



Ari Karppinen

Ohutkalvopinnoituskoneen kemikaalilähteen ohjaaminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Insinöörityö

14.11.2023

Tiivistelmä

Tekijä: Ari Karppinen
Otsikko: Ohutkalvopinnoituskoneen kemikaalilähteen ohjaaminen
Sivumäärä: 28 sivua
Aika: 14.11.2023

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Ammatillinen pääaine: Automaatiotekniikka
Ohjaajat: Ohjelmistoarkkitehti Mikko Alfthan
Lehtori Matti Välikylä

Opinnäytetyön aiheena on ohjelmistokehitysprojekti, ja työn tarkoituksena on lisätä tuki uudelle lämmitettävälle kemikaalilähteelle Picosunin valmistamaan PicoOS™-käyttöjärjestelmään, jota käytetään yrityksen valmistamissa ohutkalvopinnoituslaitteissa. Työssä laaditaan vaatimusmäärittely ja suunnitelma lähteen ohjausohjelmalle ja toteutetaan ja testataan se.

Lähteen ohjausohjelmalla ohjataan lähteeseen liitettyjä venttiileitä ja lähteen lämpötilaa. Ohjelmointi toteutetaan Beckhoffin TwinCAT 3 -ohjelmistokehitysympäristössä ja ohjelmointikielenä käytetään IEC61131-3-standardin mukaista Structured Text -kieltä.

Tulokseksi saatiin toimiva ohjelmallisäys PicoOS™-käyttöjärjestelmään, joka tuli käyttöön asiakkaan Morpher F -koneeseen.

Avainsanat: ALD, TwinCAT 3, IEC 61131

Abstract

Author: Ari Karppinen
Title: Controlling chemical source of a thin-film coating machine
Number of Pages: 28 pages
Date: 14 November 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation technology
Professional Major: Automation technology
Supervisors: Mikko Alfthan, software architect
Matti Välikylä, lecturer

The subject of the thesis is a software development project, and the purpose of the work is to add support for a new heated chemical source to PicoOS™ operating system, which is used in thin film coating equipment manufactured by Picosun. The work will define the requirements and design of the source control software and will implement and evaluate it.

The source control program controls the valves connected to the source and the temperature of the source. The programming is done in TwinCAT 3, the Beckhoff software development environment, and the programming language used is Structured Text according to IEC61131-3.

The result was a working software add-on for the PicoOS™ operating system, which is used on the customer's Morpher F machine.

Keywords: ALD, TwinCAT 3, IEC 61131

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	ALD	2
2.1	Periaate	2
2.2	Prosessi	2
2.3	Käyttökohteita	5
2.4	ALD Picosunilla	5
3	TwinCAT 3	9
3.1	TwinCAT XAE	9
3.2	TwinCAT XAR	10
4	Säätötekniikka	12
4.1	PID	12
4.2	Kaskadikytkentä	12
4.3	Säätimen viritys	13
5	Ohjausohjelman kehitys	16
5.1	Testaus	19
5.2	Lämmittimet	20
6	Yhteenveto	26
	Lähteet	27

Lyhenteet ja käsitteet

ALD: *Atomic Layer Deposition*. Atomikerroskasvatus, ohutkalvopinnoitusmenetelmä.

PLC: *Programmable Logic Controller*. Ohjelmoitava logiikka.

Substraatti: Puolijohdeteollisuudessa elektroniikan pohjalevynä ja kasvatusalustana käytettävä kappale.

XAE: *eXtended Automation Engineering*. TwinCAT 3 -ohjelmiston ohjelmointityökalu.

XAR: *eXtended Automation Runtime*. TwinCAT 3 -ohjelmiston suoritin.

1 Johdanto

Opinnäytetyön aiheena on ohjelmistokehitysprojekti, ja työn tarkoituksena on lisätä tuki uudelle lämmitettävälle kemikaalilähteelle Picosunin valmistamaan PicoOS™-käyttöjärjestelmään, jota käytetään yrityksen valmistamissa ohutkalvopinnoituslaitteissa. Työssä laaditaan vaatimusmäärittely ja suunnitelma lähteen ohjausohjelmalle ja toteutetaan ja testataan se.

Lähteen ohjausohjelmalla ohjataan lähteeseen liitetyjä venttiileitä ja lähteen lämpötilaa. Työ tehdään Picosunille, joka kehittää ja tuottaa ohutkalvopinnoituslaitteita ja ohutkalvotekniikkaa. Ohjelmointi toteutetaan Beckhoffin TwinCAT 3 -ohjelmistokehitysympäristöllä ja ohjelmointikielenä käytetään IEC61131-3-standardin mukaista Structured Text -kieltä.

2 ALD

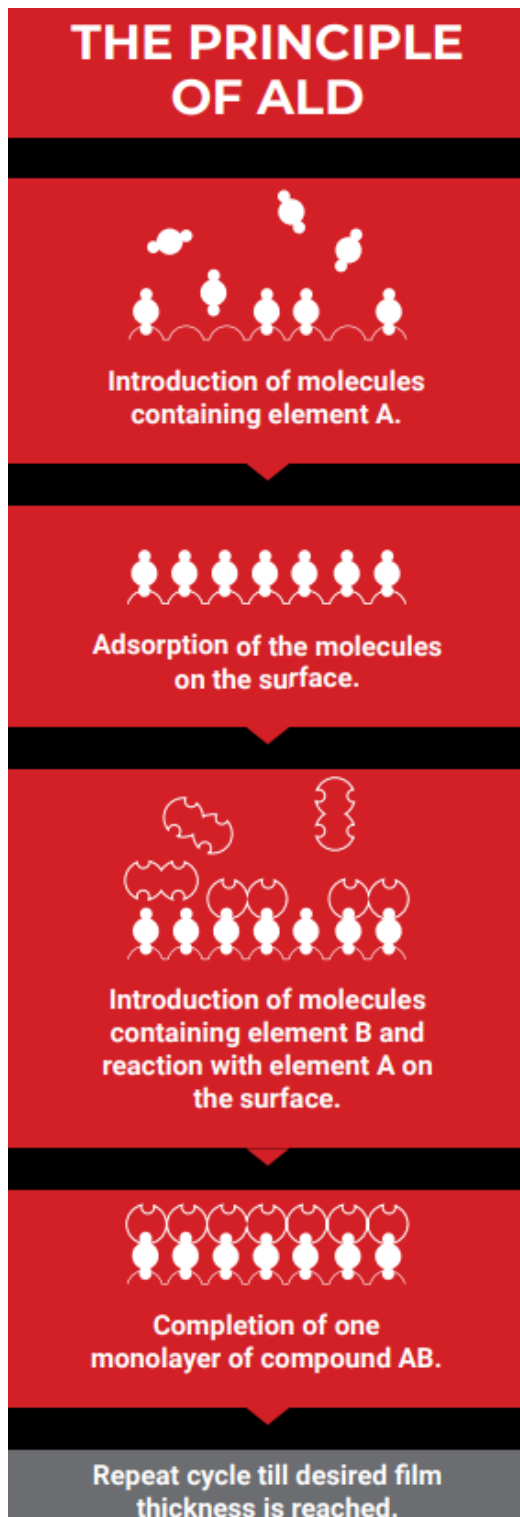
2.1 Periaate

ALD (Atomic Layer Deposition) eli atomikerroskasvatus on ohutkalvopinnoitusmenetelmä, jolla valmistetaan erittäin ohuita, tasalaatuisia ja yhdenmukaisia pinnoitteita useissa sovelluksissa. ALD perustuu peräkkäisiin, itserajoittuviin ja pintaohjattuihin kaasufaasikemiallisiin reaktioihin, joiden avulla kalvon paksuutta voidaan hallita jopa alle nanometrin paksuusalueella. Kaasujen reaktiot tapahtuvat vasta, kun ne ovat kosketuksissa pinnoitettavan pinnan kanssa, mikä tarkoittaa, että kalvo kasvaa peräkkäisinä atomikerroksina pinnasta ylöspäin. Tämän seurauksena ALD-kalvo on tiivis eikä siinä ole halkeamia tai reikiä, ja sen rakenteellisia ja kemiallisia ominaisuuksia voidaan ohjata tarkasti atomisella tasolla. [1.]

ALD-prosessilla voidaan luoda yksittäisten materiaalikerrosten lisäksi myös kerroksia, jotka ovat seostettuja, sekoitettuja tai joiden koostumus vaihtelee asteittain, sekä nanolaminaatteja. Alhaisen prosessilämpötilan ansiosta myös herkien materiaalien, kuten muovien ja polymeerien pinnoittaminen, onnistuu. ALD-prosessin kanssa yhteensopivien materiaalien valikoima on laaja, ja se kattaa esimerkiksi oksidit, nitridit, fluoridit, karbidit, sulfidit, ternääriset yhdisteet, metallit (myös jalot), hybridimateriaalit ja polymeerit. [1.]

2.2 Prosessi

ALD-prosessissa lämmitettyyn ja tyypillisesti tyhjiössä olevaan reaktiokammioon pulssitetaan kammiossa olevan substraatin pinnan kanssa reagoivia kaasumaisia lähdeaineita. Pulssien välissä kammio huuhdotaan aiemmasta lähtöaineesta. Pulssisyklejä toistetaan, kunnes haluttu paksuus on saavutettu. Yhdellä sykllillä kasvua on tyypillisesti 0,05 nm - 0,1 nm verran. [2, s.11.] Kuvassa 1 havainnollistetaan näitä ALD-prosessin pulssitusyklejä.

