

Konsta Matikainen

**MAGNEETTISEN TOROIDIYTIMEN
TEHOHÄVIÖIDEN MITTAAMINEN
KALORIMETRIN AVULLA**

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Joonas Vesa
Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Konsta Matikainen: Magneettisen toroidiytimen tehohäviöiden mittaaminen kalorimetrin avulla
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2021

Muuntajan magneettisessa ytimestä tapahtuvat tehohäviöt on tärkeää saada mitattua mahdollisimman tarkasti, jotta häviöistä johtuvat kustannukset olisivat minimaaliset ja ytimen materiaali olisi optimaalinen sen sovelluskohteelle. Häviöiden mittaamiseen liittyy kuitenkin paljon epä-tarkkuutta aiheuttavia tekijöitä, etenkin sähköisillä suureilla mitattaessa. Tämän työn tavoitteena on rakentaa kalorimetriaan perustuvan mittausjärjestelmän prototyyppi, testata sen soveltuvuutta magneettisen ytimen tehohäviömittauksiin sekä arvioida järjestelmän kehitysmahdollisuuksia kaupallisten pienihäviöisten ydinten häviömittauksien kannalta.

Työ jakaantuu kirjallisuustutkimusosaan ja mittausjärjestelmän prototyypin rakentamista ja testaamista käsittelevään osaan. Kirjallisuustutkimusosa esittelee tärkeimmät ilmiöt magneettisissa ytimissä tapahtuvien tehohäviöiden taustalla, yleisimmät tehohäviöiden mittaustavat sekä niiden ongelmia. Rakentamisosa kuvaa työssä käytettävän mittausjärjestelmän suunnittelua ja rakentamista, sekä esittelee mittausjärjestelmän yleistä toimintaa ja sen tärkeimmät komponentit. Lopuksi esitellään mittaustulokset ja johtopäätökset.

Tutkimus osoittaa, että työssä käytettävällä mittausjärjestelmällä on mahdollista päätellä tehohäviöt suuntaa-antavasti sellaisessa mittaustilanteessa, missä käämien lämpenemä ei pääse vaikuttamaan jäähdytysveden lämpötilaan. Tutkimuksessa saatiin selville tehohäviöiden mittaamiseen liittyvät suurimmat ongelmakohtat, joita olivat etenkin kalorimetrin seinien läpi vuotava lämpö sekä veden lämpötilan vaihtelu kalorimetrin jäähdytysveden sisääntulossa ja ulostulossa. Nämä ongelmat rajoittivat mittaustarkkuutta ja mitattavan tehoalueen laajuutta huomattavasti. Työ kuitenkin täytti tavoitteensa ja osoitti mittausjärjestelmän mahdollisuudet ja suunnan tulevalle kehitystyölle.

Avainsanat: Kalorimetri, magneettinen materiaali, tehohäviö, toroidiydin

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

Tämä työ on saanut rahoitusta Euroopan tutkimusneuvostolta (ERC), Euroopan unionin Horisontti 2020 -tutkimus- ja innovointiohjelmasta (avustussopimus nro 848590).

ABSTRACT

Konsta Matikainen: Calorimetric measurement system for magnetic core loss measurements
Bachelor's thesis
Tampere University
Bachelor's Degree Programme in Electrical Engineering
December 2021

It is important to measure the power losses in the magnetic core of the transformer as accurately as possible, to minimize the costs caused by losses and to optimize the core material to be the most suitable for its applications. However, there are a lot of inaccuracies involved in measuring core losses, especially when measuring the losses electrically. The aim of this work is to build a prototype of a calorimetric measurement system, test its suitability for magnetic core loss measurements, and to evaluate the system's development potential for core loss measurements of low-loss commercial cores.

The work is divided into the literature research part and the construction and testing part. The literature research section presents the most important phenomena behind power losses in magnetic cores, the most common methods of measuring power losses and problems behind those methods. The construction part describes the designing and construction of the measurement system used in the work, and presents the general operation of the measurement system and its main components. In the last two chapters, the results and conclusions of the measurements are presented.

The study shows that it is possible to determine power losses approximately in a measurement situation where the temperature of the windings does not affect the temperature of the cooling water. The study revealed the main problems related to measuring the core losses, which are the heat leaking through the walls of the calorimeter and the variation in water temperature in the inlet and outlet of the calorimeter. These problems significantly limited the measurement accuracy and the power range that was being measured. However, the work fulfilled its objectives and demonstrated the possibilities and direction of the future development of the measurement system.

Keywords: Calorimeter, core loss, magnetic material, toroidal core

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

This project has received funding from the European Research Council (ERC) under the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme (grant agreement No 848590).

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Sähkömagneetiikka	2
2.1	Magneettivuo	2
2.2	Ampèren laki ja Faradayn laki	3
3.	Magneettisten materiaalien ominaisuudet	5
3.1	Magneettiset materiaalit	5
3.2	Hystereesikäyrä	5
4.	Magneettisen ytimen häviöt ja niiden mittaaminen sähköisillä suureilla	7
4.1	Magneettisen ytimen häviöt.	7
4.2	Häviöiden mittaaminen sähköisillä suureilla	7
4.3	Sähköisten mittausten haasteet	8
5.	Kalorimetrinen häviömittaus	10
5.1	Kalorimetri	10
5.2	Tehohäviöiden mittaaminen kalorimetrillä	11
5.3	Lämpövirta kalorimetrin seinämien läpi	11
6.	Mittausjärjestelmä	12
6.1	Suunnittelu ja rakentaminen	12
6.1.1	Vastuskalorimetri	12
6.1.2	Kalorimetri toroidille	14
6.2	Mittausjärjestelmän esittely	15
6.2.1	Mittauslaitteet ja niiden toiminta	15
6.2.2	Järjestelmä kokonaisuutena	16
7.	Mittautulokset	19
7.1	Vastuskalorimetri	19
7.2	Magneettinen ydin	22
8.	Johtopäätökset	24
	Lähteet	25

1. JOHDANTO

Muuntaja on laite, joka kykenee sähkömagneettisen induktion avulla muuntamaan sähkötehoa vaihtojännitetasolta toiselle, muuttamatta sen taajuutta. Muuntajat ovat tehokkuutensa ja luotettavuutensa ansiosta edesauttaneet vaihtosähköjärjestelmän kehittymistä ja yleistymistä viime vuosisadan alusta lähtien, puhumattakaan lukemattomista muista sovelluksista. Niiden suunnitteluun ja kehittämiseen on panostettu paljon, eikä niiden roolia tulevaisuuden sähkönsiirtoverkkojen ja elektronisten laitteiden kehittämisessä voi liikaa korostaa. [1, s. 3]

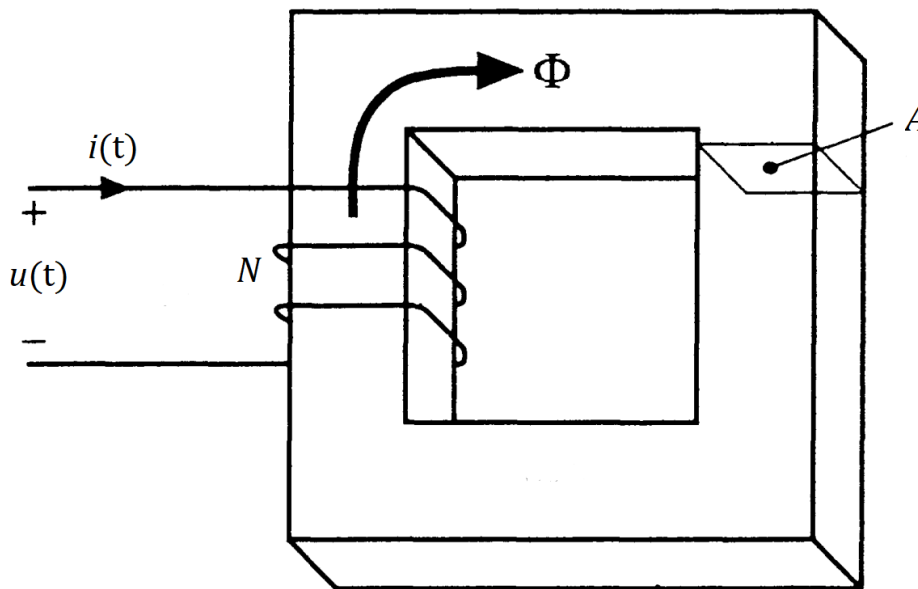
Tärkeä osa muuntajaa on sen magneettinen ydin. Muuntajan käämeissä kulkevan vaihtovirran magneettiseen ytimeen indusoivan magneettivuon tiheyden kontrollointi on kriittistä muuntajan toiminnan kannalta [2, s. 3-4]. Ytimen materiaali ja muoto määrittävät sen, millainen magneettivuo ytimeen indusoituu. Materiaalin oikealla valinnalla voidaan vähentää muuntajassa tapahtuvia tehohäviöitä ja sitä kautta käyttäjälle koituvia kustannuksia. Materiaalien kehittämisen kannalta on tärkeää pystyä mittaamaan ytimissä tapahtuvat tehohäviöt mahdollisimman tarkasti, joten uusien mittaustapojen kehittäminen on olennainen osa tätä kehitystyötä. Työn tavoitteena on suunnitella ja rakentaa prototyyppi kalorimetristä, jonka avulla voidaan mitata ytimessä tapahtuvat tehohäviöt, sekä verrata sillä saatavia mittaustuloksia sähköisillä mittauksilla saataviin tuloksiin. Työstä saatavien tulosten avulla pyritään myös arvioimaan, olisiko kyseisellä mittaustavalla mahdollista mitata tulevaisuudessa pienihäviöisten kaupallisten ydinten tehohäviöitä.

Työssä on selvitetty magneettisten ydinten häviömittausten taustoja, teoriaa sekä niihin liittyviä ongelmia. Toisessa luvussa käsitellään sähkömagneetiikan teoriaa, jotta saadaan käsitys perusilmiöistä aiheen taustalla. Kolmannessa ja neljännessä luvussa syvennytään magneettisiin materiaaleihin, niiden ominaisuuksiin sekä sähköisten häviömittausten teoriaan. Viidennessä luvussa kerrotaan kalorimetreistä ja kalorimetrisista häviömittauksista ja kuudennessa luvussa esitellään työssä käytetty mittaustapa. Seitsemännessä luvussa kootaan yhteen lopulliset mittaustulokset ja kahdeksannessa luvussa tehdään johtopäätökset niiden pohjalta.

