyy suuremmat lämpöhäviöt verrattaessa muihin vaihderakenteisiin. Tämä pienentää kierukkavaihteen hyötysuhdetta ja näin ollen myös vaihdemoottorikäytön hyötysuhdetta. Kierukkavaihteen etuina on sen halpa hinta, suuri välityssuhde ja yksinkertainen rakenne. Kierukkavaihde on myös mahdollista valmistaa siten, että se estää suuriakin kuormituksen aiheuttamia vääntömomentteja pyörittämästä moottoria. (Dudley, 1995), (Karhula, 2008)

3.4 Kartiohammasvaihdemoottori

Kartiohammasvaihdemoottorin kartiohammaspyörien akselit risteävät, jolloin voiman suunta kääntyy risteämiskulman verran. Vaihde toimii siten, että sähkömoottori pyörittää pienempää

ensiökartiohammaspyörää, jolla pyöritetään kuorma-akselissa kiinni olevaa suurempaa toisiokartiohammaspyörää. Kuvassa 3.2 on esitetty yksinkertainen kartiohammasvaihteen rakenne, jolla voiman suuntaa käännetään 90 astetta.

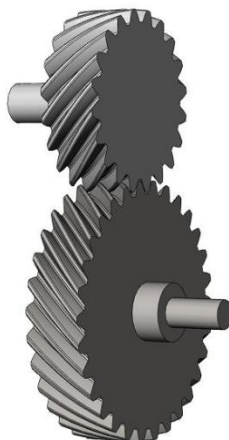


Kuva 3.2 Kartiohammasvaihteen rakenne.

Kartiohammasvaihteen hyötysuhteeseen vaikuttaa hammaspyörien hammastuksen muoto, joka määrää hammaskosketusten välisen pinta-alan. Hammaskosketusten välinen pinta-ala vaikuttaa vaihteessa syntyviin kitkahäviöihin. Kartiohammaspyörien valmistus on kallista, joka kasvattaa vaihteen hankintahintaan. (Dudley, 1995), (Karhula, 2008)

3.5 Lieriöhammasvaihde moottori

Lieriöhammasvaihde moottorissa vääntömomenttia ja nopeutta muunnetaan hammaspyörillä, jotka sijaitsevat rinnakkaisilla akseleilla. Hammasvaihteessa on yleensä useampi hammaspyöräpari, joilla välityssuhdetta voidaan kasvattaa suuremmaksi. Tällöin lähtöakselilta saatava vääntömomentti ja nopeus muodostuvat portaittain hammaspyöräparien välityssuhteiden tulona. Kuvassa 3.3 on esitetty lieriöhammaspyöräpari.

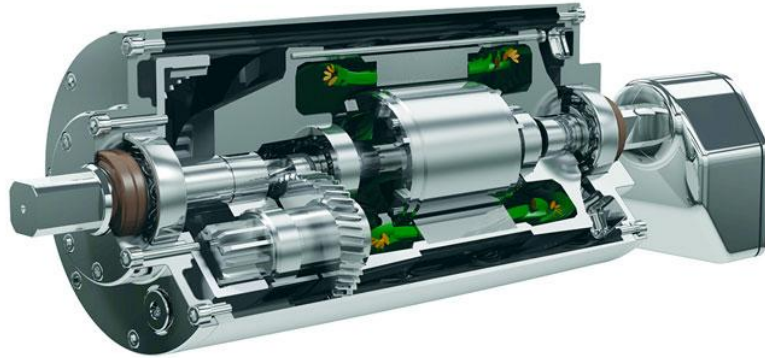


Kuva 3.3 Lieriöhammaspyöräparin rakenne. Kuvassa vinohampaiset hammaspyörät, joita käytetään äänettömän käynnin saavuttamiseksi.

Useamman hammaspyöräparin käyttämisen etuna on hammastukselle kohdistuvan rasituksen pieneneminen. Vastaavasti usean hammaspyöräparin rakenne lisää mekaanisia häviötä ja laskee siten hyötysuhdetta. Lieriöhammasvaihteen hyötysuhteeseen vaikuttaa hammastuksen muoto. Hammastuksen ollessa suorahampainen, vaihderakenteilla saavutetaan suurin mahdollinen hyötysuhde, koska tällöin hammaskosketusten välinen pinta-ala on mahdollisimman pieni. (Karhula, 2008)

3.6 Rumpumoottori

Rumpumoottori on sylinterin muotoinen kuljettimiin suunniteltu moottorityyppi, jossa moottori ja vaihde ovat sylinterin sisällä. Rumpumoottorissa voima välitetään kuljetinhihnalle pyörivän ulkokehän välityksellä. Moottorirakenteen etuna on voiman siirtäminen suoraan kuljetinhihnaan, jolloin mekaanisten osien määrä vähenee kuljettimen voimansiirrossa. Rakenteen ollessa umpinainen, moottori ja vaihde on suojattu ulkoiselta liialta ja pölyltä. Rumpumoottorin haittapuolena on lämmön siirtyminen suoraan kuljettimen hihnaan sylinteripinnan välityksellä. Kuvassa 3.4 on esitetty erään moottorivalmistajan rumpumoottorin rakenne.

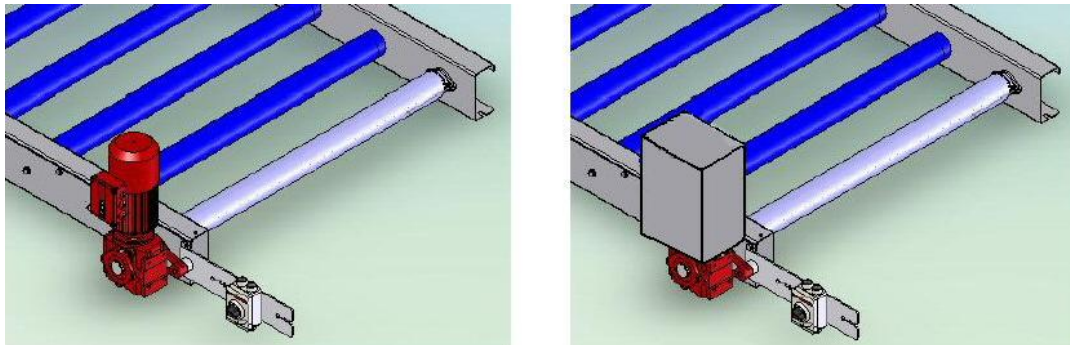


Kuva 3.4 Rumpumootorin leikkauskuva. (Lähde: <http://www.vandergraaf.com/products.php>. Viitattu 18.01.2010)

Kuvan 3.4 rumpumoottori on oikosulkumoottori, jossa on kaksiportainen lieriövaihde. Kuvasta nähdään, kuinka vaihteen ensimmäinen porras on hammaspyöräpari ja toinen porras muodostuu hammaspyörästä ja -kehästä.

3.7 Kuljetinkäytön hygieenisuus

Elintarviketeollisuudessa hygieenisuus otetaan huomioon myös kuljetinkäyttöä valittaessa. Varsinkin itsetuuletteen moottori jäähdytysriivoilla on hygieenisyyden kannalta ongelmallinen, koska tuulettimeen ja jäähdytysriivoihin voi kertyä likaa elintarvikkeista. Tästä johtuen tämän tyyppisille moottorirakenteille asennetaan niitä suojaava kotelointi. Koteloinnin haittapuolena on asennuksesta muodostuvat lisäkustannukset, tilantarve sekä moottorin lämmönsiirtymisen ongelmat. Kuvassa 3.5 on esitetty rullakuljetin, jonka kulmavaihdemoottori on koteloitu.



Kuva 3.5 Rullakuljettimen moottorin kotelointi.

Kuvassa 3.5 esitetty kotelointiratkaisu voidaan välttää valitsemalla kuljetinkäytöksi hygieenisiin tiloihin suunniteltu moottori, jonka rakenne on tyypillisesti mahdollisimman sileäpintainen ja suljettu. Tällaisella rakenteella parannetaan hygieenisyyttä minimoimalla mahdollisten elintarvikejäämien tarttuminen moottorin pintaan. Hygieenisille moottorirakenteille on myös ominaista se, että moottorin jäähdytyksessä ei käytetä tuuletinta. Nämä erikoisrakenteet heikentävät moottorin lämmönsiirron tehokkuutta, koska pakotettua konvektiota ei ole ja moottorin jäähdytyspinta-ala on pienempi. Lisäksi lämmönsiirtomuotojen tehokkuus riippuu vahvasti myös ympäristön lämpötilasta, jolloin kylmätila on kaikkien moottorien lämmönsiirron kannalta suotuisa käyttöympäristö. Erikoisrakenteen omaavilla moottoreilla on tyypillisesti korkea hinta verrattuna perinteisiin ratkaisuihin. (Nerg, 2009)

