



Vasily Sheverdyayev

Kiteenkasvatusuunin jäähdytys- vesikierron lämpötilan ja virtauksen seurantajärjestelmän suunnittelu ja asennus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

16.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä:	Vasily Sheverdyayev
Otsikko:	Kiteenkasvatusuunin jäähdytysvesikierron lämpötilan ja virtauksen seurantajärjestelmän suunnittelu ja asennus
Sivumäärä:	33 sivua
Aika:	16.5.2025
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Automaatiotekniikka
Ohjaajat:	Prosessilaitteinsinööri Toni Kiviahde Automaatiotekniikan lehtori Tuomas Leppänen

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kiteenkasvatusuunin jäähdytysvesikierron lämpötila- ja virtausseurantajärjestelmän suunnittelu ja asennus. Toimeksiantajana on Okmetic Oy, ja tavoitteena oli tehdä uuden kiteenkasvatusuunin käyttöönottoon liittyvien parannusten toteuttaminen.

Kiteenkasvatusuuni kasvattaa kiteitä piikiekkojen valmistusprosessia varten. Piikiekkot ovat Okmetic Oy:n tärkein myyntituote. Kiteenkasvatusuuneilla on keskeinen rooli piikiekkojen valmistuksessa. Opinnäytetyöprojektissa seurantajärjestelmä lisättiin kiteenkasvatusuunin lämpöeristyksen lämpövuotojen ja energiankulutuksen arviointia varten. (Tästä on tulossa diplomityö toisen työntekijän toimesta.) Vantaan tehtaalle on tullut uusi amerikkalainen kiteenkasvatusuuni, joka on otettu käyttöön syksyllä 2024. Tarkoituksena oli saada projektiin liittyviä asennuksia ja parannuksia tehtyä ennen kesää 2025.

Seurantajärjestelmän tarkoitus oli mitata kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmässä olevan veden kiertoa. Seurantajärjestelmän tuli mitata veden lämpötilaa ja virtausta jokaisessa jäähdytysjärjestelmän putkistossa ja välittää saatu tieto lokitiedoston muodossa, jossa dataa voitiin myöhemmin käyttää analysointiin.

Lopputuloksena syntyi uusi seurantajärjestelmä kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmää varten. Kaikki tavoitteet saavutettiin ja seurantajärjestelmä otettiin käyttöön keväällä 2025.

Avainsanat: kiteenkasvatusuuni, piikiekkot, seurantajärjestelmä

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Vasily Sheverdyayev
Title: Projecting and Installation of Monitoring system for Crystal grow furnace
Number of Pages: 33 pages
Date: 16 May 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Automation Engineering
Supervisors: Toni Kiviahde, Process Equipment Engineer
Tuomas Leppänen, Lecturer of Automation Engineering

The theme of this thesis will be improvements related to the commissioning of a new crystal growth furnace at Okmetic Oy. The crystal growth furnace grows crystals for the silicon wafer manufacturing process. Silicon wafers are Okmetic Oy's most important sale products. Crystal growth furnaces has a central role in the manufacturing of silicon wafers.

The thesis will be implemented in a project format and concerns the design, installation and commissioning of a temperature and flow monitoring system for the cooling water circulation of a crystal growth furnace. Monitoring system will be added for the evaluation of heat leaks and energy consumption in the thermal insulation of the crystal growth furnace. (This is becoming a master's thesis by another employee) A new American crystal growth furnace has arrived at the Vantaa factory, which has been put into use in the fall of 2024. The aim is to have the project-related installations and improvements completed before the summer of 2025.

Aim of this work is to design and implement a monitoring system that would measure the water circulation in the cooling system of the crystal growth furnace. The monitoring system must measure the water temperature and flow in each pipe of the cooling system and transmit the information obtained to the log in such a form that the data can later be used for analysis.

Keywords: Crystal grow furnace, Silicon wafer, Monitoring system

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Piikiekon valmistusprosessi	2
2.1	Piikiekon valmistusprosessi yleisesti	2
2.2	Kiteenkasvatusprosessi	2
3	Opinnäytetyön valmistelu	3
3.1	Pääkomponenttien valinta	3
3.2	Muut komponentit	5
4	Verkkoyhteyden ja kytkentöjen toteutus	6
4.1	Peruskytkennät	6
4.2	Verkkoyhteyden rakentaminen	7
4.3	Verkkoyhteyden haasteet	9
5	Ohjelman teko ja HMI-suunnittelu	11
5.1	Ohjelman teko	11
5.2	HMI:n suunnittelu ja ohjelmointi	16
6	Järjestelmän asennus	28
6.1	Ohjauskotelon kokoonpano ja asennus	28
6.2	Antureiden asennus kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmään	30
7	Yhteenveto	31
	Lähteet	32

Lyhenteet

DSP: *Double Side Polish*. Kaksipuolinen kiillotus.

GSDML: *General Station Description Markup Language*. IO-Link-tekniologian spesifikaatiotiedosto.

HMI: *Human Machine Interface*. Ohjelmoitavan logiikan käyttöliittymä.

I/O: *Input/Output*. Tulo- ja lähtöohjaukset.

IP: *Internet Protocol*. Verkkoviestinnän protokolla.

PLC: *Programmable Logic Controller*. Ohjelmoitava logiikka.

SOI: *Silicon On Insulator*. Puolijohdteollisuudessa käytettävä teknologia.

1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö tehdään Okmetic Oy:n toimeksiannosta. Okmetic on suomalainen yritys, joka on perustettu vuonna 1985, ja tällä hetkellä yrityksessä työskentelee noin 628 työntekijää. Piikiekkovalmistajista Okmetic on seitsemänneksi suurin, ja sen päätuotteita ovat 150 ja 200 millimetrin piikiekot, joita käytetään esimerkiksi autoteollisuudessa erilaisten antureiden valmistuksessa. Okmetecin pääkonttori ja tehdas sijaitsevat Vantaan Koivuhaassa, ja lähitulevaisuudessa valmistuu myös toinen tehdas, jonka rakentamiseen on investoitu yli 400 miljoonaa euroa. Tämän mittavan investoinnin tarkoituksena on laajentaa piikiekkojen valmistusta ja luoda satoja uusia työpaikkoja. [1.]

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa kiteenkasvatusuunin jäähdytysvesikierron lämpötila- ja virtausmittausjärjestelmä, jota käytetään myöhemmin energiankulutuksen mittaamiseen ja lämmöneristyksen tehokkuuden arviointiin. Kyseinen kiteenkasvatusuuni otettiin käyttöön syksyllä 2024. Järjestelmän tarkoituksena on mitata jäähdytysvesikierron eri osien lämpötilat ja virtaukset sekä tallentaa tiedot CSV-muotoon myöhempää käyttöä varten. Opinnäytetyön aloitushetkellä kiteenkasvatusuunissa oli käytössä vain lähtevän jäähdytysveden kokonaisvirtauksen ja lämpötilan mittaus.

2 Piikiekon valmistusprosessi

2.1 Piikiekon valmistusprosessi yleisesti

Piikiekkojen valmistusprosessi koostuu useista vaiheista ennen kuin kiekot toimitetaan asiakkaalle. Ensimmäinen vaihe on kiteenkasvatus. Kiteenkasvatuksen jälkeen kide siirtyy sahaukseen, jossa siitä sahataan kiekkoja. Tämän jälkeen kiekot etenevät läppäykseen ja syövytykseen.

Seuraavat vaiheet riippuvat lopputuotteesta, asiakkaan tarpeista ja tarvittavasta teknologiasta. Esimerkiksi osa kiekkoista siirtyy syövytyksen jälkeen suoraan DSP-puolelle, josta ne toimitetaan asiakkaalle, kun taas osa kiekkoista jatkaa jalostusta SOI-osastolla tai jopa kuvioinnissa. [2]. Tässä opinnäytetyössä keskitytään kiteenkasvatukseen sekä kiteenkasvatusuunin jäähdytysvesikierron lämpötila- ja virtausmittausjärjestelmän suunnitteluun, asennukseen ja käyttöönottoon.

2.2 Kiteenkasvatusprosessi

Kiteenkasvatusprosessissa kiteenkasvatusuuneilla on keskeinen rooli. Prosessi alkaa, kun puhdistettu piimurska lisätään kiteenkasvatusuunin upokkaaseen ja sulatetaan. Tämän jälkeen käynnistetään kiteenkasvatusprosessi, jossa siemenkiteen avulla kasvatetaan kiteitä hitaasti. Prosessi kestää tyypillisesti muutamana päivän, ja monet tekijät, kuten uuniin lisättävät lisäaineet, vaikuttavat kiteen ominaisuuksiin.

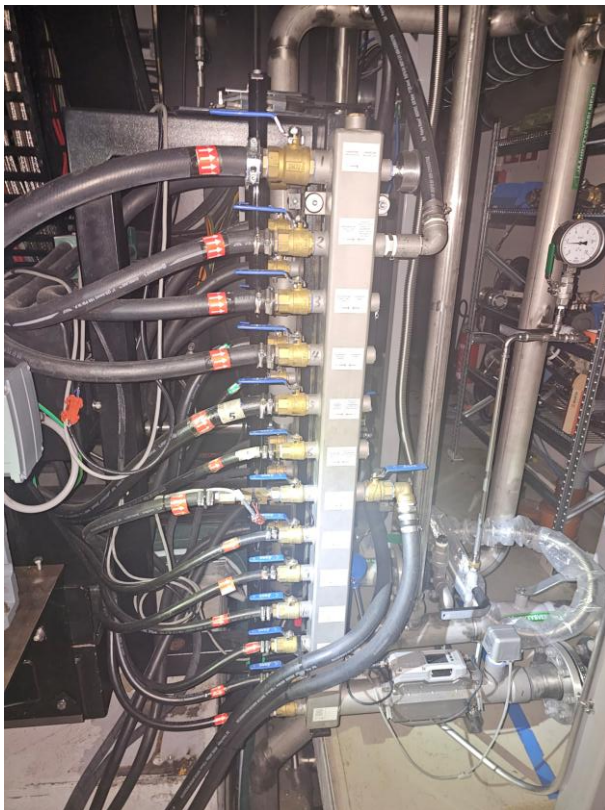
Kiteenkasvatusprosessissa käytetään erilaisia menetelmiä, jotka voivat olla joko magneettisia tai magneetitittomia. Okmetic hyödyntää molempia menetelmiä. Kiteenkasvatusuunin rakenne vaihtelee käytettävän menetelmän mukaan.

3 Opinnäytetyön valmistelu

3.1 Pääkomponenttien valinta

Kun tämän opinnäytetyön alustava suunnitelma oli laadittu, aloitettiin valitsemalla projektiin parhaiten sopivat komponentit. Seuraavaksi esitellään tärkeimmät osat.

Päädyttiin käyttämään ohjelmitavaa logiikkaa, tarvittavia antureita ja HMI-paneelia. Ohjelmitavaksi logiikaksi valittiin Siemens S7-1200, koska sen ominaisuudet sopivat parhaiten tähän tehtävään. HMI-paneeliksi valittiin Siemens KTP700 -paneeli. Kyseinen paneeli kuuluu Basic-sarjaan, mutta siinä on kaikki tarvittavat toiminnot. Antureiden valintaan perehdyttiin tarkasti, koska oli tärkeää valita oikeat anturit kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmän eri putkistoille. Kuvassa 1 on esitetty uunin jäähdytysjärjestelmän putkistot ennen antureiden asennusta.



Kuva 1. Kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmän putkistot.

