ALKALIELEKTROLYYSIN PAINEENHALLINTA PWM-OHJATUILLA VENTTIILEILLÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

Sähkötekniikan kandidaatinohjelma

2026

Anton Kurko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Vesa Ruuskanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Anton Kurko

Alkalielektrolyysin paineenhallinta PWM-ohjatuilla venttiileillä

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2026

33 sivua, 20 kuvaa, 4 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Vesa Ruuskanen

Avainsanat: alkalielektrolyysi, paineenhallinta

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin alkalielektrolyysin paineenhallinnan toteutusta PWM-ohjatuilla venttiileillä. Työn tarkoituksena oli selvittää kuinka paineenhallinta on toteutettavissa yksinkertaisesti sekä tehokkaasti ja millaiset venttiilit ja säätötekniikka soveltuvat parhaiten käyttötarkoitukseen. Paineenhallinta on oleellinen osa elektrolyysiprosessia, sillä liian suuret paine-erot anodin ja katodin välillä voivat aiheuttaa vaarallisia kaasuyhdisteitä ja paine-ero anodin ja katodin välillä tulisikin pysyä alle 10mbar alueella.

Työn kirjallisuuskatsauksessa katsottiin läpi erilaisia venttiilejä sekä säätömenetelmiä elektrolyysiprosessin paineenhallintaa varten. Säätöventtiilien todettiin olevan toimivampi vaihtoehto paineenpitoventtiilien yli niiden toimintaperiaatteen takia. Toimivaksi säätöventtiilityypiksi valikoitui solenoidiventtiili sen nopean ja tarkan toiminnan takia. Venttiilien säätimeksi todettiin riittävän PI-säädin sen yksinkertaisuuden sekä helppokäyttöisyyden takia.

Työn ensimmäisissä mittauksissa tutkittiin venttiilien ja säädön käyttäytymistä vakiopaineella ja niiden kyvykkyyttä ohjata ja säätää massavirtaa. Työn toisissa mittauksissa käytetyt venttiilit sekä säädin kytkettiin elektrolyysitestipenkkiin, ja tutkittiin kuinka tehokkaasti laitteistot kykenevät säätämään painetta sekä paine-eroa oikeassa elektrolyysiprosessissa. Työn tuloksissa todettiin, että solenoidisäätöventtiilit ja yksinkertainen PI-säädin ovat riittävät alkalielektrolyysin paineenhallintaan laboratorio-olosuhteissa. Säätöalue oli varsin tarkka ja pystyi pitämään paine-eron selkeästi alle 10 mbar.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Anton Kurko

Alkaline electrolysis pressure control with PWM-controlled valves

Electrical engineering bachelor's thesis

2026

33 pages, 20 figures, 4 tables and 2 appendices

Examiner: Associate professor Vesa Ruuskanen

Keywords: alkaline electrolysis, pressure control

This bachelor's thesis investigated alkaline electrolysis pressure control with PWM-controlled valves. The objective of this thesis was to figure out how the pressure control could be implemented in a simple and effective manner and what kind of valves and control method are best suited for the purpose. Pressure control is a major part of an electrolysis process because large pressure differences between the anode and cathode can cause dangerous gas mixtures to occur. Ideally the pressure differential should remain under 10 mbar.

The literature review looked at different kinds of valves and control methods for pressure control in an electrolysis process. Control valves were deemed to be the better option over pressure regulator valves due to their working mechanisms. Solenoid valves were found to be a suitable type of control valve for their fast and precise operation. A PI controller was deemed to be enough for the valves control for it simplicity and ease of use.

In the first measurements the valves and control methods behaviour under constant pressure was examined as well as their ability to regulate mass flow. In the second measurements the valves and controller were used in an electrolysis test bench to examine how efficiently they can regulate pressure, pressure differences and mass flow in a real electrolysis process. The results of the thesis found that solenoid control valves and a simple PI-controller are applicable for electrolysis pressure control in laboratory conditions. The control range was precise and capable of keeping the pressure difference under 10 mbar.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

K_p	vahvistuskerroin	
T_i	integrointiaika	[s]

Lyhenteet

PWM	Pulssinleveysmodulaatio (eng. Pulse Width Modulation)
MPC	Mallipohjainen ennustava säätö (eng. Model Predictive Control)
SMC	Liukutilan säätö (eng. Sliding Model Control)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

Ilmoitukset

1 Johdanto 7
2 Teoria 9
2.1 Venttiilityypit 9
2.2 Säätötyypit 11
3 Mittaukset 14
3.1 Mittaukset paineilmalla 14
3.2 Mittaukset elektrolyysitestipenkillä 16
4 Tulokset 19
4.1 Tulokset yhden venttiilin paineilmamittauksista 19
4.2 Tulokset kahden venttiilin paineilmamittauksista 22
4.3 Tulokset 1A testipenkistä 24
5 Yhteenveto 30
Lähteet 31

Liite 1. El2535 keskikohdan mittaus

Liite 2. El2502 keskikohdan mittaus

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Anton Kurko ei ole käyttänyt tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä.

Vastuu

Kirjoittaja, Anton Kurko, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Viime vuosikymmenien ilmaston nopea lämpeneminen ja sitä varten asetetut ilmastotavoitteet ovat aiheuttaneet muutosta energia-alalla. Yhä enempi taho pyrkii luopumaan fossiilisista polttoaineista ja hyödyntää sekä kehittää enemmän uusiutuvia energianlähteitä. Nämä energianlähteet kuten tuuli- ja aurinkovoima tuovat omia haasteitaan niiden vaihtelevan tuotannon takia. Tämän vuoksi myös energian varastoinnin merkitys on kasvanut suuresti. Yksi mahdollinen tapa varastoida energiaa puhtaasti on vihreä vety, joka tarkoittaa uusiutuvilla energianlähteillä tuotettua vetyä. Tämä vety tuotetaan elektrolyysiprosessilla, joka tarkoittaa veden hajottamista hapeksi ja vedyksi sähkön avulla (Ursua, et al., 2012).

Alkalielektrolyysi on elektrolyysiteknologioista vanhin ja kehittynein ja on sen vuoksi hyvin luotettava sekä turvallinen. Vihreän vedyn tuotantomenetelmistä alkalielektrolyysi onkin kaupallisesti käytetyin muoto maailmanlaajuisesti, ja se soveltuu hyvin laajaan vedyntuotantoon teollisella tasolla. (Ursua, et al., 2012) Alkalielektrolyysin etuna on myös laitteistojen halvemmat materiaalikustannukset muihin elektrolyysityyppeihin verrattuna. Sen huonoja puolia ovat alhaisempi hyötysuhde sekä laitteistojen suuret kokoluokat verrannollisesti muihin elektrolyysityyppeihin. (Emam, et al., 2024) Vaikka elektrolyysiteknologiat ovat hyvin kehittyneitä, tuottavat ne silti vain 0.1 % maailman kaikesta vedyntuotannosta (Tüysüz, 2024). Elektrolyysin laajaa käyttöönottoa varten täytyy laitteistojen hyötysuhteita kehittää sekä valmistuskustannuksia laskea entisestään, jotta teknologian käyttö olisi rahallisesti kannattavaa ja että sillä voitaisiin tuottaa tehokkaasti tulevaisuuden vaatimia määriä vetyä.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään alkalielektrolyysilaitteiston paineenhallintaa pulssinleveysmodulaatiolla-ohjatuilla (myöh. PWM) venttiileillä. Työn tarkoituksena on tutkia, kuinka alkalielektrolyysilaitteiston paineenhallinta saadaan toteutettua yksinkertaisella ja luotettavalla tavalla sekä millaiset venttiilit ja säätötyyppi soveltuvat parhaiten kyseiseen tehtävään. Työssä käytettävään alkalielektrolyysilaitteistoon oltiin jo ennen työn aloittamista valittu käytettävät venttiilit, sekä venttiilien säädin. Työssä käydään läpi kirjalliskatsauksena muita mahdollisia vaihtoehtoja paineenhallinnan toteuttamiseksi

venttiilien ja niiden säädön osalta. Työtä varten toteutettiin valituilla venttiileillä ja ohjaustyypillä mittauksia ensin paineilmaa käyttäen, jossa tutkittiin venttiilien ja säädön toimintaa sekä testattiin, millainen terminaali soveltuu parhaiten venttiilien ohjaamiseen. Tämän jälkeen mittauksia suoritettiin elektrolyysilaitteistolla, jossa testattiin miten valitut laitteet käyttäytyvät oikeassa elektrolyysiprosessissa. Saatuja tuloksia käydään läpi analysoimalla saatua mittausdataa ja pohditaan ovatko mittauksissa käytetyt venttiilit sekä säätötyyppi soveltuvia alkalielektrolyysin paineenhallintaa varten.

2 Teoria

Paineenhallinta on tärkeä osa alkalielektrolyysin toimintaa. Sillä on etenkin suuri vaikutus elektrolyysiprosessin turvallisuuteen sekä tuotettujen kaasujen puhtauteen. Elektrolyysissä anodin ja katodin, joilla tuotetaan happi- ja vetykaasua, erottaa ohut kalvo, jonka tarkoituksena on estää tuotettujen kaasujen sekoittuminen. Tämä takaa myös sen, ettei mahdollisesti syttymiskelpoisia kaasuseoksia pääse muodostumaan laitteistossa. Kaasujen sekoittumiseen voivat vaikuttaa liian suuri paine-eron lisäksi kalvon vaurioituminen sekä liian matala nestepinta elektrolyysilaitteiston neste-kaasu erottimissa. (TUKES, 2024) Anodin ja katodin välinen paine-ero ei saisi kasvaa 10 mbar korkeammaksi, sillä muuten kaasujen sekoittuminen kalvon ylitse on liian mittavaa (Schalenbach, et al., 2016). Absoluuttinen paine on myös pidettävä oikealla tasolla, jotta erottimien pinnankorkeus ei laske tai nouse liian korkealle. Paineenhallinnan on oltava siis tarkkaa sekä nopeaa, jotta kaasujen liiallinen sekoittuminen saadaan vältettyä.