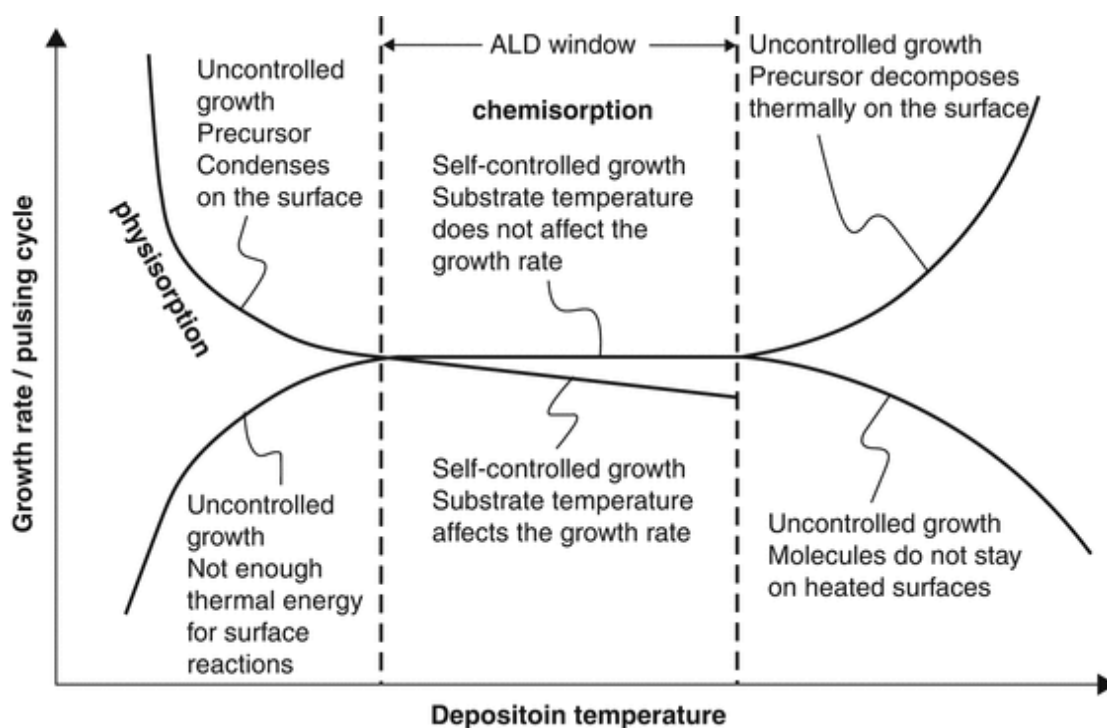


Kuva 1. Kuvassa ALD-prosessin vaiheet [3, s. 8].

ALD-prosessi perustuu atomien, ionien tai molekyylien vetovoimaan, joka mahdollistaa niiden tarttumisen johonkin pintaan muodostaen kalvon. Tätä kutsutaan adsorptioksi, joka on seurausta kappaleen pintaenergiasta. Jotta ALD-

prosessi onnistuu, tarvitaan sopiva lämpötila aineen mukaan, sillä liian matalassa lämpötilassa haluttua reaktiota ei tapahdu lämpöenergian puutteen vuoksi ja lähtöaineen kondensoitumisen vuoksi. Liian korkeassa lämpötilassa lähtöaine voi pilaantua kappaleen pinnalla tai irrota pinnasta. [2, s.9–13.] Kuvassa 2 esitetään kaavio, jossa havainnoidaan tätä kalvon kasvun ja lämpötilan suhdetta.

Yksi tapa poistaa lämpötilaikkunan rajoitus korkeaa lämpötilaa vaativilta aineilta olisi käyttää erittäin reaktiivista ja energiapitoista ainetta, esim. plasmakaasua, yhtenä reagoivana aineena. [2, s.9–13.]



Kuva 2. Kuvassa ALD-ikkuna, jolla havainnoidaan kalvon kasvun ja lämpötilan suhdetta [4].

ALD kehitettiin toisistaan riippumattomina Neuvostoliitossa 1960-luvulla ja Suomessa 1970-luvulla. Suomessa pinnoitusmenetelmän kehitti ja patentoi Tuomo Suuntola tarkoituksenaan valmistaa ohuita elektroluminesenssinäyttöjä. Tuolloin menetelmää kutsuttiin nimellä ALE (Atomic Layer Epitaxy), mutta vain osa tästä työstä koski epitaksiaalisia filmejä, joten prosessista käytetään nykyään termiä ALD. [2, s.10–11.]

2.3 Käyttökohteita

Mikropiirien valmistuksen lisäksi ALD:n muita laajamittaisia teollisia sovelluksia on mm. anturien, LEDien ja MEMS-järjestelmien (mikroelektromekaanisten järjestelmien) valmistuksessa. ALD-kalvoja käytetään myös optiikassa ja optoelektronikassa, himmentymisenestossa ja korroosiosuojauksessa sekä uusiutuvan energian sovelluksissa, kuten aurinkoenergiassa. [1.]

ALD-menetelmä tarjoaa uusia ratkaisuja energian varastointiin ja tuotantoon (esim. kehittyneet ohutkalvoakut ja polttokennot), lääkinnällisten laitteiden ja implanttien bioyhteensopivaan ja bioaktiiviseen pintatoiminnallistamiseen, ekologisiin pakkausmateriaaleihin, kosteus- ja kaasutiiviisiin kapselointikerroksiin, koristepinnoitteisiin ja hydrofobisiin/hydrofiilisiin pinnoitteisiin. [1.]

2.4 ALD Picosunilla

Picosunilla ALD-laitteet perustuvat samoista perusosista, joita ovat kantokaasujärjestelmä, lähdejärjestelmä, reaktiokammio, vakuumijärjestelmä ja substraatin lataus- ja purkujärjestelmästä. Lisäksi laitteeseen on mahdollista lisätä robotiikkaa ja laitteita, mikä riippuu halutusta kokoonpanosta. [5.]

Kantokaasujärjestelmä

Kantokaasujärjestelmällä on kaksi perustehtävää prosessin aikana. Se luo virtauksen kantokaasulinjalle, joka kuljettaa lähdeaineen reaktiokammioon ja mahdollistaa siten ALD-reaktion. Toiseksi se toimii huuhtelukaasuna, joka huuhtoo reaktiokammion pulssien välillä. Lisäksi kantokaasua käytetään tarvittaessa myös reaktiokammion saattamiseen ilmakehän paineeseen pinnoituksen jälkeen. [5.]

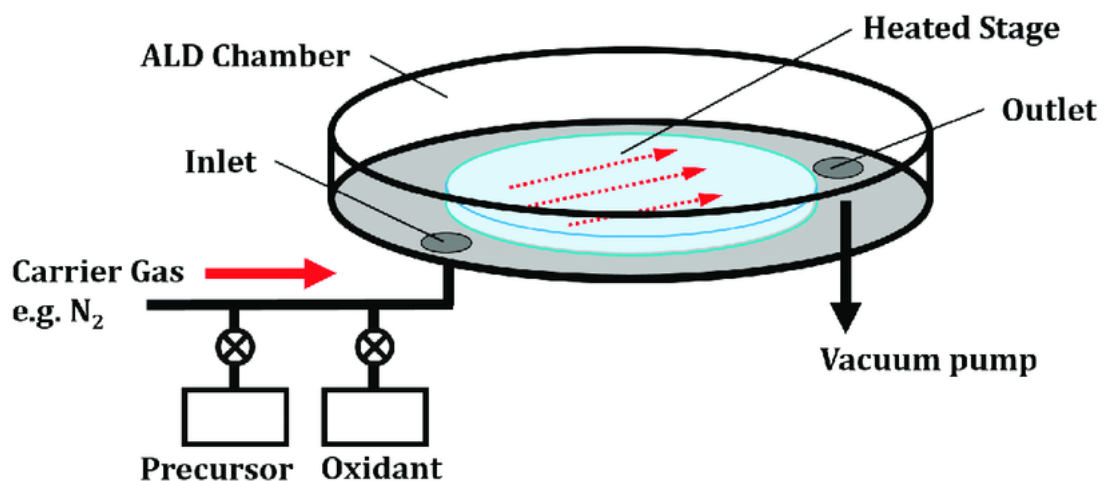
Jokainen kantokaasulinja sisältää massavirtasäätimen ja paineanturin ja ainakin yhden ALD-pulssitusventtiilin, joka yhdistää kantokaasulinjan ja lähteen. [5.]

Lähdejärjestelmä

Lähdeaineen tyypistä riippumatta peruseriaate on samanlainen: jokainen lähdeaineen lähde on liitettyä kantokaasulinjaan pneumaattisella ALD-pulssiventtiilillä. Kun pulssiventtiili on suljettu, kantokaasu virtaa normaalisti reaktorin läpi, eikä lähdeaine kulje sen mukana. Kun pulssitusventtiili avataan, lähdeaine virtaa kantokaasulinjaan ja reaktiokammioon. Lähteessä voi tyypin mukaan olla lämmittimiä, jäähdyttimiä, massavirtamittari tai sulkuventtiileitä. [5.]