Järjestelmässä käytetään erikokoisia putkistoja, mikä tarkoittaa, että jäähdytysjärjestelmän eri osissa on vaihtelevia virtauksia. Aiemmin tiedossa oli ainoastaan lähtevän veden kokonaisvirtaus ja lämpötila. Virtaukset arvioitiin kiteenkasvatusuunin eri osissa vertaamalla toisen valmistajan kiteenkasvatusuunin tietoja ja kokonaisvirtausta. Vaikka kiteenkasvatusuunit eroavat toisistaan, näiden tietojen perusteella pystyttiin valitsemaan sopivat anturit. Päädyttiin käyttämään IFM:n valmistamia kolmea eri mallia magneettisinduktiivisia virtaus- ja lämpötilaantureita sekä yhtä lämpötila-anturia tulevan veden lämpötilan mittaamiseen. Virtaus- ja lämpötila-antureiden mallit ovat IFM SM7000, IFM SM8000 ja IFM SM9000, ja lämpötila-anturin malli on IFM TN2105. Kuvassa 2 on esitetty IFM SM8000 -anturi asennettuna putkistoon.



Kuva 2. IFM SM8000 -anturi.

Tässä projektissa käytetyt anturit eroavat toisistaan minimi- ja maksimilämpötila-arvoiltaan ja virtausarvoiltaan. Suurin mitattu virtaus on ollut yli 80 l/min.

3.2 Muut komponentit

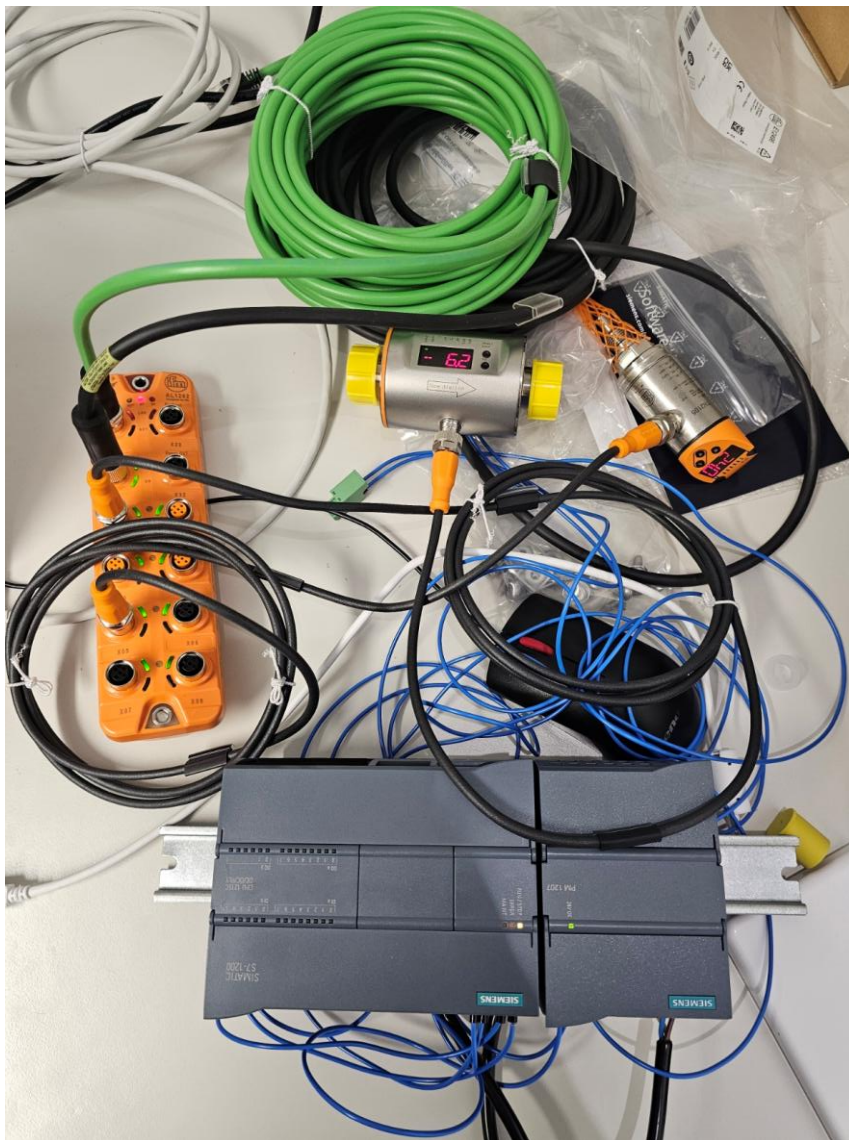
Projektissa tarvittiin myös muita komponentteja, jotka on helppo unohtaa suunnitteluvaiheessa. Tässä projektissa monet näistä komponenteista tilattiin vasta, kun niiden tarpeellisuus tuli ilmi. Tällaisia olivat esimerkiksi erilaiset kiinnikkeet, kaapelit, oikeatehoinen virtalähde sekä muut osat, kuten DIN-kiskot, kaapeleiden suojat ja kaapelikanavat. Lisäksi mainitaan IO-Link-paneelit, jotka tilattiin samalta valmistajalta kuin anturit.

IO-Link-teknologia helpottaa tiedonsiirtoa antureiden ja PLC:n välillä, sillä se mahdollistaa datan kulun molempiin suuntiin yhdellä kaapelilla ja samalla syöttää virtaa kaikille paneeliin kytketyille antureille [3]. Tyypillisesti yhteen paneeliin voidaan kytkeä enintään kahdeksan anturia, joten tässä projektissa tilattiin kaksi IO-Link-paneelia.

4 Verkkoysteiden ja kytkentöjen toteutus

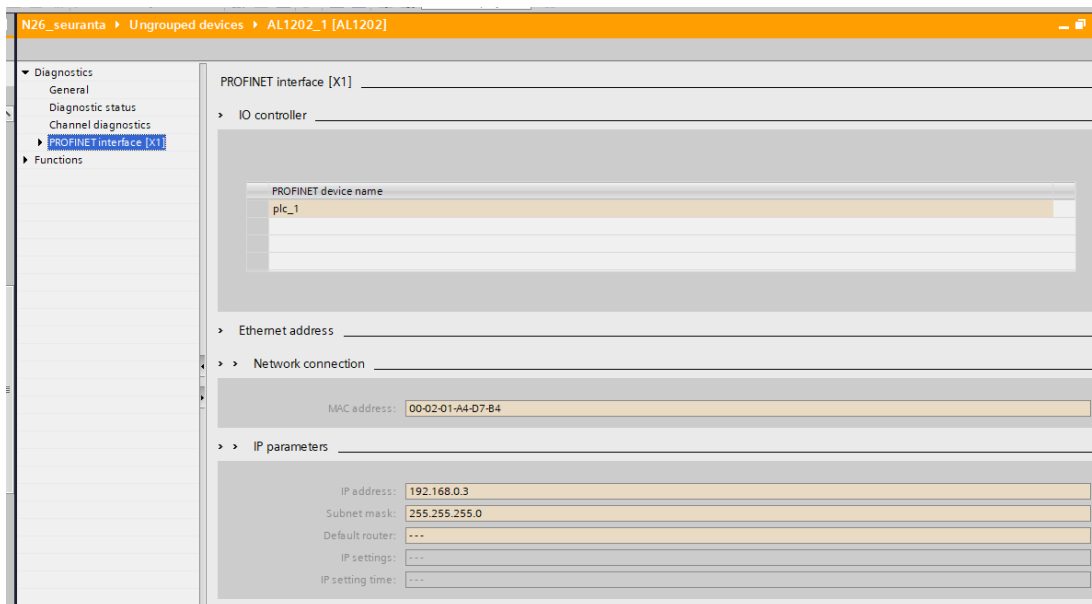
4.1 Peruskytkennät

Tärkeimmät komponentit toimitettiin nopeasti, alle viikossa. Anturit yhdistettiin IO-Link-paneeleihin, minkä jälkeen IO-Link-paneelit, PLC ja HMI-paneeli kytkettiin verkossa olevaan virtalähteeseen. Tämä tehtiin, jotta pystyttiin suorittamaan laitteiston asennus, ohjelmointi ja testaus työpöydällä kiteenkasvatusuunin sijaan. Kuvassa 3 on esitetty, miten PLC, virtalähde, IO-Link-paneeli ja anturit on yhdistetty.



Kuva 3. Peruskytkenta testausta varten.

Kun PLC, HMI-paneeli ja IO-Link-paneelit oli yhdistetty RJ45-kaapeleilla Ethernet-protokollaa käyttäen, ilmeni muutamia ongelmia, jotka oli otettava huomioon. HMI-paneelin tyyppin ja laiteohjelmistoversion on oltava yhteensopivia Siemensin laitteistokokoonpanon kanssa, sillä muuten PLC ei tunnista paneelia, vaikka IP-osoite olisi yksilöllinen ja vapaa. IP-osoitteen määrittäminen on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. IP-osoitteen määrittäminen.

On myös tärkeää, että kaikille laitteille määritetyt IP-osoitteet kuuluvat samaan aliverkkoon. Jos IP-osoitteet ovat eri aliverkoissa, yhteyttä ei voida muodostaa.

4.2 Verkko-yhteyden rakentaminen

Jokainen lisätty laite vaati yksilöllisen IP-osoitteen määrittämistä manuaalisesti. Kun laitteet oli kytketty, verkko skannattiin Proneta-ohjelmiston avulla ja tarvittavat IP-osoitteet lisättiin. Kuvassa 5 on esitetty esimerkki lähiverkon tarkastuksesta Proneta-ohjelmiston kautta. IP-osoitteiden määrittämisen jälkeen paneelit yritettiin käynnistää, mutta huomattiin, että TIA portaali [4] oli tarpeen asettaa laitteiden MAC-osoitteet.



#	Name	Device Type	IP Address	Subnet Mask	MAC Address	Role	IO Controller
3	plc_1	S7-1200	192.168.0.1	255.255.255.0	8c:f3:19:ee:e8:6c	Controller	-
1	al1202	ifm IO-Link Master AL1202	192.168.0.2	255.255.255.0	00:02:d1:a4:db:70	Device	plc_1
2	al1202_1	ifm IO-Link Master AL1202	192.168.0.3	255.255.255.0	00:02:d1:a4:d7:b4	Device	plc_1

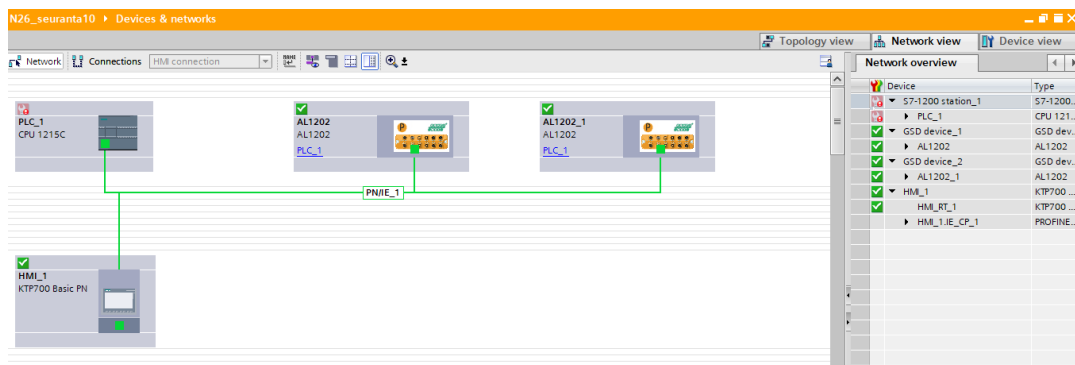
Kuva 5. Lähiverkon tarkastus.

IO-Link-paneelit määritettiin TIA Portalissa tuomalla GSDML-tiedostot. Tämän jälkeen määritettiin paneelin kaikki portit ja osoitteet. On tärkeää, että portit ja osoitteet ovat samassa järjestyksessä. Jos portti ei ole toistaiseksi käytössä, se asetetaan pois käytöstä disabled-tilaan. Määritetyn paneelin asetukset on esitetty kuvassa 6.