2.1 Venttiilityypit

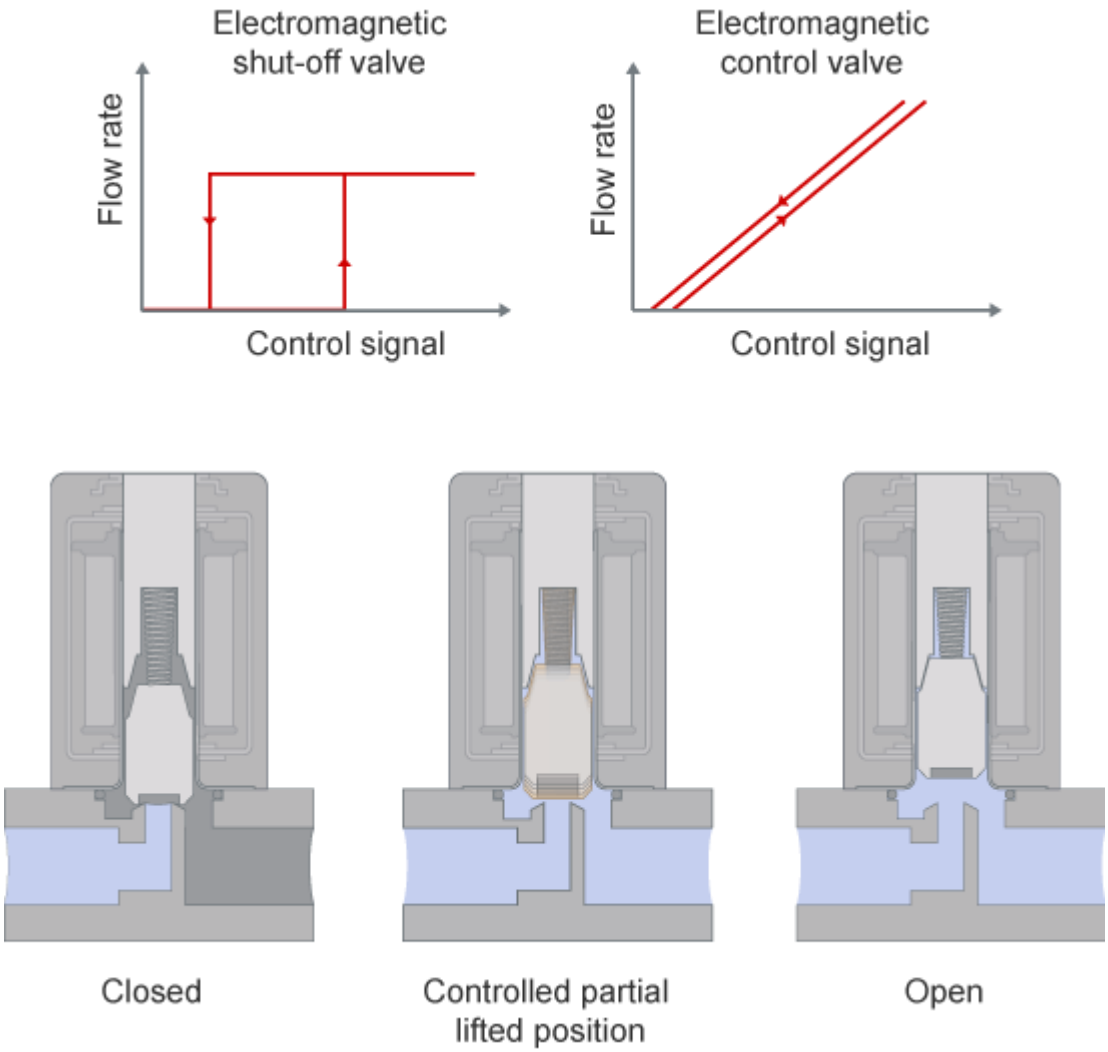
Elektrolyysilaitteistojen painehallintaan on monia vaihtoehtoja venttiilien osalta. Yksi teollisuuden käytetyimmistä venttiileistä on paineenpitoventtiili. Nämä venttiilit toimivat siten, että niiden saadessa signaalin paineen ylittyessä tietyn raja-arvon yli, ne vapauttavat painetta päästämällä nestettä/kaasua lävitseen, kunnes paine on laskeutunut takaisin normaalille tasolle. Alkalielektrolyysi vaatii kuitenkin jatkuvaa dynaamista paineen säätöä anodin ja katodin välillä ja kaasujen on pystyttävä virtaamaan jatkuvasti. Paineenpitoventtiilit eivät ole siis mahdollinen vaihtoehto alkalielektrolyysin paineenhallintaa varten.
Vaativa paineenhallinta on siis parhaiten toteutettavissa säätöventtiileillä. Säätöventtiilien toiminta perustuu jatkuvaan virtauksen arvon ohjaamiseen muuttamalla venttiilin avonaisuutta suhteessa sähköiseen ohjaussignaaliin. Toisin kuin perinteiset auki/kiinni venttiilit, säätöventtiilejä pystytään käyttämään tilassa, jossa ne ovat vain tietyn verran auki. Säätöventtiilit soveltuvatkin parhaiten käyttötarkoituksiin, jossa massa- tai tilavuusvirrat

vaihtelevat. Säätöventtiilien tyyppejä ovat pneumaattisesti-, sähkömoottorin avulla- sekä sähkömagneettisesti ohjatut venttiilit. (Bürkert, s.a.)

Pneumaattisten venttiilien toimintaperiaate perustuu paineilmaan, jota syötetään venttiilin toimilaitteelle ohjaimen antaman signaalin mukaisesti, mikä puolestaan määrittää venttiilin avonaisuuden. Pneumaattiset venttiilit sisältävät usein sähkömagneettisen-, eli solenoidi, venttiilin, joka määrittää venttiilille annetun paineilman määrän. (Gemini Valve, s. a.) Tämän solenoidiventtiilin avulla saadaan pneumaattiset venttiilit toimimaan myös PWM-käyttöisesti. Pneumaattiset venttiilit vaativat myös tukilaitteiston, jolla paineilmaa syötetään itse venttiilille ja jolla varmistetaan paineilman laatu. Pneumaattiset venttiilit ovat turvallisia sekä nopeita, mutta vaativat monimutkaisen laitteiston paineilman syöttämiseen venttiiliin sekä paineilman laadun varmistamiseksi. Pneumaattiset venttiilit ovat myös epätarkempia kuin sähköiset venttiilit. (XINMING, 2025)

Sähkömoottorilla toimivien venttiilien toiminta perustuu moottoriin, joka saa ohjaimelta sähköisen signaalin ja avaa sen mukaan venttiiliä halutun verran. Sähkömoottorikäyttöiset venttiilit ovat usein tarkempia, mutta huomattavasti hitaampia kuin solenoidiventtiilit sekä ovat myös kalliimpia. (Vincer, 2025)

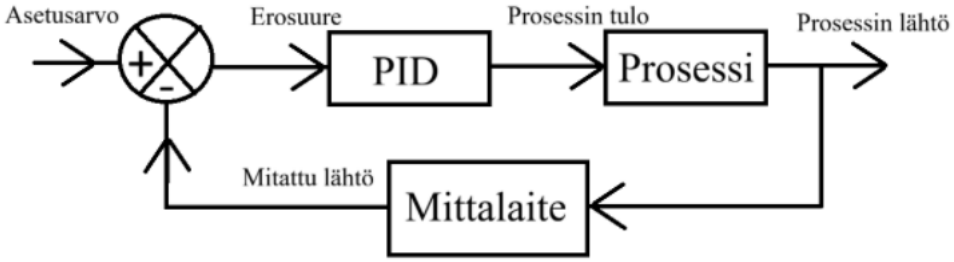
Sähkömagneetti/solenoidi venttiileissä sähkövirta kulkee suoraan venttiilissä sijaitsevalle kelalle ja kelan läpi kulkeva virta muodostaa magneettikentän, joka liikuttaa venttiilissä olevaa kestomagneettia, määrittäen venttiilin avonaisuuden (kuva 2.1). Solenoidiventtiilit ovat nopeampia toimimaan kuin sähkömoottoriset venttiilit ja niiden tarkkuus säätöventtiilinä on hyvä käyttäen PWM-ohjausta. (Tameson, 2024) Alkalielektrolyysilaitteistossa voi tapahtua äkillisiä virtauksen muutoksia ja venttiilikokonaisuuden on pystyttävä reagoimaan näihin muutoksiin mahdollisimman nopeasti ja pitämään paine-eron tasaisena. Solenoidiventtiilien nopeus ja tarkkuus soveltuvat siis hyvin alkalielektrolyysilaitteiston käyttöön.



Kuva 2.1. (Tameson, 2024) Solenoidiventtiilin toiminta

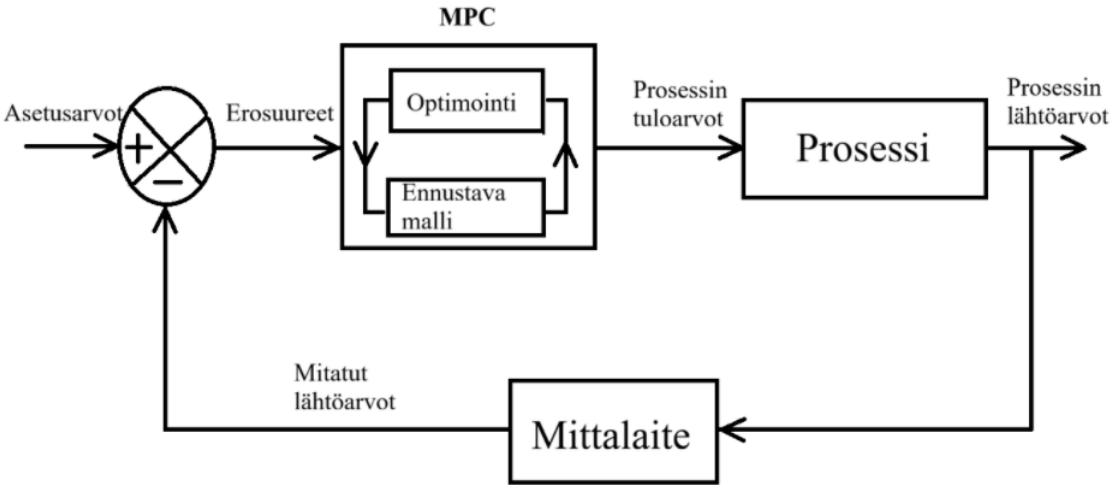
2.2 Säätötyypit

Jotta valitut venttiilit toimivat halutulla tavalla paineenhallinnassa, on niillä oltava jonkinlainen säädin. Säädin toimii osana takaisinkytkettyä säätöpiiriä, jossa sille annetaan jokin oletusarvo, tapauksessamme paine-ero tai absoluuttinen paine, ja pyrkii pitämään ulostuloarvonsa mahdollisimman lähellä oletusarvoa venttiilien avulla. Mahdollisia tapoja toteuttaa tämä säätö on mm. PID-säätimellä (kuva 2.1) tai mallipohjaisella ennustavalla säädöllä (myöh. MPC) (kuva 2.2).



Kuva 2.2 PID-säätimen lohkokaavio

PID-säädin on yleisin teollisuudessa käytettävä säädintyyppi sen yksinkertaisuuden, nopean vasteajan ja tasapainoisuuden takia. Niitä onkin yleisesti käytetty elektrolyysilaitteistoissa elektrolyysikennoston virran, kaasujen paineen sekä lämpötilan säätöön. PID-säätimet ovat tehokkaita yksi sisääntulo – yksi ulostulo järjestelmissä, mutta kohtaavat haasteita monimutkaisemmissa, usean muuttujan, tehtävissä. (Dong, et al., 2025) PID-säätimen toiminta Pelkän paineenhallinnan osalta se on kuitenkin tehokas ja yksinkertainen ratkaisu, jonka optimaaliset parametrit ovat helposti ja nopeasti löydettävissä pelkällä testaamisella. PID-säädin on myös yksinkertaistettavissa pelkäksi PI-säätimeksi. D-osan tuottama hyöty näin yksinkertaisessa prosessissa on pieni, ja kahden parametrin säätäminen ihanteelliseksi on myös yksinkertaisempaa kuin kolmen. Tämän takia paineenhallintaan paras ja yksinkertaisin vaihtoehto on PI-säädin.



Kuva 2.3 Yksinkertaistettu MPC-säätimen lohkokaavio

MPC on toinen yleisesti teollisuudessa käytetty säädin. Se on monimutkaisemmille, usea sisääntulo – usea ulostulo, prosesseille tarkoitettu säädin, joka käyttää hyväkseen dynaamista järjestelmän mallia laskeakseen järjestelmän tulevaa käyttäytymistä ja samalla optimoi järjestelmän toimintaa annettujen rajoitusten sisällä. (Dong, et al., 2025) MPC olisi tehokas vaihtoehto, jos elektrolyysijärjestelmä vaatisi yhden säätimen, joka ohjaa useampaa laitteiston toimintaa. Pelkästään paineenhallintaan se on kuitenkin turhan monimutkainen ja vaatisi enemmän laskentatehoa kuin PI-säädin.