4 MITTAUSJÄRJESTELYT

4.1 Hyötysuhteen mittausmenetelmät

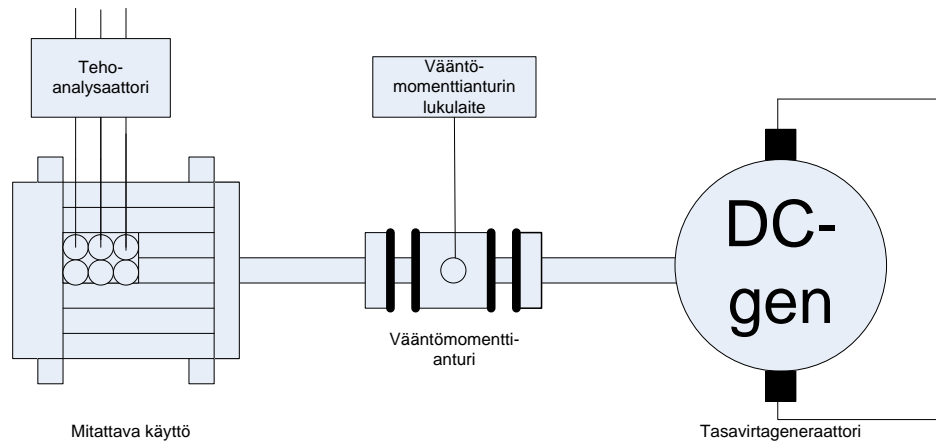
Moottorien hyötysuhteen määrittämiseen käytettävät mittausmenetelmät voidaan jakaa kahteen ryhmään: epäsuoriin ja suoriin mittausmenetelmiin. Suorassa mittausmenetelmässä hyötysuhteen määrittäminen perustuu moottorin vääntömomentin mittaukseen. Epäsuorassa mittausmenetelmässä hyötysuhteen määrittämiseksi ei mitata vääntömomenttia, vaan moottorin hyötysuhde pyritään määrittämään muilla menetelmillä. Tällainen menetelmä on esimerkiksi kalorimetrinen menetelmä, jossa moottorin hyötysuhteen määrittämiseksi mitataan siinä syntyvää häviölämpöä. (Malinen, 2005)

Moottorien teholuokka vaikuttaa moottorien hyötysuhteeseen. Pienen teholuokan moottoreilla on pienempi hyötysuhde, kuin suuremman teholuokan koneilla. Tämä johtuu siitä, että staattorin virtalämpöhäviöiden osuus kokonaishäviöistä on suurempi pienemmän teholuokan moottoreilla (Kuusinen, 2004). Suoraa mittausmenetelmää sovelletaan varsinkin pienen teholuokan koneille hyötysuhteen määrittämiseksi. Tutkittavat moottorit ovat teholuokaltaan pieniä ja

niissä on mekaaniset vaihteet, joiden häviöt pienentävät akselilta saatavaa mekaanista tehoa ja näin ollen myös hyötysuhdetta.

4.2 Hyötysuhteen mittaaminen

Hyötysuhteen määrittämiseksi kuljetinkäyttöille suoritetaan kuormituskokeita vaihtelevalla kuormalla. Kuormaksi asetetaan sopivan vastavääntömomentin tuottava DC-generaattori ja testattavaa käyttöä syötetään suoraan sähköverkosta. Hyötysuhteen määrittämiseen käytetään Norma-tehoanalysaattoria ja Dataflex-vääntömomenttianturia. Tehoanalysaattorilla mitataan moottorin sähköinen ottoteho ja vääntömomenttianturilla mekaaninen lähtöteho kuorma-akselilta. Kuvassa 4.1 on esitetty mittausjärjestelyjen kaaviokuva.



Kuva .4.1 Mittausjärjestelyjen kaaviokuva.

Tehoanalysaattorilla mitattava sinisyöttöisen kuljetinkäytön sähköinen ottoteho P_s voidaan laskea yhtälöllä

$$P_s = \sqrt{3}UI \cos \varphi, \quad (4.1)$$

jossa U on pääjännitteen tehollisarvo, I virran tehollisarvo ja $\cos \varphi$ tehokerroin. Kuljetinkäytöltä saatava mekaaninen lähtöteho P_m voidaan laskea yhtälöllä

$$P_m = \Omega \cdot T, \quad (4.2)$$

jossa Ω on kuorma-akselin kulmanopeus ja T vääntömomentti. Vääntömomenttianturi ilmoittaa akselin pyörimisnopeuden kierroksina minuutissa ja kulmanopeus voidaan laskea tästä arvosta yhtälöllä

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot n_{\text{rpm}}}{60}, \quad (4.3)$$

jossa n_{rpm} kierrosnopeus kierroksina minuutissa. Hyötysuhde η kuljetinkäytölle määritetään mekaanisen lähtötehon ja sähköisen ottotehon osamääränä

$$\eta = \frac{P_m}{P_s}. \quad (4.4)$$

Kuormituskokeessa tutkittavaa kuljetinkäyttöä kuormitetaan useissa eri toimintapisteissä. Jokaisessa kuormituspisteessä tulo- ja lähtöteho mitataan ja niiden pohjalta piirretään hyötysuhteen kuvaaja lähtötehon funktiona. Mittaukset suoritetaan tutkittavalle kuljetinkäytölle useasti mittausvirheen minimoimiseksi.

Poikkeuksena kuvassa 4.1 esitettyyn mittausjärjestelyyn on se, että yksi tutkittavista moottoreista on taajuusmuuttajasyöttöinen. Tässä tapauksessa sähköinen ottoteho mitataan tehoanalyysaattorilla taajuusmuuttajan ja moottorin väliltä, jolloin mittaustuloksissa ei oteta huomioon taajuusmuuttajan häviöitä. Tällöin moottorille syötetty virta ei ole sinimuotoista ja tämä täytyy huomioida sähköisen tehon yhtälössä

$$P_s = \sqrt{3}UI\Gamma \cos \varphi, \quad (4.5)$$

jossa Γ kuvaa virran harmonissisältöä ja φ perusaallon vaihesiirtokulma. (Korpinen, 2009)

Rumpumoottorin kuormituskokeessa voima siirretään hammashihnan välityksellä kuormakselille, jonka mekaaninen lähtöteho mitataan vääntömomenttianturilla. Kuormitettaessa rumpumoottoria hihnan välityksellä, tulee mittaustuloksissa ottaa huomioon hammashihnassa tapahtuvat häviöt, jotka heikentävät hyötysuhdetta.

Moottoreiden kuormituskokeet suoritetaan laboratorio-olosuhteissa, jossa lämpötila on yli 20 °C. Lopullisessa käyttökohteessa moottorit sijoitetaan kylmätilaan, jolloin lämpötilan muutos vaikuttaa moottorin virtalämpöhäviöihin käännesistanssin pienentyessä. Virtalämpöhäviöt vähenevät kasvattaen moottorin hyötysuhdetta. Vastaavasti lämpötilan aleneminen heikentää vaihteen voiteluöljyn toimintaa. Tutkittavat vaihteet ovat fyysiseltä kooltaan pieniä, joten voidaan olettaa, että niissä syntyvä kitka lämmittää öljyä ja sen voiteluominaisuudet kylmätilassa vastaavat kohtalaisesti laboratorio-olosuhteiden tilannetta. (Karhula, 2008), (Malinen, 2005)

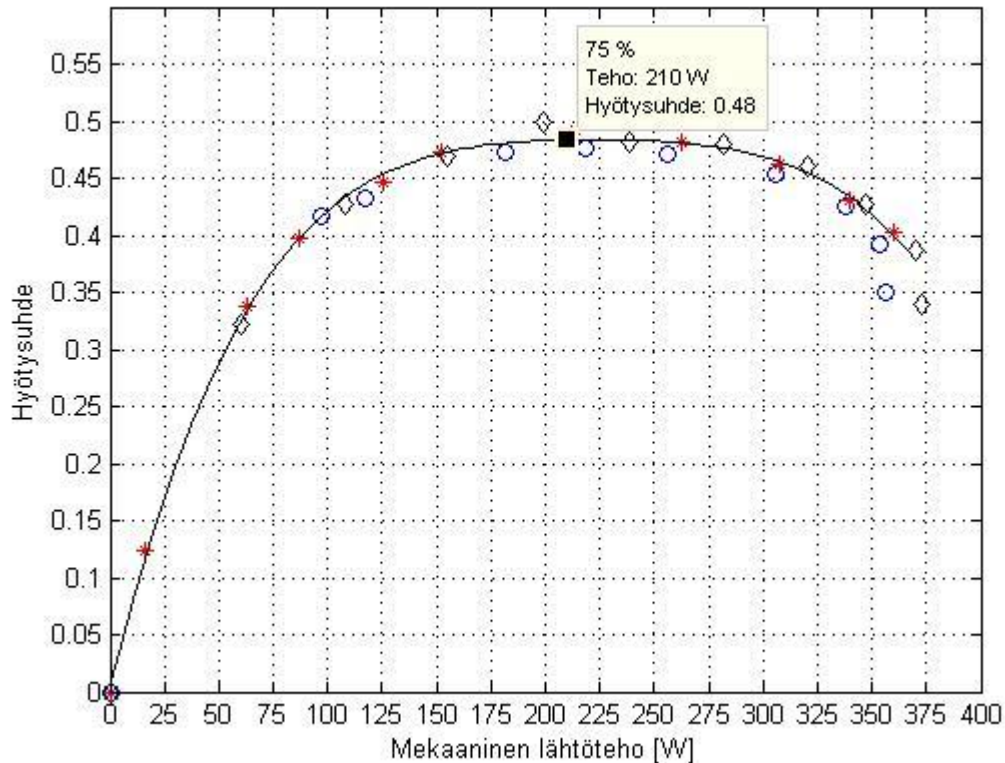
5 MITTAUSTULOKSET

Moottoreiden hyötysuhteet lasketaan mittausdatasta kappaleessa 4 esitettyjen yhtälöiden avulla. Laskennalliset hyötysuhteen arvot esitetään kuvaajissa mekaanisen lähtötehon funktiona. Tutkituissa oikosulkumoottorikäytöissä on kuvaajiin merkitty laskennallinen 75 % kuorma, jossa oikosulkumoottori saavuttaa parhaan hyötysuhteensa (Pyrhönen, 2006). Kuvaajista on arvioitu jokaiselle vaihdemoottorikäytölle tehoalue, jossa hyötysuhde on parhaimmillaan. Tehoalueen yläraja on korkeintaan nimelliskuorma, sillä ylikuormitustilanteessa moottorin lämpötila nousee jatkuvalla käytöllä varsin nopeasti.