Module	Rack	Slot	Address	Q address	Type	Article no.
AL1202_1	0	0	0x1	AL1202	AL1202	AL1202
8 Ports_1	0	1			8 Ports	AL1202
IO-Link Master	0	1	1		IO-Link Master	
IO-Link In 8 Byte = POI_1	0	1	Port 1	134...142	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_2	0	1	Port 2	143...151	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_3	0	1	Port 3	152...160	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_4	0	1	Port 4	161...169	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_5	0	1	Port 5	170...178	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_6	0	1	Port 6	179...187	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_7	0	1	Port 7	188...196	IO-Link In 8 Byte = ...	
IO-Link In 8 Byte = POI_8	0	1	Port 8	197...205	IO-Link In 8 Byte = ...	

Kuva 6. IO-Link-paneelin määrittely.

Jos IO-Link-paneeli on määritetty väärin tai osa porteista jää tyhjiksi ilman, että ne on asetettu pois käytöstä (disabled-tilaan), TIA Portalissa ilmenee lukuisia virheilmoituksia. Tämä hankaloittaa muiden virheiden havaitsemista jatkossa. Kuvassa 7 on esitetty verkkonäkymä TIA Portal -ympäristössä kahden IO-Link-paneelin kanssa.

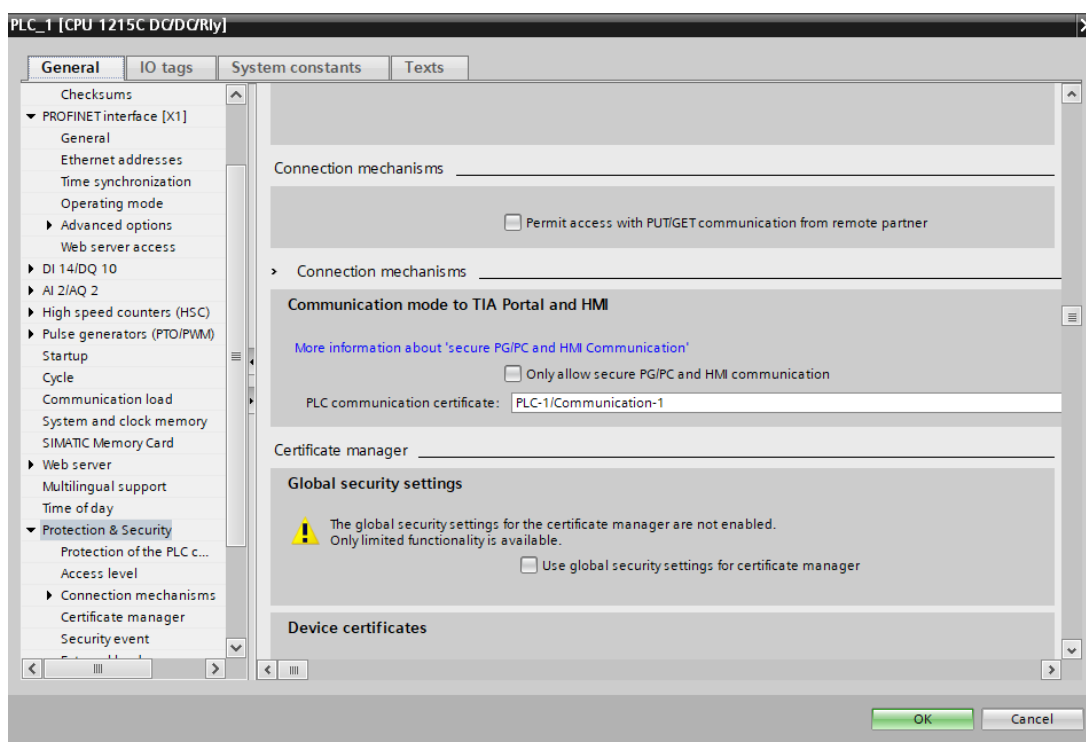


Kuva 7. PLC:n verkkonäkymä.

IO-Link-paneelit toimivat hyvin PLC:n kanssa, vaikka ne ovat eri valmistajalta. Kuten anturit, IO-Link-paneelit ovat IFM:n valmistamia, ja niiden malli on AL1202.

4.3 Verkkoyhteyden haasteet

Vaikka kaikki oli kytketty oikein, ilmeni odottamattomia ongelmia. Esimerkiksi, kun käytetään laitteita, joissa on eri laiteohjelmistoversiot (firmware), yhteys esitetään oletusarvoisesti turvallisuussyistä. Uutta projektia aloitettaessa ja oikeita laitteita lisättäessä salasanaa ei usein haluta asettaa alkuvaiheessa, jotta määrittelyt ja asetukset voidaan tehdä helpommin. Tällöin PLC voi automaattisesti aktivoida asetuksen, joka estää datan kulun laitteiden välillä, vaikka käyttäjälle näkyy, että yhteys PLC:n ja HMI-paneelin välillä on olemassa ja toimiva. Todellisuudessa datan siirto on estetty, kunnes kyseinen asetus poistetaan. Automaattinen asetus selvisi etsimällä. Tämä asetus on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Asetukset, jotka estivät yhteyden PLC:n ja HMI:n välillä.

Nämä turva-asetukset ovat vaikeasti löydettävissä, sillä ne on piilotettu syvälle TIA Portal -ohjelmiston PLC:n General-asetuksiin, tarkemmin Protection and Security -osioon.

5 Ohjelman teko ja HMI-suunnittelu

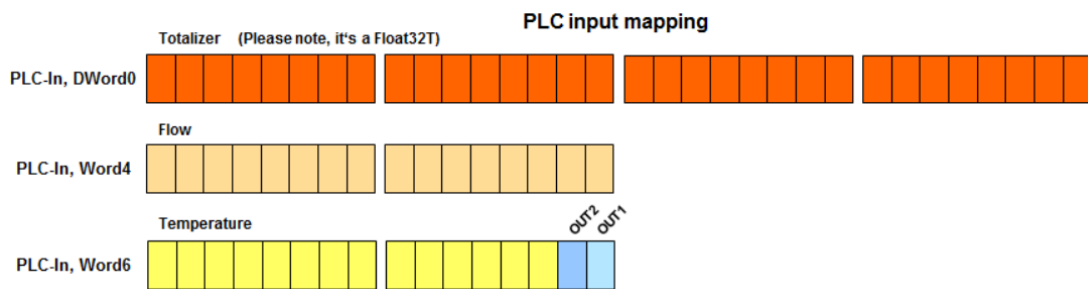
5.1 Ohjelman teko

Kun peruskytkennät oli saatu valmiiksi, kytkettiin muutama anturi IO-Link-paneeliin alustavaa ohjelman suunnittelua varten. Tämä tehtiin alustavia testejä varten, ja kuvassa 9 on esitetty, miten kytkentä toteutettiin työpöydällä.



Kuva 9. Opinnäytetyössä käytettävät laitteet.

Ensimmäiseksi tarkistettiin analogiset signaalit antureista. IFM:n magneettisinduktiiviset anturit käyttävät 8 tavua ja 8 osoitetta. Näistä erityisesti tavut 5–8 ovat kiinnostavia, koska tavut 5 ja 6 vastaavat virtausta ja tavut 7 ja 8 lämpötilaa. Kuvassa 10 on esitetty tavujen jako laitevalmistajan teknisten tietojen perusteella.



Kuva 10. Magneettis- Induktiivisen anturin bittien jako [5].

Jos kytkennät on tehty oikein, TIA Portalissa voidaan määrittää alustavat tagit, antaa niille osoitteet ja selkeät nimet. Kuvassa 10 on esitetty, mitkä tavut vastaanavat mitäänkin tietoja. Antureiden data saapuu kokonaislukuina, mikä ei ole suoraan hyödynnettävissä (lämpötila halutaan celsiusasteina ja virtaus litroina minuutissa). Tällainen raakadata vaatii vielä käsittelyä. Ensin kuitenkin lisättiin kaikki tarvittavat tagit raaka-arvoille kaikille antureille. Järjestelmään kuuluu 15 virtaus- ja lämpötila-anturia sekä yksi pelkästään lämpötilaa mittaava anturi, joten raaka-arvoja on yhteensä 31 kappaletta. Kuvassa 11 on esitetty osa käytetyistä tageista.

PLC tags										
	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Monitor value	Comment
1	Tulo_antturi_raw	Tulo antturi(temp)	Int	%IW77	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1100	Tuulinjan lämpötila anturin "raw" arvo en...
2	Tulo_antturi-2bit_int	Tulo antturi(temp)	Int	%MD1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	17153	Raaka arvo muutettu -2 bitilla
3	Tulo_antturi_scaled	Tulo antturi(temp)	Real	%MD2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.586375E-38	skaalaus
4	Tulo_antturi-2bit_real	Tulo antturi(temp)	Real	%MD1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	129.2627	muutto reaaliuvuksi
5	Antturi1_temp_raw	Virtaus- ja lämpötil...	Int	%IW74	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1868	Raaka luku anturista
6	Antturi1_temp-2bit_int	Virtaus- ja lämpötil...	Int	%MD2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	323	Raaka arvo muutettu -2 bitilla
7	Antturi1_temp-2bit_real	Virtaus- ja lämpötil...	Real	%MD3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	194.7686	muutto reaaliuvuksi
8	Antturi1_temp_scaled	Virtaus- ja lämpötil...	Real	%MD4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	98.37652	skaalaus
9	Antturi1_flow_raw	Virtaus- ja lämpötil...	Int	%IW72	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-622	5
10	Antturi1_flow_real	Virtaus- ja lämpötil...	Real	%MD5	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-1542.22	muutto reaaliuvuksi
11	Antturi1_flow_scaled	Virtaus- ja lämpötil...	Real	%MD6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-6.22	skaalaus

Kuva 11. Esimerkki tagilistasta monitor-tilassa.

Kun kaikki alustavat tagit on lisätty, aloitetaan datan käsittely oikeaan muotoon, koska analogisia signaaleja ei voida käyttää suoraan. Tätä varten tarvittavat tiedot laitevalmistajalta on esitetty kuvassa 12.

Process data Total bit length = 64
(Process data input)

Name	Description	Data type	Bit offset	Bit length	Value range	Gradient	Offset	Unit
Totalizer	Quantity meter which continuously totals the volumetric flow since the last reset	Float32T	32		-99999999.99 to 99999999.99	1	0	l
Flow	Current flow	IntegerT	16	16	-12000 to 12000 (-32762) cr.UL (-32760) UL (32760) OL (32762) cr.OL	0.01	0	l/min
Temperature	Current temperature	IntegerT	2	14	-400 to 1000 (-8186) cr.UL (-8184) UL (8184) OL (8186) cr.OL	0.1	0	°C
OUT2	Status depends on [OU2]	BooleanT	1		(false) inactive (true) active			
OUT1	Status depends on [OU1]	BooleanT	0		(false) inactive (true) active			

Kuva 12. Anturin arvojen skaalaus-ehdot [5].