Reaktiokammio

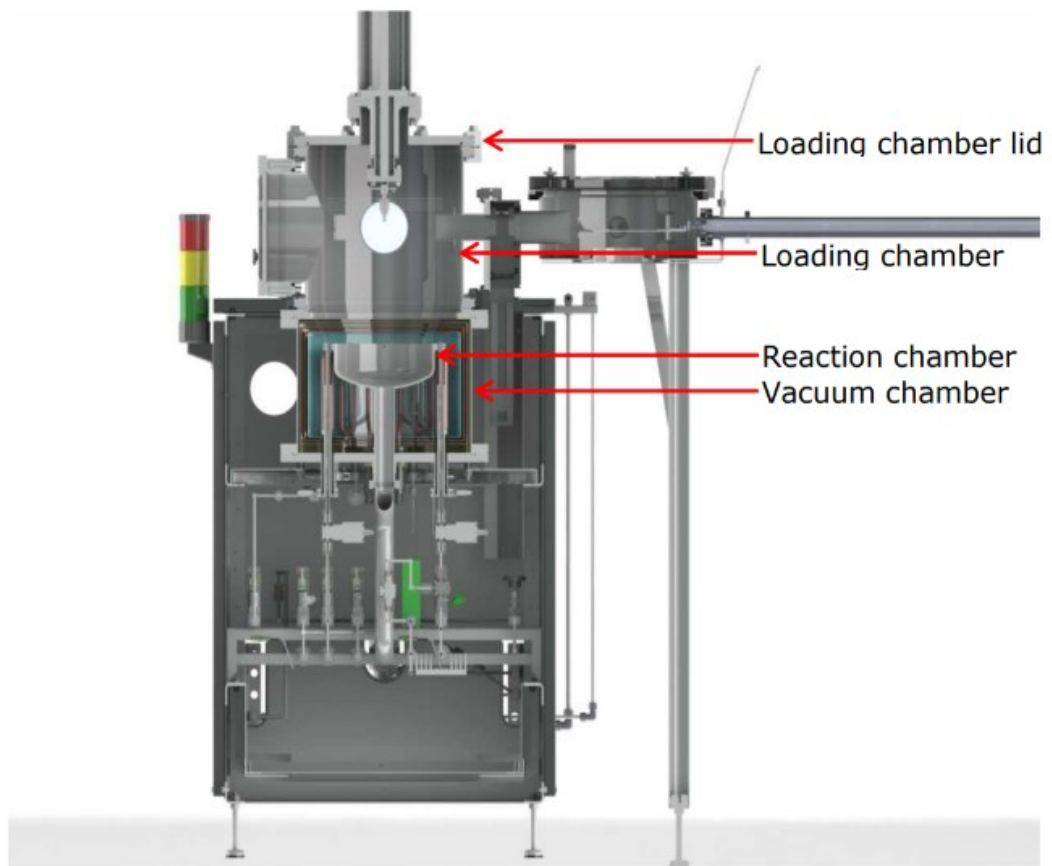
Laitteen kammio koostuu ulommasta vakuumikammioista ja sisemmästä reaktiokammioista. Ulommassa kammiossa on reaktorilämmittimet ja reaktiokammion kannen nostolaitteita. Reaktiokammiossa on liitännät kantokaasuputkiin ja koneen tyypin mukaan substraatin pidike tai kasetti, joka on kiinni kannessa. [5.] Kuvassa 3 on esimerkki reaktiokammioista, johon kytkeytyy kantokaasu- ja lähdelinjat.



Kuva 3. Kuvassa yksinkertaistettu kaaviokuva tyypillisestä tutkimuskäyttöön tarkoitetusta viskoosivirtauksen atomikerrospinnoitusreaktorista. Punaiset nuolet osoittavat kaasun virtaussuunnan näytteen yli [6].

Substraatti tuodaan pidikkeeseen koneen mukaan käsin liikuteltavalla mekanismilla tai robotilla. Molemmissa kammioissa on liitäntä vakuumijärjestelmään, tyypillisesti kammion alaosassa. [5.]

Kuvassa 4 näkyy poikkileikkaus Picosunin™ R-200 Advanced ALD -reaktorista, jossa on käsin ohjattava latausjärjestelmä. Kuvassa näkyy, kuinka reaktio- ja vakuukammio yhdistyvät, ja tämän konetyypin yhteydessä, miten ne yhdistyvät latauskammioon.



Kuva 4. PICOSUN® R-200 Advanced esiteltynä poikkileikkattuna. Koneessa on Picosunin Handyman™ manuaalinen latausjärjestelmä [5].

Vakuumijärjestelmä

Vakuumijärjestelmä koostuu pumppulinjasta, jauheansasta, jossa on jälkipoltin, kaksoissäätöventtiilistä ja vakuumpumpusta. Jälkipolttimen tehtävä on polttaa kammiosta virtaavat ylijäämämekanaalit, jotta ne eivät reagoi keskenään

hallitsemattomasti. Hallittu jälkipoltto toteutetaan ilma- tai vesilähteellä. Jälkipolttimen jälkeen vakuumijärjestelmässä on jauheansa, joka kerää jälkipolttimessa syntyneet hiukkaset ja estää niiden pääsyn pumppuun. [5.]

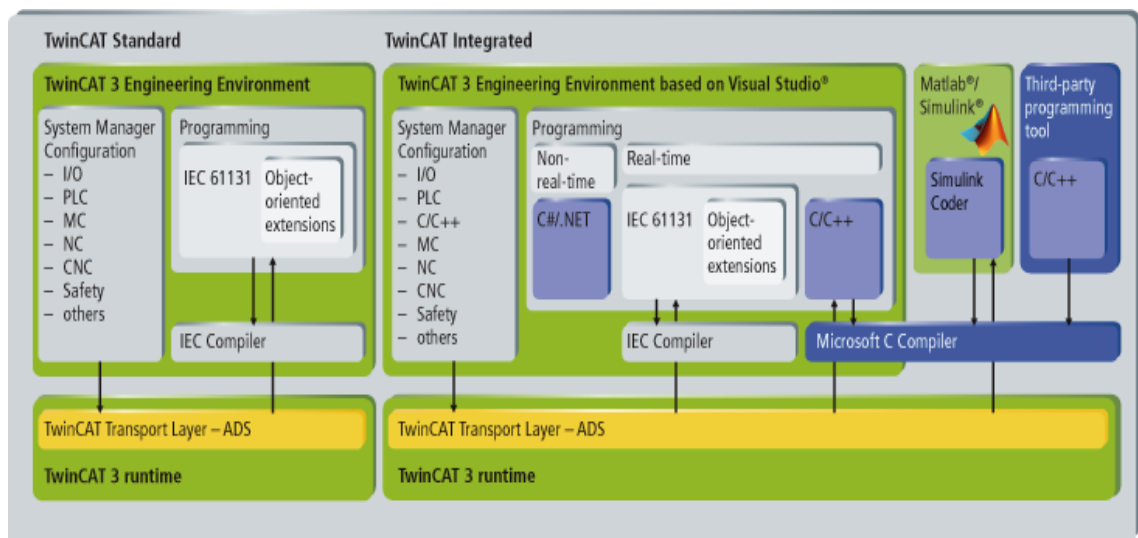
Kaksoissäätöventtiili yhdistää vakuumpumpun ja kammion. Kaksoissäätöventtiin toisella toiminnolla aloitetaan pehmeä pumppaus vakuumiin, ja toinen toiminto avaa linjan kokonaan pumppauksen nopeuttamiseksi alhaisella paineella. [5.]

3 TwinCAT 3

Työ ohjelmoidaan Beckhoffin uusimmalla TwinCAT 3 -ohjelmistokehitysympäristöllä, joka on integroitu Microsoft Visual Studioon. TwinCAT 3 -ohjelman ohjelmistoarkkitehtuuri mahdollistaa modulaarisen ohjelmoinnin, ja se on luokiteltu eXtended Automation Engineering (XAE)- ja eXtended Automation Runtime (XAR) -ohjelmiin [7].

3.1 TwinCAT XAE

TwinCAT XAE (eXtended Automation Engineering) on ohjelmointityökalu, jolla ohjelmoidaan ja konfiguroidaan ohjelmistoprojekteja. IEC 61131-3: n mukaisten ohjelmointikielten lisäksi ohjelmointiin on käytettävissä myös C/C++ ja MATLAB®/Simulink®. Työkalu tarjoaa integroidut virheenkorjausmahdollisuudet ohjelmakoodille ja ohjainlaitteiston diagnostiikkatoiminnot. Perussuunnittelua voidaan joustavasti laajentaa lisätoiminnoilla, kuten ohjelmisto-oskilloskoopilla. [8.] Kuvassa 5 havainnollistetaan TwinCAT 3 -ohjelmistotyökalun rakennetta.



Kuva 5 Kuvassa havainnollistetaan TwinCAT 3 -ohjelmistotyökalun rakennetta [7].

IEC 61131 on ohjelmitavia logiikoita koskeva IEC-standardi ja ohjelmointia PLC:llä käsittelee standardin kolmas osa IEC 61131-3, jota TwinCAT XAE

tukee. Standardi määrittelee PLC-ohjelmointiin muun muassa viisi ohjelmointikieltä, muuttujatyyppejä, ohjelman rakenteellisia yksiköitä ja olio-ohjelmoinnin. [7; 9.] Työssä käytetään Structured Text -ohjelmointikieltä. Structured Text -ohjelmointikieli on yksi viidestä IEC 61131-3-standardin tukemasta kielestä, ja se on korkean tason kieli, joka on lohkorakenteinen ja muistuttaa syntaktisesti Pascalia, johon se perustuu [10, s. 2–5].

