Eetu Korhonen & Arttu Lång

VESIPROSESSIN AUTOMAATIOJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Robotiikan ja tekoälyn koulutus

2025

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijät	Eetu Korhonen & Arttu Lång
Työn nimi	Vesiprosessin automaatiojärjestelmän suunnittelu ja toteutus
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy
Vuosi	2025
Sivut	74 sivua
Työn ohjaaja	Niko Puurtinen

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena on suunnitella ja toteuttaa automaatiojärjestelmä uuteen vesiprosessiin. Projekti toteutettiin Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kotkan kampukselle, kone- ja energiatekniikan laboratorioon. Projektin taustalla oli tarve päivittää virtaustekniikan opetusympäristö vastaamaan nykyaikaisia oppimis- ja tutkimustarpeita. Uusi vesiprosessi korvasi aiemman vanhentuneen opetusympäristön tarjoten monipuolisempia ja nykyaikaisempia mittausmahdollisuuksia.

Työn tutkimusongelmana oli selvittää, kuinka automaatiojärjestelmä voidaan suunnitella ja toteuttaa tilaajan vaatimusten sekä soveltuvien standardien mukaisesti. Alaongelmina tarkasteltiin logiikkaohjauksen, I/O-moduulien, käyttöliittymän ja kenttäväyläratkaisujen valintaa, ohjelmointia sekä järjestelmän konfigurointia toiminnallisuuden näkökulmasta. Graafisen käyttöliittymän suunnittelussa korostettiin käytettävyyttä ja selkeyttä.

Työ toteutettiin produktiivisena hankkeena hyödyntäen konstruktiivista tutkimusotetta. Teoreettinen viitekehys muodostettiin kirjallisuuskatsauksen avulla. Suunnitteluvaiheessa toteutettiin haastattelu tilaajan kanssa, jonka perusteella kartoitettiin automaatiojärjestelmälle ja oppimisympäristölle asetetut tavoitteet. Suunnittelussa keskityttiin standardien mukaisiin automaatioratkaisuihin ja vesiprosessiin soveltuvien laitteistokomponenttien valintaan. Toteutusvaiheessa kehitettiin logiikkaohjelma ja käyttöliittymä, minkä lisäksi järjestelmä konfiguroitiin, asennettiin ja otettiin käyttöön laboratorion opetusympäristöön. Valmista kokonaisuutta analysoitiin sen toiminnallisuuden ja suorituskyvyn perusteella.

Projektin lopputuloksena syntyi nykyaikainen, Siemensin 1500-sarjan logiikalla ja WinCC Unified -käyttöliittymällä toteutettu automatisoitu vesiprosessi, joka tukee virtaustekniikan opetusta ja tutkimusta. Järjestelmä on käytännöllinen ja monipuolinen. Projekti toteutui suunnitellussa aikataulussa ja toimeksiantajan esittämät toiminnalliset vaatimukset täyttyivät. Projektin tulevaisuuden kehityskohteina ovat värähtelymittaus, vesisäiliön lämmitys, riskianalyysin tekeminen, etäkäyttömahdollisuus ja turbiinikäytössä moottorin sähköisten suureiden mittaus, jotka parantaisivat järjestelmän monipuolisuutta ja opetuskäyttöä.

Asiasanat: automaatio, automaatiosuunnittelu, kenttälaitteet, kenttäväylät, konfigurointi, käyttöliittymä, ohjelmointi, teollisuuslogiikka, virtaustekniikka, vesiprosessi

South-Eastern Finland University of Applied Sciences

Degree title	Bachelor of Engineering
Authors	Eetu Korhonen & Arttu Lång
Thesis title	Design and implementation of water process automation system
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2025
Pages	74 pages
Supervisor	Niko Puurtinen

ABSTRACT

This thesis focused on designing and implementing an automation system for a new water process. The project was conducted at the campus of South-Eastern Finland University of Applied Sciences in Kotka, in the mechanical and energy technology laboratory. The purpose was to replace an outdated teaching system with a modern, more versatile solution that meets the current demands of education and research in flow technology.