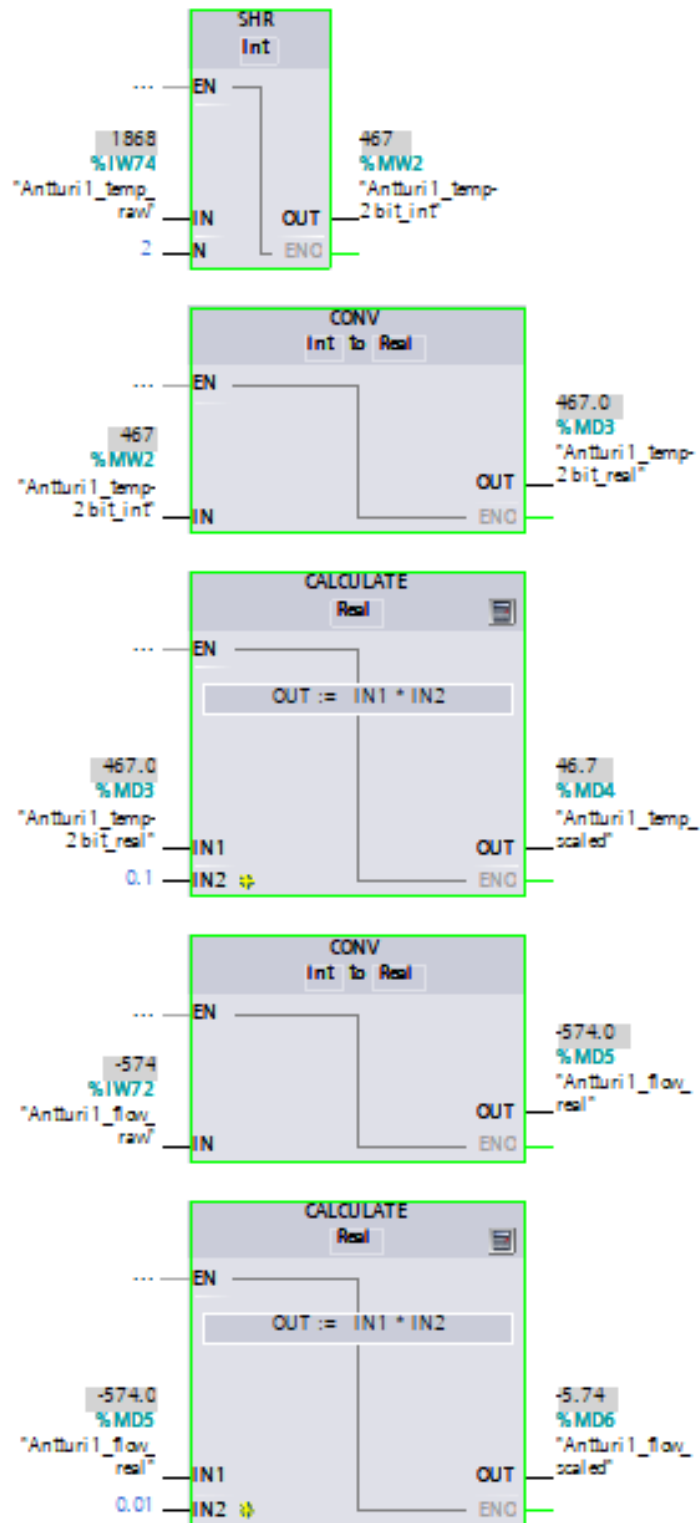
Tässä opinnäytetyössä tämä tarkoittaa sitä, että otetaan esimerkiksi virtauksen mittausalue ja muutetaan se analogiseksi signaaliksi kyseiselle alueelle. Tässä tapauksessa tämä tehtiin kertomalla anturilta tuleva kokonaisluku 0,1:llä. Samaa periaatetta sovelletaan myös lämpötilan käsittelyyn. Virtausarvo saatiin skaalattua helposti, mutta lämpötilan arvot eivät aluksi olleet oikeita.

Lopulta saatiin lämpötilan käsittelykin toimimaan oikein. Ongelma johtui siitä, että lämpötilalle oli varattu kaksi 8-bittistä osoitetta, eli yhteensä 16 bittiä, mutta lämpötilan arvo käyttää vain 14 bittiä. PLC luki arvon kuitenkin 16 bitin kokonaisuutena, mikä tarkoitti, että kaksi ylimääräistä bittiä vaikutti analogiseen raakaarvoon.

Tämä ongelma ratkaistiin muuttamalla kokonaisluku binäärimuotoon, poistamalla kaksi oikeanpuoleisinta bittiä ja muuttamalla arvo takaisin desimaalimuotoiseksi kokonaisluvuksi. Onneksi tätä varten on olemassa erillinen lohko nimeltä SHR (Shift Right), joka siirtää binäärilukua oikealle halutun määrän bittijä. Lopullinen arvonkäsittely yhdellä anturilla näkyy kuvassa 13.

SHR-lohko käsittelee raakaa lukuarvoa leikkaamalla siitä kaksi oikeanpuoleista bittiä ja siirtämällä muut bitit kahdella positiolla oikealle. Saatu uusi arvo tallennetaan uuteen muuttujaan, jolle luodaan oma tagi. Tämän jälkeen arvo muunnetaan CONV-lohkolla REAL-tyyppiseksi, ja tätä varten luodaan oma muuttuja ja tagi. Vasta tämän jälkeen arvo skaalataan haluttuun muotoon.

Virtauksen käsittely tapahtuu tämän jälkeen melko samalla tavalla. Koska virtaus käyttää kaikki 16 bittiä, bittejä ei tarvitse siirtää. Riittää, että arvon tyyppi muutetaan ja arvo skaalataan lopulliseen muotoonsa. Kuvassa 13 näkyy ohjelma, joka muuntaa arvot jatkokäsittelyä varten.



Kuva 13. Toimilohkot, jotka vastaavat oikeiden arvojen muunnoksesta.

On myös hyvä tietää, miten määritetään oikeat osoitteet tageille. Tämä on erityisen tärkeää silloin, kun joudutaan käyttämään muistibittejä, muistialueita tai muita

vastaavia resursseja. On otettava huomioon, että samanaikaisesti ei saa käyttää osoitteita %MB0, %MW0 ja %MD0, vaikka ne näyttävät erilaisilta. Ne kaikki kuuluvat samaan muistialueeseen ja osa käyttää samoja bittejä. Sen sijaan samat osoitenumerot voidaan käyttää samanaikaisesti tulo- ja lähtöalueilla, esimerkiksi %I0.0 ja %Q0.0 ovat sallittuja yhtäaikaisesti, koska ne kuuluvat eri muistialueisiin. Kuvassa 14 näkyvät muistibittien tyypit, kuten Memory Bit, Memory Byte, Memory Word ja Memory Double Word ja niiden käyttöön liittyvät ominaisuudet. [6.]

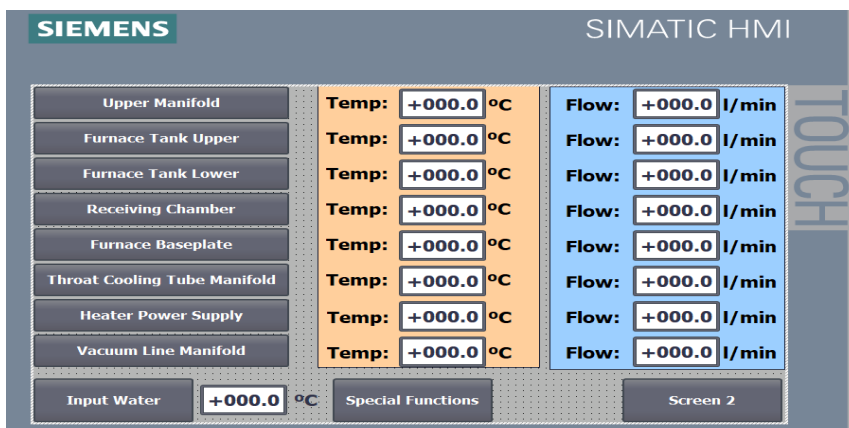
Double Words	Words	Bytes	Bits		
%MD0	%MW0	%MB0	%MX0.7	...	%MX0.0
		%MB1	%MX1.7	...	%MX1.0
	%MW1	%MB2	%MX2.7	...	%MX2.0
		%MB3	%MX3.7	...	%MX3.0
%MD1	%MW2	%MB4	%MX4.7	...	%MX4.0
		%MB5	%MX5.7	...	%MX5.0
	%MW3	%MB6	%MX6.7	...	%MX6.0
		%MB7	%MX7.7	...	%MX7.0
%MD2	%MW4	%MB8	%MX8.7	...	%MX8.0
	

Kuva 14. Muistin jako [6].

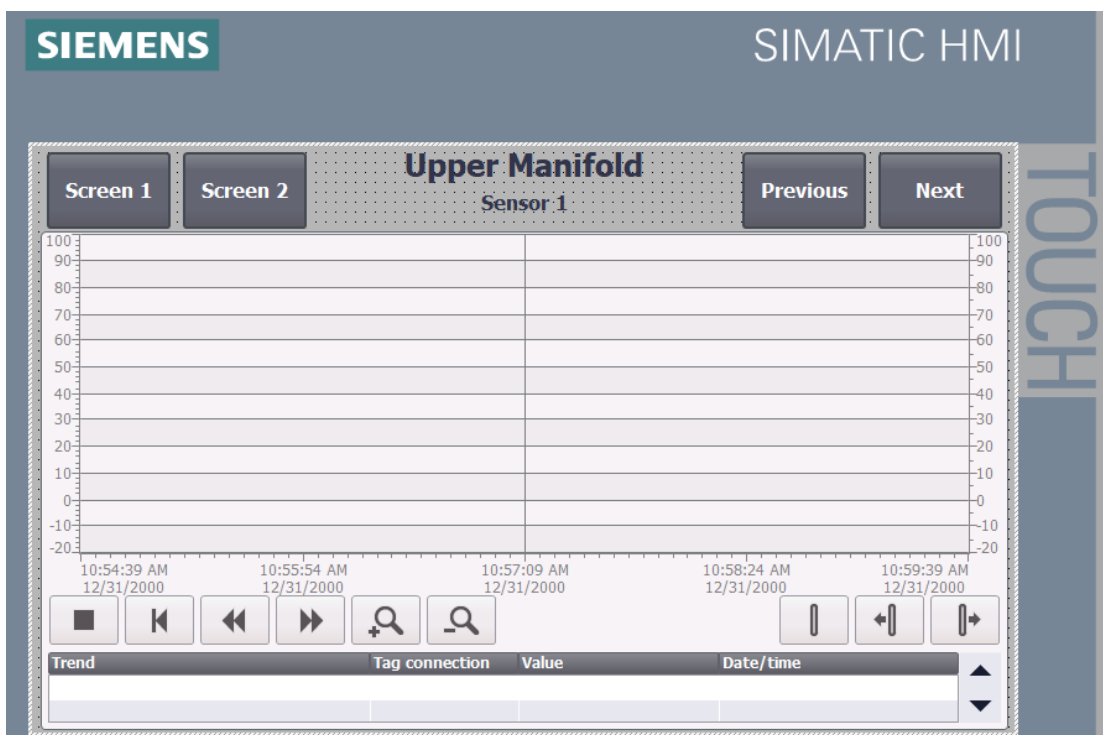
5.2 HMI:n suunnittelu ja ohjelmointi

Kun oikeat arvot oli saatu ja kaikille määritetty omat tagit, aloitettiin HMI:n suunnittelu. Joudittiin tekemään kaksi päänäyttöä: Screen 1 ja Screen 2. Syynä tähän oli se, että KTP700-paneelin näyttö on vain 7 tuumaa, eivätkä kaikki järjestelmän nimet mahtuneet yhdelle näytölle. Tämän vuoksi kahdeksan ensimmäistä nimeä sijoitettiin Screen 1:lle ja seitsemän viimeistä Screen 2:lle. Kuvassa 15 näkyy Screen 1.



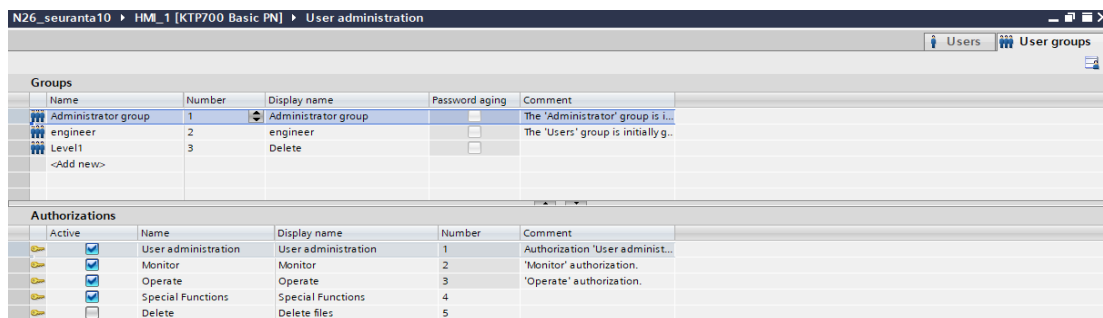
Kuva 15. Käyttöliittymän päänäyttö.