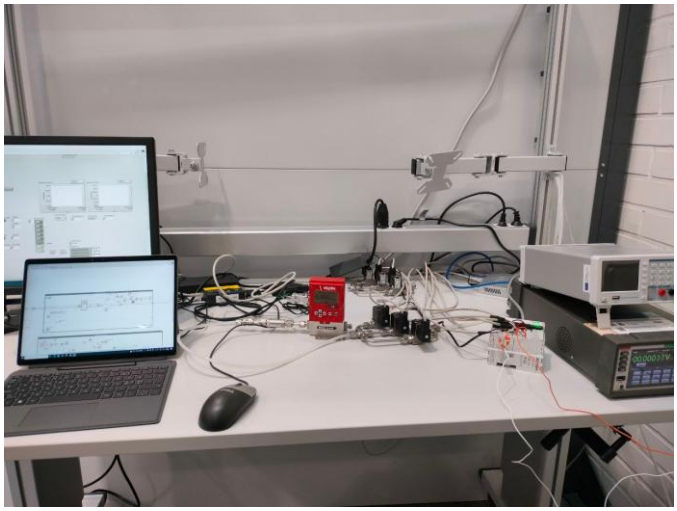
3 Mittaukset

Venttiilien sekä ohjauksen toiminnan tutkimiseksi suoritettiin mittauksia, jossa seurattiin massavirran, PWM-signaalin sekä paine-erojen käyttäytymistä. Mittaukset suoritettiin kahdessa vaiheessa laboratoriotilassa LUT-yliopistolla.

3.1 Mittaukset paineilmalla

Ensimmäiset mittaukset toteutettiin käyttäen laboratoriotilasta saatavaa paineilmaa, jota syötettiin 4 barin paineella. Tarkoituksena oli selvittää kumpi EtherCAT terminaali soveltuu paremmin tulevien mittauksien käyttötarkoitukseen sekä tutkia kuinka tarkasti massavirtaa pystytään terminaalien sekä venttiilien avulla ohjaamaan. Terminaalien PWM-referenssiarvoa nostettiin askeleittain tietyin aikavälein tiettyyn arvoon asti ja massavirran muutos sekä asettumisaika pyrittiin pitämään mahdollisimman stabiilina.

Ensimmäisen vaiheen mittauksissa (kuva 3.1) käytettiin Beckhoff EK9000 Modbus-väyläliitintä, Beckhoff EL2535 ja EL2502 EtherCAT-terminaaleja, Keithley DMM6500 pöytäyleismittaria sekä Vögtlin SmartTrak 100 massavirtamittaria. Käytetyt venttiilit olivat Bürkertin Tyyppi 2871 Suoratoimisia 2/2-tie solenoidisäätöventtiilejä. Laitteita ajettiin LABView ohjelmointialustalla, jossa jokaiselle laitteelle oli omat ohjelmansa ja niiden saama data saatiin visuaaliseen muotoon, sekä csv-tiedostona.



Kuva 3.1 Mittausjärjestelyt paineilmalla mittaamiseen

Molemmat EtherCAT-terminaalit ohjaavat venttiilien avonaisuutta PWM-ohjauksen avulla. Erona on, että EL2535 säätää PWM-arvoa virtaohjauksen avulla, sisältäen oman sisäisen säätimensä ja EL2502 taas normaalisti jännitettä käyttäen vaatien ulkoisen säätimen. Kun paineilmaa syötettiin venttiilien läpi, huomattiin että venttiilit avautuivat vasta noin puolessa välissä terminaalien maksimi PWM-arvosta.

Taulukko 3.1 Mittaukset EL2535-terminaalilla

Mittaus	Nousu (PWM %)	Aika (s)	Väli (PWM %)
1.	0,01	1	53–59
2.	0,01	2	53–59
3.	0,01	1	64–73
4.	0,01	2	64–73
5.	0,01	1	76–81
6.	0,01	2	76–81

Ensimmäisenä paineilman massavirtaa ohjattiin käyttäen EL2535-terminaalia, yhdellä 0.2 mm kokoisella venttiilillä. Mittauksia tehtiin 7 kappaletta. Kaikissa mittauksissa referenssiarvo nousi 0,01 % joko 1 s tai 2 s välein.

Taulukko 3.2 Mittaukset EL2502-terminaalilla

Mittaus	Nousu (PWM %)	Aika (s)	Väli (PWM %)
1.	0.06	6	40–57
2.	0.02	6	40–57
3.	0.06	6	55–80
4.	0.02	6	55–80
5.	0.06	6	79–99
6.	0.02	6	79–99

Seuraavaksi paineilman massavirtaa ohjattiin EL2502-terminaalilla. Käytössä oli jälleen yksi 0.2 mm venttiili. EL2502-terminaali vaatii oman PI-säätimensä, joka toteutettiin LABViewissä PID-säädin blokilla. PI-säätimen arvot olivat $K_p = 200$ ja $T_i = 1 * 10^{-5}$. Jossa K_p on säätimen proportionaalisen osan vahvistuskerroin ja T_i integraaliosan integrointiaika. Mittauksia tehtiin 6 kappaletta ja kaikissa mittauksissa referenssiarvo nousi joko 0.06 % tai 0.02 % aina 6 s välein.

Taulukko 3.3 Mittaukset kahdella venttiilillä

Mittaus	PI-arvot
1.	K_p = 1, T_i = 0.1
2.	K_p = 1, T_i = 0.01
3.	K_p = 2, T_i = 0.1
4.	K_p =2, T_i = 0.01

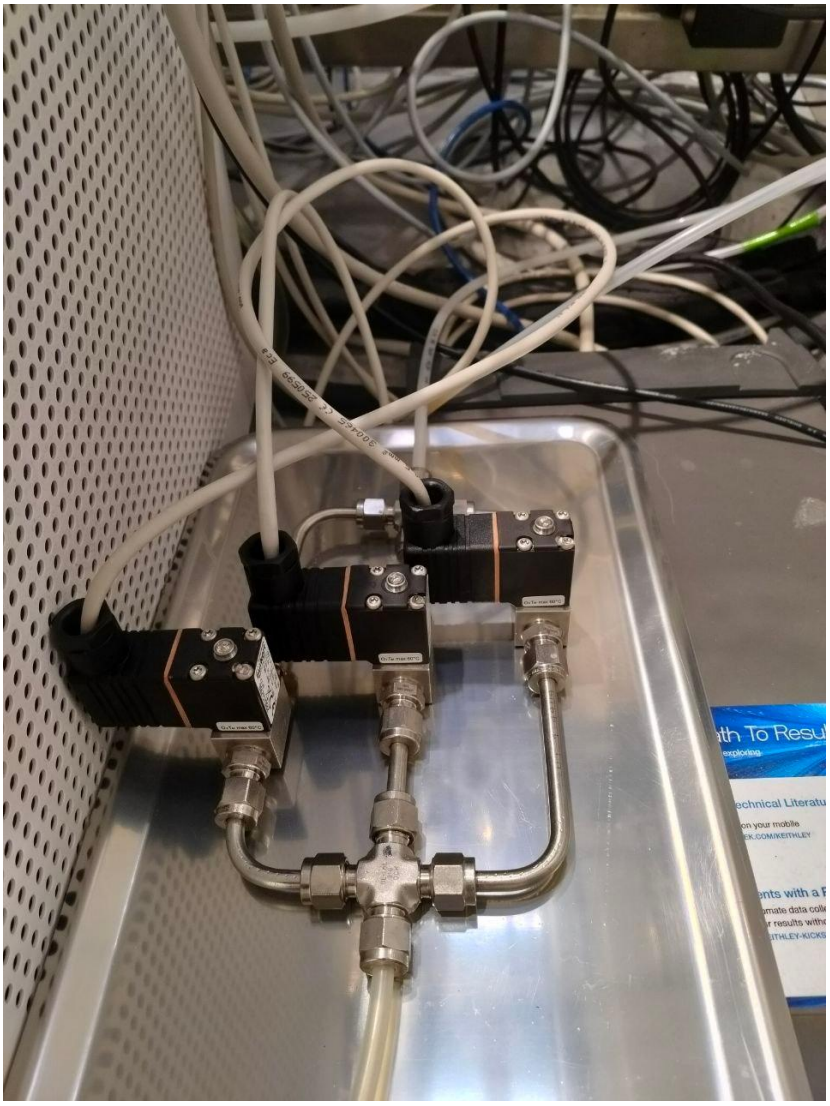
Viimeiset mittaukset suoritettiin kahdella venttiilillä, joista toisen koko oli 0.2 mm ja toisen 0.4 mm. Mittauksen tarkoituksena oli saada venttiilit avautumaan yksi kerrallaan ja selvittää kuinka venttiilit toimivat yhteisesti massavirran ohjauksessa ja miten niiden ohjaus käyttäytyy. Tätä varten käytettiin LABViewissä ohjelmoitua tilakonetta, joka avaa seuraavan venttiilin, kun edellinen on avautunut täysin. Mittauksia suoritettiin neljä kappaletta. Näissä mittauksissa paineilmaa syötettiin 0.5 bar paineella, joka on lähempänä kaasujen painetta testipenkki 1A:ta käytettäessä. Mittauksissa muutettiin vain PI-säätimen arvoja ja tutkittiin massavirran käyttäytymistä etenkin kohdassa, jossa uusi venttiili avautuu.

3.2 Mittaukset elektrolyysitestipenkillä

Testipenkki 1A (kuva 3.2) on < 1kW alkalielektrolyysilaitteisto, jolla voidaan tuottaa vetyä pienessä mittaluokassa. Testipenkillä voidaan simuloida kuinka suuremman teholuokan laitteisto toimisi olosuhteissa, jossa tuotanto on huomattavasti normaalia pienempää. Testipenkillä suoritettujen mittauksien tarkoitus oli selvittää kuinka venttiilit, joita käytettiin aiemmin paineilman hallintaan, toimivat oikeassa elektrolyysiprosessissa seuraamalla ja

säätämällä anodin ja katodin puolen paineita ja paine-eroa sekä elektrolyysin virtaa. Tämän lisäksi haluttiin selvittää, miten paineenhallinta toimii massavirran laskiessa ja kuinka monta sekä minkä kokoista venttiiliä tarvitaan pienen massavirran säätelyyn. Paineenhallintaan katodin sekä anodin puolella käytettiin kolmea rinnankytkettyä Bürkertin Tyyppi 2871 venttiiliä (kuva 3.3) joita ajettiin EL2502-terminaaleilla. Anodin venttiilit olivat kokoa 0.2 mm, 0.8 mm ja 1.2 mm. Katodin venttiilit olivat kokoa 0.2 mm, 0.4 mm, ja 1.2 mm. Painemittarina anodin ja katodin puolelle käytettiin Bronkhorst EL-press P-702CV painesäädintä, jonka lähdöt oltiin tulpattu, paine-eroa mitattiin Huba 692 paine-erolähettimellä ja vedyn massavirtaa mitattiin Bronkorhstin EL-flow select sarjan massavirtamittarilla F-111B. Ennen jokaista mittausta laitteisto huuhdeltiin typellä, jotta mahdolliset epäpuhtaudet saatiin poistettua kaasuletkuista ja tuotetun vedyn puhtaus pysyy halutulla tasolla.