5.1 Kierukkavaihdemoottorin kuormituskoe

Tutkittava kierukkavaihdemoottori on nimellisteholtaan 0,37 kW oikosulkumoottori, jossa on välityssuhteeltaan 18,24 oleva kierukkavaihde. Kierukkavaihdemoottorille suoritettiin kolme erillistä kuormituskoeita ja kokeiden tuloksien ollessa lähellä toisiaan, ei kokeen toistamista useampaan kertaan koettu tarpeelliseksi. Kierukkavaihteen hyötysuhteen lasketut arvot on esitetty mekaanisen lähtötehon funktiona kuvassa 5.1. Kuvassa on esitetty eri kuormituskokeiden

tulokset eri symbolein ja yhden kuormituskokeen mittaustuloksista on muodostettu käyrän sovitukset.



Kuva 5.1 Kierukkavaihdemoottorin hyötysuhteen lasketut arvot mekaanisen lähtötehon funktiona.

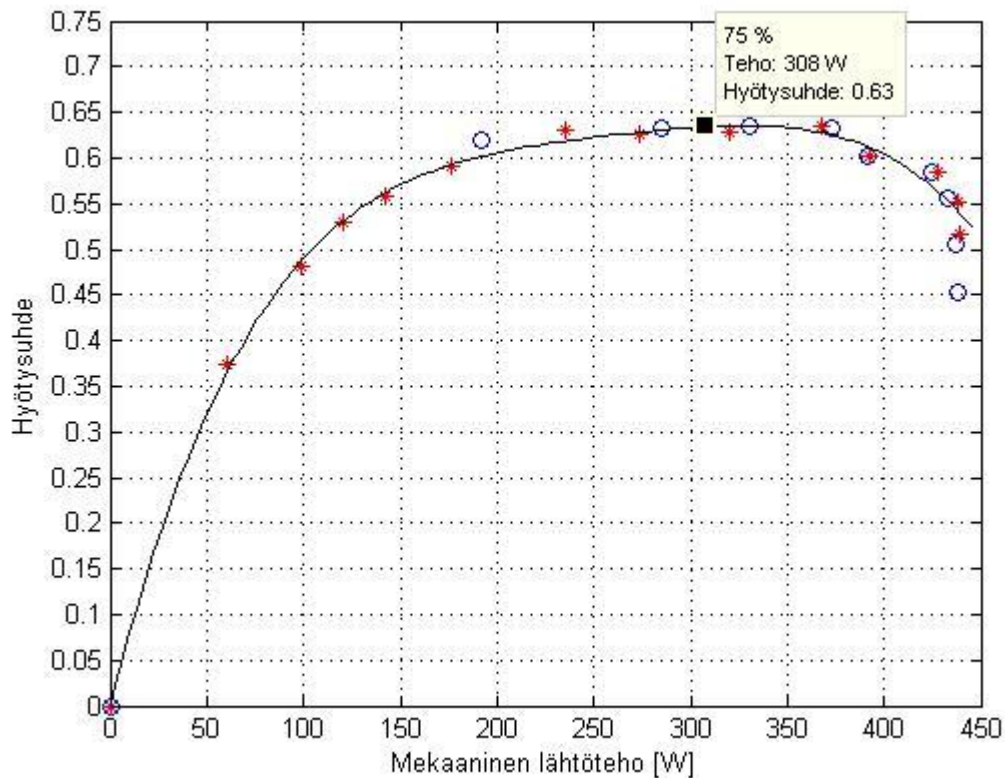
Kuvasta 5.1 nähdään, että kierukkavaihdemoottorin hyötysuhde on varsin alhainen jokaisessa mittauspisteessä. Moottorin ollessa 75 %:n kuormituksessa hyötysuhteen arvoksi saadaan noin 0,48. Hyötysuhde on korkeimmillaan, kun mekaaninen lähtöteho on välillä 100–290 W.

5.2 Lieriövaihdemoottoreiden kuormituskokeet

Tutkittavia lieriöhammasvaihdemoottoreita on kaksi, jossa toisessa on nimellisteholtaan samansuuruinen oikosulkumoottori kuin kierukkavaihdemoottorissa. Oikosulkumoottorin vaihteen välityssuhde on 61,3 ja se on rakenteeltaan kaksiportainen. Toinen lieriövaihdemoottori on kestopagneettisynkronimoottori, jossa on kolmiportainen välityssuhteeltaan 37,24 oleva vaihde. Tämän moottorin ohjauksessa käytetään moottorinvalmistajan taajuusmuuttajaa. Li-

säksi moottori on suunniteltu erityisesti kuljetinkäyttöön ja se on koteloitu yhdessä vaihteen kanssa umpinaiseksi.

Verkkosyötetylle 0,37 kW:n lieriövaihdemoottorille suoritettiin kaksi kuormituskoetta. Kuvassa 5.2 esitetään lieriövaihdemoottorin lasketut hyötysuhteen arvot mekaanisen lähtötehon funktiona. Kuvaajassa on toisen mittausdatan pohjalta muodostettu käyrän sovitus.

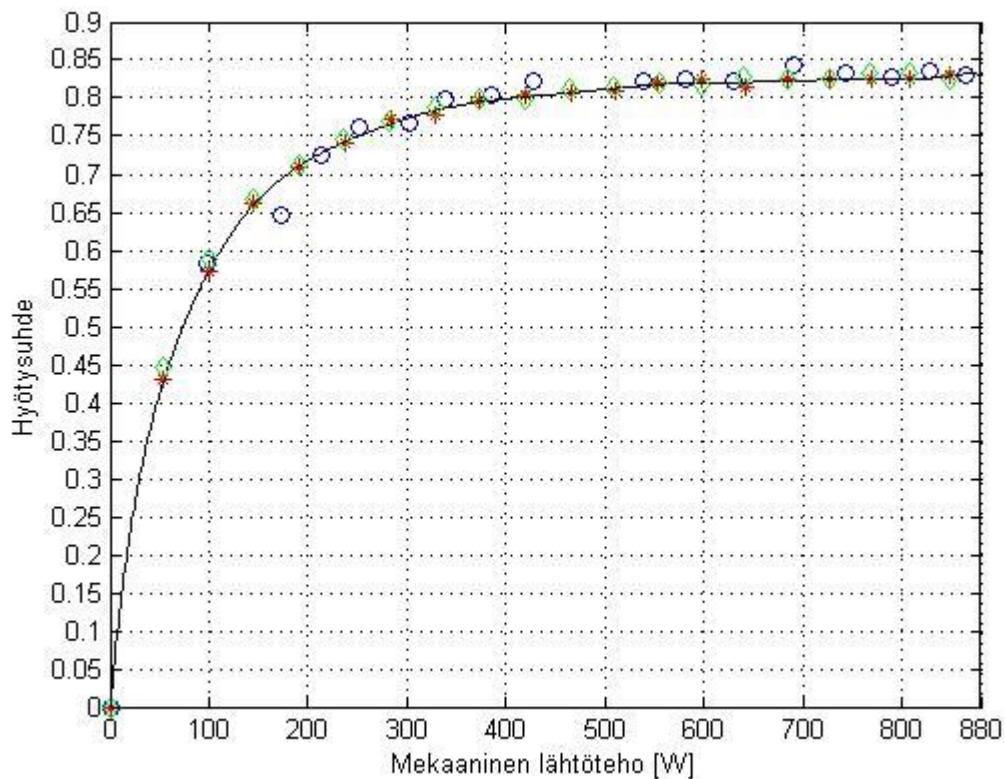


Kuva 5.2 Lieriövaihdemoottorin hyötysuhteen lasketut arvot mekaanisen lähtötehon funktiona.

Kuvasta 5.2 nähdään, että lieriövaihdemoottorin hyötysuhde on edellä esitettyä kierukkavaihdemoottoria parempi ja 75 %:n kuormalla hyötysuhteen arvoksi saadaan noin 0,63. Kuvaajan perusteella lieriövaihdemoottorin energiatehokkain käyttöalue on välillä 150–360 W. Koska lieriövaihdemoottoreilla ja edellä esitettyllä kierukkavaihdemoottorilla on saman teholuokan ja valmistajan oikosulkumoottori, voidaan moottoreiden hyötysuhteita pitää lähes samansuuruisina, jolloin ero käyttöjen kokonaishyötysuhteissa johtuu vaihteiden erisuuruisista mekaanis-

ta häviöistä. Lieriövaihteessa syntyy vähemmän mekaanisia häviöitä, ja näin ollen se on energiatehokkaampi ratkaisu verrattaessa kierukkavaihteeseen.