Päänäytöillä näkyvät jokaisen anturin lämpötila- ja virtausarvot. Painamalla osan nimeä, joka vastaa kyseistä anturia, avautuu ikkuna, josta näkyy kyseisen anturin trendikäyrä. Tämä on esitetty kuvassa 16. Trendinäytöltä voi siirtyä seuraavan tai edellisen anturin näkymään sekä palata takaisin päänäytöille.



Kuva 16. Käyttöliittymän trendinäkymä.

Lisättiin myös Special Functions -ikkunan, jossa voidaan tarkastella jokaisen järjestelmän osan hetkellistä tehonkulutusta. Pääsy tälle sivulle on rajoitettu, ja se vaatii käyttäjätunnuksen sekä salasanan. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki käyttäjäryhmistä.



The screenshot shows a software interface for user administration. It is divided into two main sections: 'Groups' and 'Authorizations'.

Groups Table:

Name	Number	Display name	Password aging	Comment
Administrator group	1	Administrator group	<input type="checkbox"/>	The 'Administrator' group is i...
engineer	2	engineer	<input type="checkbox"/>	The 'Users' group is initially g...
Level1	3	Delete	<input type="checkbox"/>	
-Add new->				

Authorizations Table:

Active	Name	Display name	Number	Comment
<input checked="" type="checkbox"/>	User administration	User administration	1	Authorization 'User administr...
<input checked="" type="checkbox"/>	Monitor	Monitor	2	'Monitor' authorization.
<input checked="" type="checkbox"/>	Operate	Operate	3	'Operate' authorization.
<input checked="" type="checkbox"/>	Special Functions	Special Functions	4	
<input type="checkbox"/>	Delete	Delete files	5	

Kuva 17. Käyttöliittymän turva-asetukset.

Lämpöenergian laskentaa varten jouduttiin tekemään erillinen Functio Block, joka laskee lämpöenergian määrää eri uunin jäähdytysjärjestelmän kohdissa. Laskenta perustuu erilliseen yhtälöön, joka on räätälöity järjestelmän tarpeisiin.

$$Q = m \times c \times \Delta T$$

Missä:

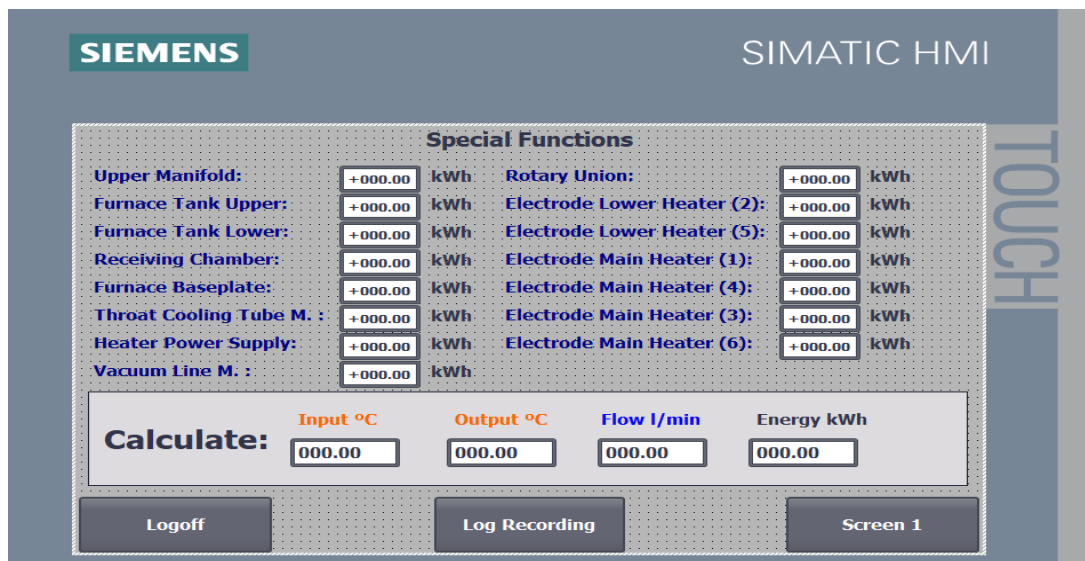
Q — lämpöenergian määrä (jouleina, J),

m — aineen massa (kilogrammoina, kg),

c — aineen ominaislämpökapasiteetti ((Joule/(grammaKelvin) tai Joule/(gramma°C))

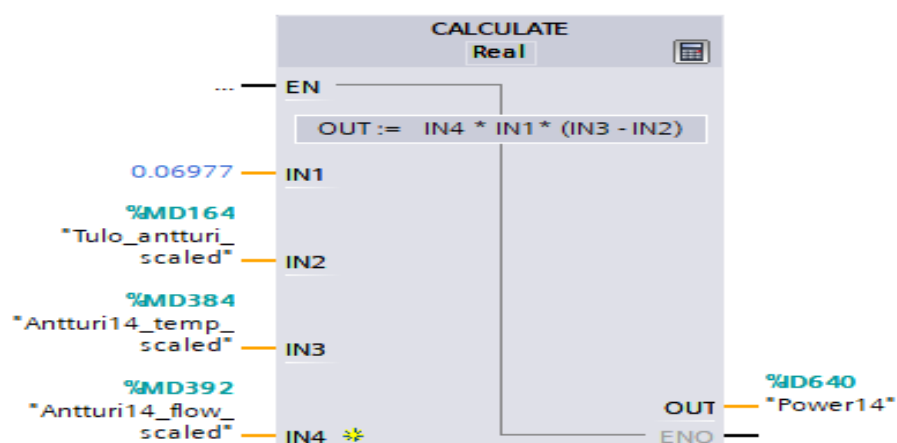
ΔT — Lämpötilan muutos (Kelvin tai °C) [7].

Tälle näytölle lisättiin myös toiminto, jonka avulla voidaan laskea teoreettiset tarvittavat arvot lämpöenergialle. Tämä toiminto voi olla hyödyllinen esimerkiksi tilanteissa, joissa paikan päällä halutaan nopeasti tarkistaa energianlaskennassa käytettävät arvot. Kuvassa 18 on esitetty Special Functions -näyttö sekä toiminto, joka mahdollistaa arvojen tarkastelun ja laskennan.



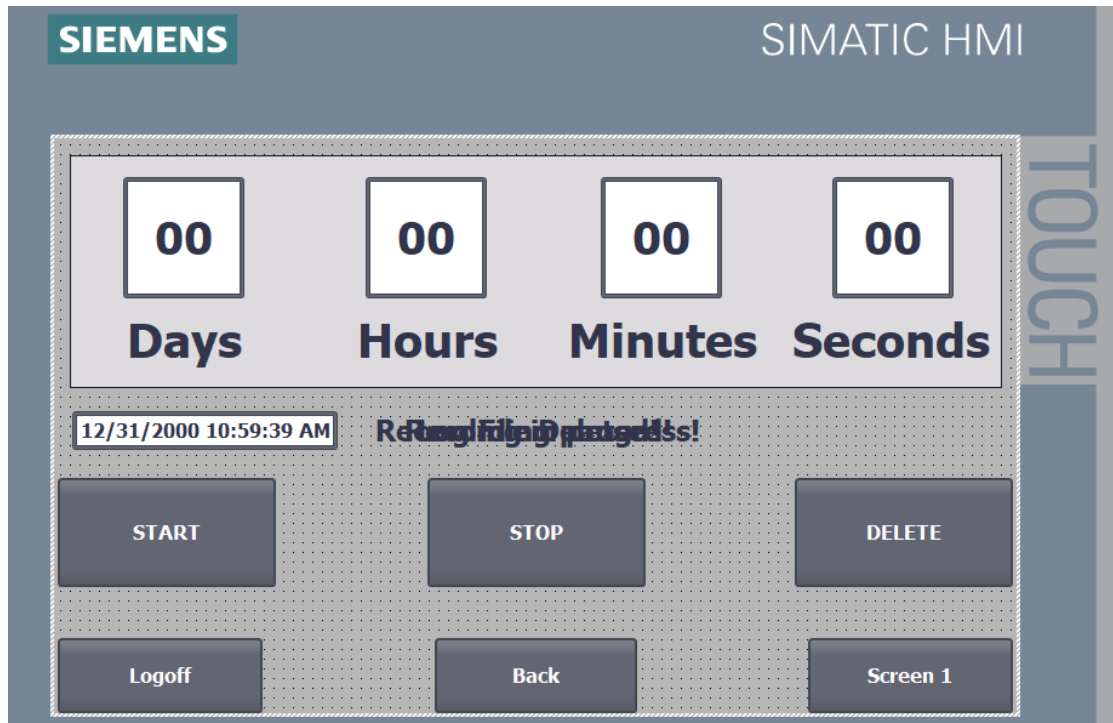
Kuva 18. Käyttöliittymän lämpötehonlaskentanäyttö.

Functional Block on toteutettu yksinkertaisesti Calculate-lohkon avulla. Lämpötehon laskemiseen tarvitaan vain tulevan veden lämpötila, lähtevän veden lämpötila sekä veden virtaus kyseisessä jäähdytysjärjestelmän osassa. Lisäksi laskennassa hyödynnetään veden fysikaalisia ominaisuuksia, kuten ominaislämpökapasiteettia ja tiheyttä. Kuvassa 19 on esitetty esimerkki Calculate-lohkon käytöstä.



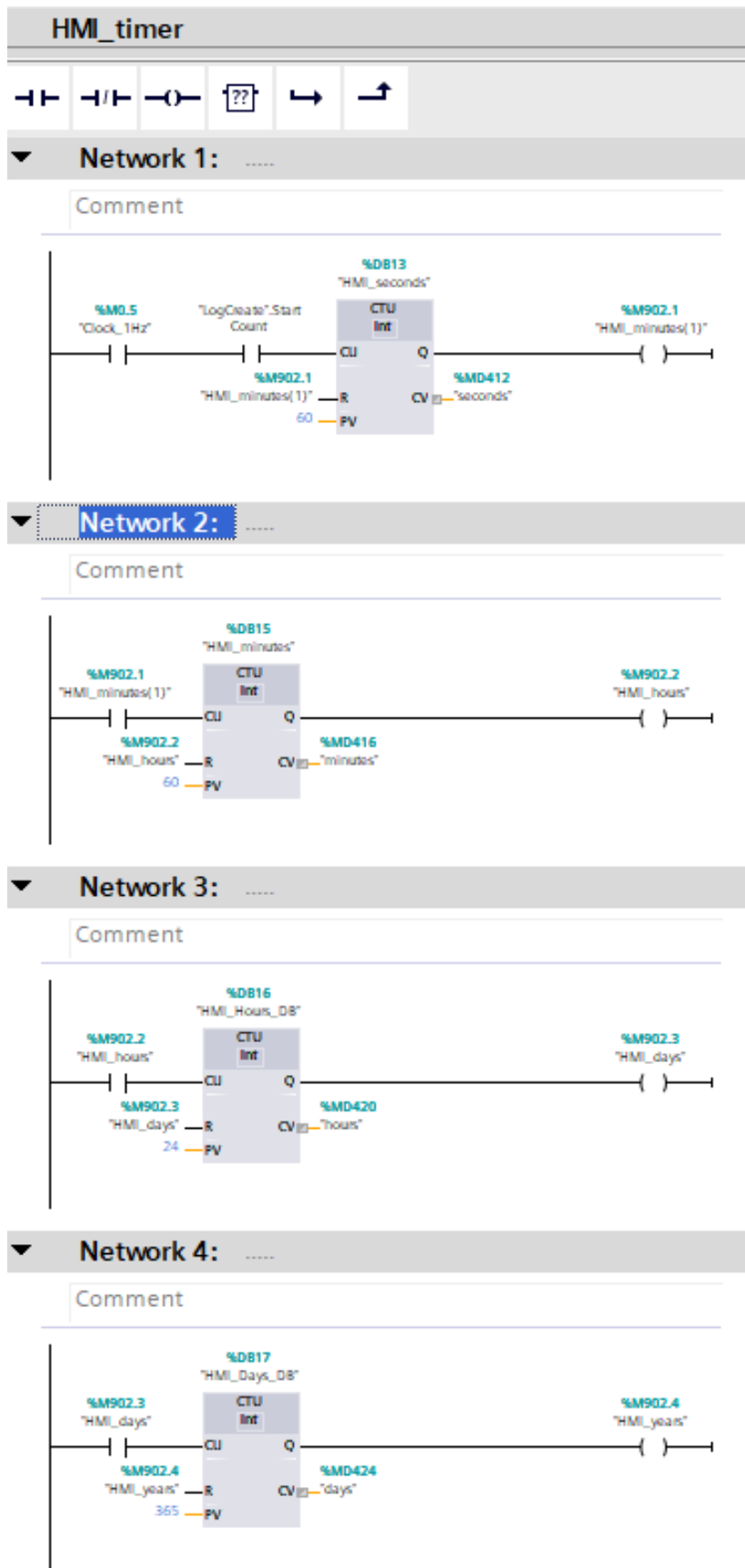
Kuva 19. Calculate-lohko vastaa lämpötehon laskennasta.