2. SÄHKÖMAGNETIIKKA

2.1 Magneettivuuo

Kun käämiin kytketään vaihtojännite, käämissä kulkeva sähkövirta synnyttää johdinsilmukoiden keskelle ajan suhteen muuttuvan magneettikentän. Magneettikentän suunta riippuu virran kulkusuunnasta. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Magneettivuon kulkusuunta ytimessä ja kulkutien poikkileikkaus, muokattu lähteestä [3, s. 461].

Yksi tärkeä magneettikenttää kuvaava suure on magneettivuuo, joka voidaan määritellä pinnan läpäisevän magneettivuon tiheyden avulla

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}, \quad (2.1)$$

missä Φ on magneettivuuo, B on magneettivuon tiheys ja $d\vec{A}$ on pinta vastaan kohtisuora pintaelementtivektori [4, s. 913]. Gaussin lain mukaan suljetun pinnan lävistävä magneet-

tivuo on yhtä suuri kuin nolla, joten suljetulle pinnalle voidaan kirjoittaa

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0. \quad (2.2)$$

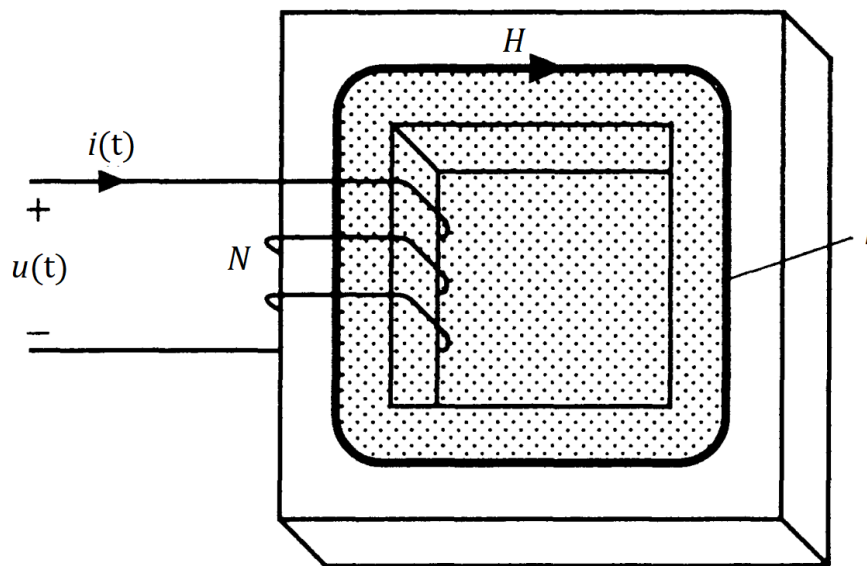
Jos magneettivuo on jokaisessa pinnan pisteessä yhtä suuri ja kohtisuorassa pintaa vastaan, (2.1) saa muodon

$$\Phi = BA, \quad (2.3)$$

missä A on vuon kulkutien eli ytimen poikkileikkauksen pinta-ala. [3, s. 456]

2.2 Ampèren laki ja Faradayn laki

Kuvassa 2.2 visualisoidun Ampèren kiertolain mukaan magneettikentän voimakkuuden polkuintegraali suljetun käyrän l ympäri on yhtä suuri kuin käyrän rajaaman pinnan läpäisevä nettovirta [5, s. 198].



Kuva 2.2. Ampèren laki visualisoituna, muokattu lähteestä [3, s. 461].

Ampèren laki integraalimuodossa on [5, s. 198]

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Ni(t). \quad (2.4)$$

Jos magneettikenttä on tasainen, (2.4) voidaan kirjoittaa

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = Hl = Ni(t), \quad (2.5)$$

missä N on käämin kierroslukumäärä [3, s. 458].

Faradayn lain mukaan magneettisen ytimen sisällä muuttuva magneettivuo indusoi ytimen ympärille kierrettyyn käämiin ajan suhteen muuttuvan jännitteen, joka on muotoa

$$u(t) = N \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.6)$$

Kun yhdistetään (2.3) ja (2.6), jännite voidaan esittää keskimääräisen magneettivuon tiheyden avulla

$$u(t) = NA \frac{dB}{dt}, \quad (2.7)$$

missä keskimääräinen magneettivuon tiheys B on $\frac{\Phi}{A}$. [3, s. 460-461]

3. MAGNEETTISTEN MATERIAALIEN OMINAISUUDET

3.1 Magneettiset materiaalit

Permeabiliteetti on väliaineen ominaisuus, joka ottaa huomioon magneettikenttiä kuvaavat kenttäsuureet magneettivuon tiheyden B ja magneettikentän voimakkuuden H . Magneettivuon tiheys väliaineessa on magneettikentän voimakkuuden ja permeabiliteetin avulla määriteltynä

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}, \quad (3.1)$$

missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti ja μ_r väliaineen materiaalin suhteellinen permeabiliteetti [5, s. 206]. Suhteellinen permeabiliteetti kuvaa aineen magneettista käyttäytymistä ulkoisen magneettikentän vaikutuksen alaisena.

Magneettiset materiaalit luokitellaan yleensä kolmeen eri luokkaan niiden susceptibiliteetin perusteella: paramagneettisiin, diamagnettisiin ja ferromagneettisiin materiaaleihin. Susceptibiliteetti voidaan määrittellä suhteellisen permeabiliteetin avulla:

$$\chi_m = \mu_r - 1. \quad (3.2)$$

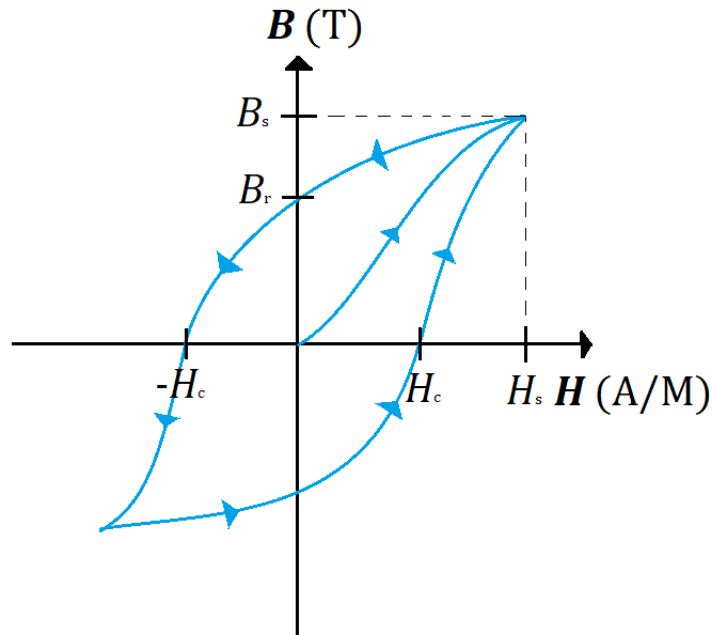
Paramagneettisille materiaaleille on tyypillistä pieni positiivinen susceptibiliteetti, diamagneettisille pieni negatiivinen susceptibiliteetti ja ferromagneettisille suuri positiivinen susceptibiliteetti. [6, s. 409]

Ferromagneettisia materiaaleja ovat muun muassa rauta, nikkeli, koboltti ja niitä sisältävät metalliseokset. Materiaalin ferromagneettiset ominaisuudet ovat kuitenkin lämpötilariippuvaisia, sillä tarpeeksi suuressa lämpötilassa materiaali muuttuu ferromagneettisesta paramagneettiseksi. [6, s. 411]

3.2 Hystereesikäyrä

Magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden välistä suhdetta ferromagneettisissa materiaalissa voidaan havainnollistaa kuvan 3.1 kaltaisen hystereesikäyrän

avulla, joka esittää magneettivuon tiheyden magneettikentän voimakkuuden avulla. Hystereesikäyrästä nähdään mitä materiaalin magneettisille ominaisuuksille tapahtuu, kun se on vuorovaikutuksessa virran I synnyttämän magneettikentän kanssa.



Kuva 3.1. Esimerkki ferromagneettisen materiaalin hystereesikäyrästä yhden jakson aikana, mukaillen lähteestä [7, s. 178].

Kaavan (2.5) mukaan virran kasvaessa magneettikentän voimakkuus kasvaa, jos käänin kierroslukumäärä ja vuon kulkutie pysyvät vakiona. Hystereesikäyrältä nähdään että magneettikentän voimakkuus saavuttaa lopulta saturaatiopisteen, jonka jälkeen magneettivuon tiheys B ei kasva enää merkittävästi. Vaikka virta ja magneettikentän voimakkuus putoaisivat tämän jälkeen nolnaan, jää ytimeen silti magneettivuon tiheys B_r . Tätä ferromagneettisen materiaalin ominaisuutta kutsutaan remanenssiksi [7, s. 178].

Jotta magneettivuon tiheys saadaan putoamaan takaisin nolnaan, tarvitaan magneettikentän voimakkuus $-H_c$, jota kutsutaan magneettisen materiaalin koersiivisuudeksi [2, s. 2-3]. Virran ja magneettikentän voimakkuuden muuttuessa magneettivuon tiheyden arvot mukailevat kuvan 3.1 kaltaista käyrää. Ideaalisella, eli tässä tapauksessa lineaarisesti käyttäytyvällä ja täysin häviöttömällä, materiaalilla B-H-käyrä on suora viiva, jonka kulmakertoimen arvo vastaa materiaalin permeabiliteettiä. [8, s. 3]

4. MAGNEETTISEN YTIMEN HÄVIÖT JA NIIDEN MITTAAMINEN SÄHKÖISILLÄ SUUREILLA

4.1 Magneettisen ytimen häviöt

Kun käämin johtimen päiden välillä on vaihtojännite, energiaa kulkee syklin aikana sekä jännitelähteestä käämille, että käämistä takaisin jännitelähteeseen. Jännitelähteen takaisin saama energia on kuitenkin pienempi kuin sen luovuttama energia. [9, s. 110] Tämä erotus on ydinmateriaalissa yhden jakson aikana tapahtunut energiahäviö, joka vastaa kuvan 3.1 hystereesikäyrän sisään jäävää pinta-alaa. Häviöt koostuvat pääosin kahdesta komponentista; hystereesihäviöistä ja pyörrevirtahäviöistä. [2, s. 2-4] Häviöitä ytimessä aiheuttavat myös niin sanotut poikkeavat häviöt, mitkä johtuvat magneettisten alkeisalueiden rajapintojen liikkeestä, ytimen epähomogeenisuudesta ja magnetoituman epätasaisuudesta [10, s. 442].