The main research question was how to develop an automation system that fulfils the client's requirements while complying with relevant standards. Subtopics included selecting and programming the PLC, choosing appropriate I/O modules, designing a user-friendly interface, and integrating fieldbus communication. Special attention was paid to the usability and clarity of the graphical user interface to support student learning.

The project was implemented using a constructive research approach. A literature review established the theoretical basis, and a client interview helped define the system's functional and educational objectives. During the design phase, standardized automation solutions and suitable hardware components were selected and tailored to the needs of the water process and the learning environment. In the implementation phase, the logic program and user interface were developed, and the system was configured, installed, and commissioned in the laboratory. The completed setup was evaluated based on its functionality, reliability and performance.

The result was a modern, automated water process system built with a Siemens S7-1500 PLC and a WinCC Unified interface. It provides a practical, versatile platform for teaching and research in flow technology. The system met all the functional requirements set by the client and was completed within schedule. Future improvements may include adding vibration measurement, water heating, a risk analysis, remote access, and electrical monitoring in turbine operation to further enhance educational value.

Keywords: automation, automation design, configuration, fieldbuses, field devices, flow technology, industrial logic, programming, user interface, water process

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 6

1.1 Tausta ja tavoitteet 6

1.2 Tutkimusongelma ja rajaus 6

1.3 Toteutustapa ja menetelmät 7

2 VESIPROSESSI 8

2.1 Vaatimukset 8

2.2 Toiminta ja ajotavat 9

3 AUTOMAATIOTEKNIIKKA 12

3.1 Automaatiojärjestelmät 12

3.2 Ohjelmoitava logiikka 13

3.3 I/O-moduulit 14

3.4 TIA Portal 17

3.5 Ohjelmointikielet 17

3.6 Kenttäväylä 18

3.7 HMI- ja SCADA-järjestelmät 21

4 VIRTAUSTEKNIIKKA 22

4.1 Painehäviöt 22

4.2 Käyrästöjen määrittäminen 25

4.3 Virtauksen säätäminen 26

5 SUUNNITTELU 27

5.1 Standardit 28

5.2 Laitteiston valinta 29

5.3 Kenttäväylän valinta 30

5.4 SCADA- ja HMI-järjestelmän valinta 31

5.5 Kenttälaitteet 32

5.5.1 Paineanturit 32

5.5.2 Lämpötila-anturit 33
5.5.3 Virtausmittarit 34
5.5.4 Pumput ja moottorit 35
5.5.5 Taajuusmuuttajat 36
5.5.6 Säätöventtiilit 37
5.5.7 Venttiilit 38
6 JÄRJESTELMÄN KONFIGUROINTI 39
6.1 Kenttälaitteiden konfigurointi 39
6.2 PLC:n ja käyttöliittymän konfigurointi 42
7 PLC:N JA KÄYTTÖLIITTYMÄN OHJELMOINTI 45
8 GRAAFINEN KÄYTTÖLIITTYMÄ JA VALVOMONÄKYMÄ 51
9 TURVALLISUUS 54
9.1 Turvaohjelmointi 56
10 FYYSISEN JÄRJESTELMÄN TOTEUTUS 60
10.1 Ryhmäkeskus 61
10.2 Logiikkakeskus 62
10.3 Kenttälaitteiden kytkentä 63
11 JÄRJESTELMÄN TESTAUS 67
12 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYS 69
LÄHTEET 71

1 JOHDANTO

1.1 Tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa automaatiojärjestelmä kone- ja energiatekniikan laboratorion uuteen vesiprosessiin Kotkan nykyiselle kampukselle. Työn toimeksiantaja on Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy. Projektin taustalla on koulun tarve päivittää ja kehittää virtaustekniikan opetusympäristöä, jotta se vastaisi nykyaikaisia oppimis- ja tutkimustarpeita. Uusi vesiprosessi korvaa aiemman, teknisesti vanhentuneen virtaustekniikan opetusympäristön, joka sijaitsi Xamkin vanhalla kampuksella Metsolassa. Uudella laitteistolla voidaan toteuttaa monipuolisempia ja nykyaikaisempia mittauksia, mikä parantaa sekä opetuksen että tutkimuksen laatua.