Samasta ikkunasta pääsee myös lokitiedostojen tekoon, joka on ehkä kaikista tärkein osa käyttöliittymää, ja sen näytön näkymä on kuvassa 20.



Kuva 20. Näytössä näkyvät lokitiedoston päätoiminnot.

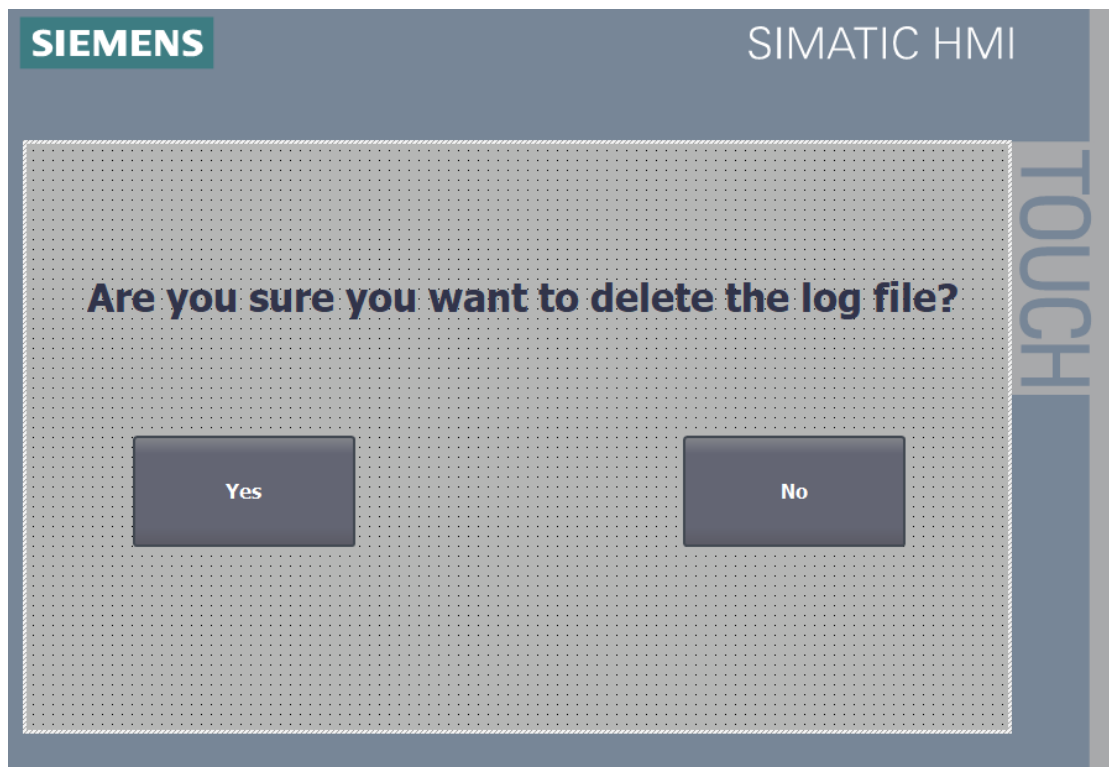
Näytöllä on kolme tärkeintä toimintoa: lokin teon käynnistys, pysäytys ja lokitiedoston poisto. Näytöllä on toteutettu laskuri, joka laskee kuluvan ajan käynnistytksen jälkeen. Painamalla "Stop" lokin teko ja samalla laskuri pysähtyvät, painamalla "Start" lokin teko jatkuu, ja "Delete" poistaa tiedoston. Kun lokin teko on käynnissä, laskurin tausta muuttuu vihreäksi ja näytöllä lukee "Recording in progress". Kun loki teko pysähtyy, lukee "Recording paused", ja kun tiedosto on poistettu, lukee "Log File Deleted" ja samalla laskuri nollautuu. Jotta laskuri osaisi laskea sekun nit, minuutit, tunnit ja päivät oikein, tehtiin erillinen Functional Block, joka näkyy kuvassa 21.



Kuva 21. Laskurin toimintaperiaate.

Toiminto on toteutettu CounterUp-lohkon avulla. PLC:n asetuksissa otetaan käyttöön Clock Memory ja käytetään tulona "Clock 1Hz" (1Hz = 1 sekunti). CounterUp laskee 60:een asti ja lähettää bitin eteenpäin samalla nollaten sekunnit. Seuraavissa lohkoissa lasketaan samalla tavalla tunnit, päivät ja vuodet. Tätä varten luodaan uudet tagit ja osoitteet.

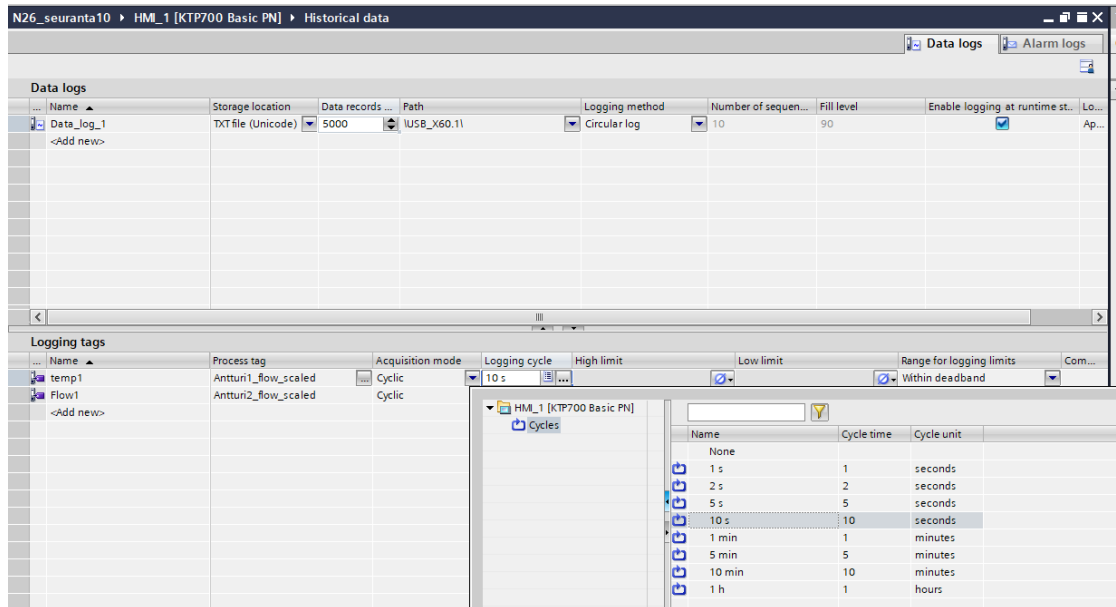
KTP700:lla ei ole mahdollisuutta käyttää pop up -ikkunoita, joten varmistusta varten tehtiin erillinen näyttö, joka kysyy käyttäjältä, haluaako hän oikeasti poistaa tiedoston. Kuvassa 22 on esitetty esimerkki tästä toiminnosta.



Kuva 22. Varmistusnäyttö lokitiedoston poistosta.

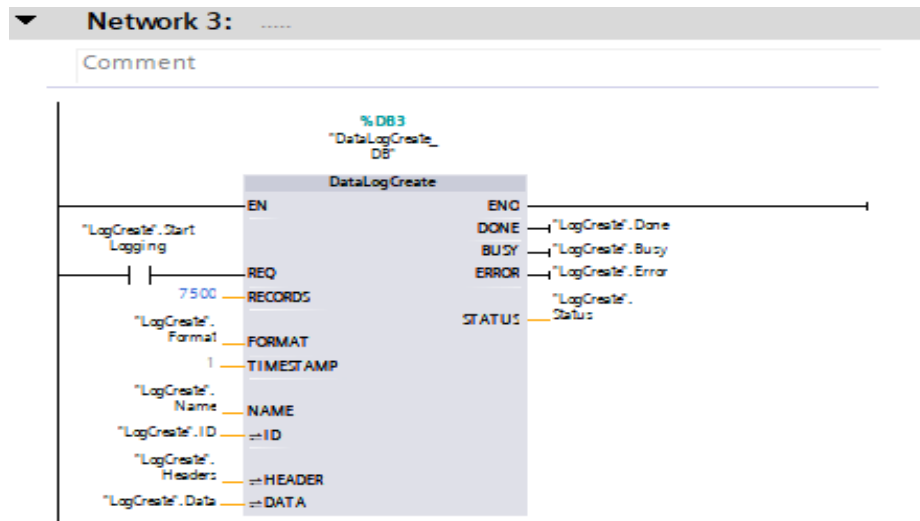
Itse lokin teko -toiminto toteutettiin aluksi HMI:n avulla, ja tarkoituksena oli, että lokitiedosto tallennetaan USB-muistitikulle. Kuitenkin tämä tapa ei onnistunut, sillä KTP700:lla on omat rajoituksensa: Se pystyy luomaan ainoastaan yhden lokitiedoston kerrallaan, ja siihen saa liittää korkeintaan 10 tagia, jotka sisältävät jokaisen anturin lämpötilat ja virtaukset. Lisäksi se osaa tallentaa dataa vain

TXT-muodossa, ja maksimirivien määrä on 5000. Tämä ei ole riittävä, kun halutaan tallentaa dataa ainakin viideltä päivältä minuutin välein. Kuvassa 23 näkyy lokitiedoston luonti Tia Portal -ympäristössä HMI:n kautta.



Kuva 23. Lokitiedoston luonti HMI:n avulla.

Kun antureita on 15+1, tageja olisi yhteensä 31 kappaletta, mikä on liikaa kyseiselle HMI:lle. Lopulta tehtiin loki teko PLC:n kautta. Tätä varten lisättiin pääohjelmaan LogFileCreate-, LogFileWrite-, LogFileClose-, LogFileOpen- ja LogFileDelete-lohkot. Näiden lohkojen avulla lokitiedoston luominen onnistui juuri tarvittavalla tavalla. Kaikki arvot saatiin tallennettua samaan tiedostoon ja heti CSV-muodossa. Kuvassa 24 on esitetty esimerkki DataLogCreate-lohkon käytöstä.



Kuva 24. Lokitiedoston luonti PLC:n kautta.

Lokin tekoon tarvittaville lohkoille on luotu omat DataBlockit, joissa on määritetty omat tagit, oikeat datatyytit ja tarvittaessa myös alustavat arvot. Kuvassa 25 näkyy tämä DataBlock ja sen sisältö.