Kuva 3.2 Elektrolyysitestipenkki 1A



Kuva 3.3 Bürkertin Tyyppi 2871 venttiilit

Taulukko 3.4 Mittaukset testipenkki 1A:lla

Mittaus	Virta (A)	PI-arvot	Venttiilit
1.	5	K_p = 10 T_i = 0.04	3
2.	5 -> 15 ->10	K_p = 6 T_i = 0.17	3
3.	5 -> 10 -> 3 -> 1.3 -> 0.8	K_p = T_i = 0.17	1

Mittauksia suoritettiin kolme kappaletta. Mittauksissa tutkittiin katodin ja anodin välistä paine-eroa ja anodin paineen sekä vedyn massavirran käyttäytymistä. Kaikissa mittauksissa

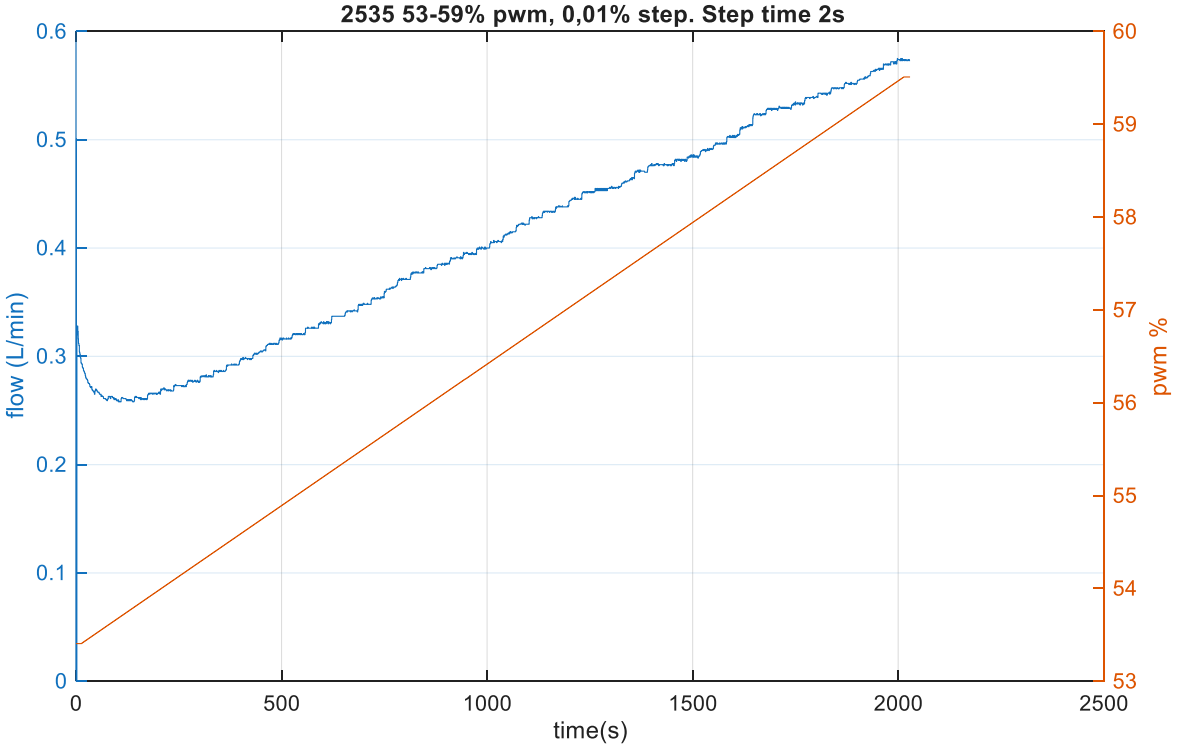
ylärajana anodin paineelle toimi 0.7 barg ja paine-erolle 10mbar. Mittausten välillä muutettiin säätimen arvoja, elektrolyysin virran suuruutta sekä venttiilien määrää. Kahdessa ensimmäisessä mittauksessa oli käytössä 0.2 mm, 0.4 mm, ja 1.2 mm venttiilit ja viimeisessä mittauksessa 1.2 mm venttiili.

4 Tulokset

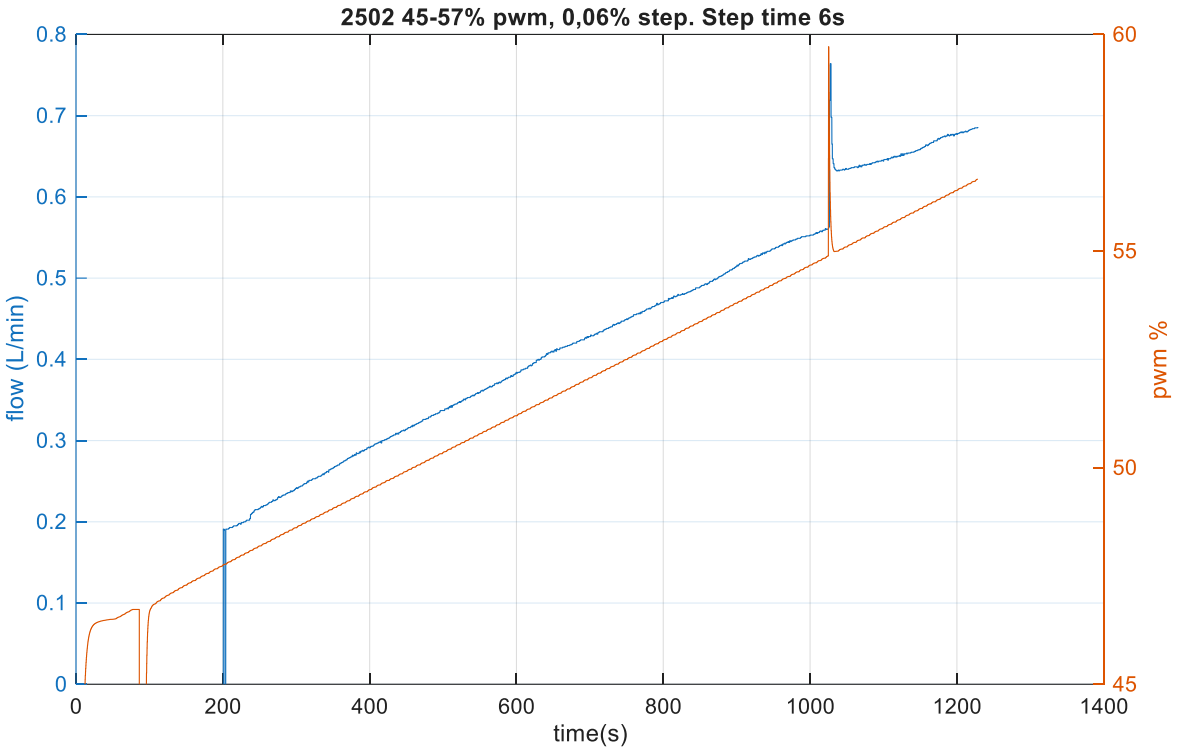
Mittauksista saadut tulokset otettiin talteen csv-tiedostoina ja käyttäen Ms Exceliä sekä MATLABia, muokattiin visuaaliseen muotoon.

4.1 Tulokset yhden venttiilin paineilmamittauksista

Paineilmamittauksen tuloksissa tarkastellaan EL2535-terminaalin, sekä EL2502-terminaalin eroja massavirran ohjauksessa vakiopaineella. Erityisesti massavirran stabilisointi ja muutosnopeus ovat olennaisia tarkkailukohtia. Yhden venttiilin mittauksissa on tarkoituksena selvittää kumpi terminaaleista soveltuu paremmin tulevia mittauksia varten.

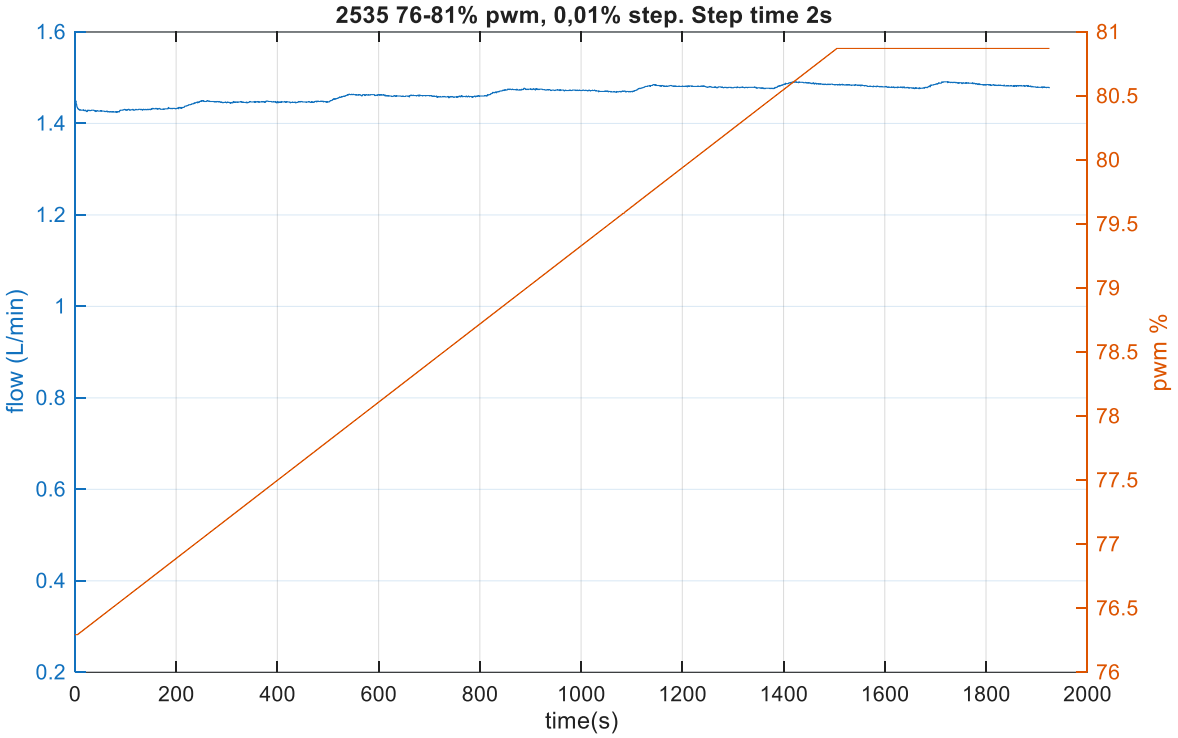


Kuva 4.1 EL2535 alkupään mittaus

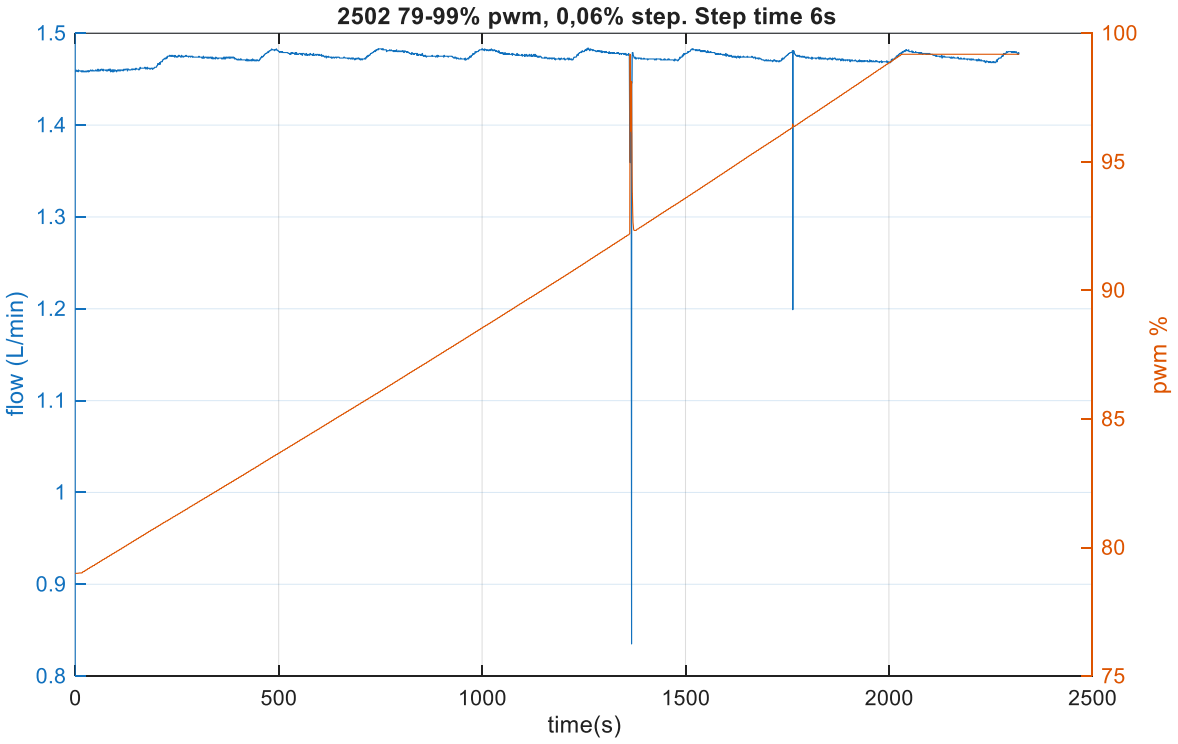


Kuva 4.2 El2502 alkupään mittaus

Venttiilien alkupään mittauksissa huomataan, että molempien terminaalien kohdalla venttiili avautuu vasta noin 50 % PWM-arvolla. EL2535 (kuva 4.1) tapauksessa massavirta notkahtaa hieman, mutta lähtee nopeasti nousuun. Notkahdus johtuu EL2535-terminaalin sisäisen säätimen toiminnasta, jossa se on aiheuttanut virtasignaalin poikkeaman, joka on vaikuttanut venttiilin avonaisuuteen, minkä säädin on kuitenkin nopeasti korjannut. Massavirtaus itsessään El2535:llä on hieman epätasaisempaa kuin EL2502:lla (kuva 4.2), mutta ei oskilloi vakavasti. Molempia terminaaleja käytettäessä massavirta nousee tasaisesti ja pysyy tarvittavan stabiilina. El2502 kohdassa näkyy pieni piikki massavirrassa sekä PWM-arvossa. Tämä piikki johtuu luultavammin pienestä häiriöstä laitteessa, jota ei kuitenkaan tarvitse ottaa huomioon. Noin keskivaiheen mittauksissa (Liitteet 1. ja 2.) huomataan samaa massavirran käyttäytymistä kuin alkupäässä. Molemmat venttiilit pitävät massavirran suhteellisen stabiilina ja niiden nousu on tasaista.