Kun ferromagneettinen materiaali altistetaan kasvavalle ulkoiselle magneettikentälle, materiaalin magneettiset alkeisalueet kääntyvät hiljalleen ulkoisen kentän mukaan [6, s. 411]. Hystereesihäviöt ovat näiden magneettisten alkeisalueiden liikkeeseen kuluva energia. Pyörrevirtahäviöt taas johtuvat käämin ytimeen indusoimasta muuttuvasta magneettivuosta, joka indusoi materiaaliin pyörrevirtoja [10, s. 442]. Ytimessä tapahtuvat häviöt voidaan havaita ytimen lämpötilan kasvuna.

4.2 Häviöiden mittaaminen sähköisillä suureilla

Hystereesikäyrän muodostaman silmukan sisään jäävän pinta-alan suuruus vastaa keskimäärin yhden jakson aikana ytimessä tapahtunutta energiahäviötä tilavuusyksikköä kohden. Tämä voidaan esittää magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden avulla

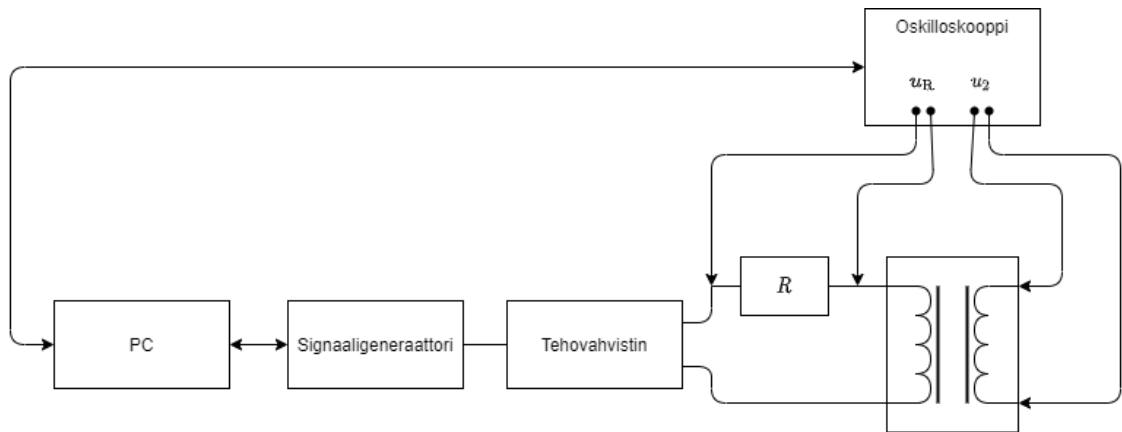
$$W_{\text{häviö}} = \oint HdB, \quad (4.1)$$

missä $W_{\text{häviö}}$ on energiahäviötiheys. [11, s. 117] Yhdistämällä (2.5), (2.7) ja (4.1), saa-

daan energiahäviötiheydeksi yhden jakson aikana

$$W_{\text{häviö}} = \frac{N_1}{N_2} \frac{1}{A} \frac{1}{l} \int_0^T i_1(t) u_2(t) dt, \quad (4.2)$$

missä T , eli jaksonaika, on ensiökäämiin syötetyn vaihtojännitteen taajuuden f käänteisluku. Ensiökäämin virta $i_1(t)$ ja toisiokäämin jännite $u_2(t)$ voidaan mitata esimerkiksi kuvan 4.1 mukaisen mittausjärjestelyn avulla. Ensiökäämin virta saadaan selville Ohmin lain avulla mittaamalla etuvastuksen yli oleva jännite $u_R(t)$.



Kuva 4.1. Havainnollistava kaavio mittausjärjestelmästä. Kaksisuuntaiset nuolet kuvaavat tietoliikennettä ja yksisuuntaiset nuolet mittauksia.

Ytimessä tapahtuva tehohäviö saadaan kertomalla energiahäviötiheys yhden jakson aikana ytimen tilavuudella ja ensiökäämin syöttöjännitteen taajuudella [3, s. 472]. Näin ollen sähköisillä suureilla mitatuksi tehohäviöksi saadaan

$$P_{\text{häviö, s}} = V f W_{\text{häviö}}, \quad (4.3)$$

missä V on ytimen tilavuus. Kun mitattava ydin on toroidin mallinen, (4.3) saadaan muotoon

$$P_{\text{häviö, s}} = \pi(r_u^2 - r_s^2) h f W_{\text{häviö}}, \quad (4.4)$$

missä r_u on toroidin ulompi säde, r_s sisempi säde ja h toroidin korkeus.

4.3 Sähköisten mittausten haasteet

Kuvan 4.1 mittausjärjestely auttaa selvittämään ytimen häviöt ilman, että käämityksissä tapahtuvat häviöt häiritsevät mittaustulosta, mikä on kyseisen mittaustavan isoin etu. Mittaustavan suurimmat epätarkkuudet johtuvat käytännössä ensiökäämin virran mittauk-

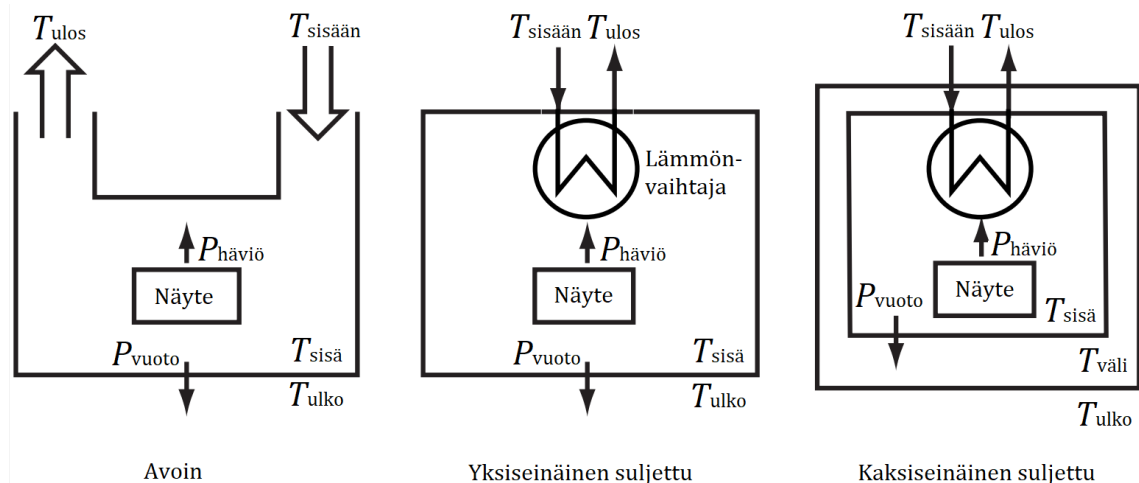
sessä käytetyn etuvastuksen parasiittisesta induktanssista, jänniteantureiden epätarkkuuksista sekä oskilloskoopin näytteenottotarkkuuden rajallisuudesta. Tämä korostuu etenkin silloin, kun ytimen induktiivisen reaktanssin ja resistanssin suhde on korkea. [12, s. 4374]

Käytännössä myös ytimen magneettisten ominaisuuksien epälineaarisuus hankaloittaa ytimen häviöiden sähköisiä mittauksia. Magneettivuon tiheyden käyrämuodon säätäminen on ehtona edellä kuvatun mittaustavan riittävälle tarkkuudelle ja toistettavuudelle. [13, s. 9841]

5. KALORIMETRINEN HÄVIÖMITTAUS

5.1 Kalorimetri

Kalorimetri on laite, jolla mitataan lämpöä. Kalorimetrejä on hyvin monenlaisia, mutta ne voidaan jakaa kolmeen luokkaan: avoimet, yksiseinäiset suljetut ja kaksiseinäiset suljetut [14, s. 1439]. Nämä kolme mallia on esitetty kuvassa 5.1. Kalorimetrejä sovelletaan esimerkiksi materiaalitekniikassa, biologiassa, lääketieteessä sekä kasvavissa määrin myös sähköisten komponenttien ja laitteiden häviöiden mittaamisessa [15, s. 1].



Kuva 5.1. Periaatekuvat kolmesta yleisimmästä kalorimetrityypistä. Muokattu lähteestä [14, s. 1439].

Kalorimetrin peruseriaate on mitata prosessin aikana näytteestä kalorimetriin siirtynyt lämpö. Lämpö voi siirtyä johtumalla, säteilemällä tai konvektiolla [15, s. 61-67]. Tässä työssä käytetty tapa on siirtää lämpö konvektiolla, eli virtaavan jäähdytysnesteen avulla. Ideaalisessa tilanteessa kaikki lämpö absorboituu näytteestä nesteeseen, mutta kuten kuvasta 5.1 nähdään, todellisuudessa osa jäähdytysnesteeseen absorboituneesta lämmöstä vuotaa kalorimetrin seinämien läpi lämpövirtana P_{vuoto} [14, s. 1439]. Kaksiseinäinen suljettu kalorimetri on näistä kolmesta kalorimetrityypistä tarkin, sillä seinämien välisiä lämpötilaa voidaan kontrolloida jäähdytysnesteestä vuotavan lämmön minimoimiseksi.

5.2 Tehohäviöiden mittaaminen kalorimetrillä

Kalorimetrisillä mittauksilla voidaan eliminoida kappaleessa 4 mainitut, sähköisille suureille tyypilliset virheet. Koska ytimen häviöt havaitaan sen lämpötilan kasvuna, voidaan ne mitata kalorimetrin avulla, selvittämällä virtaavan nesteen ulostulon ja sisääntulon lämpötilaero ΔT ja nesteen massavirta \dot{m} . Ytimen tehohäviöksi kalorimetrillä mitattuna saadaan siis

$$P_{\text{häviö, k}} = c_p \dot{m} \Delta T = c_p \dot{m} (T_{\text{ulos}} - T_{\text{sisään}}), \quad (5.1)$$

missä c_p on jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetti [16, s. 660].

5.3 Lämpövirta kalorimetrin seinämien läpi

Kalorimetrisissä mittauksissa epätarkkuutta aiheuttaa mittauslaitteiden ja komponenttien epäideaalisuuksien lisäksi etenkin kalorimetrin seinämien läpi vuotava lämpövirta P_{vuoto} , kuten kappaleessa 5.1 todettiin. Jos kalorimetrin sisällä vallitseva lämpötila on $T_{\text{sisä}}$, ulkopuolella vallitseva lämpötila T_{ulko} ja kalorimetrin lämmönsiirtokerroin U , seinämien läpi vuotava lämpövirta voidaan esittää

$$P_{\text{vuoto}} = U(T_{\text{sisä}} - T_{\text{ulko}}). \quad (5.2)$$

Jos vuotavan lämpövirran arvo on positiivinen, lämpöä vuotaa kalorimetristä ulos. Negatiivisella arvolla lämpöä taas vuotaa kalorimetriin sisälle. Kun yhtälöistä 5.1 ja 5.2 saata- vat tehohäviö ja lämpövuoto summataan yhteen, saadaan tulokseksi kalorimetrin sisällä olevassa kappaleessa tapahtunut tehohäviö.