Project tree | N26_seurantamo | PLC_1 [CPU 1215C DC/DC/Rly] | Program blocks | LogCreate [DB4]

Devices

Devices & networks

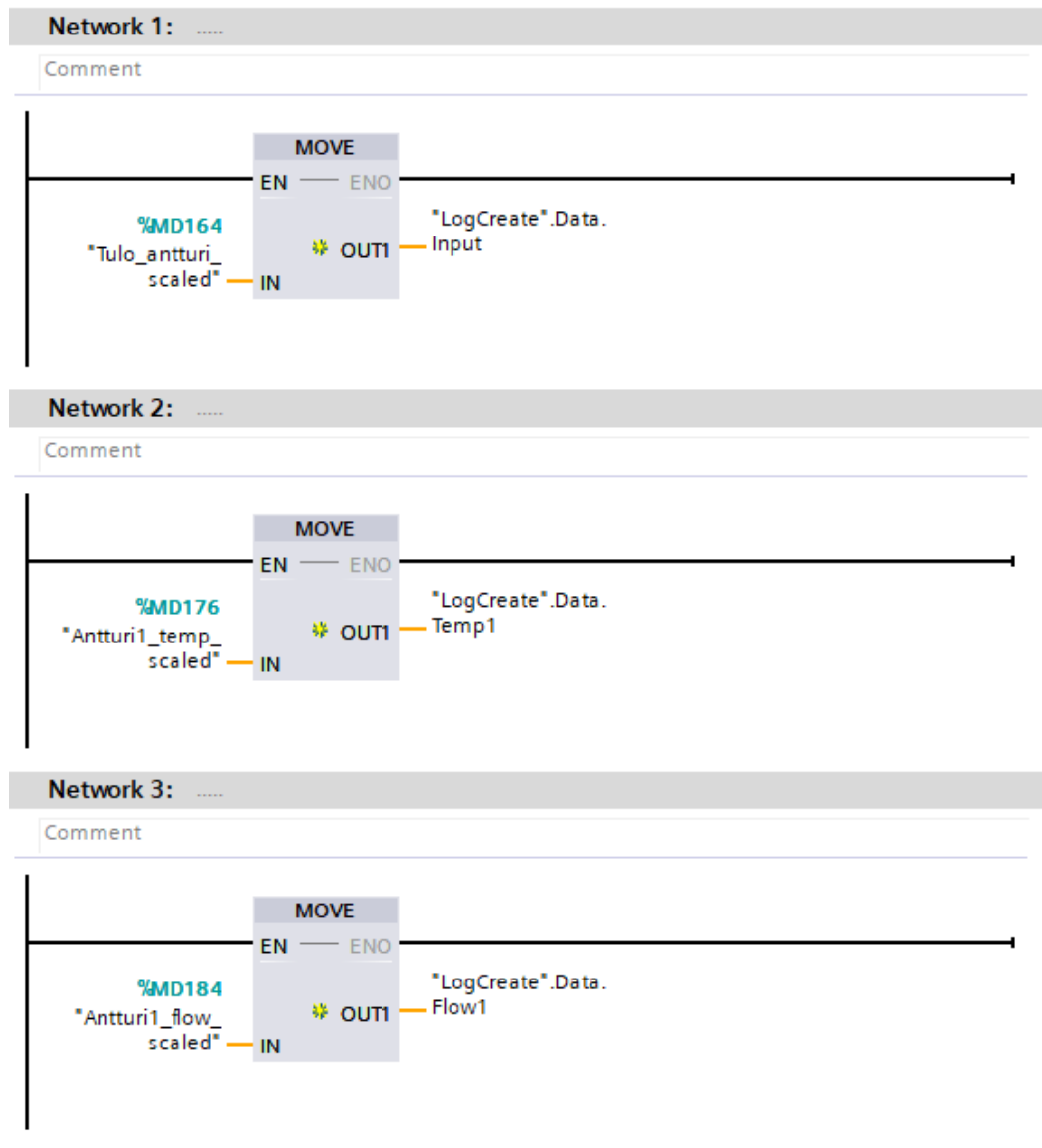
- PLC_1 [CPU 1215C DC/DC/Rly]
 - Device configuration
 - Online & diagnostics
 - Program blocks
 - Add new block
 - Main [OB1]
 - Antturit [FB1]
 - Block_1 [FB3]
 - Data Move [FB4]
 - HMI_timer [FB5]
 - Teholaskenta [FB2]
 - Antturi_DB [DB1]
 - Block_1_DB [DB7]
 - Block_1_DB_1 [DB8]
 - DataMove_DB [DB12]
 - HMI_timer_DB [DB14]
 - LogCreate [DB4]
 - Teholaskenta_DB [DB2]
 - System blocks
 - Program resources
 - DataLogClose_DB [DB9]
 - DataLogCreate_DB [DB3]
 - DataLogDelete_DB [DB...
 - DataLogOpen_DB [DB11]
 - DataLogWrite_DB [DB5]
 - HMI_Days_DB [DB17]
 - HMI_Hours_DB [DB16]
 - HMI_minutes [DB15]
 - HMI_seconds [DB13]
 - Minute [DB6]

LogCreate (snapshot created: 3/7/2025 11:36:58 AM)

Name	Data type	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Comment
1	Static							
2	DeleteLog	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
3	Zero	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
4	StartLogging	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
5	Records	UDInt	30	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
6	Name	String	'log'	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	ID	DWord	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	Headers	String	'InputTemp.Te...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	Data	Struct		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	Done	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	Busy	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	Error	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	Status	Word	16#0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
14	Format	UInt	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
15	LogFul	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
16	StopLogging	Bool	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
17	StartCount	Bool	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
18	LogFileFull	Word	16#0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
19	NewName	String	'newlog'	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

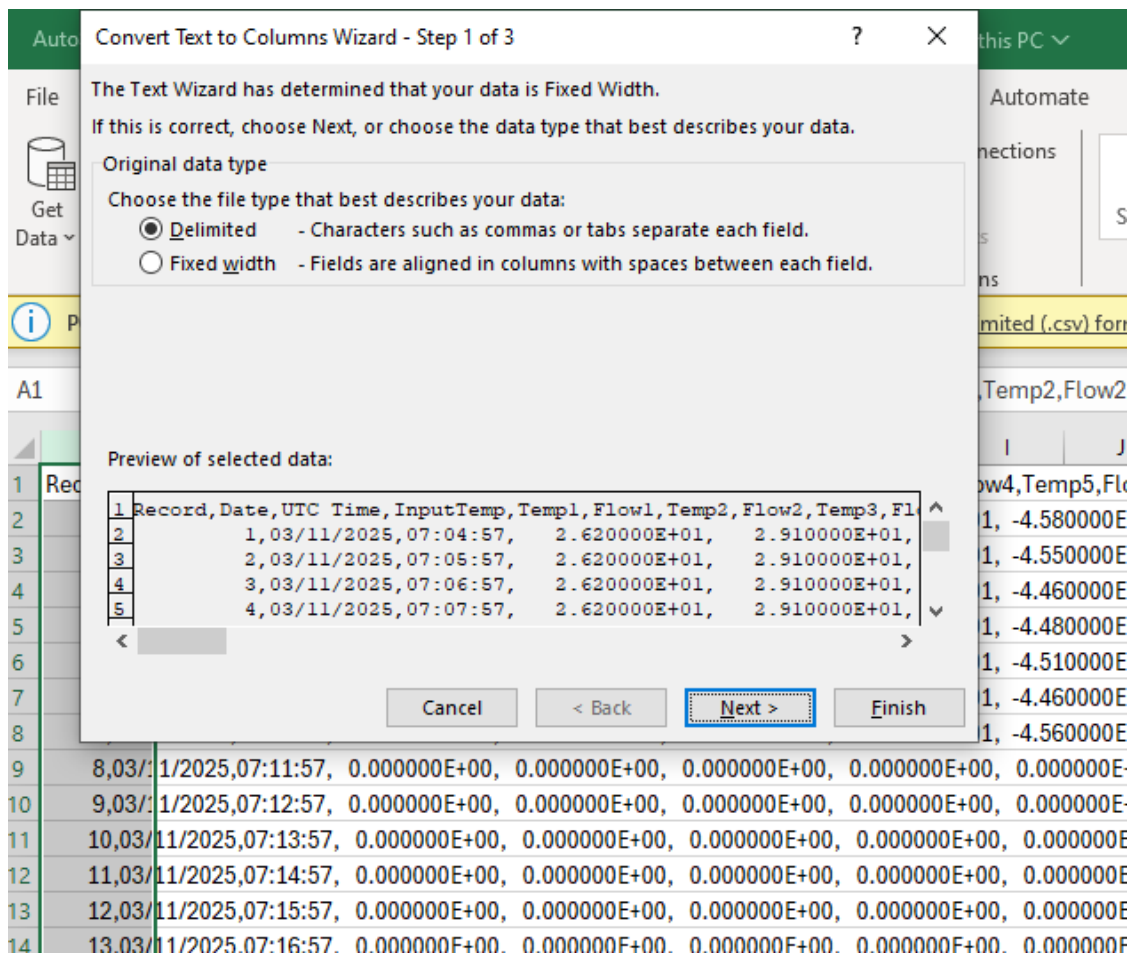
Kuva 25. Lokitiedoston toimintoista vastaava Functional Block.

Jotta data näkyisi oikein ja saisi oikean arvon, käytetään MOVE-lohkoa, joka siirtää arvot oikeille paikoille omille muuttujille juuri lokin tekoa varten. Ohjelmassa käytetty ja määritetty MOVE-lohko löytyy kuvasta 26.



Kuva 26. Datan siirto lokitiedostoa varten.

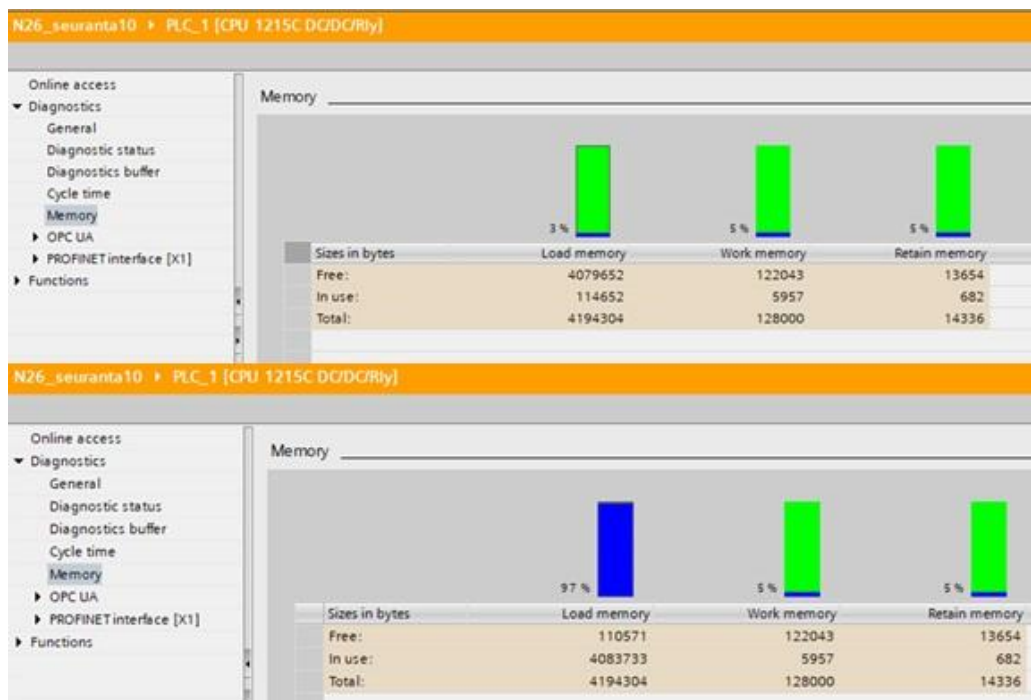
Jotta arvot olisi helpompi käsitellä, tiedostoa voidaan hieman muokata Excelissä, jotta arvot saadaan omille sarakkeille ja oikeaan muotoon, sillä PLC tallentaa arvot eksponenttimuodossa. Kuvassa 27 on esitetty CSV-taulukon muokaus.



Kuva 27. CVS-taulukon muokkaus jälkikäsitteilyä varten.