Kuva 4.3 El2535 loppupään mittaus

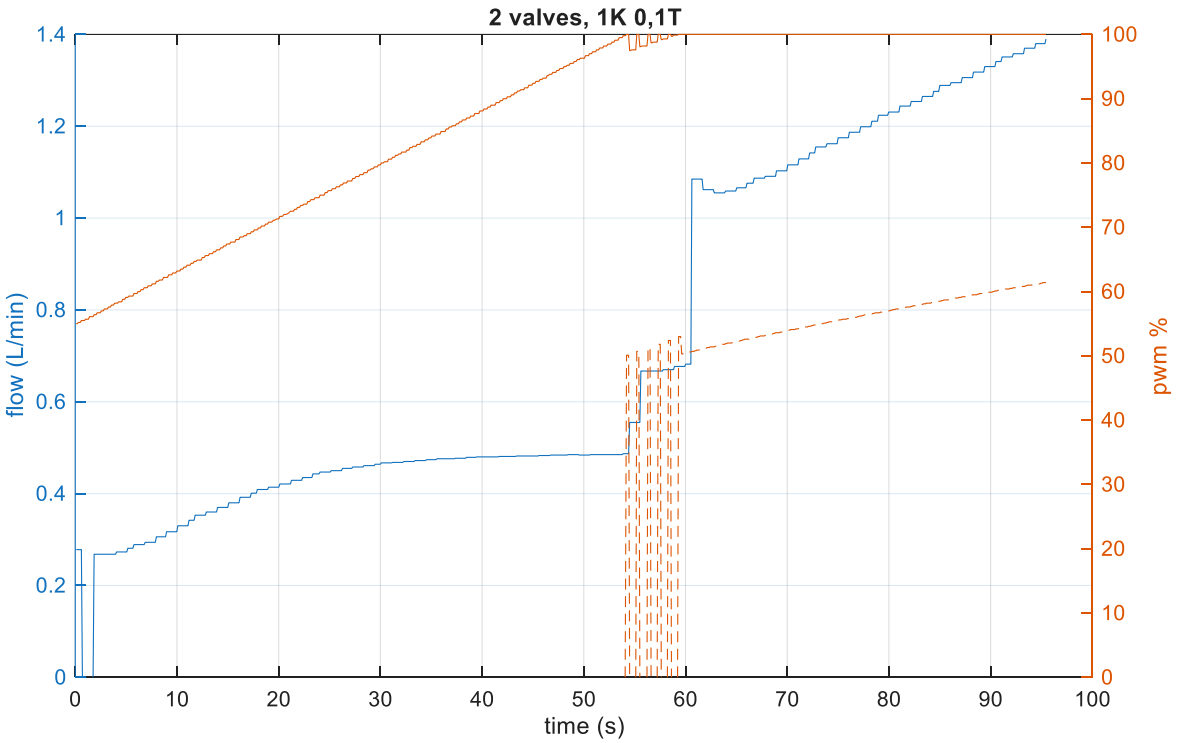


Kuva 4.4 El2502 loppupään mittaus

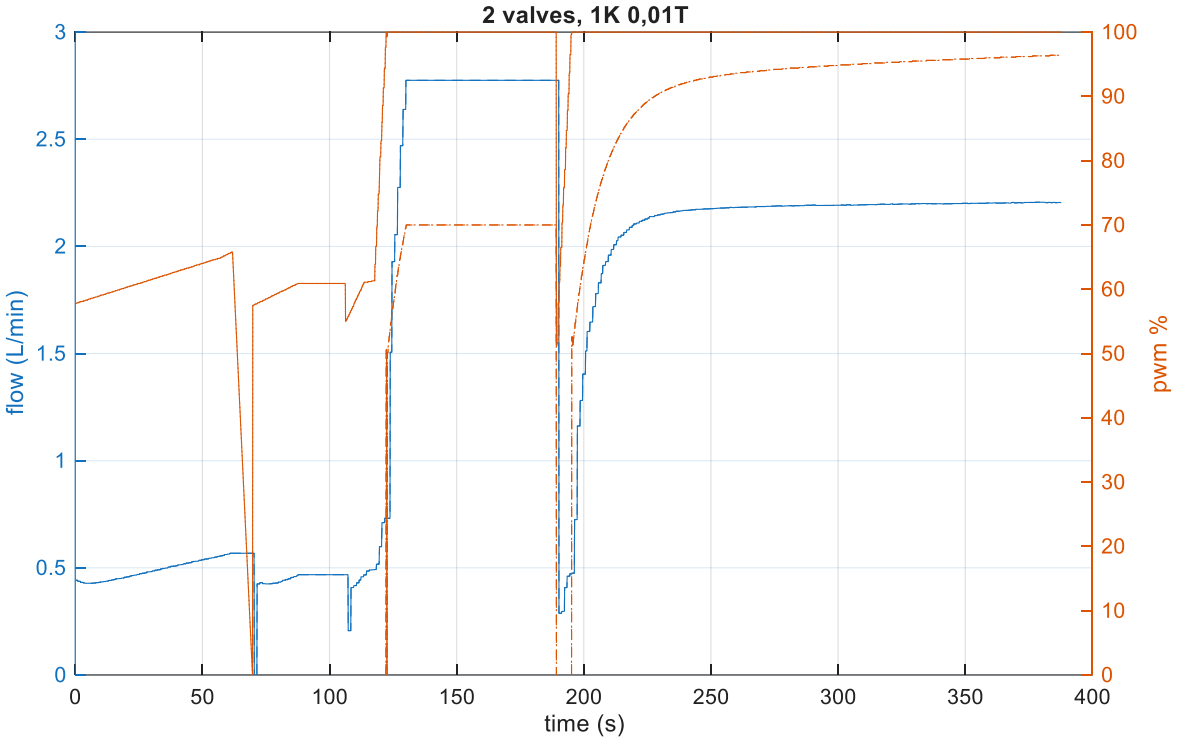
Lähempänä terminaalien täysiä PWM-arvoja massavirran käyttäytyminen on lähes stabiilia, mutta molemmissa terminaaleissa EL2535 (kuva 4.3) ja EL2502 (kuva 4.4.) nähdään että massavirrassa näkyy selkeitä askelia. Askeleet johtuvat venttiilin ominaisuuksista kuten lepokitkasta. Askelet ovat kuitenkin hyvin pieniä ja virtaus pysyy suhteellisen stabiilina. Molempien terminaalien säätäessä massavirtaa lähes yhtä stabiilisti, käyttöön valittiin EL2502-terminaali, sillä se ei sisällä sisäistä säädintä ja ulkoisen PI-säätimen käyttö antaa enemmän joustavuutta venttiilien ohjaamiseen.

4.2 Tulokset kahden venttiilin paineilmamittauksista

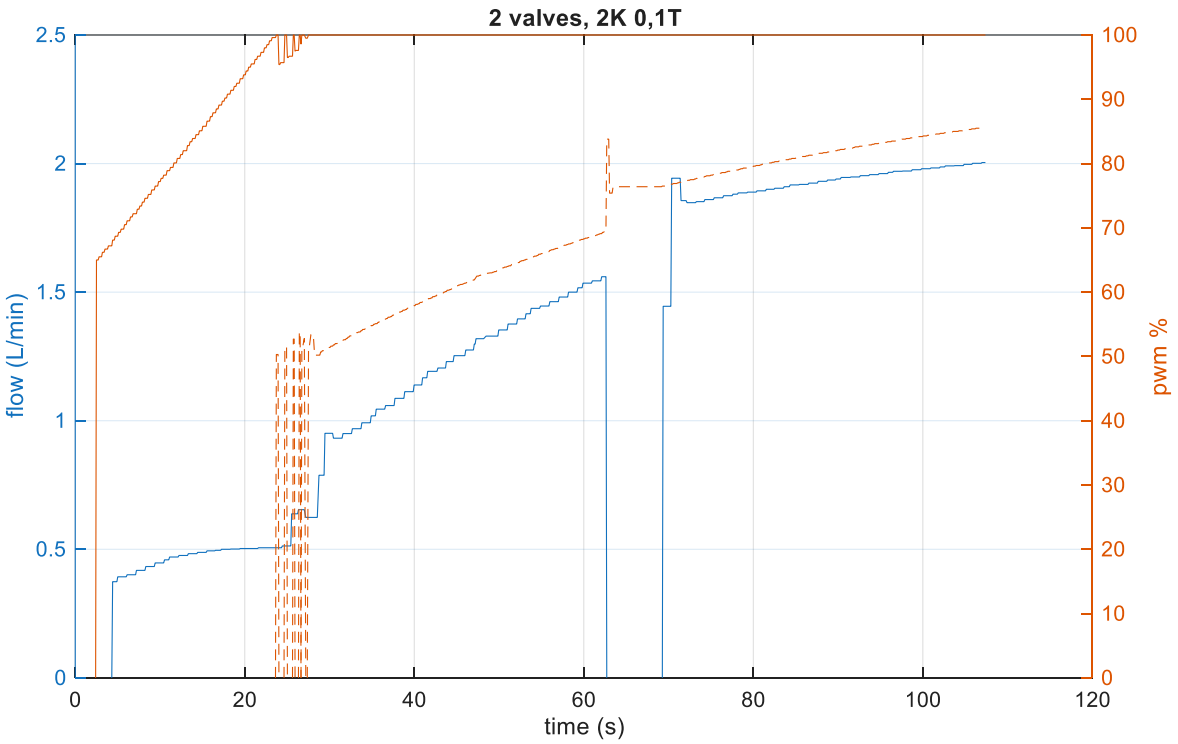
Kahden venttiilin mittauksissa tarkastellaan kohtaa jossa toinen venttiili avautuu, kun ensimmäinen on täysin avonainen. Tarkoituksena on selvittää mitkä seikat vaikuttavat venttiilien avautumiseen sulavasti ja tutkia venttiilien välistä dynamiikkaa.