6. MITTAUSJÄRJESTELMÄ

6.1 Suunnittelu ja rakentaminen

Työn suunnittelu ja rakentaminen jakautuvat kahteen osioon: kalorimetrin ominaisuuksien testaamiseen käytettävän vastuskalorimetrin rakentamiseen ja magneettisen toroidiytimen mittaamiseen käytettävän kalorimetrin rakentamiseen. Työssä rakennetaan siis kaksi kalorimetriä, joiden kotelot valmistetaan 3D-tulostamalla.

3D-tulostetut kappaleet koostuvat useista toistensa päälle tulostetuista kerroksista, jotka ovat tavallisesti 0,10-0,20 mm korkeita. Jos paine kappaleen sisällä kasvaa liian korkeaksi, tämä kerrosrakenne ei pysy vesitiiviinä. Kappaleen vedenpitävyyttä voidaan kuitenkin parantaa muun muassa tulostusasetusten optimoinnilla ja kemiallisella jälkikäsittelyllä. Esimerkiksi asetonilla voidaan liuottaa ABS-muovista (akryylinitriilibutadieenistyreeni) valmistetun kappaleen pintaa, jolloin kappaleen uloimmat kerrokset sulavat käsitellyltä alueelta toisiinsa ja vesitiiviys paranee huomattavasti. Jälkikäsittelymahdollisuuden takia myös tässä työssä käytetty materiaali kalorimetrien koteloille on ABS-muovi.

Koteloiden suunnittelu- ja rakentamisprosessi noudattaa tässä työssä seuraavaa järjestystä:

1. 3D-mallin piirtäminen Solidworks-ohjelmistolla.
2. Kappaleen tulostaminen.
3. Tulostetun kappaleen jälkikäsittely.

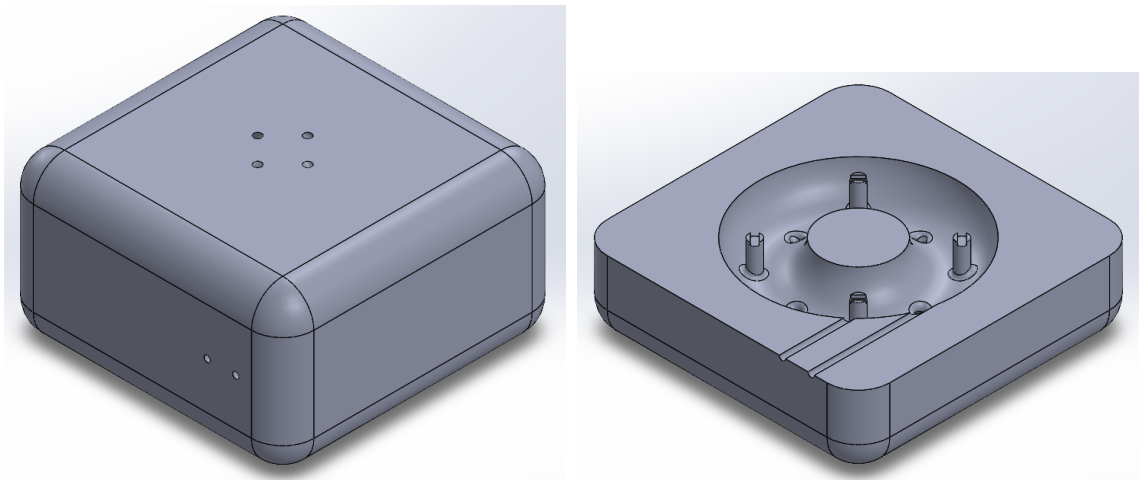
Kappaleen tulostaminen pitää sisällään monia työvaiheita 3D-mallin tiedostomuodon valmistelusta 3D-tulostimen säätöön, mutta tässä työssä ei syvennyttä niihin tarkemmin.

6.1.1 Vastuskalorimetri

Vastuskalorimetrin avulla pyritään selvittämään, kuinka työssä käytettävän kalorimetrin mittaustarkkuus muuttuu kotelon sisällä kiertävän veden massavirran muuttuessa. Sillä pyritään myös selvittämään mittaustavan toimivuus ilman kalorimetrin ympärillä olevan ensiökämin lämpenemän aiheuttamaa lämpövuotoa kalorimetrin sisälle, mikä aiheuttaa epätarkkuutta toroidiytimen mittauksissa. Mittauksista saatavien tulosten avulla lasketaan

vastuskalorimetrin kotololle lämmönsiirtokerroin, jolloin saadaan eliminoitua kotelon seinämien läpi vuotavasta lämpövirrasta johtuva mittausrvirhe.

Kuten nimestä voi päätellä, vastuskalorimetrin kotelon sisällä on vastuksia, joissa tapahtuvia tehohäviöitä on helppo muuttaa säätämällä vastusten sarjaankytkennän syöttövirtaa. Tässä työssä käytetään neljän vastuksen sarjaankytkentää. Kotelon 3D-malli on esitetty kuvassa 6.1.

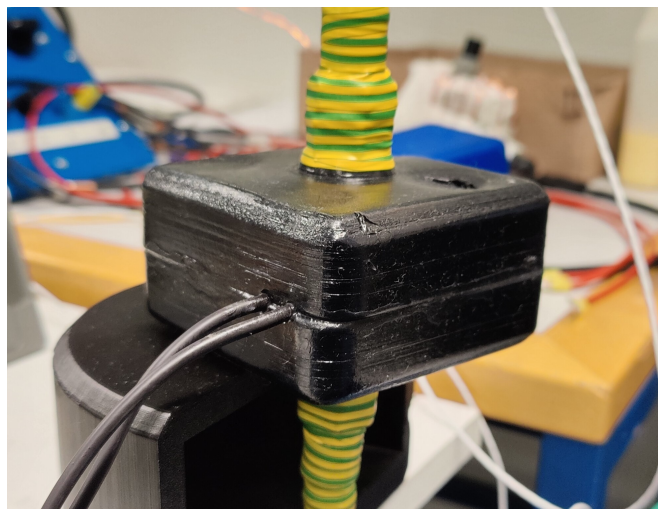


(a) Kokonainen kotelo.

(b) Kotelon läpileikkaus.

Kuva 6.1. Vastuskalorimetrin kotelon 3D-malli.

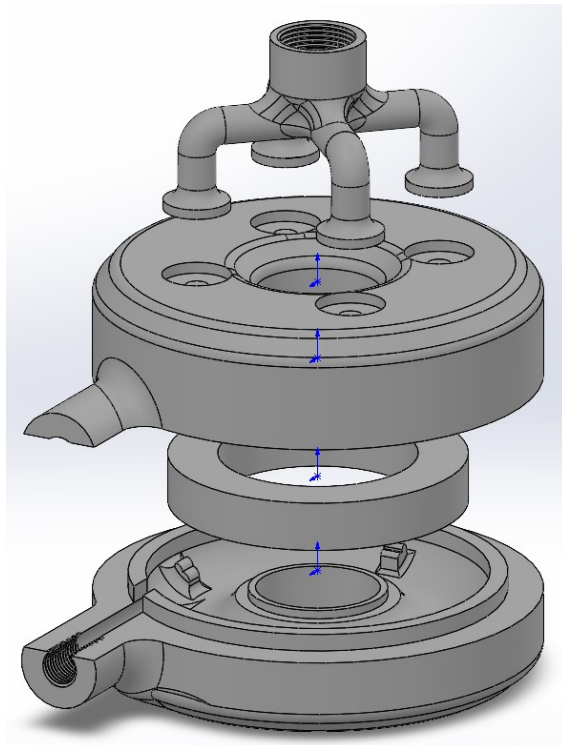
3D-mallin valmistumisen jälkeen kotelo tulostetaan kahtena osana, jälkikäsitellään vesitiiviiksi ja osat liimataan yhteen. Ennen liimaamista sarjaankytketyt vastukset kiinnitetään kotelon toiseen puolikkaaseen. Kotelon kokoonpanon jälkeen siihen kiinnitetään lämpötila-anturit ja vesiletkut, jonka jälkeen kalorimetri on valmis mittauksia varten. Valmis vastuskalorimetri on esitetty kuvassa 6.2.



Kuva 6.2. Valmis vastuskalorimetri. Kotelossa näkyvät vauriot syntyivät jälkikäsitelyprosessissa, mutta ne eivät vaikuta mittauksiin millään tavalla.

6.1.2 Kalorimetri toroidille

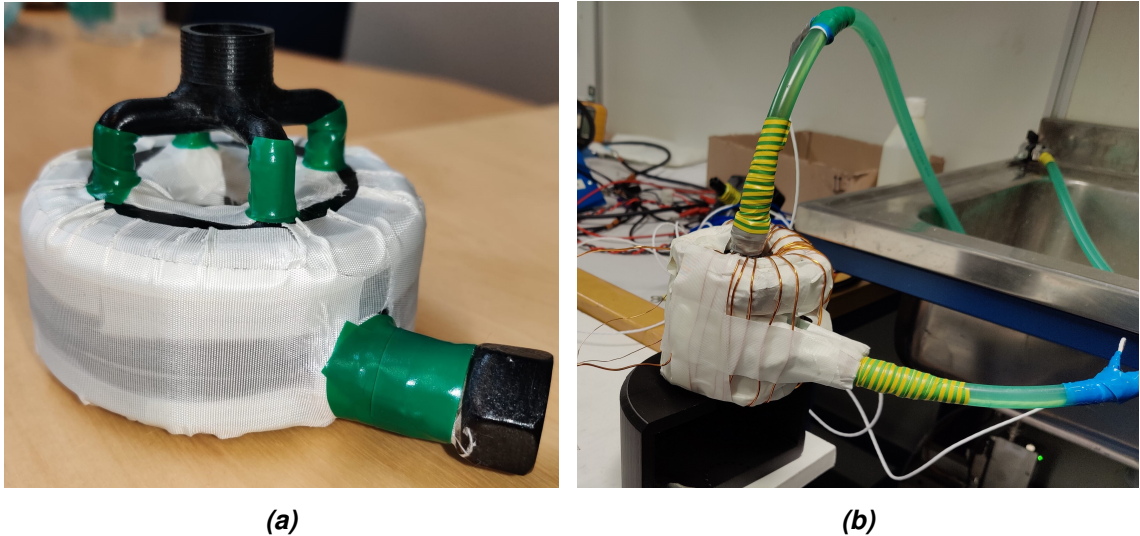
Magneettisen toroidiytimen häviöiden mittaamiseen käytettävä kalorimetri eroaa hieman suunnittelultaan vastuskalorimetristä. Sen sisällä on magneettisesta materiaalista valmistettu toroidin mallinen kappale, johon indusoidaan kotelon ulkopuolella sijaitsevan käämin avulla muuttuva magneettivuoto. Edellisissä kappaleissa esitellyistä ilmiöistä johtuen toroidi lämmitteää ympärillään kiertävää vettä, joten sen tehohäviöt voidaan selvittää kalorimetrisesti samalla tavalla kuin vastuskalorimetrillä selvitetään vastuksissa tapahtuvat tehohäviöt. Kalorimetrin kotelon 3D-malli on esitetty kuvassa 6.3.