Taajuusmuuttajaohjatuslle lieriövaihdemoottorille suoritettiin kolme kuormituskoetta nimellisuopeudella 54 kierrosta minuutissa ja yksi kuormituskoe nopeuksilla 27 ja 10 kierrosta minuutissa. Kuvassa 5.3 esitetään nimellisuopeudella suoritettujen kuormituskokeiden mittaustuloksista lasketut hyötysuhteet mekaanisen lähtötehon funktiona.

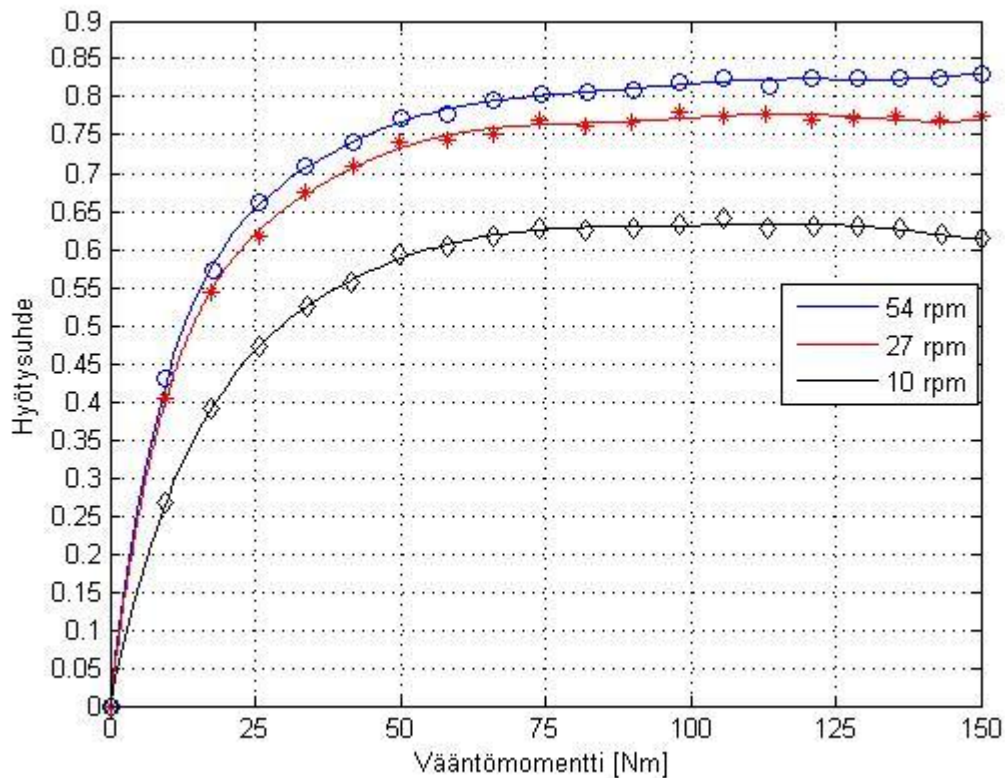


Kuva 5.3 Taajuusmuuttajaohjatuslieriövaihdemoottorin hyötysuhde mekaanisen lähtötehon funktiona nimellisuopeudella.

Kuvasta 5.3 nähdään, että taajuusmuuttajaohjatuslieriövaihdemoottorin kuormituksen kasvaessa hyötysuhde saavuttaa nopeasti parhaat arvonsa ja korkeimmillaan hyötysuhde on noin 0,83. Kuvaajasta nähdään energiatehokkaan käyttöalueen olevan välillä 150–850 W. Hyötysuhteen kuvaaja poikkeaa edellä esitetyistä siten, että hyötysuhde ei laske lopussa kuormituksen kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että kuormituskokeiden aikana kuormituksen kasvaessa

suureksi taajuusmuuttaja pysäytti moottorin. Kuvasta kuitenkin nähdään selkeä alue, jossa hyötysuhde on korkeimmillaan.

Kuormituskokeita suoritettiin eri nopeuksilla, jolloin nopeussäädön vaikutusta hyötysuhteen voidaan tarkastella. Kuvassa 5.4 esitetään eri nopeuksilla suoritettujen kuormituskokeiden mittaustuloksista lasketut hyötysuhteen arvot vääntömomentin funktiona.



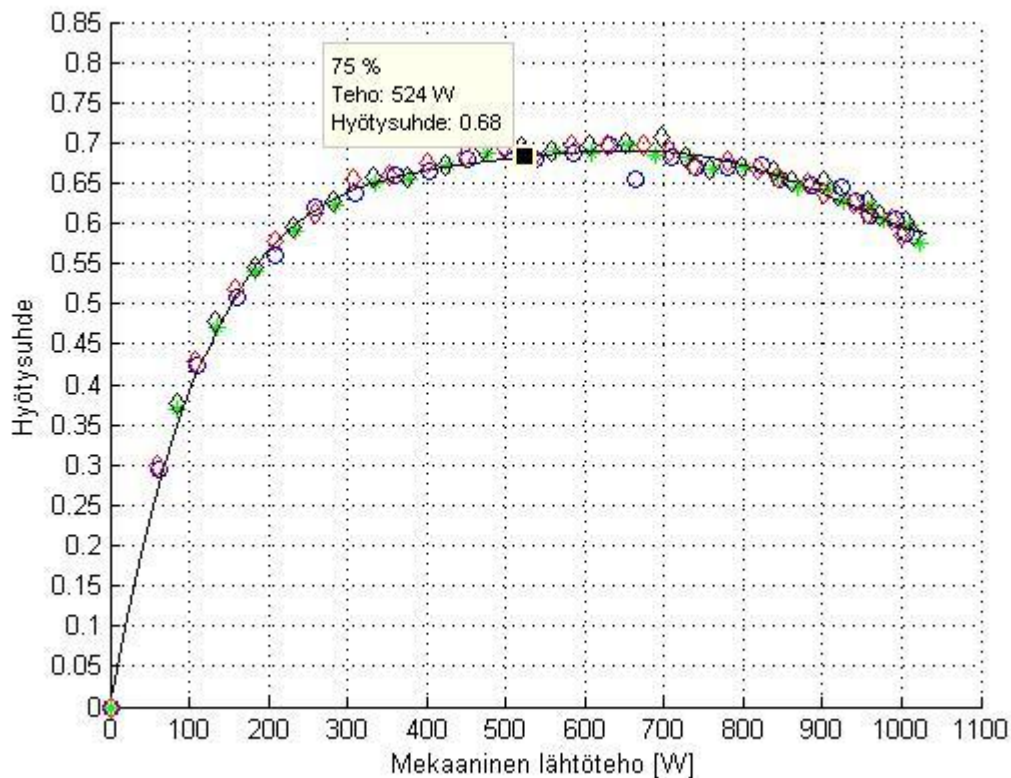
Kuva 5.4 Hyötysuhteen kuvaajat vääntömomentin funktiona eri pyörimisnopeuksilla.

Kuvan 5.4 ylin käyrä on nimellisnopeudella mitattujen arvojen pohjalta laskettu hyötysuhde, keskimäinen käyrä nopeudella 27 ja alin käyrä nopeudella 10 kierrosta minuutissa. Kuvasta nähdään hyötysuhteen olevan alhaisempi pienemmillä kierrosnopeuksilla, ja taajuusmuuttaja-ohjatulla moottorilla paras hyötysuhde saadaan nimellisnopeudella. Hyötysuhde ei kuitenkaan merkittävästi laske pyörimisnopeuden puolittuessa nimellisnopeudesta. Huomattava hyötysuhteen pieneneminen tapahtuu, kun nopeus on laskenut viidesosaan.

5.3 Kartiovaihdemoottoreiden kuormituskokeet

Tutkittavana ovat kahden eri valmistajan kartiohammasvaihdemoottorit. Moottorit ovat 0,75 kW ja 0,25 kW oikosulkumoottoreita. Suurempitehoisen moottorin vaihteen välityssuhde on 24,99 ja pienempitehoisen 47,78.

Teholuokan 0,75 kW:n kartiovaihdemoottorille suoritettiin neljä kuormituskokeetta. Kuvassa 5.5 esitetään kuormituskokeiden mittausdatasta lasketut hyötysuhteen arvot mekaanisen lähtötehon funktiona. Kuvaajassa on myös esitetty yhden mittausdatan pohjalta laskettu käyrän sovitus.