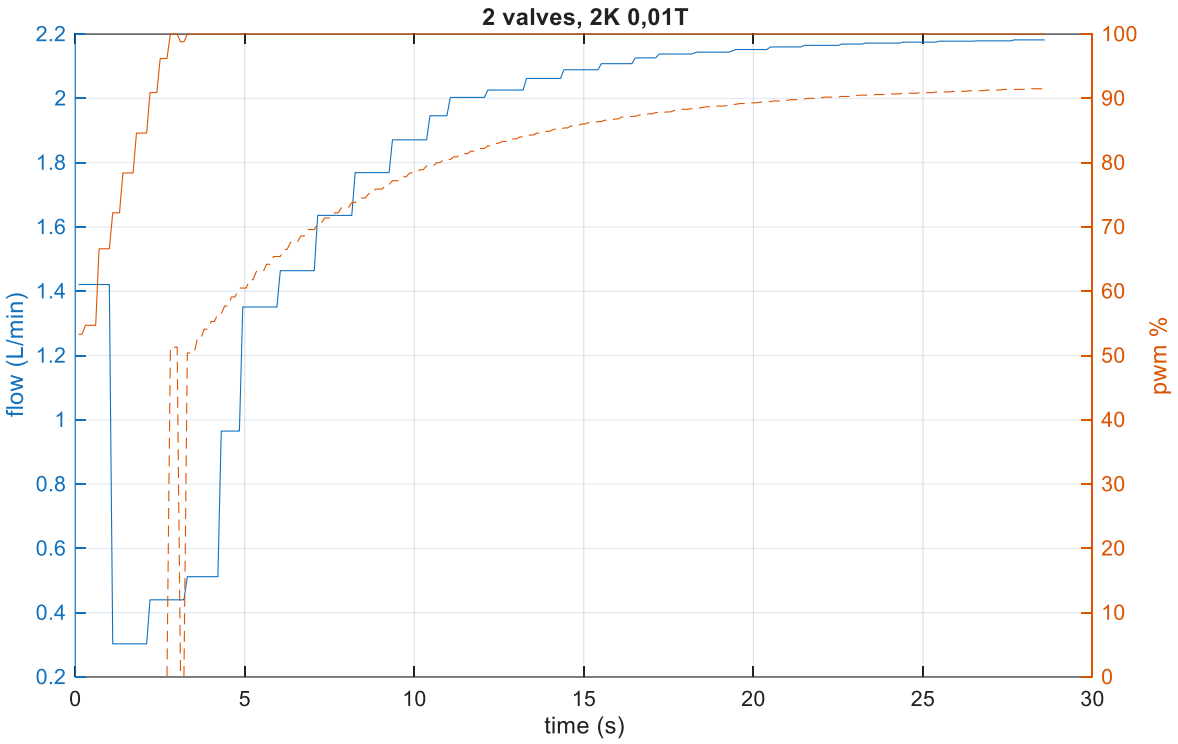
Kuva 4.5 Kaksi venttiiliä 1K, 0,1T PI-arvoilla



Kuva 4.6 Kaksi venttiiliä 1K, 0,01T PI-arvoilla



Kuva 4.7 Kaksi venttiiliä 2K, 0,1T PI-arvoilla



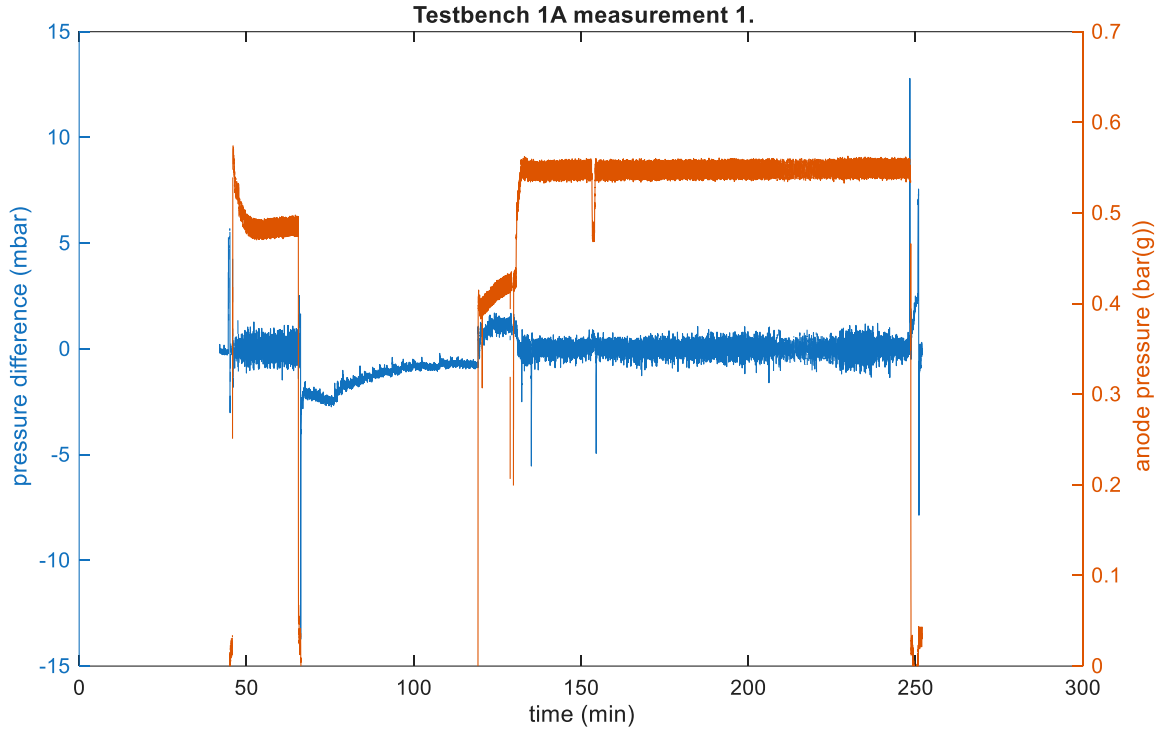
Kuva 4.8 Kaksi venttiiliä 2K, 0,01T PI-arvoilla

Kahden venttiilin mittauksissa huomataan, että toisen venttiilin avautuessa, molempien venttiilien PWM-arvot oskilloivat hetken, kunnes tasoittuvat ja jatkavat normaalia nousua. Tätä oskillointia tapahtuu enemmän, suuremmalla PI-säätimen integrointiajalla T_i (kuvat 4.5 ja 4.7) kuin pienemmällä T_i arvolla (kuvat 4.6 ja 4.8). PI-säätimen proportionaalinen osan vahvistuskertoimen K_p, kasvatus vaikuttaa vain PWM-arvojen kasvun nopeuteen, eikä sillä näytä olevan vaikutusta itse venttiilien avautumiseen. Data kuvassa 4.6 on hieman sekavaa, mutta toisen venttiilin avautuminen on nähtävissä silti n. 120 s ja 190 s kohdalla. Näiden kuvaajien perusteella voidaan todeta, jotta seuraavan venttiilin avautuminen saadaan mahdollisimman hallituksi ilman liiallista oskillointia, on PI-säätimen T_i arvoa laskettava ja K_p arvon asettaminen halutulle tasolle vaikuttaa vain systeemin kasvunopeuteen.

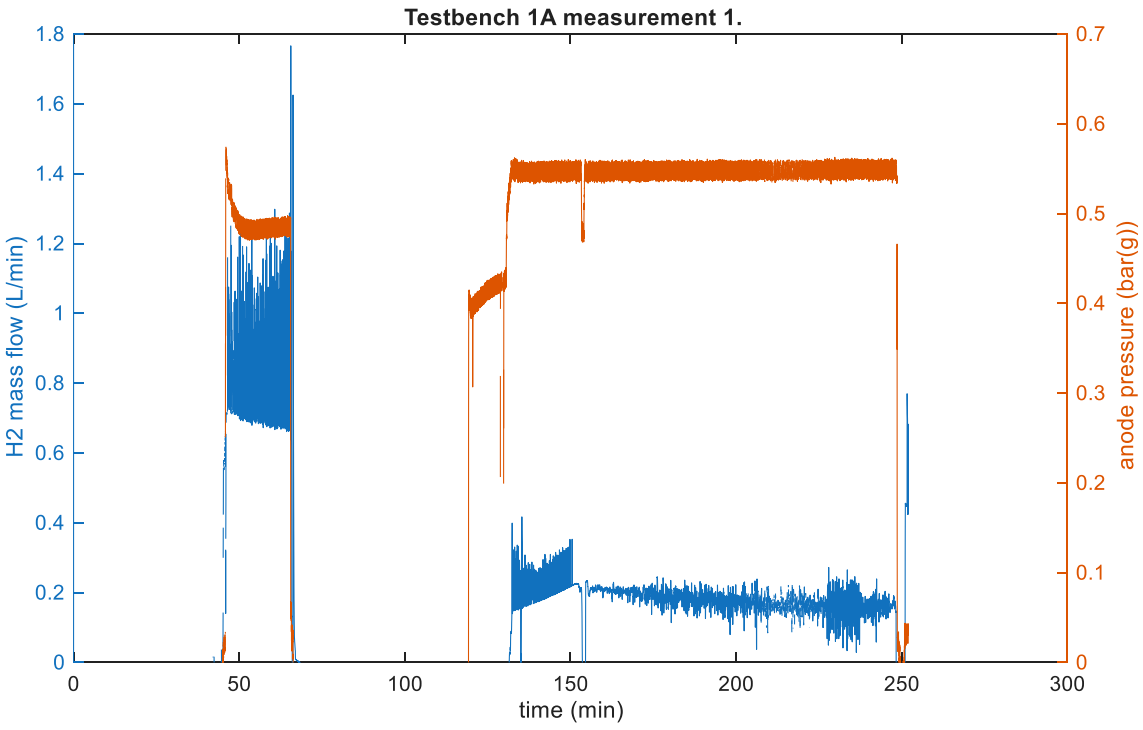
4.3 Tulokset 1A testipenkistä

Testipenkki 1A mittauksissa tarkastellaan anodin painetta, anodin ja katodin välistä paine-eroa, sekä vedyn massavirran käyttäytymistä erilaisissa tilanteissa. Mittauksissa muutettiin elektrolyysin virran arvoa, PI-säätimen arvoja sekä venttiilien lukumäärää. Paine-ero

pyrittiin pitämään alle 10mbar alueella ja anodin paine sekä vedyn massavirta tasaisena. Ennen jokaista mittausta laitteisto puhdistettiin typpihuuhtelulla, joten itse mittauksen tulokset eivät ala ajan kohdasta 0 min, vaan vaihtelevat mittauskohtaisesti.