Kuva 6.3. Kotelon 3D-malli. Testattavaa magneettista toroidiydintä on mallinnettu kuvassa toisiksi alimpana olevalla, donitsin muotoisella kappaleella.

3D-mallin valmistuttua kotelo tulostetaan kolmessa osassa, joita ovat pohja, kansi ja veden ulostulon liitin. Kaikki osat jälkikäsitellään ja ennen yhteen liimaamista toroidiydin asetetaan pohjan ja kannen väliin. Pohjassa ja kannessa on pienet kiinnikkeet, joiden avulla toroidi pysyy kotelon sisällä paikallaan.

Vastuskalorimetrissä käytettävät lämpötila-anturit ja vesiletkut voidaan liittää helposti myös tähän koteloon, jonka jälkeen kalorimetri on valmis mittauksia varten. Valmis kalorimetri on esitetty kuvassa 6.4 käämitysten ja eristemateriaalin kanssa, sekä ilman niitä. Eristemateriaalin tehtävänä on vähentää käämin lämpenemisestä aiheutuvaa lämpövirtaa kotelon sisään.



Kuva 6.4. Valmis kalorimetri. Vasemmassa kuvassa kalorimetri on suojattu vain teipillä. Oikeassa kuvassa se on mittaustilanteessa, jolloin sen ympärillä on eriste ja käämitykset.

6.2 Mittausjärjestelmän esittely

Mittausjärjestelmä koostuu mittauksissa käytettävästä kotelosta riippuen hieman erilaisista laitekoonpanoista. Vastuskalorimetrin mittauksissa, vastuksien tehohäviöiden selvittämiseksi sähköisillä suureilla vastuksien sarjaankytkennän virtaa mitataan yleismittarilla. Toroidiydintä mitattaessa tehohäviöt saadaan mitattua sähköisillä suureilla kuvan 4.1 periaatteella toimivalla mittausjärjestelmällä. Kalorimetriset mittaukset ovat molempien osalta kuitenkin samanlaiset: niissä käytetään kahta lämpötila-anturia mittaamaan veden lämpötilaa ennen koteloa ja kotelon jälkeen.

6.2.1 Mittauslaitteet ja niiden toiminta

Mittausjärjestelmässä kiertävän veden massavirran arvoa säädetään massavirtasäätimellä. Työssä käytettävä massavirtasäädin on hollantilaisen Bronkhorst High-Tech -yrityksen valmistama mini CORI-FLOW™ M13V14I -massavirtasäädin, jonka avulla virtauksen suuruutta voidaan säätää välillä 0,001-0,1 g/s. Massavirran säätäminen tapahtuu laitteen mukana toimitetun tietokoneohjelman avulla. [17]

Työssä käytettävät lämpötila-anturit ovat standardimallisia vastuslämpötila-antureita, joiden resistanssia voidaan mitata neljällä johtimella suurimman mahdollisen tarkkuuden saavuttamiseksi. Tarkkuuden merkitys korostuu sitä enemmän, mitä pienempiä tehoja mitataan. Antureiden resistanssin riippuvuus lämpötilasta yli 0 °C lämpötilassa voidaan esittää kaavalla

$$R(T) = R_0(1 + AT + BT^2), \quad (6.1)$$

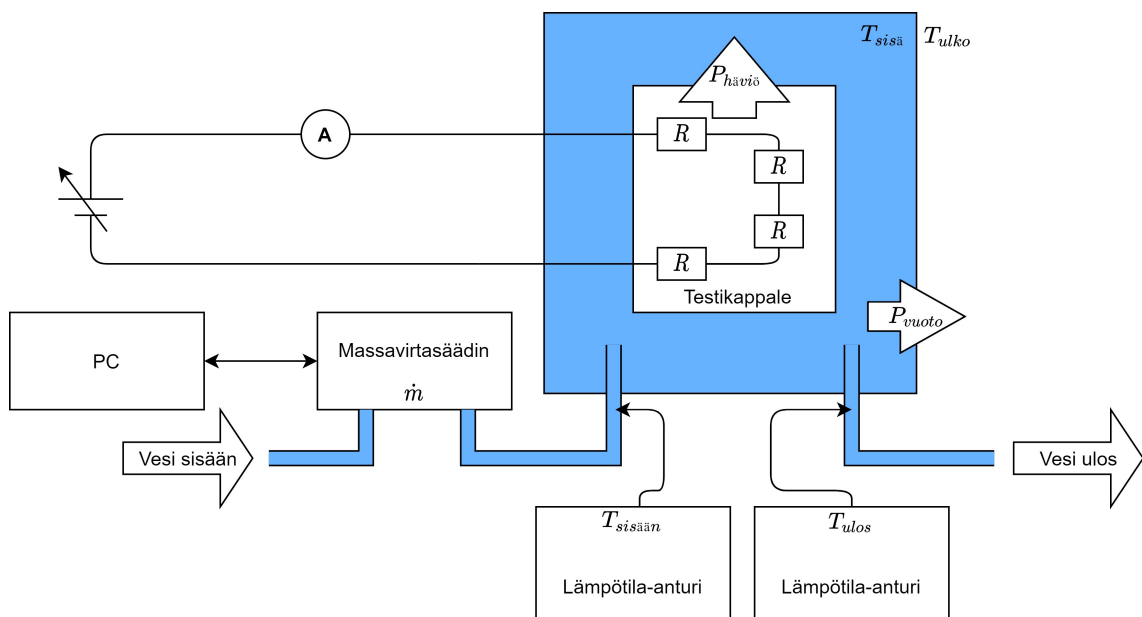
missä $R(T)$ on lämpötila-anturin resistanssi lämpötilassa T , R_0 on lämpötila-anturin resistanssi 0 °C lämpötilassa, A ja B ovat vakioita joiden arvot ovat $A = 3,9083 \cdot 10^{-3}\text{ °C}^{-1}$ ja $B = -5,775 \cdot 10^{-7}\text{ °C}^{-2}$. [18, s. 2384] Antureiden resistanssi R_0 on $100\ \Omega$, joten antureilla mitatuksi lämpötilaksi saadaan kaavan 6.1 avulla

$$T = \frac{\sqrt{BR(T) + 25(A^2 - 4B)} - 5A}{10B}. \quad (6.2)$$

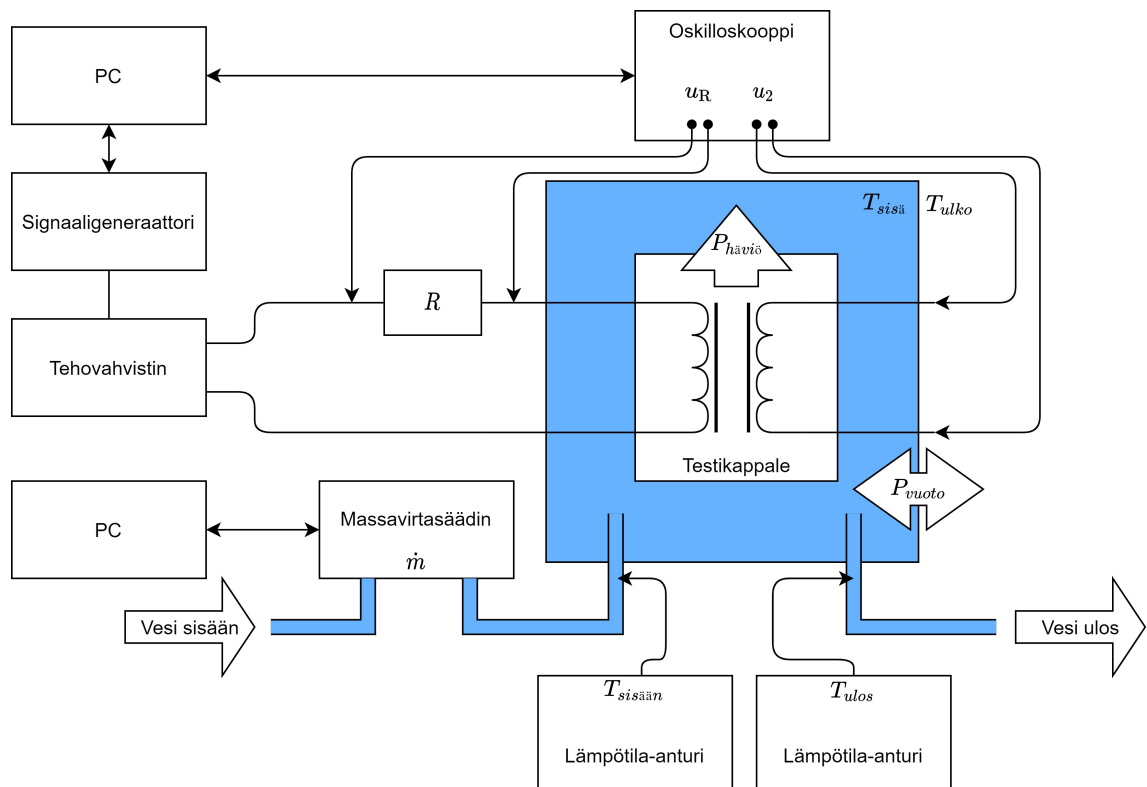
Laskemalla molempien antureiden mittaamat lämpötilat, saadaan selville kalorimetrissä kiertävän nesteen lämpenemä, jota tarvitaan tehohäviöiden laskemiseksi kaavalla (5.1). Antureiden resistansseja mitataan kahdella Keysight 34461A -digitaalisella yleismittarilla.

6.2.2 Järjestelmä kokonaisuutena

Sekä vastuksia että toroidiydintä mitattaessa käynnissä on samanaikaisesti aina kaksi eri mittausta: sähköisillä suureilla mittaus ja kalorimetrinen mittaus. Sähköisten suureiden mittauksista saatavat tulokset toimivat vertailupohjana kalorimetrisillä mittauksilla saataville tuloksille. Mittausjärjestelmien havainnollistavat kaaviokuvat on esitetty kuvissa 6.5 ja 6.6 ja todelliset mittausjärjestelmät kuvissa 6.7 ja 6.8.