TwinCAT 3 tukee oliopohjaista ohjelmointia ja tarjoaa seuraavia toimintoja ja objekteja tätä tarkoitusta varten:

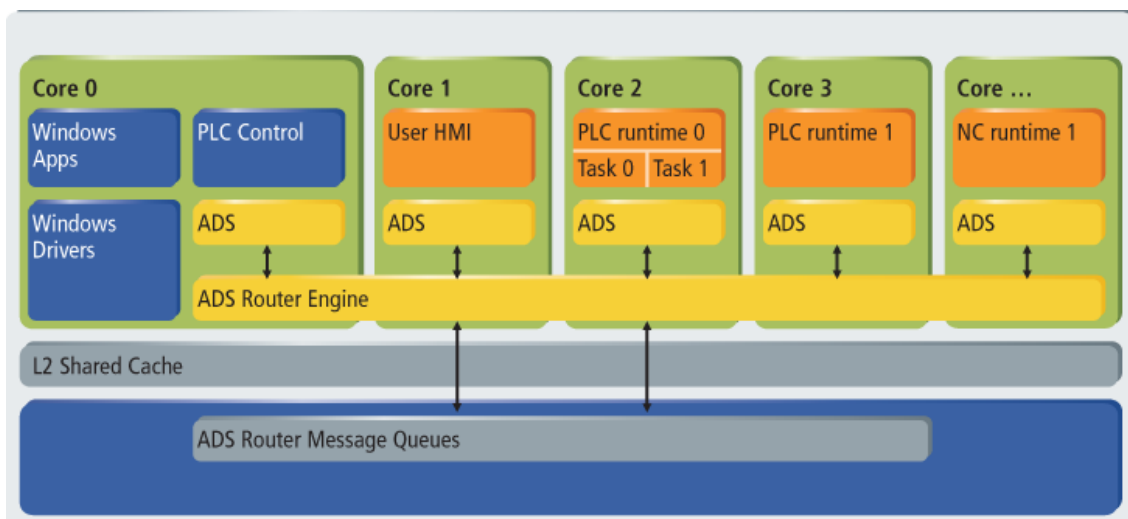
- toimintolohkot (Object Function block)
- metodit (Metodiobjekti)
- ominaisuudet (Property-objekti)
- rajapinnat (objektin rajapinta, rajapinnan toteutus)
- periytyminen
- metodikutsu
- ABSTRACT-käsite. [7.]

3.2 TwinCAT XAR

TwinCAT XAR (eXtended Automation Runtime) on reaaliaikakykyinen suoritin, jossa ohjelmakoodi voidaan suorittaa koneen kenttätason ohjaamiseksi. Modulaarisen arkkitehtuurin ansiosta laajennuksia voidaan asentaa ja ladata sovelluskohtaisesti funktioiden muodossa. [7.]

Varsinaisen käyttöjärjestelmästä riippumattomasti suoritettavan reaaliajan lisäksi PC-pohjaisissa ohjaimissa toimii aina käyttöjärjestelmä, joka mahdollistaa myös muiden ohjelmien suorittamisen. Näin ollen ohjausalustaa voidaan käyttää myös tehtäviin, kuten visualisointiin tai asiakaskohtaisten ohjelmistojen suorittamiseen. [7.]

TwinCAT 3 sisältää tuen moniydinsuorittimille eli yksittäiset TwinCAT-tehtävät voidaan jakaa suorittimen eri ytimille. Näin uusimpien moniydin-teollisuus- ja sulautettujen PC-tietokoneiden suorituskykyä voidaan hyödyntää parhaalla mahdollisella tavalla. [7.] Kuvassa 6 havainnollistetaan eri ohjelmien jakamista eri ytimille.



Kuva 6. Kuvassa havainnollistetaan eri ohjelmien jakamista eri ytimille. [7.]

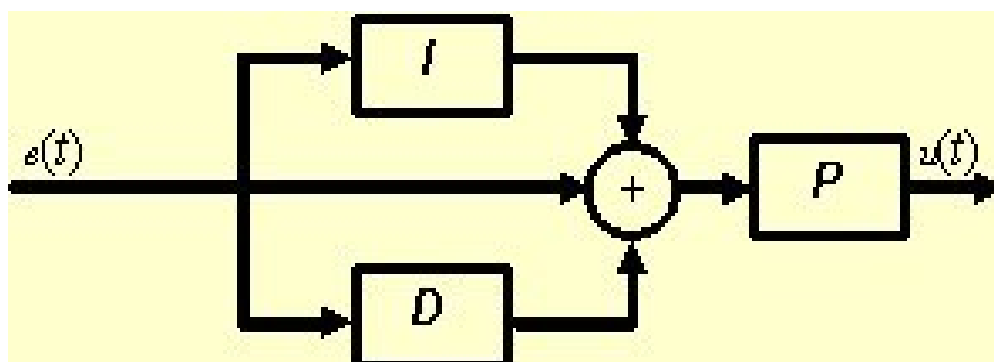
TwinCAT 3:n eri osat kommunikoivat Automation Device Specification (ADS) -viestintäprotokollalla. Se mahdollistaa TwinCAT-järjestelmien tiedonvaihdon ja ohjauksen. ADS on mediariippumaton ja voi kommunikoida sarja- tai verkkoyhteyksien kautta. [7.]

4 Sääntötekniikka

Sääntötekniikka on automaation haara, joka keskittyy säätämiseen. Säätö voi tapahtua joko manuaalisesti käyttäjän toimesta tai automaattisesti säätimen avulla. Automatisoidussa säädössä järjestelmä perustuu mitattuun tietoon. Tämä mittaustieto välitetään säätimelle, joka vertaa mitattua arvoa asetettuun arvoon ja lähettää toimilaitteelle ohjaussignaalin näiden erojen perusteella. [11.]

4.1 PID

PID-säädin on yksi yleisimmistä säätimistä teollisuudessa, ja se koostuu kolmesta osasta, jotka ovat suhde (Proportional), integroiva (Integral) ja derivoiva (Derivative). PID-säätimen perusrakenne on yksinkertainen, mutta sillä on useita käytännön toteutuksia. Oleellista on sen perusrakenne, jossa säädin laskee lähdön mitta-arvon ja asetusarvon erotuksesta eli erosuureesta ja sen vahvistuksesta, integraalista ja derivaatasta. [11, s. 67-90.] Kuvassa 7 on esitetty ideaalirakenteinen PID-säädin, jossa säätimen osilla on yhteinen vahvistus.



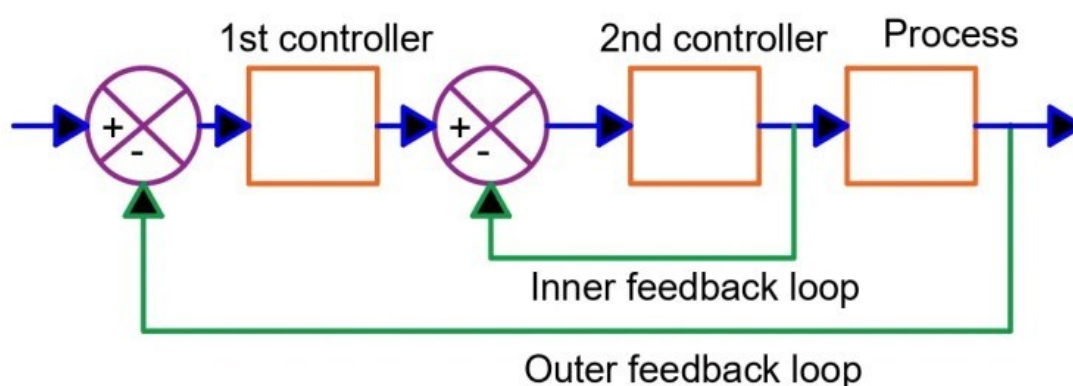
Kuva 7. Kuvassa PID-säädin, jonka eri osilla on sama vahvistus [11].

4.2 Kaskadikytkentä

Kaskadikytkennässä käytetään useita ohjaussuureita ja yhtä säädettävää suuretta, eli se koostuu sisäkkäisistä säätimistä. Kaskadisäädössä varsinaisen suureen ohjaus säädetään toisen suureen kautta. Säätöä voidaan nopeuttaa, kun

varsinaisen säätimen apuna käytetään apusäätäjää, joka reagoi nopeammin muutoksiin. Ulompaa säädintä kutsutaan yläsäätimeksi (isäntäsäädin, pääsäädin), ja apusäädin on alasäädin (renkisäädin). Kaskadikytkennässä pyritään poistamaan häiriöt, jotka vaikuttavat sisempään säätöpiiriin ennen kuin ne ehtivät vaikuttamaan itse prosessiin. Säätöpiirin viive jää osittain sisemmän piirin ulkopuolelle, mikä mahdollistaa säädön nopeuttamisen. [11, s. 33.] Kuvassa 8 esitellään säätöpiiri, jossa käytetään kaskadikytkentää.

Apusäädin voi olla yksinkertainen P-säädin, jonka virittäminen on suhteellisen helppoa. Kaskadikytkennässä apusäätimeltä ei välttämättä vaadita suurta tarkkuutta, kunhan se pystyy reagoimaan tarpeeksi nopeasti pääsäätimen antamiin asetusarvonmuutoksiin. Pääsäätimen ohjaus kytketään apusäätimen asetusarvoon, joten alasäätimen asetusarvo muuttuu jatkuvasti. Kaskadikytkennässä molemmat säätimet voidaan virittää erikseen, mutta kuitenkin siten että alasäädin viritetään ensin ja sitten yläsäädin, joka viritetään hitaammaksi kuin alasäädin. [11, s. 33.]