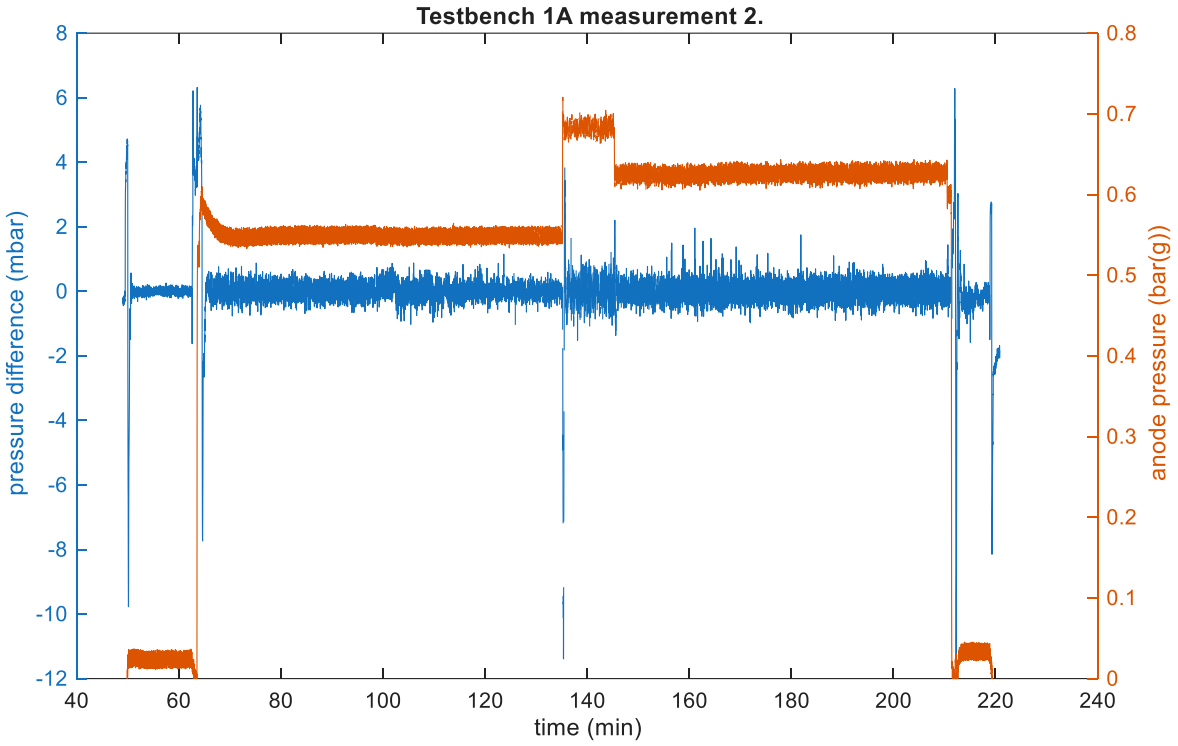


Kuva 4.9 Testipenkki 1. mittaus, paine-ero ja anodin puolen paine

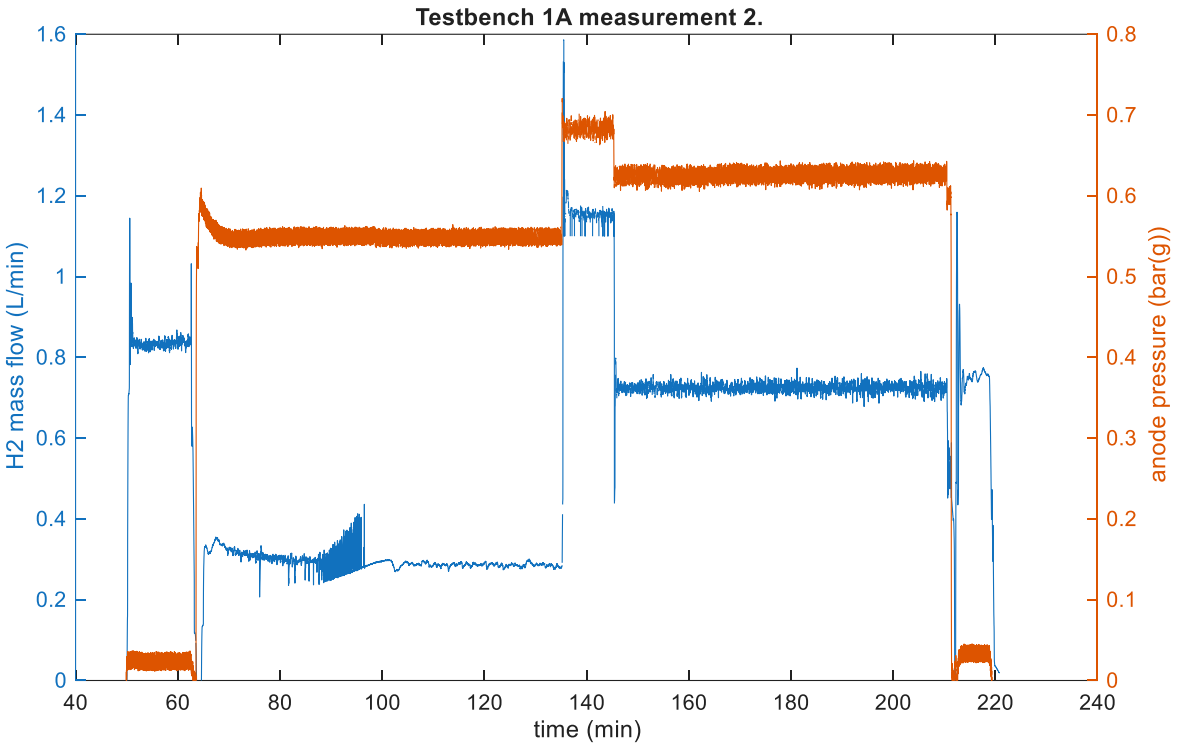


Kuva 4.10 Testipenkki 1. mittaus, vedyn massavirta ja anodin puolen paine

Ensimmäisen mittauksen aikana ei muutettu elektrolyysin virtaa taikka muita laitteiston ominaisuuksia vaan testattiin venttiilien toimivuutta staattisessa elektrolyysissä. Itse mittaus alkaa kohdasta 120 min. Anodin paine ja paine-ero (kuva 4.9) pysyvät tasaisena koko mittauksen ajan. Mittauksen aikana ei muutettu elektrolyysin virtaa taikka muita laitteiston ominaisuuksia. Paine-ero menee satunnaisissa pisteissä yli 5mbar ja kahdessa kohtaa yli 10mbar, mutta pysyy muuten sallitulla alueella. Vedyn massavirta (kuva 4.10) alkaa oskilloivana n. 125 min kohdalla, josta se tasaantuu nopeasti, mutta keskimääräinen massavirta alkaa laskea ja oskilloimaan uudestaan. Mittausten jälkeen selvitettiin, että laitteistossa oli vuoto venttiilien kohdalla, josta tämä johtui. Vuoto saatiin korjattua ennen seuraavaa mittausta. Venttiilit näyttävät kuitenkin toimivan moitteettomasti paine-eron säätelyssä, pitäen paineen stabiilina n. 0.5 barg tarkkuudella ja paine-eron 1 mbar tarkkuudella.

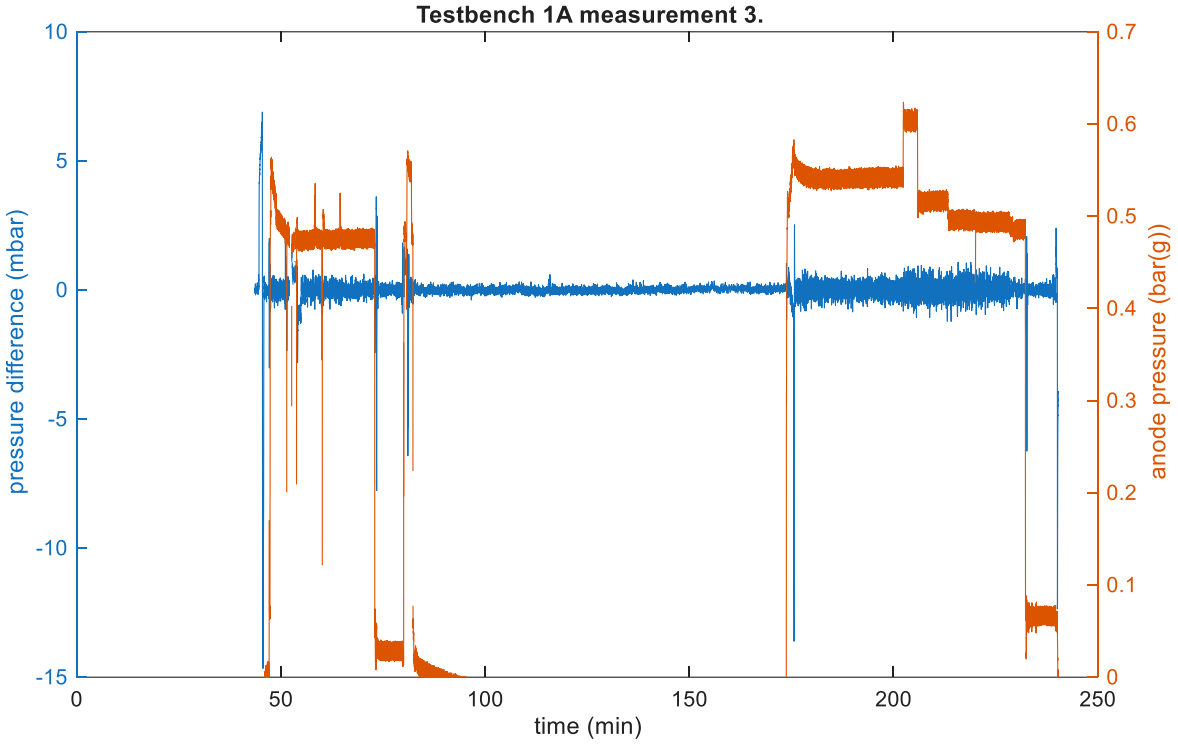


Kuva 4.11 Testipenkki 2. mittaus, paine-ero ja anodin puolen paine

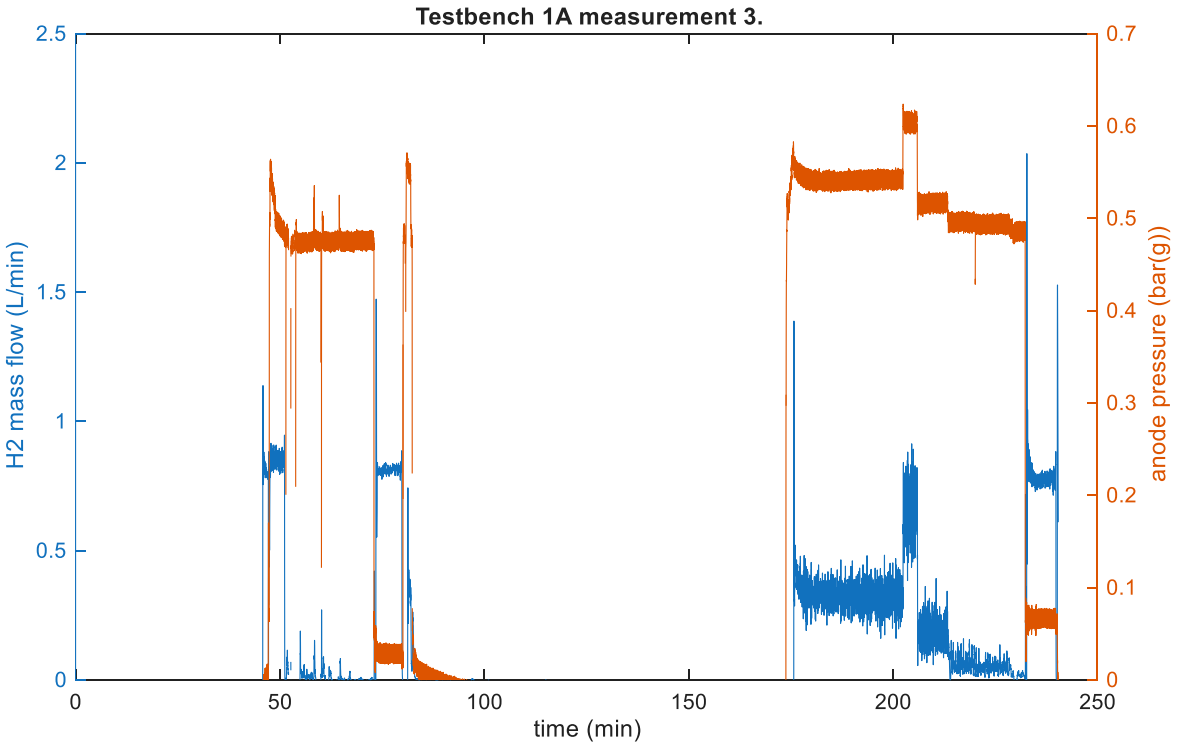


Kuva 4.12 Testipenkki 2. mittaus, vedyn massavirta ja anodin puolen paine

Toisessa mittauksessa elektrolyysin virtaa muutettiin järjestyksessä 5 A, 15 A, 10 A. Mittaus alkaa kohdasta 60 min. Koko mittauksen ajan paine-ero ja anodin paine (kuva 4.11) pysyivät tasaisena ja paine-ero pysyi halutulla tasolla. Virran vaihtuessa paine-ero nousi hetkellisesti, mutta palasi lähes heti sallitulle tasolle. Vedyn massavirta (kuva 4.12) oskilloi hetkellisesti 5A kohdalla, mutta tasaantui nopeasti normaalille tasolle. 15 A ja 10 A kohdalla massavirta pysyi myös suhteellisen stabiilina. Venttiilien ja säädön toiminta elektrolyysin virran muutostilanteissa toimii moitteettomasti. Anodin puolen paine saatiin pidettyä stabiilina n. 0.5 barg tarkkuudella ja paine-ero 1 mbar tarkkuudella.