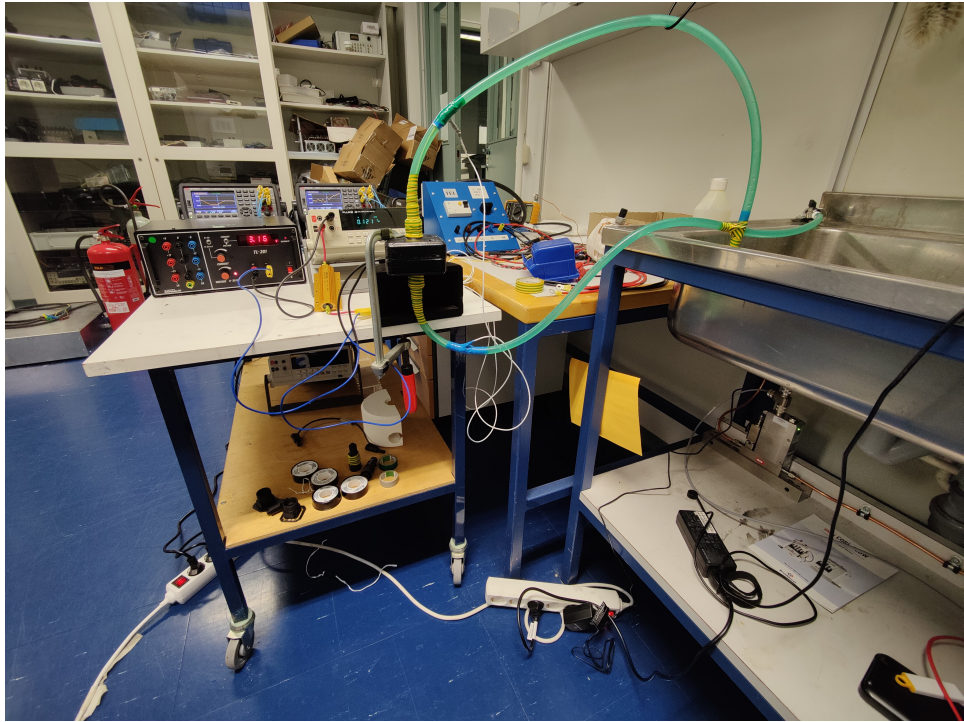
Kuva 6.5. Havainnollistava kaavio vastuskalorimetrin mittausjärjestelmästä. Kaksisuuntainen nuoli kuvaa tietoliikennettä ja yksisuuntaiset nuolet mittausta.



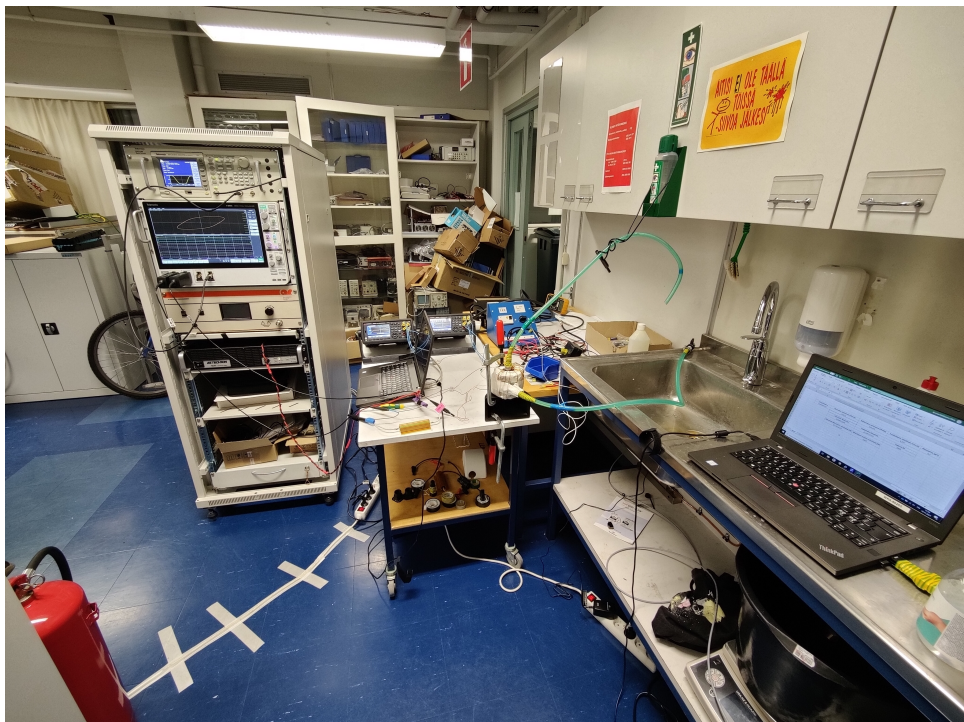
Kuva 6.6. Havainnollistava kaavio toroidin mittausjärjestelmästä. Kaksisuuntaiset nuolet kuvaavat tietoliikennettä ja yksisuuntaiset nuolet mittauksista.

Vaikka havainnekuviosta ei välttämättä käy ilmi, testikappaleet ovat molemmassa mittausjärjestelmissä vedessä. Ensiö- ja toisiokäämi taas ovat toroidiydintä mitattaessa kalorimetrin ulkopuolella. Kuvassa 6.6 näkyvä nuoli P_{vuoto} on kaksisuuntainen, sillä käämin lämmittäessä kalorimetriä ulkopuolelta käsin, lämpöä voi virrata myös kalorimetriin sisälle. Vastuksilla mitattaessa lämpöä vuotaa vain kalorimetrin ulos, sillä jäähdytysnesteen lämpötila on käytännössä aina suurempi kuin kalorimetriä ympäröivän huoneilman lämpötila.

Kuvan 6.8 vasemmassa reunassa sijaitsevassa liikuteltavassa hyllyssä on oskilloskooppi, signaaligeneraattori sekä tehovahvistin, joita käytetään toroidiytimen tehohäviöiden mittaamiseen sähköisillä suureilla. Lämpötila-antureiden mittaamiseen käytettävät digitaaliset yleismittarit sijaitsevat pöydän takaosassa. Massavirtasäädin sijaitsee tiskialtaan alla olevalla tasolla. Se on liitetty hanan pesukoneliitäntään ja siitä on viety tiskialtaan päälle kupariputkella veden ulostulo, johon kalorimetrin vesiletku on liitetty.



Kuva 6.7. Mittausjärjestelmä vastusten tehohäviöiden mittaamiseen.

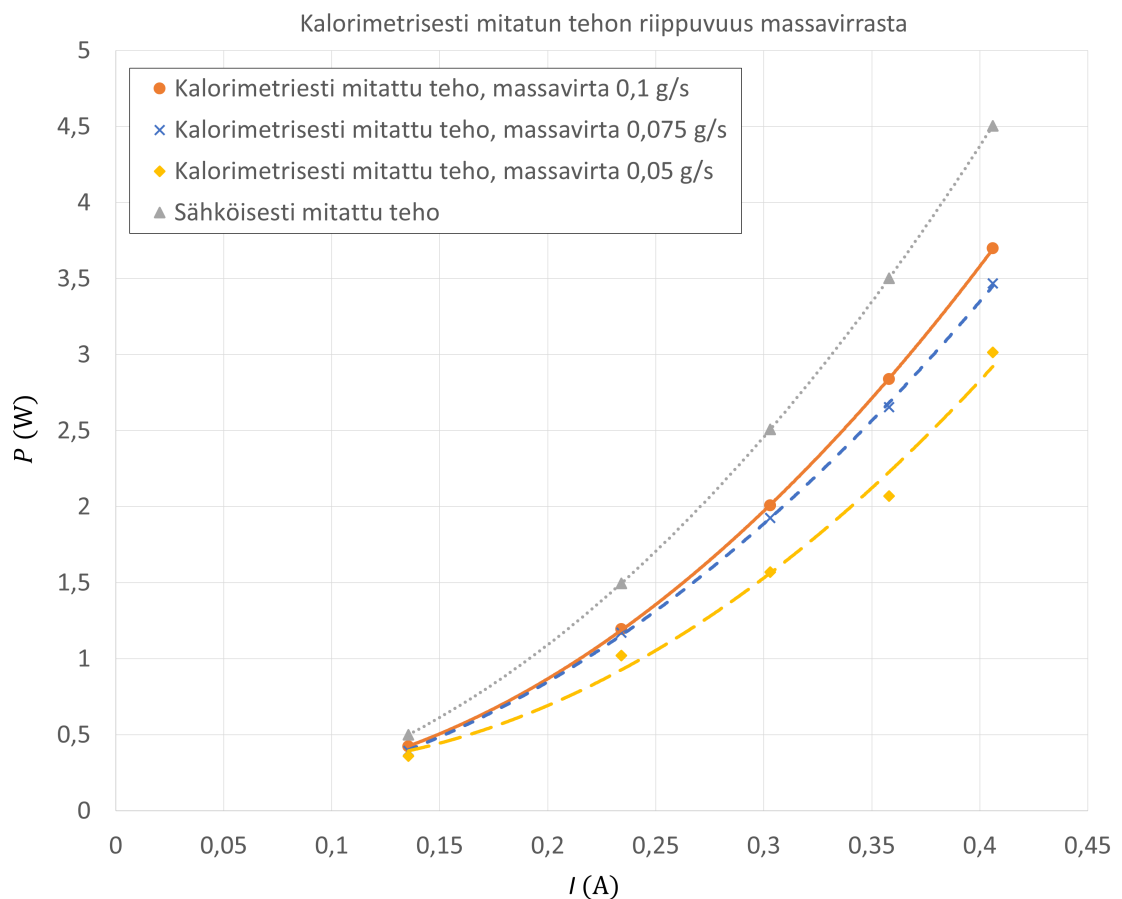


Kuva 6.8. Mittausjärjestelmä toroidiytimen tehohäviöiden mittaamiseen.

7. MITTAUSTULOKSET

7.1 Vastuskalorimetri

Vastuskalorimetrillä ja sähköisillä suureilla mitatut vastusten tehohäviöt on esitetty kuvassa 7.1 suhteessa vastusten syöttövirtaan. Mittaukset toistettiin kolmella eri massavirralla.