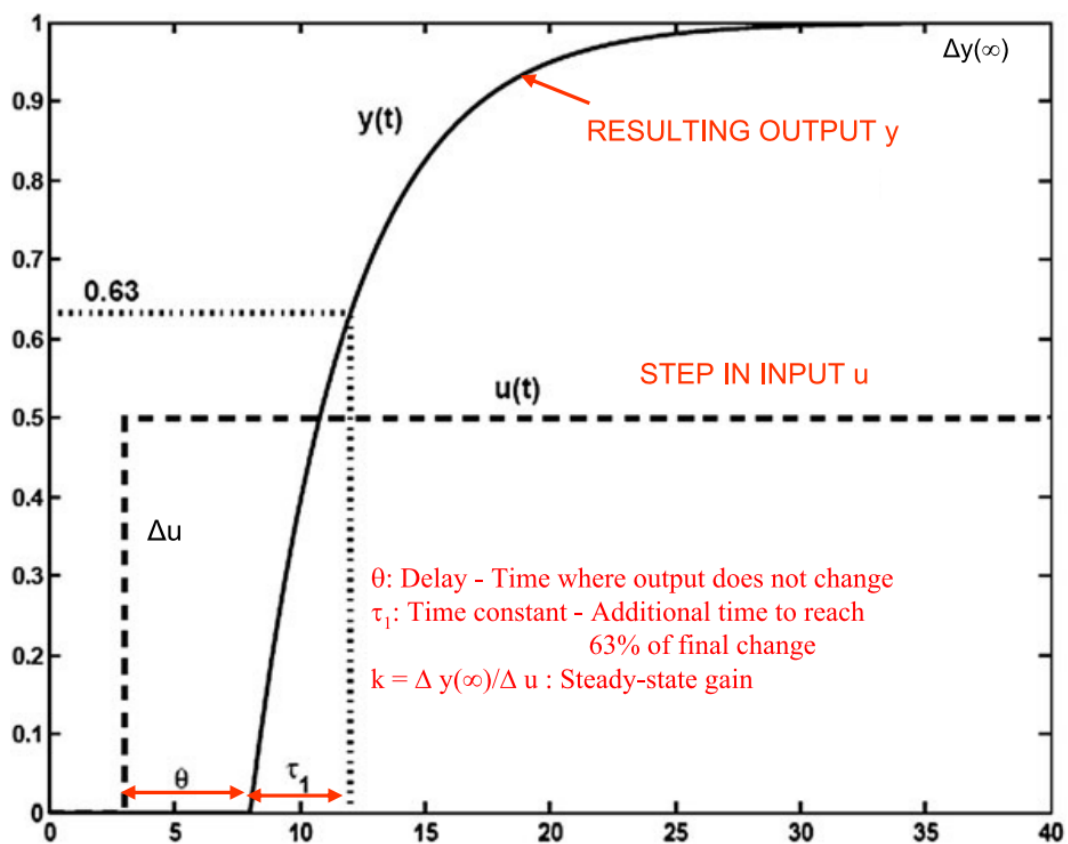
Kuva 8. Kuvassa kaskadisäätöpiiri [12].

4.3 Säätimen viritys

Vaikka PID-säätimessä on vain kolme parametria, siihen ei ole välttämättä helppoa löytää hyviä arvoja eli viritysparametreja. [13, s. 1.] Tässä työssä käytetään SIMC-metodia säädinten viritämiseen ja siihen tarvittava likimääräinen

ensimmäisen kertaluvun viiveellinen prosessimalli saadaan avoimen piirin askelvastekokeella.

Mallia varten tarvitaan prosessin vahvistus (K), joka on mittaussuureen muutoksen suhde ohjaussuureen muutokseen, viive (L), joka on ohjaussuureen muutoksesta mittasuureen muutokseen kuluva aika ja aikavakio (T), joka on aika, jolloin 63 % mittaussuureen muutoksesta on tapahtunut avoimen piirin askelvastekokeessa. Kuvassa 9 havainnollistetaan, mitä näillä parametreillä tarkoitetaan.



Kuva 9. Avoimen säätöpiirin askelvastekokeilu parametrien K , T ja L määrittämiseksi ensimmäisen kertaluvun mallissa [13].

Näistä parametreistä SIMC-viritysmenetelmän mukaan PI-säätimelle lasketaan parametrit

$$K_P = \frac{1}{K} \left(\frac{T}{\tau_c + L} \right)$$

$$T_i = \min\{T, 4(\tau_c + L)\},$$

jossa τ_c voidaan määrittää sen perusteella, miten suljetun systeemin vasteen halutaan käyttäytyvän. Jos lähdön halutaan olevan tiukassa hallinnassa (SIMC "tight control") eli pyritään pitämään lähtösignaali mahdollisimman lähellä asetustarvoa, suositellaan valintaa $\tau_c = L$. Tällä valinnalla on usein nopea vaste ja häiriövastekäyttäytyminen. Vasteen seuranta voidaan parantaa valitsemalla $\tau_c = 0.5 L$, mutta tämä valinta johtaa huonompaan robustisuuteen. [13.]

Jos vasteen halutaan olevan sujuvassa hallinnassa (SIMC "smooth control"), suositellaan $\tau_c > L$, tosin liian suurella arvolla mahdollinen kuormahäiriö voi aiheuttaa epästabiilisuuden. [13.]

5 Ohjausohjelman kehitys

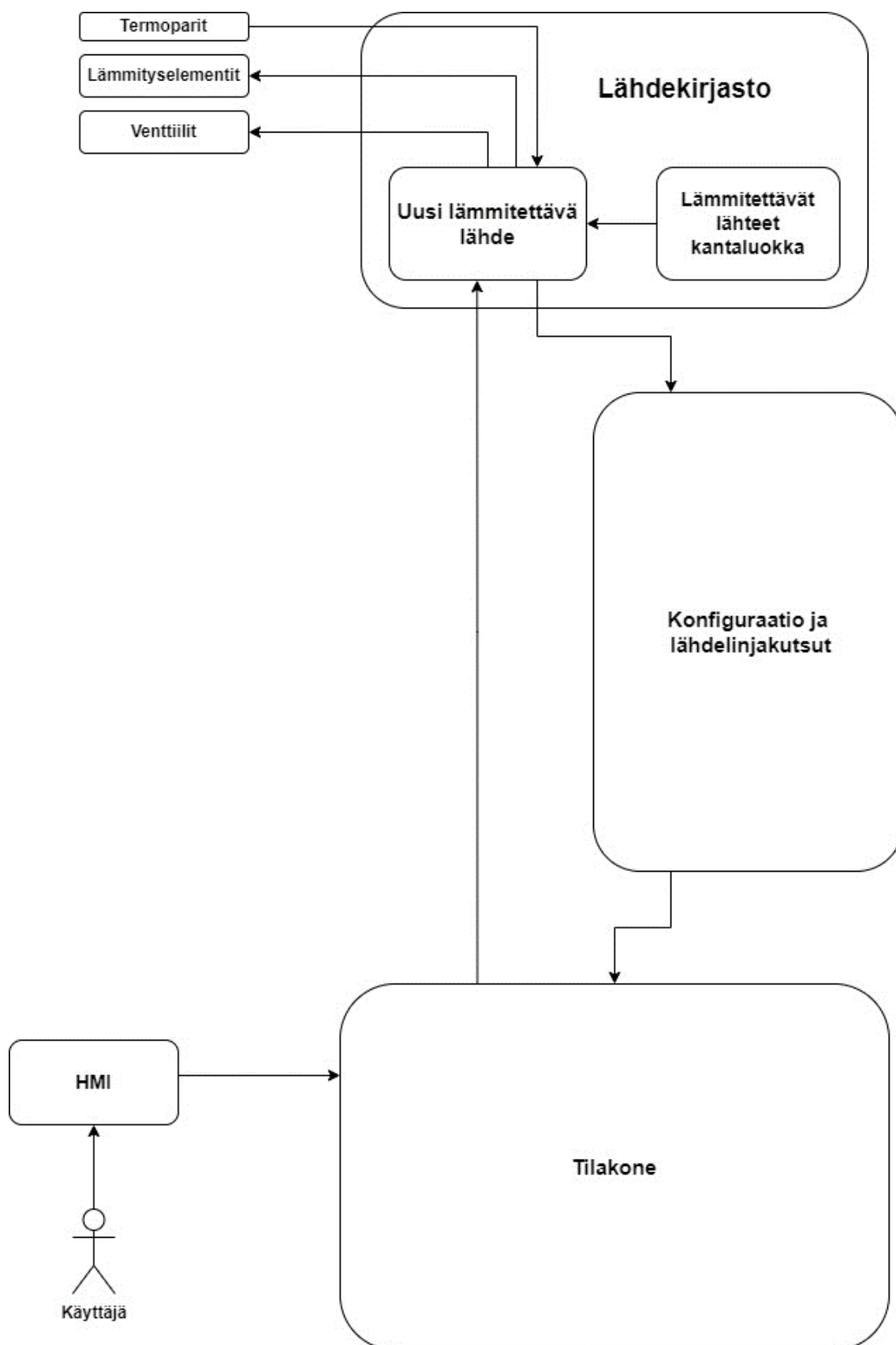
Työssä laaditaan vaatimusmäärittely ja suunnitelma lähteen ohjausohjelmalle ja toteutetaan ja testataan se. Ohjelmisto lisätään Picosunin valmistamaan PicoOS™-ohjelmaan, ja ohjelmointi keskittyy enimmäkseen ohjelman lähdelinjoja käsittelevään kirjastoon. Ohjelmoinnin lisäksi ohjelmaan liitetyt lämpötilasäätimet viritetään ja testataan.

PicoOS™ toimii käyttöjärjestelmänä ja prosessinohjausohjelmana yrityksen täysin automatisoiduissa ALD-laitteissa, Morphereissa ja Sprinttereissä. PicoOS™ yhdistää yksittäisen ALD-moduulin, kiekkojen käsittely- ja siirtojärjestelmän sekä instrumenttien ohjauksen yhteisen käyttöliittymän alle. [14.]

Alkuun kerättiin tietoa lähteestä selaamalla lähteeseen liittyviä dokumentteja, kyselemällä lähteen suunnittelijalta ja ohjelmistoarkkitehtuurilta. Tiedot koottiin yhteen paikkaan ja kirjoitettiin ohjelman vaatimuksia ylös. Vaatimukset eivät olleet missään vaiheessa juurikaan käytössä, sillä dokumenteista ja haastateltavilta saatiin niin hyvä kuva lähteen toiminnasta, ettei vaatimuksia käytetty myöhemmissä vaiheissa.

Ohjelmalla ohjataan lähteen toimilaitteita, joita ovat kemikaalipullon venttiilit, linjan huuhtomisventtiili, pulssitusventtiilit ja lämmitysvastukset. Toimilaitteiden lisäksi lähteeseen liitetään useita lämpötila-antureita. Suunnitelmana oli, että lähteen ohjelma periytyy lämmitettävien lähteiden kantaluokasta ja toteutus on samankaltainen muiden lämmitettävien lähteiden kanssa. Näin saadaan hyödynnettyä muita lähteitä ja niihin kehitettyjä ratkaisuja.