1.2 Tutkimusongelma ja rajaus

Tutkimus rajataan vesiprosessin automaatioon. Opinnäytetyö ei käsittele vesiprosessin mekaanista suunnittelua, sillä prosessilaitteiston mekaanisesta runkorakenteesta vastasi tilaaja. Tilaaja oli ennakkoon määritellyt vesiprosessissa tarvittavat kenttälaitteiden vaatimukset ja tilannut valmiiksi venttiilit, taajuusmuuttajat, pumput ja virtausmittarit.

Opinnäytetyössä etsitään vastauksia kysymyksiin:

- Miten automaatiojärjestelmä suunnitellaan ja toteutetaan standardeja ja tilaajan vaatimuksia noudattaen?
- Mikä logiikka, I/O-moduulit, käyttöliittymä ja kenttäväylä olisi optimaalinen kyseiseen järjestelmään?
- Miten järjestelmä voidaan ohjelmoida ja konfiguroida parhaiten vesiprosessin toimivuuden kannalta?
- Miten graafinen käyttöliittymä toteutetaan niin, että sitä on selkeä ja helppo käyttää?

Edellä esitettyjen kysymysten tarkastelun tavoitteena on tuottaa kokonaisvaltainen automaatioratkaisu, joka vastaa sekä teknisiin standardeihin että käytettävyyteen liittyviin vaatimuksiin.

1.3 Toteutustapa ja menetelmät

Opinnäytetyömme on produktiivinen ja kehittämismenetelmänä käytämme konstruktiivista tutkimusta, sillä tuotamme konkreettisen automaatiojärjestelmän. Konstruktiivinen tutkimusmenetelmä soveltuu hyvin opinnäytetyöhömme, sillä Järvinen ja Järvinen (2000, 102) toteavat, että sille on tyypillistä uuden luominen hyödyntämällä jo olemassa olevaa tietoa.

Tiedonkeruumenetelmänä käytämme kirjallisuuskatsausta, jonka avulla kokoamme yhteen olemassa olevia aineistoja ja lähteitä (Järvinen & Järvinen 2000, 163–164). Keskitymme vesiprosessiin liittyvään automaatioteoriaan ja tarvittavaan virtaustekniikkaan. Tämän pohjalta muodostamme työn teoreettisen viitekehyksen. Suoritimme tilaajan kanssa haastattelun, jossa tiedustelimme projektin vaatimuksia. Haastattelu toteutettiin avoimena haastatteluna, jossa käytimme teemana tutkimustamme. Haastattelussa hankitaan tietoja keskustelemalla henkilön kanssa, jolloin tältä saadaan tietoja projektiin liittyen (Järvinen & Järvinen 2000, 153–154).