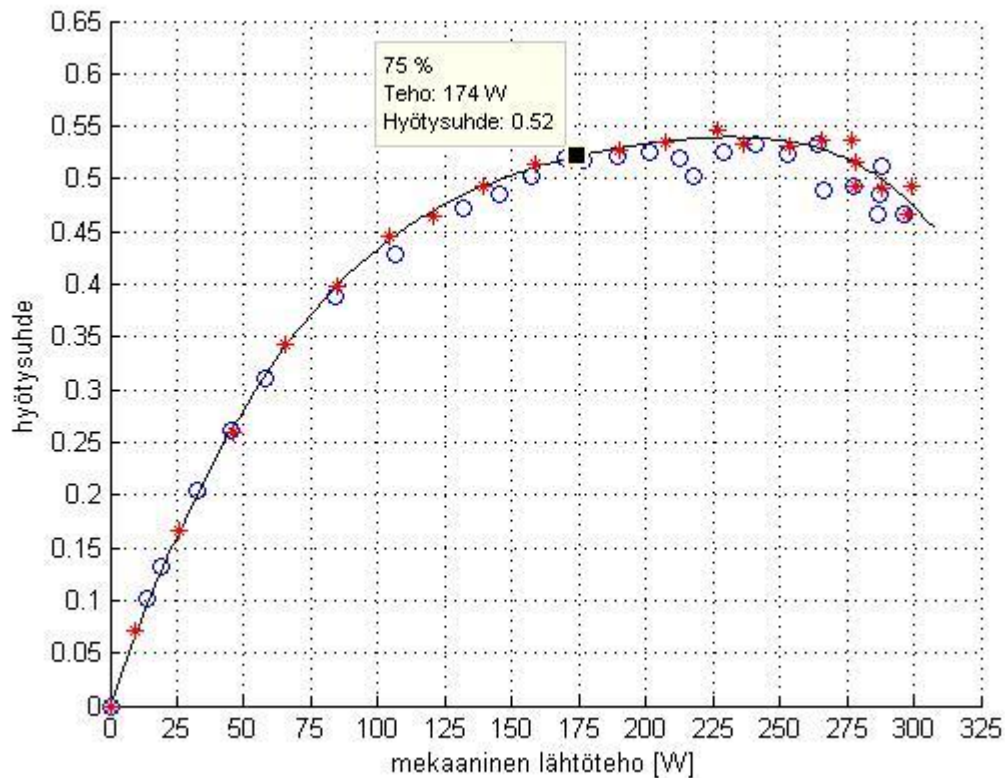


Kuva 5.5 Teholuokan 0,75 kW kartiohammasvaihdemoottorin hyötysuhteen lasketut arvot mekaanisen lähtötehon funktiona.

Kuvasta 5.5 nähdään, että kartiohammasvaihdemoottorin hyötysuhde on korkeampi kuin edellä esitettyjen lieriö- ja kierukkavaihdemoottoreiden hyötysuhteet. Kuitenkin oikosulkumoottorin teholuokka on suurempi, joten moottorin hyötysuhde on korkeampi verrattuna pienemmän

teholuokan moottoriin. Hyötysuhteen arvoksi moottorin ollessa 75 %:n kuormituksessa saadaan noin 0,68. Kuvaajan perusteella energiatehokkain tehoalue on välillä 250–700 W.

Teholuokan 0,25 kW:n kartiohammasvaihde moottorille suoritettiin kaksi kuormituskoetta. Kuvassa 5.6 on esitetty lasketut hyötysuhteen arvot mekaaniset lähtötehon funktiona ja yhden mittausdatan pohjalta tehty käyrän sovitus.

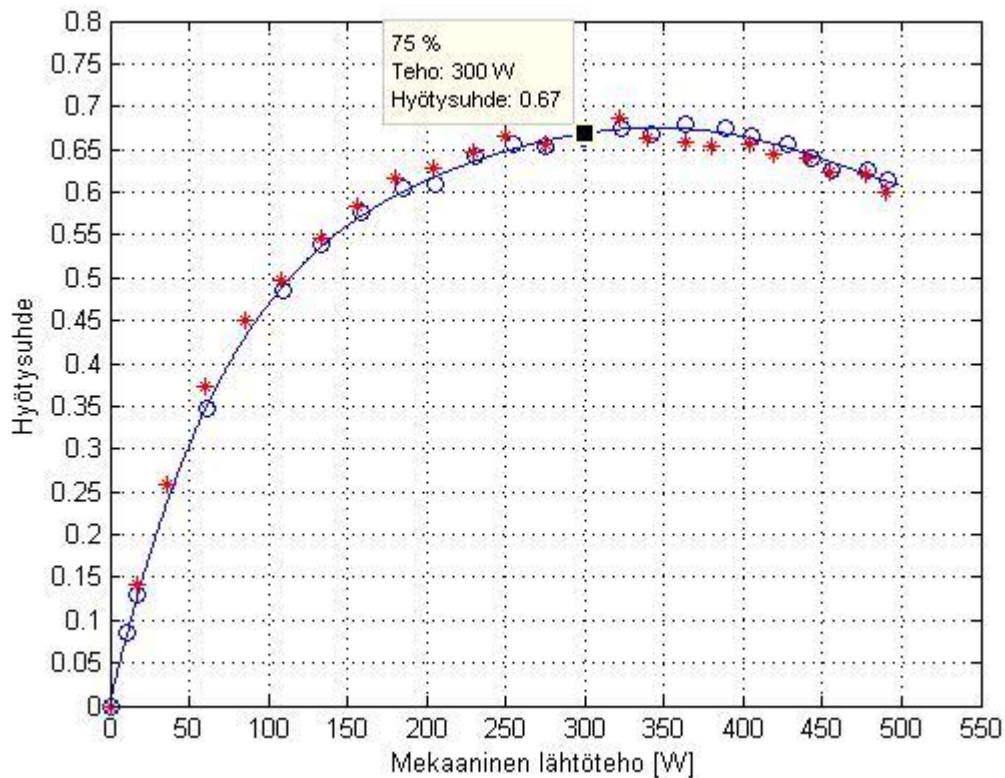


Kuva 5.6 Teholuokan 0,25 kW kartiohammasvaihde moottorin hyötysuhteen lasketut arvot mekaanisen lähtötehon funktiona.

Kuvasta 5.6 nähdään, että teholuokan 0,25 kW:n kartiohammasvaihde moottorin hyötysuhde on parhaimmillaan tehoalueella 125–235 W. Moottorin ollessa 75 %:n kuormituksessa käytön hyötysuhde on noin 0,52. Verrattaessa kartiovaihde moottoria aikaisemmin esitettyyn 0,37 kW:n kierukkavaihde moottoriin, huomataan sen hyötysuhteen olevan parempi. Ero pienemmän teholuokan moottorin hyväksi johtuu suurimmaksi osaksi vaihteen rakenteesta.

5.4 Rumpumoottorin kuormituskoe

Tutkittava rumpumoottori on teholuokaltaan 0,37 kW oikosulkumoottori, jossa on välityssuhteeltaan 25,0 oleva kolmiportainen lieriöhammasvaihte. Rumpumoottorille suoritettiin kaksi kuormituskoeita, joissa rumpumoottori oli kytkettynä kuorma-akseliin hammashihnavetoisena. Tällöin mittaustuloksissa pitää ottaa huomioon myös hihnan voimansiirron hyötysuhde, joka on hammashihnoilla korkea. Kuvassa 5.7 on esitetty rumpumoottorin hyötysuhde mekaanisen lähtötehon funktiona. Hihnan häviöiden osuus on poistettu arvioimalla hihnan hyötysuhteeksi 0,95.



Kuva 5.7 Rumpumoottorin hyötysuhde mekaanisen lähtötehon funktiona.

Kuvasta 5.7 nähdään, että rumpumoottorin hyötysuhde on parhaimmillaan tehoalueella 200–355 W ja moottorin ollessa 75 %:n kuormituksessa hyötysuhde on noin 0,67. Hyötysuhteen arvot ovat lähes samat kuin kuvassa 5.2 esitetyllä saman teholuokan lieriövaihdemoottorilla. Tuloksista nähdään, että saman teholuokan oikosulkumoottori samalla vaihderakenteella, ei tuo rumpumoottorille selkeää etua hyötysuhteen osalta.

5.5 Vaihteiden vertailu

Vaihdemoottorin kokonaishyötysuhde on moottorin ja vaihteen hyötysuhteiden tulo. Tarkasteltaessa ainoastaan vaihteiden hyötysuhteita, voidaan moottorin hyötysuhteen osuus kokonaishyötysuhteesta arvioida laskemalla moottorille sen nimellishyötysuhde. Nimellishyötysuhde voidaan laskea moottorin nimellisarvojen perusteella yhtälöllä

$$\eta_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi_n}, \quad (5.1)$$

jossa P_n on nimellisteho, U_n nimellisjännite, I_n nimellisvirta ja $\cos \varphi_n$ nimellistehokerroin. Lasketaan edellä esitetyille oikosulkumoottoreille nimellishyötysuhteet, joiden pohjalta voidaan arvioida vaihteiden hyötysuhdetta. Taulukossa 5.1 on kilpiarvojen ja teholuokkaa vastaavien tyyppisten oikosulkumoottoreiden perusteella arvioidut nimellishyötysuhteet, mitattu kokonaishyötysuhde ja näiden arvojen avulla arvioitu vaihteen hyötysuhde.

Taulukko 5.1 Tutkittujen moottoreiden mitattu kokonaishyötysuhde, laskettu nimellishyötysuhde ja näiden arvojen avulla arvioitu vaihteen hyötysuhde.