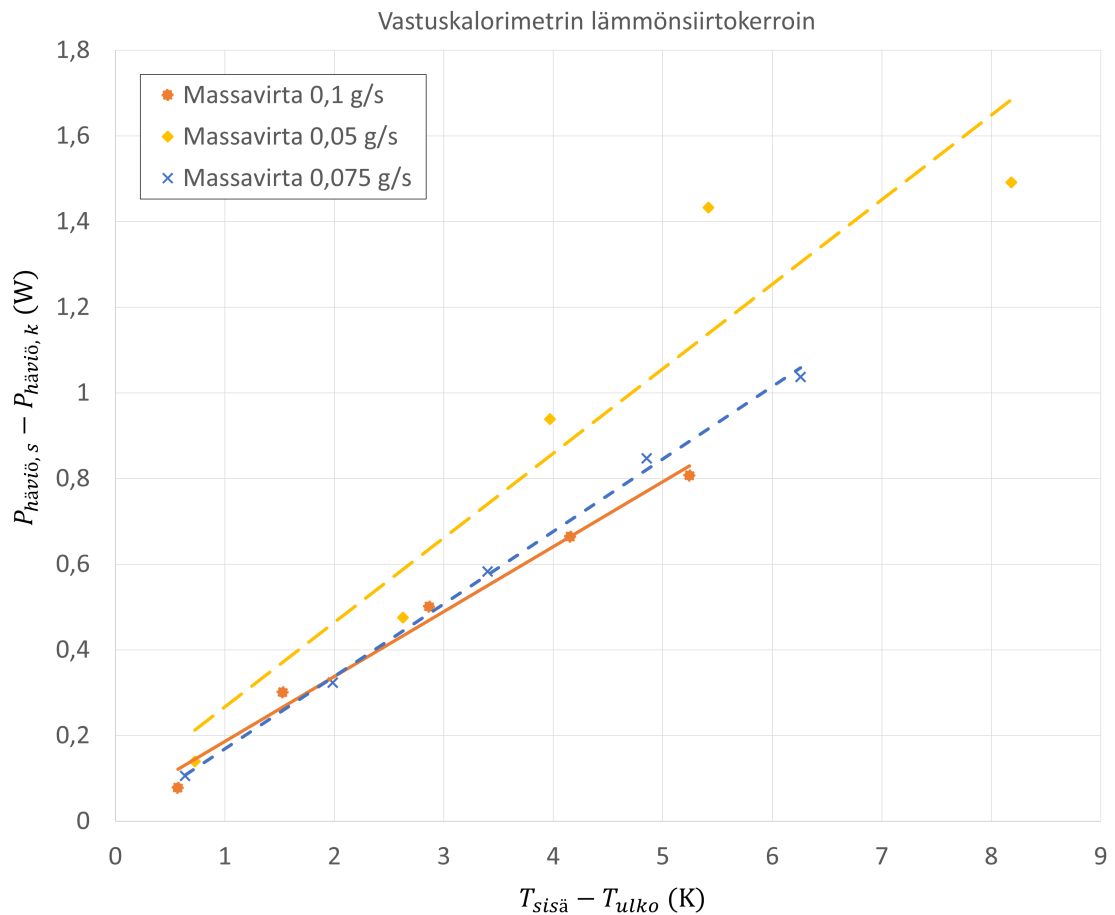


Kuva 7.1. Vastusten tehohäviöt kalorimetrisillä ja sähköisillä suureilla mitattuna. Pystyakselilla on mitattu teho ja vaaka-akselilla on vastusten syöttövirta.

Mittaustuloksista käy ilmi kalorimetrisesti mitatun tehon riippuvuus massavirrasta. Mitä pienemmällä massavirralla mittaukset suoritetaan, sitä suurempi on ero kalorimetrisillä mittauksilla ja sähköisillä mittauksilla saatujen tuloksien välillä. Näin ollen seinämien läpi

vuotava lämpövirta P_{vuoto} on sitä suurempi, mitä pienemmällä massavirralla mittaukset suoritetaan.

Kalorimetrin lämmönsiirtokerroin voidaan selvittää asettamalla koordinaatiston vaaka-akselille sisä- ja ulkolämpötilan erotus, pystyakselille sähköisillä suureilla mitattujen tehohäviöiden ja kalorimetrisesti mitattujen tehohäviöiden erotus ja laskemalla pisteisiin asetetun suoran kulmakerroin. Ulkopuolinen lämpötila saadaan yksinkertaisesti mittaamalla laboratorion huonelämpötila, mutta kalorimetrin sisällä vallitsevaa lämpötilaa ei ole mahdollista mitata tarkasti, sillä se ei ole tasainen kaikkialla. Sitä voidaan kuitenkin arvioida laskemalla kalorimetrin jäähdytysveden ulostulossa ja sisääntulossa mitattujen lämpötilojen keskiarvo. Pisteisiin asetettu suora on esitetty jokaiselle mittaussarjalle kuvassa 7.2.



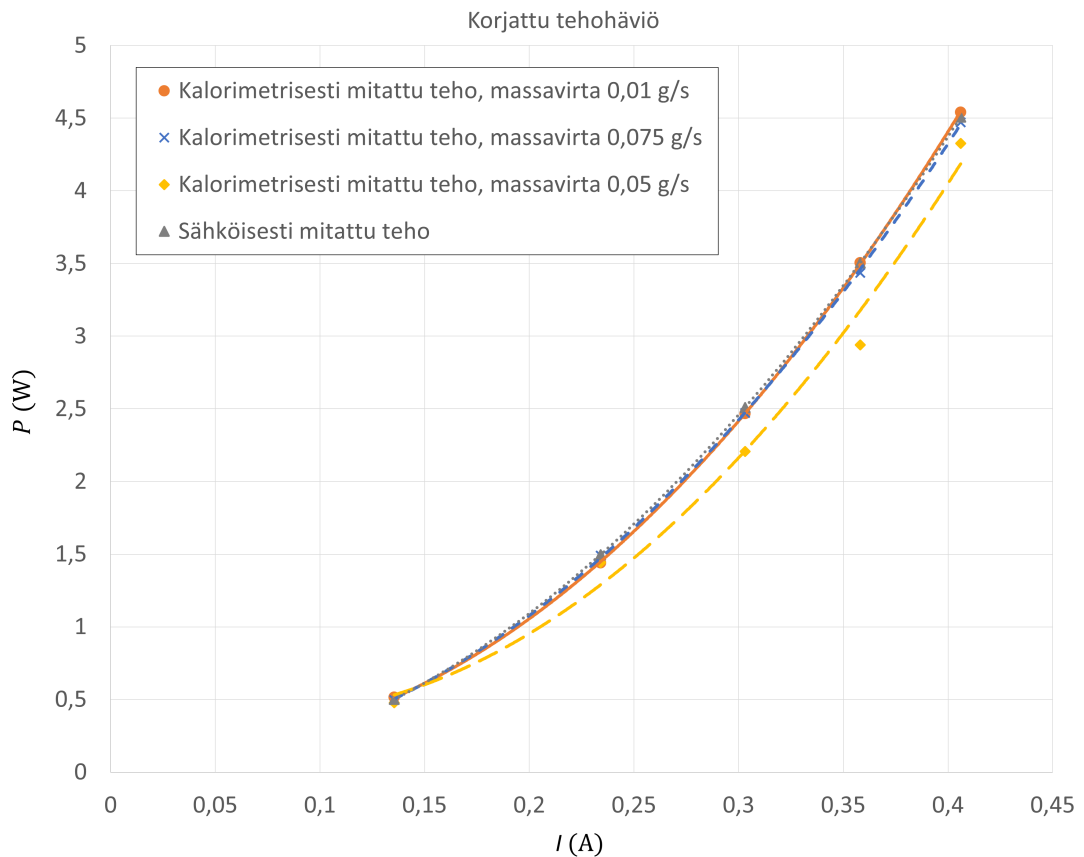
Kuva 7.2. Vastuskalorimetrin lämmönsiirtokerroin visualisoituna. Pystyakselilla on sähköisillä suureilla mitatun tehohäviön ja kalorimetrisesti mitatun tehohäviön erotus. Vaaka-akselilla on kalorimetrin sisä- ja ulkolämpötilan erotus.

Kuvista 7.1 ja 7.2 nähdään, että 0,05 g/s massavirralla suoritetun mittaussarjan tuloksissa on paljon hajontaa. Tämä johtuu todennäköisesti mittauksen vaikeasta luonteesta, sillä niin pienellä massavirralla mittaukset kestävät todella pitkään, eivätkä mitattavat

lämpötila-arvot tasaannu helposti, mikä vaikeuttaa lopullisen mittaustuloksen määrittämistä. Koska kahdella suurimmalla massavirralla saadut arvot asettuvat kuvassa 7.2 lähes päällekkäin ja ne ovat sähköisillä suureilla saatuihin mittauksiin verrattuna tarkimmat, määritetään kulmakertoimeksi kyseisten suorien kulmakertoimien keskiarvo. Pienimmällä massavirralla saatuja tuloksia ei oteta tässä huomioon, sillä ne ovat selvästi kahdesta muusta mittaussarjasta poikkeavia.

Kulmakertoimien laskeminen tapahtuu kuvan 7.2 suorista Excelin LINREGR -fuktiolla ja niiden keskiarvoksi saadaan $0,16036 \frac{W}{K}$, mikä on kalorimetrin lämmönsiirtokerroin. Koska kahdella suurimmalla massavirralla saadut datapisteet asettuvat suorille, joiden kulmakertoimet ovat lähes samat, voidaan olettaa lämmönsiirtokerroimen olevan riippumaton massavirrasta. Näin ollen kaavan 5.2 mukaan, kalorimetrin seinämien läpi vuotava lämpö on lineaarisesti riippuvainen vain kalorimetrin sisä- ja ulkolämpötilan erosta.

Todellinen vastuksissa tapahtuva tehohäviö saadaan nyt selville summaamalla kalorimetrin seinämien läpi vuotava lämpövirta P_{vuoto} ja kalorimetrillä mitattu tehohäviö $P_{\text{häviö, k}}$. Korjatut tulokset on esitetty jokaiselle mittaussarjalle kuvassa 7.3.