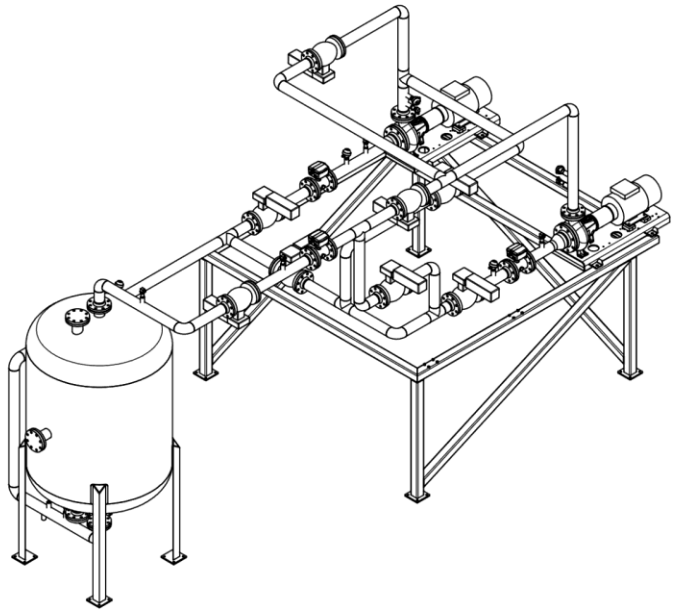
Suunnitteluosiossa käsitellään automaatiojärjestelmän toteutusta ohjaavat keskeiset vaiheet. Suunnittelun perustana ovat standardit, jotka varmistavat järjestelmän turvallisuuden, toiminnallisuuden ja luotettavuuden. Osiossa esitellään myös vesiprosessissa käytettävät komponentit ja niiden valintoja. Konfigurointiosiossa perehdytään kenttälaitteiden, teollisuuslogiikan sekä käyttöliittymän määrittelyyn ja käyttöönottoon. Ohjelmointiosiossa kuvataan logiikkaohjelman ja käyttöliittymän ohjelmointiprosessia. Toteutusosiossa keskitytään järjestelmän konkreettiseen rakentamiseen, mukaan lukien laitteiden asennukset ja kytkennät. Analysoimme valmiin järjestelmän toiminnallisuutta ja suorituskykyä. Lopuksi arvioimme projektin onnistumista ja tunnistamme mahdolliset jatkokehitystarpeet.

2 VESIPROSESSI

2.1 Vaatimukset

Vesiprosessin ohjausjärjestelmän ja oppimisympäristön tarpeiden selvittäminen toteutettiin haastatteluna 5. helmikuuta 2025 Teams-etäyhteyden välityksellä. Haastateltavana oli vesiprosessista vastaava toimeksiantaja. Haastattelun tarkoituksena oli tarkentaa, mitä toiminnallisuuksia järjestelmältä odotetaan ja millaisia pedagogisia tavoitteita oppimisympäristölle asetetaan. Keskustelussa nousi esiin sekä käytännön ohjaustarpeita että koulutuksellisia toiveita, jotka ohjaavat järjestelmän suunnittelua.

Haastattelun perusteella todettiin, että vesiprosessiin tarvitaan paikallinen ohjausjärjestelmä, jonka kautta prosessia voidaan hallita valvomonäkymästä. Toivottuna sisältönä valvomonäkymään esitettiin perustoimintoja, kuten reaaliaikaista anturien ja kenttälaitteiden tietojen seurantaa sekä venttiilien ja pumppujen ohjausta. Toiminnallisten ominaisuuksien lisäksi esiin nousi tarve käyttäjäystävällisille pikanäppäimille ajotapojen valintaan, trendikäyrien esittämiseen sekä lukitus- ja hälytystoimintojen sisällyttämiseen prosessin turvallisuuden ja seurannan varmistamiseksi. Oppimisympäristön näkökulmasta erityistä painoarvoa annettiin mahdollisuudelle tutkia pumppujen ja putkiston toimintaa sekä toteuttaa erilaisia mittauksia prosessin aikana. Tavoitteena on luoda teollisuutta vastaava ympäristö, jossa opiskelijat voivat syventyä prosessinohjauksen ja virtaustekniikan perusteisiin käytännönläheisesti. (Toimeksiantaja 2025.)



Kuva 1. Vesiprosessin yleiskuva (Tarhonen 2024)

Autodesk Inventor -ohjelmalla tehdystä vesiprosessin mallinnuksesta saadaan selkeä yleiskuva vesiprosessin rakenteesta (kuva 1). Prosessiin kuuluu useita mittaus- ja toimilaitteita, joita on esitelty tarkemmin luvussa 5.5.