Vaihdemoottorin tyyppi	Mitattu kokonaishyötysuhde	Oikosulkumoottorin nimellishyötysuhde	Arvioitu vaihteen hyötysuhde
0,37 kW kierukkavaihdemoottori	0,48	0,63	0,76
0,37 kW lieriövaihdemoottori	0,63	0,65	0,97
0,25 kW kartiovaihdemoottori	0,52	0,58	0,89
0,75 kW kartiovaihdemoottori	0,68	0,73	0,93
0,37 kW rumpumoottori	0,67	0,69	0,97

Taulukossa esitetyt vaihteiden hyötysuhteet ovat arvioita, mutta osoittavat kuitenkin vaihteiden väliset erot energiatehokkuuden osalta. Lieriöhammasvaihde on selkeästi tehokkaampi kuin muut tutkitut vaihderakenteet, mikä vastaa kirjallisuudessa esitettyjä hyötysuhteiden arvoja (Dudley, 1995). Tarvittaessa vaihdetta 90 asteen voimansiirtoon, voidaan tulosten pohjalta sanoa, että kartiohammasvaihdemoottori on energiatehokkaampi verrattuna kierukkavaihdemoottoriin. Taulukosta nähdään myös kartiohammasvaihteiden tuloksien avulla, että ero kokonaishyötysuhteessa samanlaisella vaihderakenteella, johtuu moottorin hyötysuhteesta. Tämän perusteella voidaan sanoa myös, että vaihderakenteen fyysinen koko ei vaikuta suuresti sen hyötysuhteeseen.

6 TALOUDELLISET VAIKUTUKSET

Tutkittavien kuljetinkäyttöjen elinkaarikustannuksia arvioitaessa otetaan huomioon vain hankinta- ja energiakustannukset. Kylmätilan energiakustannuksissa otetaan huomioon kuljettimien sähkönkulutus ja niissä muodostuvan lämmön poistaminen jäähdytyskoneistolla. Jäähdytyskoneiston tehon tarpeeseen vaikuttaa kuljetinkäyttöjen sähkönkulutus, koska käyttöjen ottama energia muuttuu lämmöksi kuljettimen eri osissa. Valitsemalla kylmätilaan hyvän hyötysuhteen kuljetinkäyttö pienennetään tilaan tuotavan energian määrää ja samalla jäähdytystehon tarvetta.

Hankintakustannuksiltaan hyvän hyötysuhteen moottorit ovat kalliimpia verrattaessa huomman hyötysuhteen moottoreihin. Tarkasteltaessa kokonaiskustannuksia käytön elinkaaren ajalta, hankintahinnan osuus jää pieneksi ja energiakustannuksista muodostuu suurin osa kokonaiskustannuksista. Energiakustannukset kasvavat sähkönhinnan noustessa, mutta kasvattavat siten myös kokonaiskustannuseroa paremman hyötysuhteen kuljetinkäytön hyväksi. (Kuusinen, 2004)

Kuljetinkäyttöjen kustannusarvioissa on vuosittaiseksi käyttöajaksi oletettu 6000 tuntia, kylmätilassa olevien kuljetinkäyttöjen määräksi kymmenen ja kokonaistarkastelu ajaksi kymmenen vuotta. Kymmenen kuljetinkäytön vuosittainen energiankulutus voidaan laskea yhtälöllä

$$E = P_s \cdot t \cdot x, \quad (6.1)$$

jossa P_s yhden kuljetinkäytön ottoteho, t vuosittainen käyttöaika tunteina ja x on käyttöjen määrä. Arviolaskuissa käytetään teollisuuden sähkön hintana 0,08 €/kWh ja sen vuosittaisena kasvuna 5 %. Näiden hinta-arvioiden perustana on käytetty aikaisempien vuosien tilastoja teollisuuden sähkön hinnalle (EMV, 2009). Nyt kuljetinkäyttöille voidaan laskea vuosittaiset energiakustannukset yhtälöllä

$$K = E \cdot 1,05^a \cdot 0,08 \text{ €/kWh}, \quad (6.2)$$

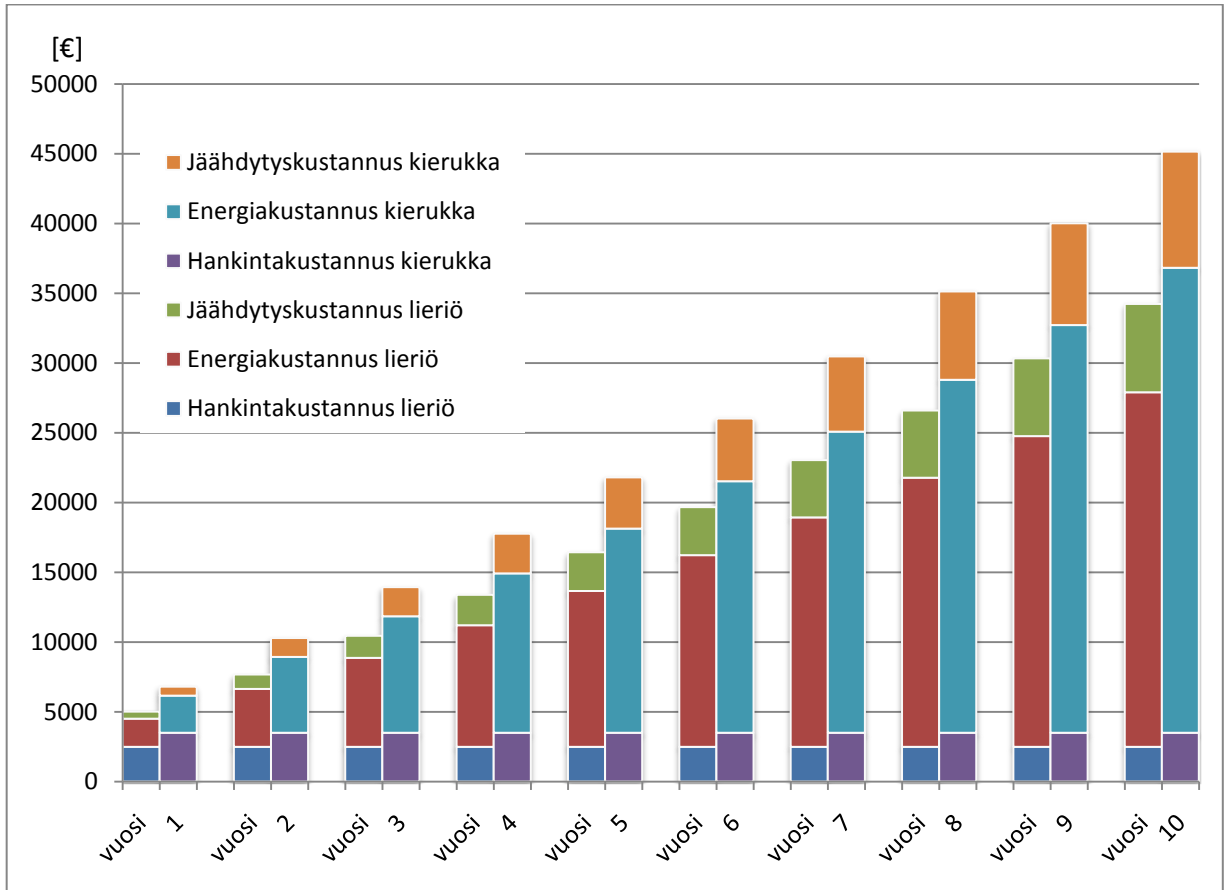
jossa a on tarkasteluvuosien lukumäärä.

Edellä esitettyjä alkuarvoja käytetään vertailtaessa saman teholuokan moottoreita keskenään. Mittaustulosten pohjalta saman teholuokan moottoreille valitaan vertailupiste, jossa molemmat vertailtavat moottorit ovat optimaalisella käyttöalueella. Käyttötunnit ovat valittu vastaamaan tilannetta, jossa kuljetin on toiminnassa noin 16 tuntia vuorokaudessa vastaten kaksivuorotyönä toimivan teollisuuden toimintaa.

6.1 Kustannusvertailu teholuokan 0,37 kW moottoreille

Vertailtaessa teholuokan 0,37 kW kierukka- ja lieriövaihdemoottoreita, tarkastellaan tilannetta, jossa kierukkavaihteen keskimääräinen ottoteho on 550 W. Tällöin kierukkavaihdemoottorilla saadaan tuotetuksi noin 265 W mekaaninen lähtöteho. Mittaustulosten perusteella lieriövaihdemoottori käyttää 130 W vähemmän ottotehoa muodostaakseen saman lähtötehon kuljettimelle. Laskettaessa kustannuksia yhtälöillä (6.1), (6.2) ja edellä esitettyjen oletusarvojen perusteella, voidaan muodostaa moottoreille kertyvät vuosittaiset kustannukset. Kuvassa 6.1 esitetään arvioidut kokonaiskustannukset, joissa otetaan huomioon hankintahinta ja sähkönkulutus käyttövuosien mukaan. Kymmenen lieriövaihdemoottorin hankintahinta on noin 2500 €