Tiedonkeruun jälkeen alkoi itse ohjelmointityö. Ohjelmointi aloitettiin luomalla toimintolohkoluokka lähdekirjastoon. Luokka sisältää rajapintoja, metodeja ja ominaisuuksia toimilaitteiden mittauksista, ohjauksista ja niiden ohjelmallisten lukitusten käytöstä, joita sitten käytetään prosessimoduulin tilakonetta hallinnoivasta ohjelmasta. Kuvassa 10 havainnollistetaan, miten lähteen ohjelma is-
tahtaa PicoOS™-ohjelmaan.

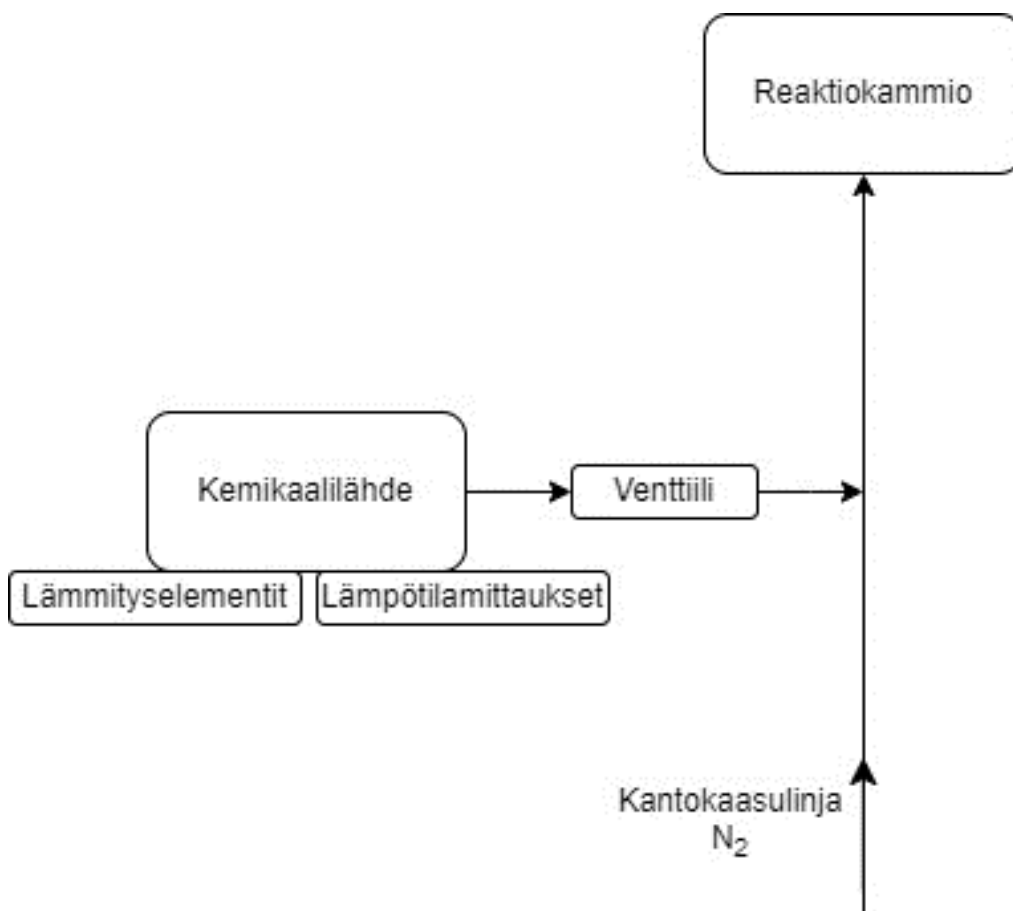


Kuva 10 Havainnekuva lähteen ohjelmasta PicoOS™-arkkitehtuurissa.

Osa luokan sisällöstä periytyi lämmitettävien lähteiden kantaluokasta ja osa pulloisten lähteiden kantaluokasta ja ohjelmistoa täydennettiin tarpeen mukaan. Esimerkiksi yksi pullon lämmitykseen käytetty toimilohko periytyi lämmitettävien lähteiden kantaluokasta, mutta toinen pullon lämmitys täytyi lisätä itse.

Yhtenä vaatimuksena esimerkiksi oli, että venttiilejä voidaan käyttää käyttöliittymästä käsikäytöllä tiettyjen ehtojen täytyessä. Näitä ehtoja ovat esimerkiksi ohjelmalliset lukitukset, jotka estävät ei-toivottuja tiloja tilakoneessa. Tällaiseen vaatimukseen vastaamiseen PicoOS™-arkkitehtuurissa on hyvät mahdollisuudet arkkitehtuurin modulaarisuuden vuoksi. Venttiilille tehdään olio eli toimilohko digitaalisten ulostulojen luokasta, josta saadaan venttiilille rajapinta käyttöliittymälle ja lukituksille.

Työ tehtiin PI-kuvan ja muiden toimintaa ja vaatimuksia selittävien dokumenttien pohjalta. Kuvassa 11 on karkea hahmotelma PI-kuvasta.



Kuva 11. Kuvassa hyvin yksinkertaistettu hahmotelma PI-kuvasta lähteen osalta.

5.1 Testaus

Kun koodi oli saatu kirjoitettua, alkoi testivaihe. Ohjelma testattiin Picosunin valmistamassa Morpher F -koneessa. Testivaiheessa tehtiin IO-testi ja testattiin käyttöliittymä, lähteen toimilohko ja sen metodit ja ominaisuudet ja niiden toiminta konekoodissa.

IO-testillä testattiin, että toimilaitteet on kytketty IO-luettelon mukaisiin IO-pisteisiin sähkökaapissa ja on kenttäpäässä PI-kaavion mukaisessa paikassa. Testit suoritettiin lämpötila-antureiden osalta siten, että kenttäpäässä anturin läheisyydessä oleva liitin irrotettiin ja katsottiin, että käyttöliittymässä kyseisen anturin kohdalla mittaustuloksessa tapahtuu muutos. Lämmityselementin osalta testi suoritettiin siten, että laitettiin vastus lämpenemään ja katsottiin, että elementin

läheisyydessä olevan lämpötilan mittauksessa näkyy muutos. Näin pääteltiin, että lämmityselementti on kytketty oikein ja sijaitsee oikeassa paikassa.

Metodit testattiin käyttämällä koneen automaattisia toimintoja. Esimerkiksi alustustoiminto käynnistää lämpötilansäätimet ja asettaa niille tyhjäkäyntilämpötilan asetusarvoksi kutsumalla metodia `HeatersActiveIdleTemp`. Lämmittimet aktivoituivat ja asetusarvona oli tyhjäkäyntilämpötila, joten metodi toimii. Tähän tyyliin testattiin kaikki metodit eli tehtiin jokin toiminto koneella, joka kutsui kutakin metodia ja varmistettiin että metodin sisältämät toiminnot toteutuivat.

Ominaisuudet testattiin jokseenkin samalla tavalla kuin metoditkin, eli etsittiin kohta, mihin se vaikuttaa ohjelmassa ja muutettiin ominaisuuden arvoa ja katsottiin, saatiinko haluttu lopputulos. Esimerkiksi ominaisuutta, joka on tosi silloin, pulssitusventtiili on auki, katsottiin ohjelmassa, jossa käsitellä ohjelmallisia lukituksia. Ohjelma lukitsee muut pulssitusventtiilit, jos joku on jo auki. Käyttöliittymästä avattiin pulssitusventtiili ja muut pulssitusventtiilit lukittuivat, eli ominaisuus toimii.

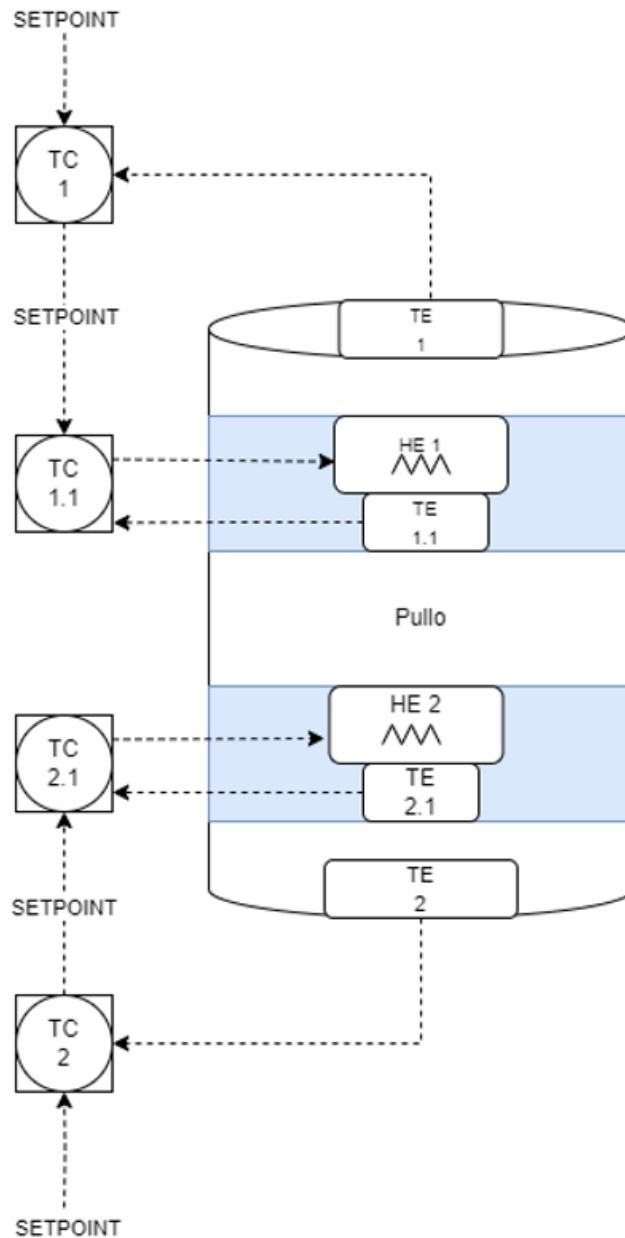
Käyttöliittymästä katsottiin, että kaikki toimilaitteet ja anturit näkyvät oikein ja että ne ovat linkitetty oikeain ohjelmaan. Tämän lisäksi testattiin, että halutut toiminnot toimilaitteille ovat tehtävissä käyttöliittymästä, esimerkiksi venttiilin avaus ja sulkeminen onnistuu käyttöliittymästä.