Kuva 4.13 Testipenkki 3. mittaus, paine-ero ja anodin puolen paine



Kuva 4.14 Testipenkki 3. mittaus, vedyn massavirta ja anodin puolen paine

Kolmannessa mittauksessa testattiin kuinka tehokkaasti paineenhallinta ja vedyn massavirran stabiilina pitäminen toimisi yhdellä suurella venttiilillä. Mittaus alkaa kohdasta 175 min. Paine-ero (kuva 4.13) mittauksen aikana oli jälleen tasainen ja pysyi sallituissa rajoissa, jälleen n. 1 mbar alueella. Vedyn massavirta (kuva 4.14) oskilloi vahvasti mittauksen aikana. Oskillaation vahvuus laski elektrolyysin virran ja vedyn massavirran laskiessa, mutta oli suurta verrattuna mittaukseen 2. jossa käytössä oli kaikki kolme venttiiliä. Yhden venttiilin käyttäminen ei ole siis näillä arvoilla järkevin valinta paineenhallintaan, mutta vaatii lisää testausta muuttamalla PI-säätimen arvoja, sekä venttiilin kokoa.

5 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin alkalielektrolyysin paineenhallinnan toteutusta sekä testausta. Työn tarkoituksena oli selvittää miten paineenhallinta tulisi toteuttaa yksinkertaisella ja luotettavalla tavalla sekä miten venttiilit ja säätö toimivat paineenhallinta prosessissa. Työn kirjallisuuskatsauksessa käytiin läpi erilaisia vaihtoehtoja venttiilien sekä säätimien osalta paineenhallintaa varten, ja todettiin miksi juuri laitteistossa käytetyt vaihtoehdot ovat toimivia valintoja. Työn mittausosiossa esitettiin mittaukset ja niissä käytettävät laitteet, sekä mittausten tarkoitukset. Tulokset-osiossa esitettiin mittausten keskeisimmät tulokset ja pohdittiin tulosten merkitystä alkalielektrolyysin paineenhallinnan toimintaan ja kehittämiseen.

Työssä selvisi, että edullisten solenoidikäyttöisten PWM-venttiilien käyttäminen alkalielektrolyysin paineenhallintaan on riittävää ja sillä pystytään hyvin tarkkaankin säätämiseen kuten paine-eron pitäminen alle 10 mbar alueella. Venttiilejä on parempi olla useampi eri kokoluokkaa kuin yksi suurempi venttiili. Tämä takaa myös vedyn massavirran paremman stabiilisuuden. Tavallinen PI-säädin todettiin myös riittäväksi säätöratkaisuksi sen yksinkertaisuuden sekä helppokäyttöisyyden takia. Massavirtaukset käytetyssä elektrolyysilaitteistossa ovat kuitenkin hyvin pieniä verrattuna teollisiin laitteistoihin, joten vaadittavat ratkaisut suuremmassa kokoluokassa saattavat poiketa merkittävästi työssä saaduista tuloksista.

Lähteet

Bürkert, s.a.. *Proportional valves.* [Online]
Available at: https://www.burkert.com/en/products/proportional-valves
[Haettu 22. 7. 2026].

Dong, Z. ym., 2025. *Control strategies for alkaline water electrolysis hydrogen production: a comprehensive review and future perspectives.* [Online]
Available at: https://doi.org/10.1016/j.gloei.2025.10.008
[Haettu 30. 7. 2026].

Emam, S. A., Hamdan, O. M., Abu-Nabah, A. B. & Elnajjar, E., 2024. *A review on recent trends, challenges, and innovations in alkaline electrolysis.* [Online]
Available at: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.238
[Haettu 9. 7. 2026].

Gemini Valve, s. a.. *Pneumatically vs. Electrically Actuated Ball Valves: Which Should You Use?.* [Online]
Available at: https://www.geminivalve.com/pneumatically-vs-electrically-actuated-ball-valves-which-should-you-use/
[Haettu 23. 7. 2026].

Pressure Control Solutions, 2022. *Flow Control & Electrolysis: Controlling Hydrogen or Oxygen with Back Pressure Regulators.* [Online]
Available at: https://www.pressurecontrolsolutions.com/flow-control-electrolysis-controlling-hydrogen-or-oxygen-with-back-pressure-regulators/
[Haettu 6. 8. 2026].

Schalenbach, M., Lueke, W. & Stolten, D., 2016. *Hydrogen Diffusivity and Electrolyte Permeability of the Zirfon PERL Separator for Alkaline Water Electrolysis.* [Online]
Available at: http://dx.doi.org/10.1149/2.1251613jes
[Haettu 10. 8. 2026].

Tameson, 2024. *Proportional Solenoid Valve - How They Work.* [Online]
Available at: https://tameson.com/pages/proportional-solenoid-control-valve
[Haettu 27. 7. 2026].

TUKES, T. j. k., 2024. *Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus.* [Online]
Available at: https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#elektrolyysi
[Haettu 16. 7. 2026].

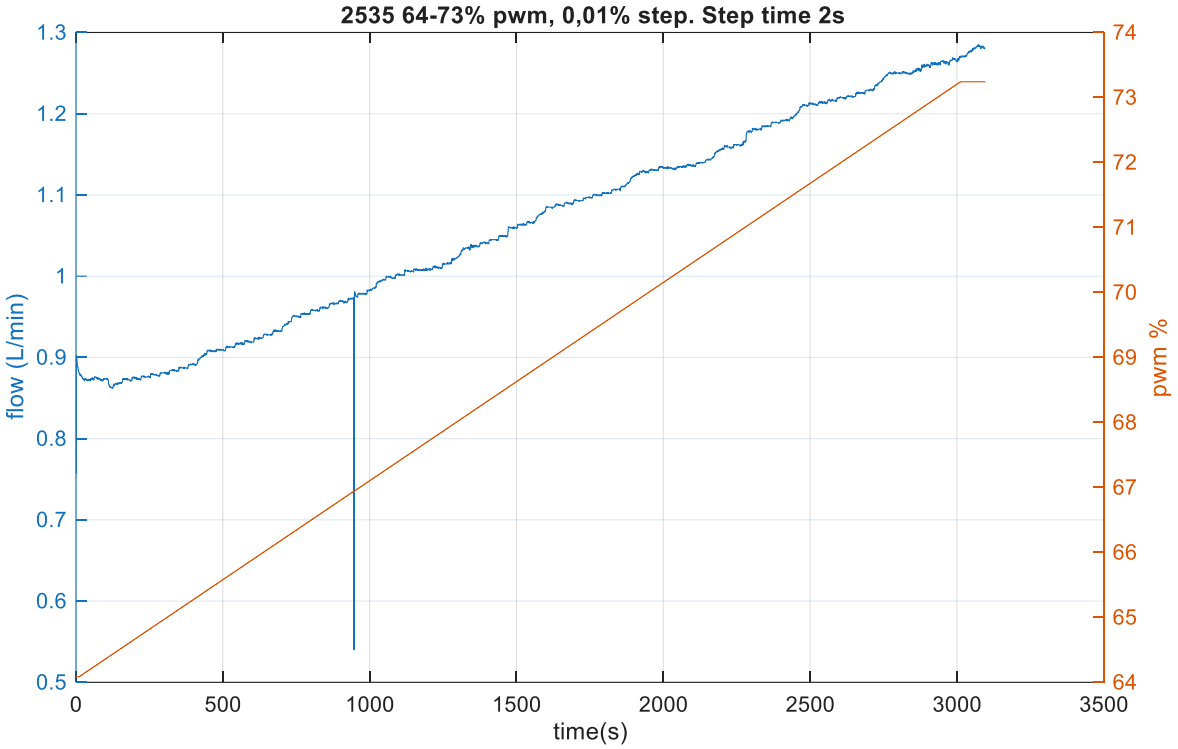
Tüysüz, H., 2024. *Accounts of Chemical Research: Alkaline Water Electrolysis for Green Hydrogen Production.* [Online]

Available at: https://doi.org/10.1021/acs.accounts.3c00709
[Haettu 13. 7. 2026].

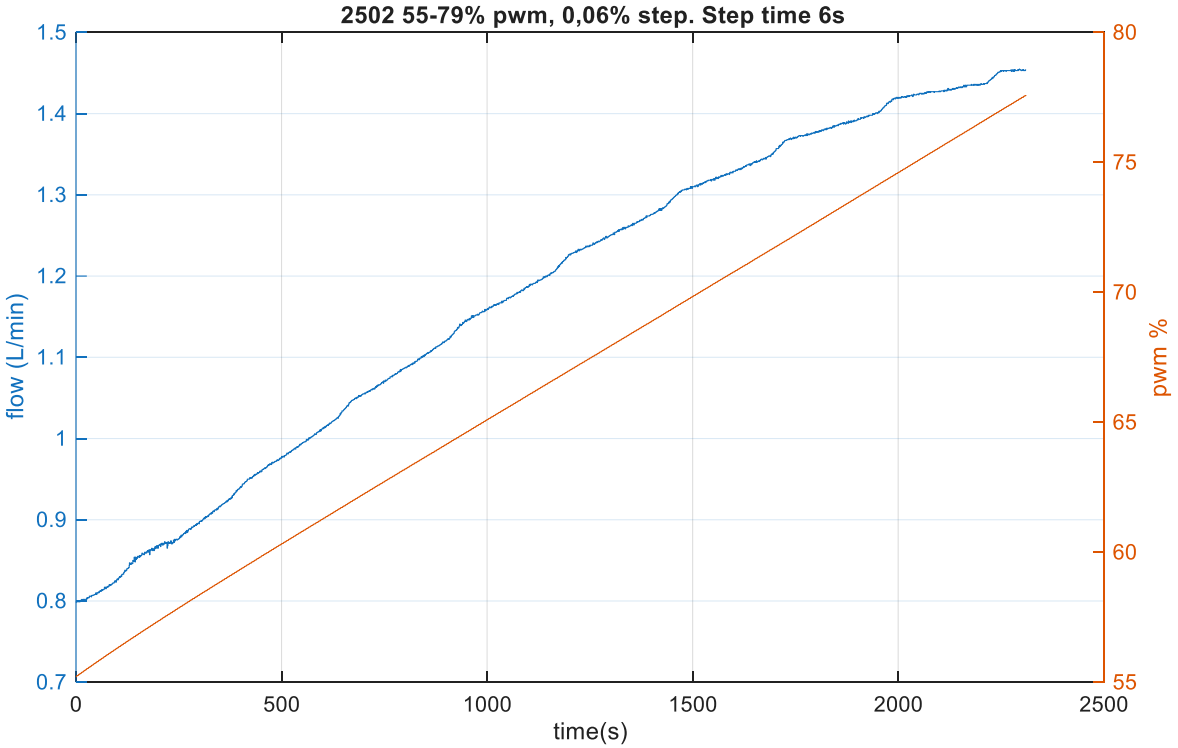
Ursua, A., Sanchis, P. & Gandia, M. L., 2012. *Hydrogen Production From Water Electrolysis: Current Status and Future Trends.* [Online]
Available at: https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/5898382
[Haettu 8. 7. 2026].

Vincer, 2025. *Solenoid Valve vs Motorized Valve: Choosing the Best Valve for Your Needs.* [Online]
Available at: https://www.vincervalve.com/solenoid-valve-vs-motorized-valve/
[Haettu 27. 7. 2026].

XINMING, 2025. *What is a Pneumatic Actuator and How Do They Work.* [Online]
Available at: https://www.xm-valveactuator.com/Data/upload/20250515/20250515091245I5O8VZV1.pdf
[Haettu 23. 7. 2026].



Liite 1. El2535 keskikohdan mittaus



Liite 2. EL2502 keskikohdan mittaus