PLC:n kautta voidaan luoda tiedosto, joka on 7500 riviä pitkä, ja tätä rajoittaa ai-noastaan logiikan Work Memory, joka on tällä mallilla 4 MB. Tavoitteena on jat-kossa tilata Siemensin Memory Card, jolloin Work Memory kasvaa 260 MB:iin (256 MB + 4 MB).

Kun lokitiedosto luodaan, huomattiin, että järjestelmä varaa muistia koko täyte-lylle tiedostolle heti, vaikka alussa tiedosto on melko tyhjä. Kuvassa 28 näkyy muistin käyttö.



Kuva 28. PLC:n muistinäkymät. Ensimmäinen kuva on ennen lokitiedoston luontia, toinen heti luonnin jälkeen.

6 Järjestelmän asennus

6.1 Ohjauskotelon kokoonpano ja asennus

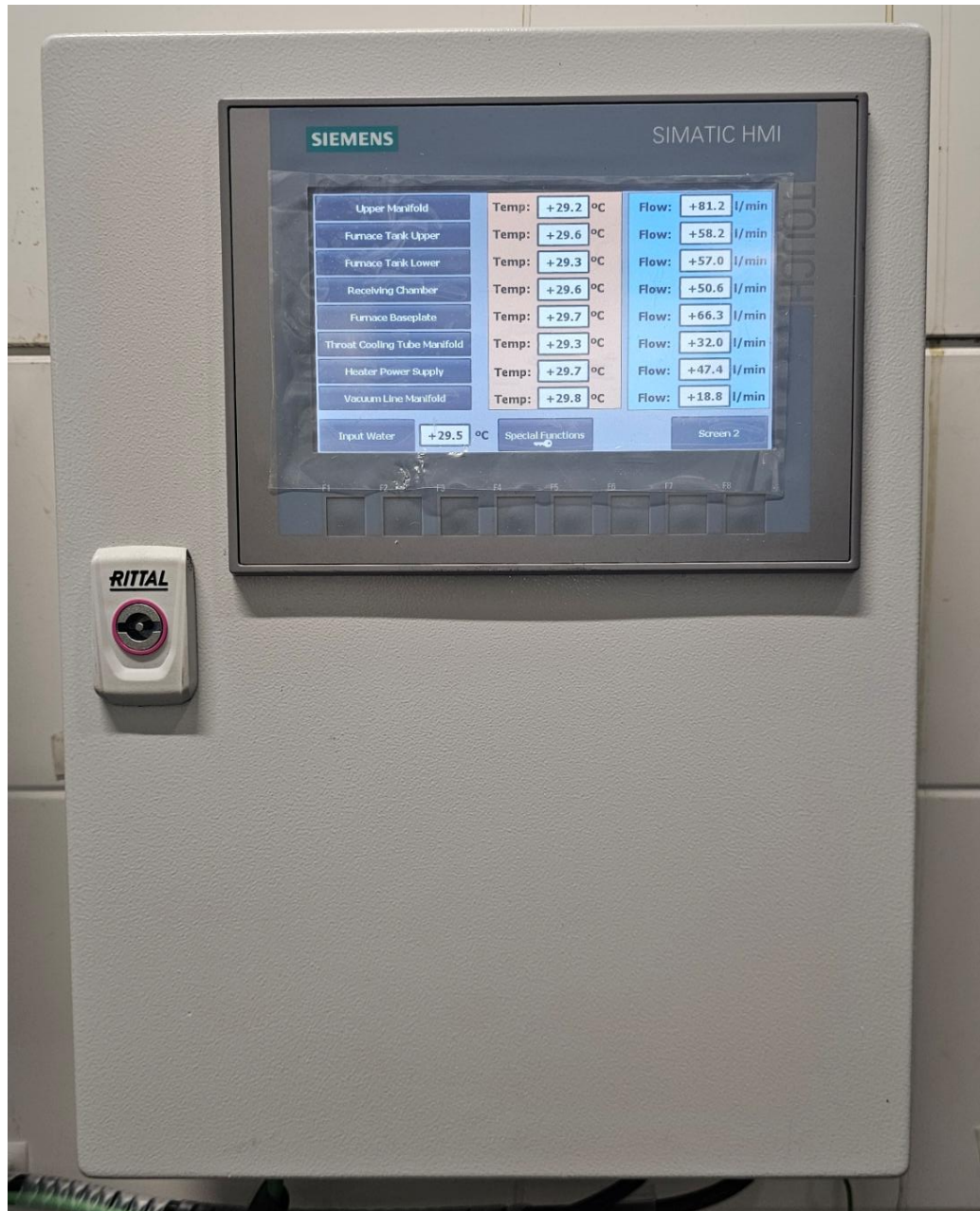
Asennusvaihe on jaettu kahteen osaan. Ensin tehtiin asennukset, jotka eivät vaadi kiteenkasvatusuunin pysähtymistä, ja vasta tämän jälkeen asennettiin anturit jäähdytysjärjestelmään. Kun aloitettiin ohjauskotelon kokoonpano, järjestelmä oli jo testattu muutaman kerran toimistossa. Kokoonpano aloitettiin leikkaamalla ohjauskoteloon tarvittavat aukot kaapeleille ja HMI-paneelille. Lisäksi asennettiin DIN-kisko PLC:lle ja virtalähteelle. Kytkennät ohjauskotelossa näkyvät kuvassa 29.



Kuva 29. Ohjauskotelon sisäinen rakenne.

Kun kotelo oli valmis, asennettiin sisään tärkeimmät osat: HMI, virtalähde ja PLC, minkä jälkeen tehtiin lopulliset kytkennät. Varmuuden vuoksi tarkistettiin uudestaan kytkentöjen kunto sekä yhteyden toimivuus, sillä lopullisen asennuksen jälkeen korjaus olisi ollut haastavaa. Onnistuneen testin jälkeen lisättiin

kaapeleiden päälle suojausta, jotta huollot olisi helpompi tehdä tarpeen mukaan ja kaapeleiden kunto säilyisi, eikä vaurioita syntyisi kaapeleiden liikkuesssa. Onneksi kaikki toimi oikein, ja ohjauskotelo oli asennettu valittuun paikkaan uunin viereen. Kuvassa 30 näkyy kotelo jo asennettuna seinälle.

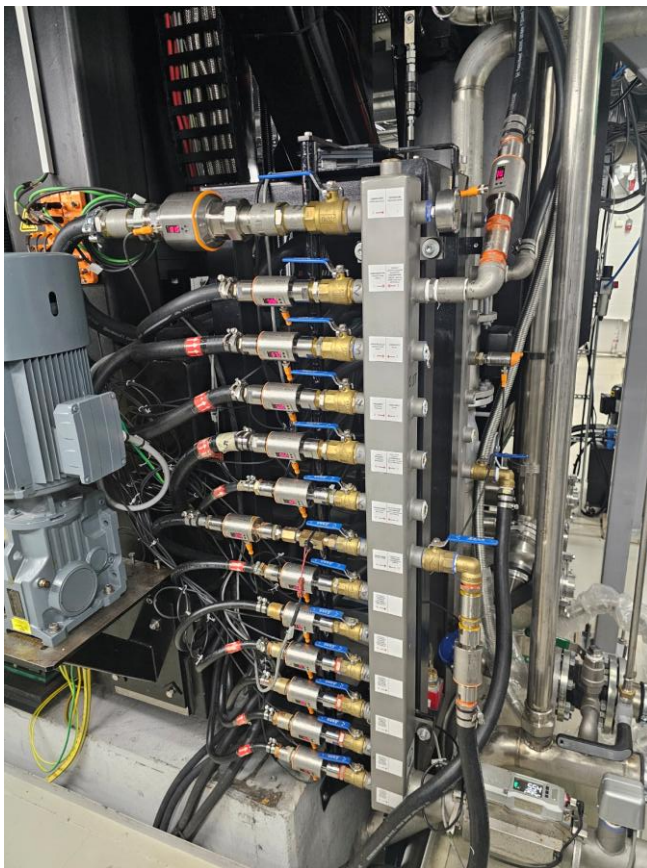


Kuva 30. Toimiva ohjauskotelo asennuksen jälkeen.

6.2 Antureiden asennus kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmään

Seuraavana askeleena tehtiin varsinaiset kytkennät ja asetukset kiteenkasvatusuunin jäähdytysjärjestelmään. Lämpötila- ja virtausanturit asennettiin menopuolelle, jotta voidaan mitata jo kiertävän veden arvot, ja lämpötila-anturi asennettiin tulopuolelle, jotta voidaan verrata arvoja sekä HMI-paneelilta että lokitiedostosta.

Antureiden sisään rakentaminen on vaatinut kiteenkasvatusuunin pysäyttämistä, sillä uunia ei voi käyttää ilman jäähdytysjärjestelmää. Asennuksen aikana kaikki jäähdytysjärjestelmän vedenkiertolinjat suljettiin sekä tulo- että menopuolella. Asennus sujui hyvin, sillä ehdittiin asentamaan kaikki anturit ennakkoon sovittuna aikana, eikä jäähdytysjärjestelmän ylösajossa syntynyt vuotoja. Kuvassa 31 on esitetty asennetut ja kytketyt anturit.



Kuva 31. Asennetut anturit jäähdytysjärjestelmän putkistoissa.

7 Yhteenveto

Opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda jäähdytysvesikierron lämpötilan ja virtauksen seurantajärjestelmä kiteenkasvatusuunille. Opinnäytetyö sisälsi järjestelmän suunnittelun, toteutuksen ja käyttöönoton, ja se vaati oikeat automaatiotekniikan taidot.

Koko opinnäytetyö eteni etukäteen sovitulla aikataululla ja saatiin valmiiksi aikarajojen mukaan. Toteutuksen aikana ei syntynyt suuria ongelmia, ja lopulta kaikki haasteet ratkaistiin. Kaikki tavoitteet saavutettiin, ja työ tehtiin Okmeticin tehtävänannon mukaisesti.

Olen oppinut opinnäytetyön aikana monia automaatiotekniikkaan liittyviä asioita ja syventänyt omaa osaamistani selvästi. Tunnen työn lopputulokset hyvin ja olen tyytyväinen projektin lopputulokseen.

Lähteet

- 1 Okmetic on vaativien piikiekkojen markkinajohtaja. Verkkoaineisto. Okmetic. <<https://www.okmetic.com/fi/tietoa-okmeticista/yritys/>>. Luettu 15.1.2025.
- 2 Piikiekkon tarina. Verkkoaineisto. Okmetic. <<https://www.okmetic.com/fi/tietoa-okmeticista/piikiekkon-tarina/>>. Luettu 18.1.2025
- 3 IO-Link järjestelmäyhteenveto. Verkkoaineisto. IFM. <<https://www.ifm.com/fi/fi/shared/technologien/io-link/system-overview/io-link-jarjestelmayhteenveto>>. Luettu 18.1.2025
- 4 TIA Portal (Totally Integrated Automation). Verkkoaineisto. Siemens. <<https://www.siemens.com/fi/fi/tuotteet/teollisuus/tia-portal.html>>. Luettu 20.1.2025.
- 5 IO-Link Interface Description (EN). Verkkoaineisto. IFM <[https://www.ifm.com/download/files/ifm-SM8000-20161103-IODD11-en/\\$file/ifm-SM8000-20161103-IODD11-en.pdf/](https://www.ifm.com/download/files/ifm-SM8000-20161103-IODD11-en/$file/ifm-SM8000-20161103-IODD11-en.pdf/)>. Luettu 4.2.2025.
- 6 RAM Memory Organization. Verkkoaineisto. Schneider-Electric. <https://product-help.schneider-electric.com/Machine%20Expert/V1.1/en/m251prg/m251prg/M2xx_-_Memory_Mapping/M2xx_-_Memory_Mapping-3.htm>. Luettu 15.2.2025.
- 7 Miten lämpökapasiteetti lasketaan? Verkkoaineisto. Phongnhaexplorer. <<https://fi.phongnhaexplorer.com/kjv/koulutus/miten-lampokapasiteetti-lasketaan.html#gsc.tab=0>>. Luettu 3.3.2025.