5.2 Lämmittimet

Kooditestauksen jälkeen alkoi lämmittimien viritys, joka oli astetta hitaampi prosessi johtuen lämmitettävistä rakenteista.

Lähteessä on lämmittimet, jotta saadaan kemikaali kiinteästä olomuodosta höyryksi ja tarpeeksi painetta pulloon. Sen lisäksi kemikaalin reitti pullosta kammioon on lämmitetty, jottei kemikaali kondensoidu tälle välille. Näitä lähteeseen liitettäviä lämmittimiä on 4 kappaletta, joista 2 on pullon lämmittämiseen, yksi venttiililohkon lämmittämiseen ja yksi linjan syöttöputken kammion läpiviennin lämmittämiseen. Nämä lämmittimet koostuvat lämmitinelementeistä, jotka ovat

alumiinilohkoissa, joista lämpö johdetaan erilaisiin teräsrakenteisiin. Kuvassa 12 havainnoidaan pullon lämmittäjiä. Lämpötilan säätö on toteutettu kaskadisäätimellä, joka on kehitetty TwinCAT Controller Toolboxin ideaalisen PID-säätimen päälle.

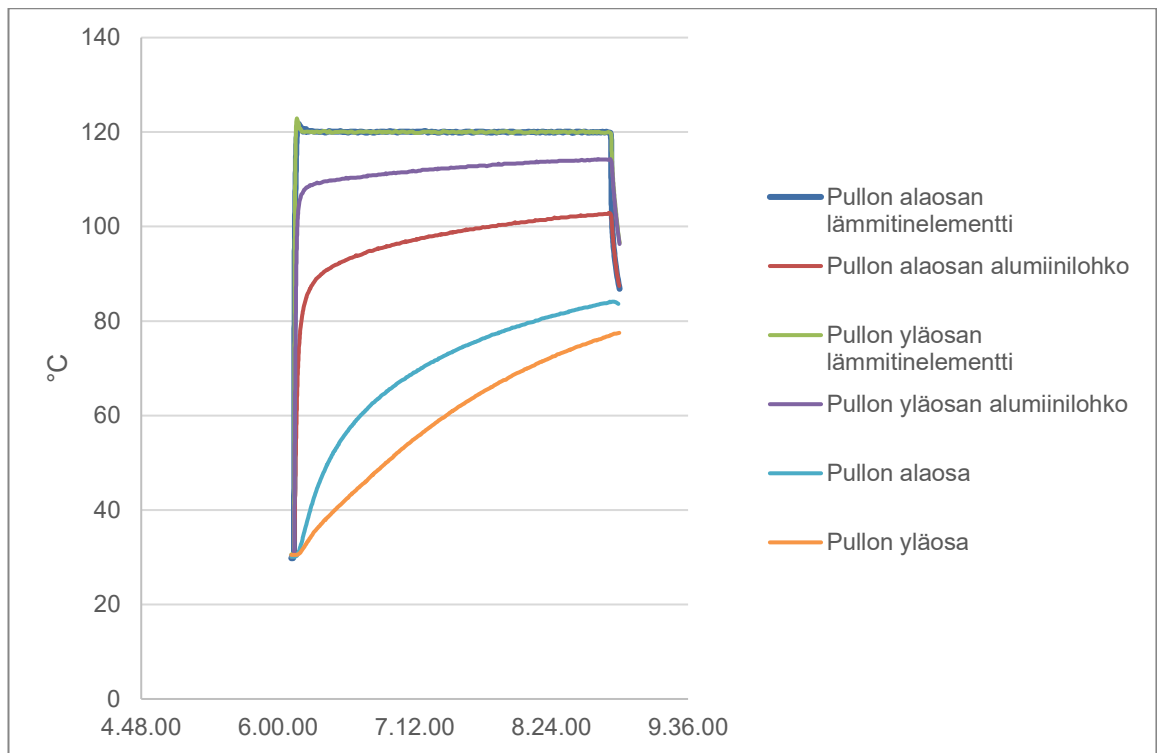


Kuva 12. Kuvassa pullon lämmittimien säätöpiirit.

Pullon lämpötilasäätimet viritettiin automaattisella viritystoiminnolla, joka laskee säätöparametrit käyttäen SIMC-metodia. Virityksessä tehdään askelvastekoe, mitataan tulokset ja niiden perusteella lasketaan optimaaliset viritysparametrit. Viritystoiminnolle syötetään parametrit, joilla kerrotaan, kuinka paljon lämpötilan pitää nousta määritellyn ajan, jotta lämpötilan katsotaan nousevan. Tämän lisäksi virittimelle syötetään lämpötila-arvo, jonka sisällä mitatun lämpötilan pitää pysyä määritellyn ajan verran, jotta lämpötilan katsotaan olevan paikallaan, eli se ei nouse eikä laske. Näiden lisäksi määritellään vielä haluttu askeleen koko.

Elementtiä virittäessä syötetään askeleen koko tehona välillä 0–100 %, jolloin askelvastekokeessa lämmitetään elementtiä tällä teholla ja elementti lämpenee ja asettuu johonkin lämpötilaan. Pääsädintä virittäessä askeleen koko annetaan celsiusasteina, johon elementti lämmittää itsensä, jonka jälkeen prosessi lämpenee ja asettuu lopulta johonkin lämpötilaan.

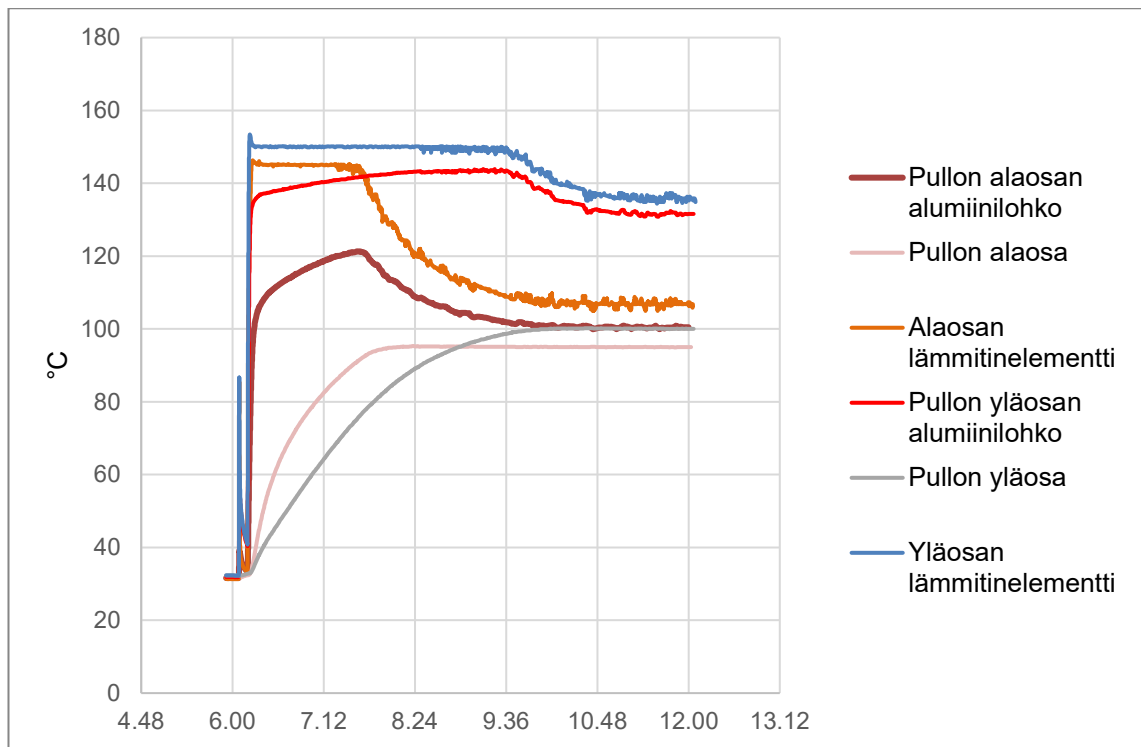
PID-säätimen parametrit laskettiin SIMC-metodin tiukkaan hallintaa. Kuvassa 13 esitetään kaavio pullon lämpötilamittauksista pääsäätimen virityksen ajalta. Askeleen koko valittiin siten, että elementin lämpötila nousi sataan kahteenkymmeneen asteeseen.



Kuva 13. Kuvassa askelvastekokeen lämpötilamittaukset.

Toissijaisia eli lämmitinelementtien lämpötilasäätimiä ei viritetty, koska niille löytyi kohtuullisen hyvät säätöparametrit elementeille toisesta lämmitettävästä lähteestä. Viritys ei ole täydellinen ja kuvassa 13 ja 14 nähdäänkin parin asteen ylitys, mutta koska teräspullo lämpenee niin hitaasti, ei pienellä tavoitelämpötilan ylityksellä ole merkitystä elementin kohdalla.