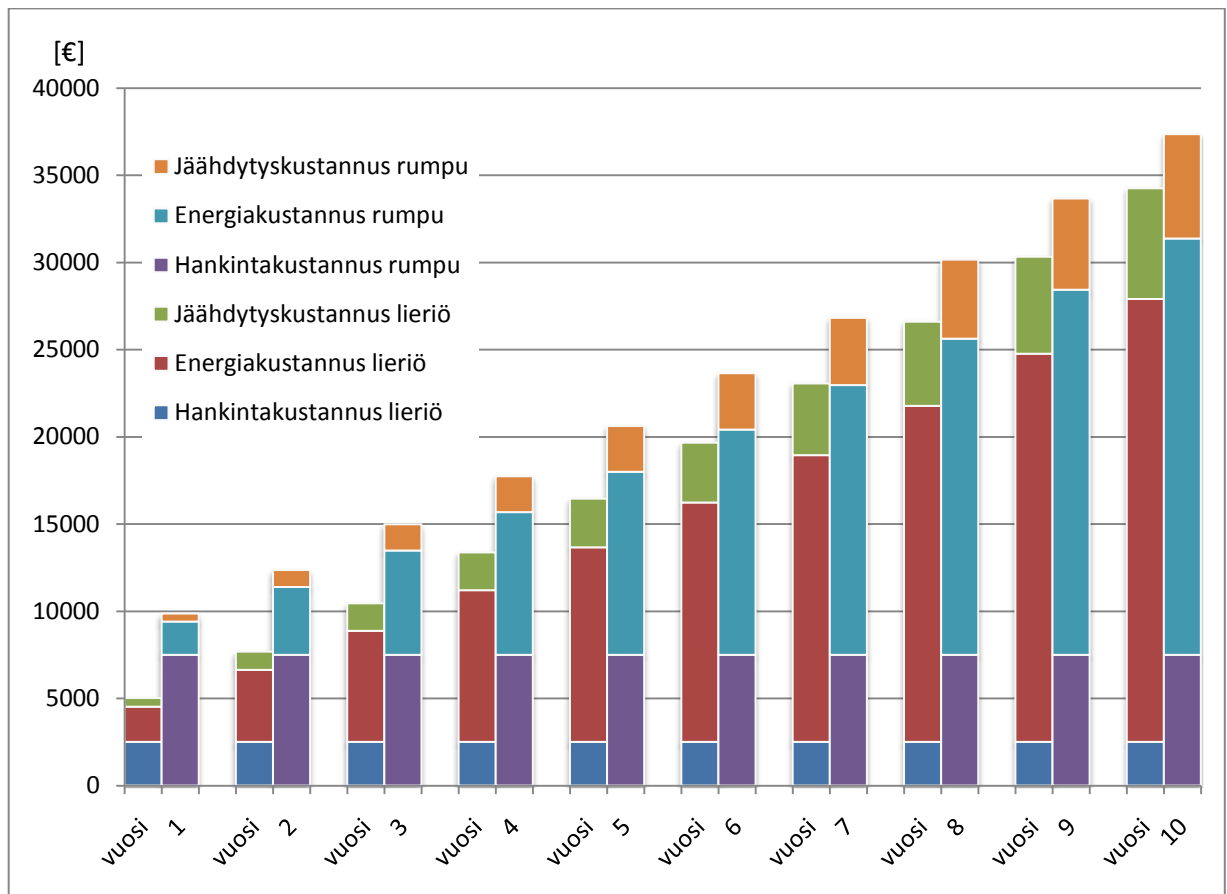
ja kierukkavaihdemoottoreiden noin 3500 €. Energiakustannuksissa kylmälaitteiden energiankulutus on laskettu arvioimalla kylmäkertoimen arvoksi neljä.



Kuva 6.1 Lieriö- ja kierukkahammasvaihteiden kokonaiskustannukset kymmenen vuoden tarkasteluaikana. Vasemman puoleinen palkki esittää lieriöhammasvaihdemoottoreiden kokonaiskustannuksia ja oikean puoleinen vastaavaa kierukkavaihdemoottoreiden kustannusta.

Kuvan 6.1 palkeissa hankintahinta on alimpana, keskimmäisenä on moottoreiden sähkönkulutuksen kustannus ja ylimpänä niiden aiheuttama jäähdytyksen kustannus. Kuvasta nähdään kuinka energiakustannuksista muodostuu suurin osuus kokonaiskustannuksista. Vertailusta nähdään, kuinka lieriövaihdemoottori on selkeästi edullisempi hankintahinnaltaan ja käyttö kasvattaa säästöä kierukkavaihdemoottoriin nähden vuosien aikana merkittävästi. Kierukkavaihdemoottorin ainoa etu lieriövaihdemoottoriin on voimansiirron kääntymisen, jolloin se voidaan asentaa kuljettimen suuntaisesti.

Samanlainen vertailu voidaan muodostaa saman teholuokan lieriövaihte- ja rumpumoottorille. Kymmenen rumpumoottorin hankintahinta on 7500 €. Tarkastelutilanteessa kuljettimelle vaaditaan moottoreilta 265 W mekaaninen teho. Tällöin lieriövaihdemoottorin ottoteho on noin 420 W ja rumpumoottorin noin 400 W. Kuvassa 6.2 on esitetty molempien moottoreiden kustannukset kymmenen vuoden aikana siten, että vasemmalla on lieriövaihdemoottorin kustannuspalkki ja oikealla rumpumoottorin.



Kuva 6.2 Lieriövaihte- ja rumpumoottorikäyttöjen kustannusvertailu.

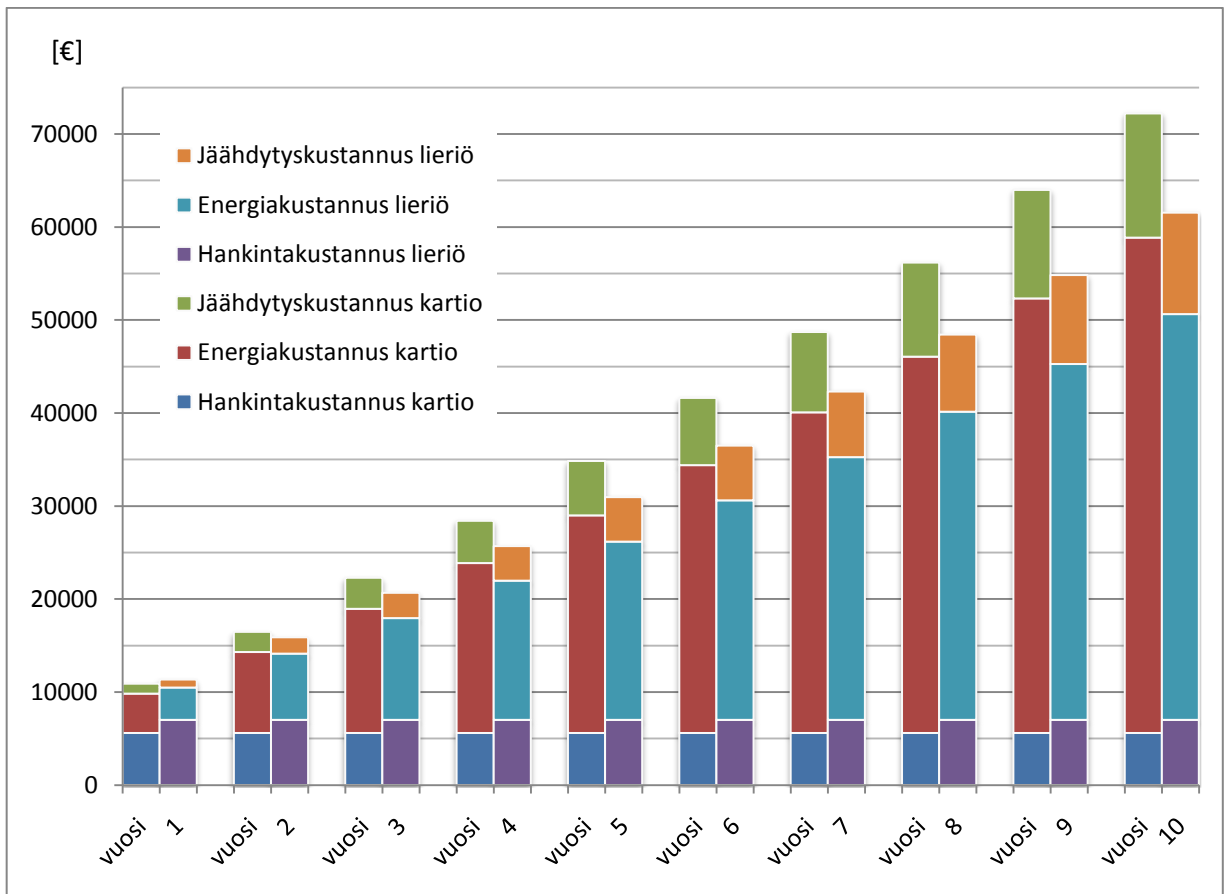
Kuvasta 6.2 nähdään, että lieriövaihdemoottori on edullisempi ratkaisu rumpumoottoriin nähden selkeästi pienemmän hankintahintansa vuoksi. Kymmenen vuoden tarkastelun aikana energiakustannuksista syntyvät säästöt rumpumoottorien eduksi eivät ole merkittäviä ja etu lieriövaihdemoottorien hyväksi on tuhansia euroja tarkasteluajan lopulla. Kustannusarvioissa

ei oteta huomioon mahdollisia asennus- ja kotelointikustannuksia, jotka lieriövaihdemoottorilla ovat suuremmat kuin suoraan kuljettimeen asennettavalla suljetulla rumpumoottorilla.