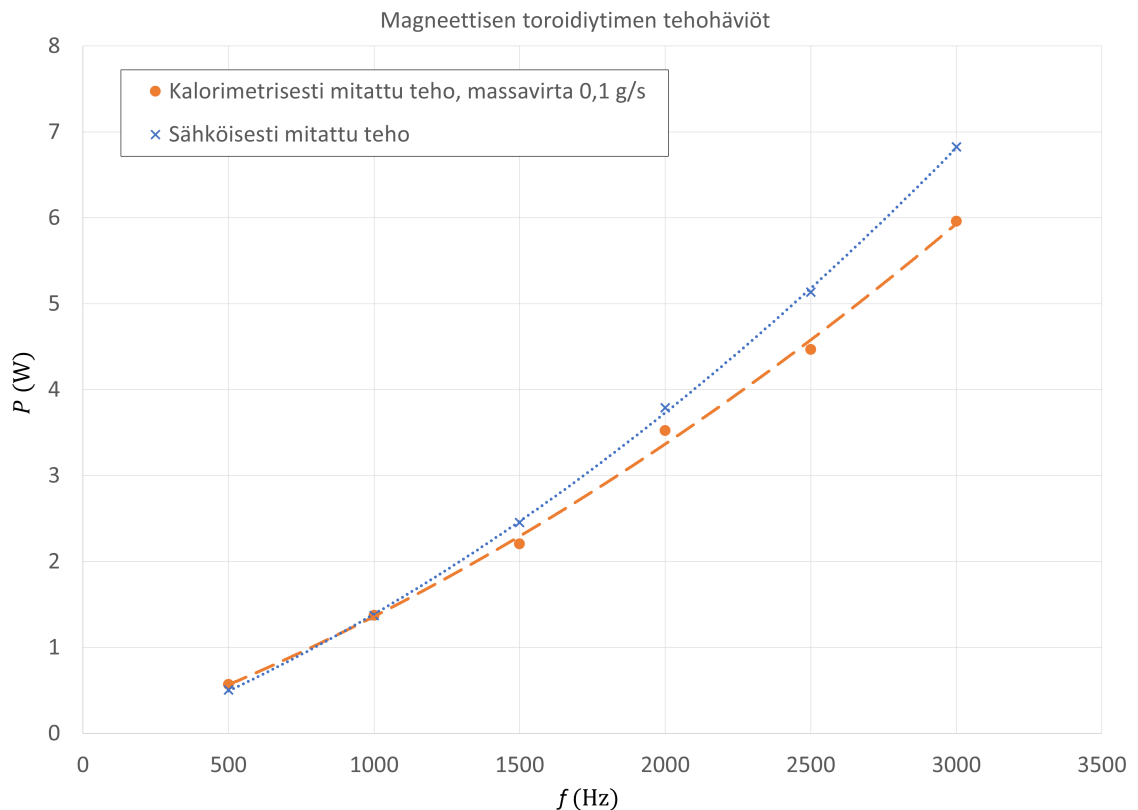


Kuva 7.3. Kalorimetrillä mitattu tehohäviö, johon on lisätty numeerisesti päätelty lämpövuoto. Pystyakselilla on mitatun tehon ja lämpövuodon summa. Vaaka-akselilla on vastusten syöttövirta.

Kuvasta nähdään, miten kahdella suurimmalla massavirralla saadut mittaussarjat asetuvat siististi sähköisillä suureilla mitatun mittaussarjan kuvaajan päälle. Kolmas mittaussarja jää hieman niiden alapuolelle, edellä mainitusta mittaustuloksien hajonnasta ja poikkeavuudesta johtuen. Näiden tulosten perusteella vastuskalorimetrin avulla voitaisiin nyt mitata jonkin tuntemattoman kappaleen tehohäviöt, koska kotelon lämmönsiirtokerroin tiedetään.

7.2 Magneettinen ydin

Magneettisen toroidiytimen tehohäviöt kalorimetrillä ja sähköisillä suureilla mitattuna on esitetty kuvassa 7.4 taajuuden funktiona. Tehohäviöt mitattiin kuudella eri ensiökäämin taajuuden arvolla, välillä 500 Hz-3000 Hz. Tätä suuremmilla taajuuksilla ensiökäämi ja sen etuvastus olisivat kuumenneet liikaa ja tätä pienemmillä taajuuksilla mittaustarkkuus ei olisi enää riittänyt. Mittaukset suoritettiin 0,1 g/s massavirralla, koska vastuskalorimetrin mittausten perusteella sillä saadaan tarkimmat tulokset.



Kuva 7.4. Magneettisen toroidiytimen tehohäviöt sähköisillä suureilla ja kalorimetrisesti mitattuna. Pystyakselilla on mitattu teho ja vaaka-akselilla ensiökäämin taajuus.

Mittaustuloksista nähdään, kuten vastuskalorimetrinkin tapauksessa, että tehohäviöiden kasvaessa myös kotelon läpi vuotanut lämpövirta kasvaa. Edellisistä mittauksista poike-

ten, nyt voidaan kuitenkin havaita myös lämpövirta kalorimetrin sisälle, sillä alle 1000 Hz taajuudella kalorimetrisesti mitatut tehohäviöiden arvot vaikuttavat suuremmilta kuin sähköisillä suureilla saadut arvot. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että noin pienillä tehoilla kalorimetrin sisällä kiertävä vesi lämpeää niin vähän, että kalorimetrin ulkopuolella vallitseva lämpötila on suurempi. Ympäröivää lämpötilaa kasvattaa kalorimetrin ympärille kierretyn käämin lämpeäminen.

8. JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaukset ja niistä saadut tulokset antoivat monia mahdollisia kehityskohteita magneettisen toroidiytimen kalorimetrisille mittauksille. Mittauksissa auttaisi etenkin mahdollisuus säädellä massavirran lisäksi tarkasti myös kalorimetriin syötettävän veden lämpötilaa. Se mahdollistaisi lämpövuodon minimoinnin, kun veden lämpötila säädettäisiin yhtä suureksi kalorimetrin ulkopuolisen ympäristön lämpötilan kanssa. Mittauksissa oli havaittavissa myös sisääntulevan veden lämpötilan jatkuvaa vaihtelua, mikä hankaloitti myös ulostulossa mitatun veden lämpötilan tasaantumista.

Vaikeammin toteutettavia kehityskohteita olisivat jäähdytykseen käytettävän veden korvaaminen pienemmän ominaislämpökapasiteetin omaavan nesteen kanssa ja kalorimetrin kotelon muuttaminen kaksiseinäiseksi. Jäähdytysnesteen ominaislämpökapasiteetin pienentyessä nesteen lämpenemää saataisiin kasvatettua, jolloin pienempien tehojen mittaaminen olisi tarkempaa. Tämä vaatisi kuitenkin oman järjestelmän jäähdytysnesteen kierrättämiseen ja lämpötilan kontrollointiin. Kalorimetrin kotelon rakentaminen kaksiseinäiseksi mahdollistaisi ulomman kammion lämpötilan kontrolloinnin, jolloin lämpövuoto jäähdytysnesteestä pois saataisiin minimoitua.

Magneettista toroidiydintä mitattaessa suurimmaksi ongelmaksi muodostui käämeistä aiheutunut lämpövuoto kalorimetriin sisälle, sillä vaikka vastuskalorimetrin avulla esitetyllä lämmönsiirtomallilla voidaan estimoida lämmön siirtyminen kalorimetrin seinämien läpi, käämeistä johtuvaa lämmönsiirtoa ei voida laskea samalla menetelmällä. Tämä hankaloittaa mittausjärjestelmän soveltamista kaupallisille pienihäviöisille ytimille, joiden häviöt jäävät pienemmiksi kuin ensiökämin häviöt.

Työssä rakennettiin onnistuneesti mittausjärjestelmä, jolla on mahdollista arvioida suuntaantavasti magneettisen toroidiytimen tehohäviöt. Jotta mittausjärjestelmä soveltuvuusi pienihäviöisten kaupallisten ydinten mittaamiseen, tulisi edellä esitetyt ongelmat ratkaista ja kehitystyötä viedä eteenpäin. Tämä työ kuitenkin täytti tavoitteensa osoittamalla suunnan mittausjärjestelmän kehitystyölle ja tuomalla paljon lisätietoa sen mahdollisuuksista.

LÄHTEET

- [1] Georgilakis, P. S. *Spotlight on Modern Transformer Design*. 1. painos. Springer London, 2009. 427 s.
- [2] McLyman, C. W. T. *Transformer and Inductor Design Handbook*. 4. painos. CRC Press, 2017. 678 s.
- [3] Erickson, R. W. *Fundamentals of Power Electronics*. 1. painos. Springer, 2013. 783 s.
- [4] Sears, F. W., Zemansky, M. W., Ford, A. L., Young, H. D. ja Freedman, R. A. *Sears and Zemansky's university physics: with modern physics*. 14. painos. Pearson, 2016. 1573 s.
- [5] Guru, B. S. *Electromagnetic field theory fundamentals*. 2. painos. PWS Pub., 2004. 699 s.
- [6] Mansfield, M. M. *Understanding physics*. 3. painos. Wiley, 2020. 656 s.
- [7] Salam, M. A. *Electromagnetic Field Theories for Engineering*. 1. painos. Springer Singapore, 2014. 315 s.
- [8] Soong, W. L. BH Curve and Iron Loss Measurements for Magnetic Materials. *Power Engineering Briefing Note Series 5* (2008), s. 3–4.
- [9] Kazimierczuk, M. K. *High-frequency magnetic components*. 2. painos. Wiley Blackwell, 2014. 757 s.
- [10] Coey, J. M. D. *Magnetism and magnetic materials*. 1. painos. Cambridge University Press, 2010. 614 s.
- [11] Fiorillo, F. Measurements of magnetic materials. *Metrologia* 47.2 (2010), s. 114–142.
- [12] Mu, M., Li, Q., Gilham, D. J., Lee, F. C. ja Ngo, K. D. T. New Core Loss Measurement Method for High-Frequency Magnetic Materials. *IEEE transactions on power electronics* 29.8 (2014), s. 4374–4381.
- [13] Vo, A.-T., Fassenet, M., Kedous-Lebouc, A., Blache, F., Boudinet, C. ja Vaillant, M.-P. Novel Adaptive Controller for Effective Magnetic Measurement Under Arbitrary Magnetization. *IEEE transactions on industrial electronics (1982)* 67.11 (2020), s. 9841–9850.
- [14] Christen, D., Badstuebner, U., Biela, J. ja Kolar, J. W. Calorimetric Power Loss Measurement for Highly Efficient Converters. *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA -* (2010), s. 1438–1445.
- [15] Sarge, S. M., Höhne, G. W. H. ja Hemminge, W. *Calorimetry: Fundamentals, Instrumentation and Applications*. 2. painos. Wiley-VCH Verlag, 2014. 300 s.

- [16] Xiao, C., Chen, G. ja Odendaal, W. G. H. Overview of Power Loss Measurement Techniques in Power Electronics Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications* 43.3 (2007), s. 657–664.
- [17] *Bronkhorst mini CORI-FLOW™ M13V14I, Low Flow Coriolis Mass Flow Controller*. 2021. URL: <https://www.bronkhorst.com/int/products/liquid-flow/mini-cori-flow/m13v14i/> (viitattu 26. 11. 2021).
- [18] Boguhn, D. ja Koepke, M. Typical R(T90) Characteristics of Platinum Thin-Film Resistance Thermometers in the Temperature Range from 50 °C to +660 °C. *International journal of thermophysics* 32.11-12 (2011), s. 2379–2387.