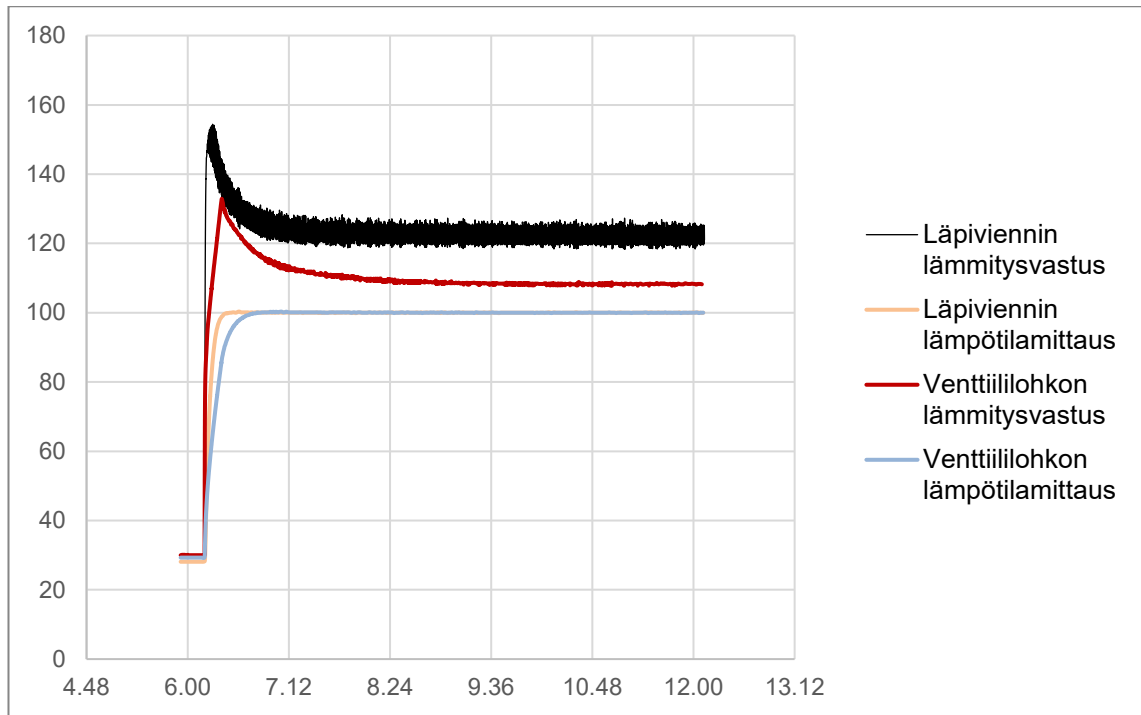
Kuvassa 14 on kaavio lähdelinjan pullon testilämmittämisestä virituksen jälkeen. Selitteet "Pullon yläosa" ja "Pullon alaosa" ovat siis pääsäätimille tulevat mittaukset, ja lämmitinelementteihin viittaavat selitteet ovat elementtien säätimille tulevat mittaukset. Pullon yläosan asetusarvo oli 100°C ja alaosan asetusarvo 95°C.



Kuva 14. Kuvassa lämmitystestin lämpötilamittaukset pullon osalta.

Kuten kuvasta nähdään, viritys onnistui ja se täyttää lämmittimille asetetun vaatimuksen maksimissaan kahden asteen ylityksestä. Muita vaatimuksia ei ollut, joten säätimen parametrit olisi voinut laskea SIMC-metodin sujuvaan hallintaan, jos olisi näyttänyt siltä, että tiukalla hallinnalla olisi tullut liikaa ylitystä. Viritystoiminnossa oli kuitenkin määritelty vain tiukka hallinta, joten se oli ensisijainen vaihtoehto. Kuvassa näkyy myös elementtien maksimilämpötila, joka on 50°C astetta enemmän kuin kohteen asetusarvo.

Venttiililohkon tai läpiviennin lämmittimiä ei viritetty, koska ne on kopioitu tähän linjaan sellaisenaan toisista projekteista ja siten niihin löytyi säätöparametritkin. Uusi linja kylläkin eroaa näistä toisista linjoista, joista säätöparametrit otettiin, joten tässä uudessa linjassa kopioidut säädinten parametrit olisivat voineet olla epäkelpoiset, mutta onneksi näin ei kuitenkaan ollut. Kuvassa 15 on venttiililohkon ja läpiviennin lämmitystestin tulokset. Asetusarvona oli 100°C.



Kuva 15. Kuvassa venttiililohkon ja putkilinjan kammion läpiviennin lämmitystestien tulokset.

Kuvassa näkyy läpiviennin lämmitysvastuksen lämpötilassa sahailua. Tämä johtui siitä, että lämmitysvastuksen säätimen parametrit olivat testivaiheessa huonot eikä vastus asettunut kunnolla asetustempötilaan. Kun tämä huomattiin, vaihdettiin säätöparametrit samoiksi, mitä venttiililohkon vastuksella oli, ja tulokseksi saatiin paremmin asetustempötilaan asettuva lämmitysvastus.

6 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli lisätä tuki uudelle lämmitettävälle kemikaalilähteelle Picosunin valmistamaan PicoOS™-käyttöjärjestelmään. Työssä laadittiin ohjelmalle suunnitelma ja vaatimusmäärittely, joiden pohjalta ohjelma toteutettiin ja testattiin.

Työ onnistui hyvin, ja se täyttää sille asetetut vaatimukset. Tulokseksi saatiin toimiva ohjelmalisäys PicoOS™-käyttöjärjestelmään, joka tuli käyttöön asiakkaan Morpher F -koneeseen. Työtä erityisesti helpottivat muut lämmitettävät lähteet, jotka ovat pitkälti samanlaisia ja joiden koodista pystyin katsomaan mallia. Myös ohjelman arkkitehtuuri mahdollisti työn jokseenkin helpohkon ohjelmoinnin, sillä esimerkiksi koneen tilakoneeseen ei tarvinnut koskea, vaan riitti, että muutamiin tilakoneen kutsumiin metodeihin lisättiin lähteen käsittely. Myös lämmittimien viritys onnistui parin yrityksen jälkeen riittävän hyvin.

Jatkokehityksenä pullon alaosan lämmittimen asetusarvon voisi laittaa seuraamaan ylemmän osan lämpötilaa, sillä alaosa lämpenee nopeammin, mikä johtuu alumiinilohkon muodoista, jossa on enemmän pinta-alaa, josta lämpö johtuu pulloon. Pullon alaosan ennenaikainen lämpeneminen saattaa johtaa siihen, että kemikaali lämpenee ja sublimoituu eli muuttuu kiinteästä olomuodosta höyryksi alaosassa ja härmistyy eli muuttuu takaisin kiinteäksi pullon yläosaan tukien pullon yläosassa sijaitsevan suodattimen.

Lähteet

- 1 What is ALD. Verkkoaineisto. Picosun Oy. <<https://www.picosun.com/about-us/what-is-ald/>>. Luettu 04.05.2023.
- 2 Kääriäinen, Tommi; Cameron, David; Kääriäinen, Marja-Leena; Sherman, Arthur; Kriinen, Tommi & Kriinen, Marja-Leena. 2013. Atomic Layer Deposition: Principles, Characteristics, and Nanotechnology Applications. E-kirja. John Wiley & Sons, Incorporated.
- 3 Picosun® Morpher. Verkkoaineisto. Picosun Oy. <https://20135258.fs1.hubspotusercontent-na1.net/hubfs/20135258/Product%20Brochures/2022%20June%20Brochures/Morpher_brochure_23-06-2022.pdf>. Luettu 08.11.2023
- 4 Bharat Bhushan. 2014. Encyclopedia of Nanotechnology. E-kirja. Springer Dordrecht.
- 5 ALD R200 Advanced Safety, Operating and Maintenance Manual. Yrityksen sisäinen dokumentti. Picosun Oy.
- 6 Onn, Tzia; Kungas, Rainer; Fornasiero, Paolo; Huang, Kevin & Gorte, Raymond. 2018. Atomic Layer Deposition on Porous Materials: Problems with Conventional Approaches to Catalyst and Fuel Cell Electrode Preparation. Inorganics. Vol. 6, s. 3.
- 7 Beckhoff Information System. Verkkoaineisto. Beckhoff Automation Oy. <https://infosys.beckhoff.com/english.php?content=../content/1033/tc3_overview/180213643.html&id=>>. Luettu 17.05.2023.
- 8 TwinCAT automation software. Verkkoaineisto. Beckhoff Automation Oy. <<https://www.beckhoff.com/en-us/products/automation/twincat/>>. Luettu 17.05.2023.
- 9 Status IEC 61131-3 standard. Verkkoaineisto. PLCopen. <<https://plcopen.org/status-iec-61131-3-standard>>. Luettu 11.11.2023.
- 10 Roos, Nieke. Programming PLCs using Structured Text. Verkkoaineisto. <<https://citeseerx.ist.psu.edu/doc/10.1.1.49.2016>>. Luettu 19.05.2023.
- 11 Harju, Timo & Marttinen, Arto. 2000. Sääätötekniikan koulutusmateriaali. Verkkoaineisto. Control CAD Oy. <https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/pid_kirja_1-1.pdf>. Luettu 11.11.2023.

- 12 Cascade Control Principle. Verkkoaineisto. Electrical Volt. <<https://www.electricalvolt.com/2023/06/cascade-control-principle/>>. Luettu 11.11.2023.
- 13 Skogestad, Sigurd & Grimholt, Chriss. 2012. The SIMC Method for Smooth PID Controller Tuning. Teoksessa Vilanova, Ramon & Visioli, Antonio. (ed.). PID Control in the Third Millennium. Lontoo: Springer London.
- 14 PICOSUN® PicoOS™. Verkkoaineisto. Picosun Oy. <<https://www.picosun.com/products/automation-and-software/picosun-picoos/>>. Luettu 23.05.2023.