Vertailtaessa rumpumoottoria kierukkavaihdemoottoriin, nähdään kuvien 6.1 ja 6.2 oikeanpuoleisia palkkeja vertaamalla, kuinka rumpumoottori on kierukkavaihdemoottoria edullisempi ratkaisu neljän vuoden käyttöajan jälkeen. Kierukkavaihde on edullisempi ainoastaan erikoissovelluksissa, joissa tarvitaan 90 asteen voimansiirtoa ja käyttötunnit ovat vähäiset.

6.2 Kustannusvertailu teholuokan 0,75 kW moottoreille

Mitatuista moottoreista kartiovaihdemoottori ja taajuusmuuttajaohjattu lieriövaihdemoottori ovat teholuokaltaan sekä nimellisakselinopeudeltaan ja -vääntömomentiltään lähes samansuuruisia, joten niille voidaan suorittaa samanlainen vertailu kuin edellä esitetyille 0,37 kW moottoreille alussa esitetyillä oletusarvoilla. Tarkastellaan tilannetta, jolloin kartiovaihdemoottorilla keskimääräinen ottoteho on noin 880 W, jolloin moottorilta saadaan 600 W akseliteho. Saman verran akselitehoa saadaan taajuusmuuttajaohjatulla lieriövaihdemoottorilla noin 730 W ottoteholla. Kymmenen 0,75 kW:n kartiohammasvaihdemoottorin hankintakustannukset ovat noin 5600 € ja kymmenen taajuusmuuttajaohjatun lieriövaihdemoottorin noin 7000 €. Kuvassa 6.3 on esitetty näiden kahden moottorin kertyvät vuosittaiskustannukset.



Kuva 6.3 Kartiohammasvaihdemoottorikäytön ja taajuusmuuttajaohjatun lieriövaihdemoottorikäytön kokonaiskustannukset kymmenen vuoden tarkasteluajana. Vasemman puoleinen palkki esittää kartiohammasvaihdemoottorikäytön kokonaiskustannuksia ja oikean puoleinen taajuusmuuttajaohjatun lieriövaihdemoottorikäytön kustannuksia.

Kuvan 6.3 kustannuspalkeista nähdään, kuinka kartiovaihdemoottorin pienempi hankintahinta tekee sen edullisemmaksi ratkaisuksi kahden ensimmäisen vuoden aikana. Kolmannen vuoden aikana taajuusmuuttajaohjatun lieriövaihdemoottorin parempi hyötysuhde ja pienempi sähkönkulutus tekevät siitä edullisimman ratkaisun. Kymmenen vuoden tarkasteluajana taajuusmuuttajaohjattu lieriövaihdemoottori tulee selkeästi edullisemmaksi käyttäjälle kuin kartiovaihdemoottori. Edellä esitetyssä tarkastelussa taajuusmuuttajaohjatun moottorin hintaan on laskettu myös ohjausjärjestelmän hinta. Koska kartiohammasvaihdemoottorin hankintakustannuksissa ei ole otettu huomioon kuljetinkäytölle tulevan taajuusmuuttajan hintaa, lyhenee taajuusmuuttajaohjatun lieriövaihdemoottorin takaisinmaksuaika kartiohammasvaihdemoottoriin nähden arviolta alle vuoteen.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaustulosten perusteella saadaan selkeä näkemys siitä, miten vaihteen rakenne vaikuttaa kuljetinkäytön kokonaishyötysuhteeseen. Tulokset osoittavat kulmavaihteiden; kierukka- ja kartiohammasvaihteen, hyötysuhteiden olevan selvästi alhaisempia kuin lieriöhammasvaihteiden. Kaikki mitatut lieriövaihdemoottorit osoittautuivat energiatehokkaimmiksi ratkaisuksi kuljetinkäyttöille. Mittaustulokset vastaavat vaihteiden teoriaa, osoittaen lieriövaihteiden olevan energiatehokkaimpia verrattaessa muihin tutkittuihin vaihderakenteisiin.

Taloudellisesta näkökulmasta lieriövaihdesovellukset eivät aina osoittaudu kustannustehokkaimmaksi ratkaisuksi. Usein erikoisrakenteen omaavat lieriövaihdemoottorit ovat hankintahinnaltaan kalliimpia, jolloin hankintahinnaltaan edullisempien kulmavaihte- ja peruslieriövaihdemoottoreiden elinkaarikustannukset ovat pienemmät. Tämä huomataan erityisesti vertailtaessa saman teholuokan rumpu- ja lieriövaihdemoottoreita, joissa on sama vaihderakenne ja moottorityyppi. Elinkaarikustannusten tarkastelu rajoittuu hankinta- ja energiakustannuksiin, jolloin mahdollisia muita kustannuksia, kuten asennus- ja huoltokustannuksia, ei oteta huomioon. Loppukäyttäjälle asennuksissa muodostuu lisäkustannuksia erityisesti oikosulkumoottorin ja vaihteen yhdistelmissä, koska monesti ne pitää hygienian vuoksi koteloida. Tutkituista moottoreista rumpumoottori ja taajuusmuuttajaohjattu lieriövaihdemoottori ovat umpinaisia rakenteeltaan, joten näiden kohdalla erillistä suojausta kuljettimien lähellä ei tarvita.

Kuljetinkäyttöjen optimaalinen valinta tehokkuuden ja säästöjen kannalta riippuu useasta käyttökohteen asettamasta ehdosta. Tarkasteltaessa kuljetinkäyttöjen elinkaarikustannuksia loppukäyttäjälle on huomattava, että laskelmissa on käytetty arvioituja tehoalueita, käyttötuntimääriä ja kylmäkerrointa. Tutkitulla käyttötuntimäärällä energiakustannus on merkittävin kustannustekijä kaikilla käytöillä. Näin ollen kohteissa, joissa käyttötuntimäärät ovat pieniä, voi halvemmat ja huonomman hyötysuhteen kuljetinkäytöt tulla edullisemmiksi. Kylmätilan jäähdytyksen tehokkuuteen voidaan vaikuttaa ainoastaan jäähdytyskoneistolla ja sen tehokkuutta kuvaavalla kylmäkertoimella. Kylmäkertoimen ollessa huonompi, kokonaiskustannukset kasvavat kaikilla käytöillä jäähdytyskustannusten kasvaessa, jolloin energiatehokkaammilla käytöillä saadaan suurempia säästöjä.

LÄHTEET

- (Aittomäki, 2009) Aittomäki Antero. 2009. Teknillinen termodynamiikka. Prosessit ja energian muutokset, luentomateriaali. Tampere. TUT, energia- ja prosessitekniikka. Verkkolähde: <http://www.tut.fi/units/me/ener/kurssit/ENER-2060/Termodynamiikka.pdf>. Viitattu 10.07.2009
- (Aura, 1986) Aura Lauri, Tonteri Antti J. 1986. Sähkämiehen käsikirja 2. Sähkölaitteet. WSOY, Porvoo. ISBN 951-0-13479-1
- (Dudley, 1995) Dudley Darle W., Sprengers Jacques, Schröder Dierk, Yamashina Hajime. 1995. Gear Motor Handbook. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 3-540-58988-0
- (EMV, 2009) Energiamarkkinavirasto. Sähkön hinnan kehitys 1.10.2009. Verkkolähde: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1766&pgid=67>. Viitattu 23.11.2009.
- (Karhula, 2008) Karhula Jukka. 2008. Koneenosien suunnittelu, luentomoniste. Lappeenranta. LUT, LUT Metalli, konetekniikan osasto.
- (Kokkonen, 2007) Kokkonen Jesse. 2007. Sähkölaitteen valintaperiaatteet ja monimoottorilaitteet malmin laaduntasauksessa, diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto.
- (Korpinen, 2009) Korpinen Leena, Mikkola Marko, Keikko Tommi, Falck Emil. 2009. Yliaalto-opus. Verkkolähde: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf> . Viitattu 7.8.2009

- (Kuusinen, 2004) Kuusinen Katri, Bovellan Kari. 2004. Korkeahyötysuhteisen moottorin hankinta, verkkojulkaisu. Helsinki. Electrowatt-Ekono Oy. Verkkolähde: http://www.motiva.fi/files/1666/Korkeahyotysuhteisten_sahkomoottorien_hankinta.pdf. Viitattu 26.06.2009
- (Lynwander, 1983) Lynwander Peter. 1983. Gear Drive System. Design and application. MARCEL DEKKER, INC, New York, New York. ISBN 0-8247-1896-8
- (Malinen, 2005) Malinen Jukka. 2005. Induktiomoottorin hyötysuhdemittaukset verkko- ja taajuusmuuttajasyötössä, diplomityö. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikan osasto.
- (Nerg, 2009) Nerg Janne. 2009. Terminen laitesuunnittelu, luentomateriaali 2009. Lappeenranta. LUT, LUT Energia, sähkötekniikan osasto.
- (Pyrhönen, 2006) Pyrhönen Juha. 2006. Sähkökäytöt 2005...2006, luentomateriaali. Lappeenranta. LUT, LUT Energia, sähkötekniikan osasto.
- (Ruohonen, 2009) Ruohonen Pekka. 2009. Teollisuuden käyttöhyödykejärjestelmät, kurssimateriaali. Erityyppiset kylmäkoneet ja kolmituotantoratkaisut. Helsinki. TKK. Verkkolähde: https://noppa.tkk.fi/noppa/kurssi/ene-59.4135/materiaali/erityyppiset_kylmakoneet_ja_kolmituotantoratkaisut.pdf. Viitattu 10.07.2009.