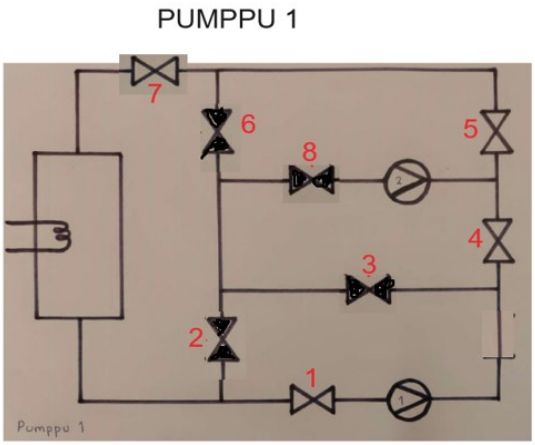
2.2 Toiminta ja ajotavat

Vettä siirretään vesiprosessissa säiliöstä pumppujen avulla eteenpäin putkistoa pitkin erilaisten ajotapojen mukaisesti. Opetussisältöihin kuuluu painehäviöiden määrittäminen tilanteissa, joissa veden tilavuusvirta vaihtelee, sekä eri ajotapojen vaikutusten tarkastelu prosessissa. Lisäksi suoritetaan kokeellisia mittauksia pumpun ominais- ja hyötysuhdekäyristä sekä putkiston vastuskäyristä. Kokeet toteutetaan vaihtelevilla säätöventtiilien asennoilla ja erilaisilla pumpun pyörimisnopeuksilla. Prosessin avulla voidaan tutkia myös esimerkiksi pumpun affiniteettisääntöjä. Vesiprosessin oppimis- ja tutkimusmahdollisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.

Ajotapakuvissa olevat mustat venttiilit ovat kiinni ja valkoiset ovat auki. Venttiilillä 7 saadaan kuristettua koko prosessin virtausta. Vesi kiertää kuvassa vastapäivään putkistoja pitkin takaisin säiliöön. Säiliötä kuvataan kuvissa vasem-

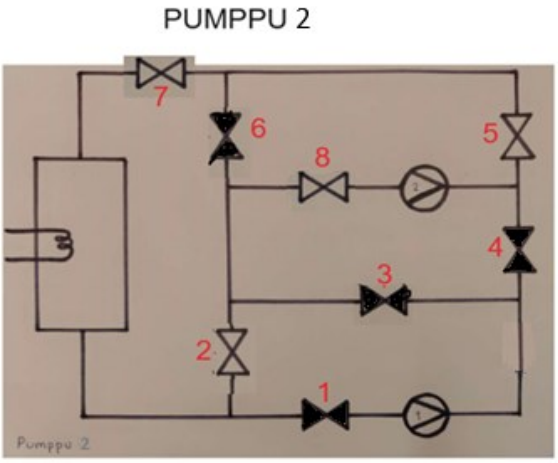
malla puolella olevana suorakulmiona. Ajotavat on esitetty 2D-kuvana selkeyden vuoksi ja valvomonäkymässä prosessi on kuvattu samalla tavalla. Käsittelemme nämä ajotavat seuraavaksi tarkemmin.

Ajotavalla ”pumppu 1” järjestelmää pyöritetään ainoastaan ykköspumpulla (alempi pumppu), jolloin vesi kiertää venttiilien 1, 4, 5 ja 7 kautta takaisin säiliöön (kuva 2).



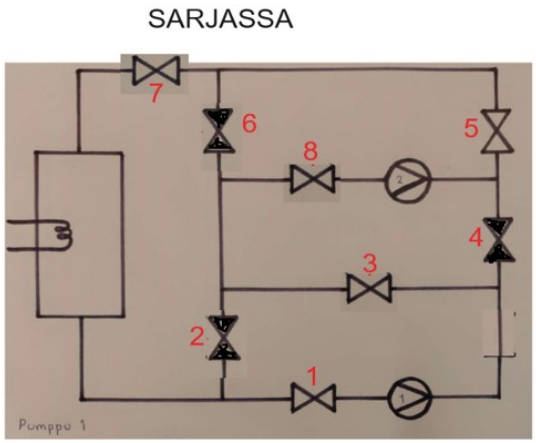
Kuva 2. Pumppu 1 ajotapa (Energiatekniikan projektityö 2022)

Ajotavalla ”pumppu 2” järjestelmää pyöritetään ainoastaan kakkospumpulla (ylempi pumppu), jolloin vesi kiertää venttiilien 2, 8, 5 ja 7 kautta takaisin säiliöön (kuva 3).



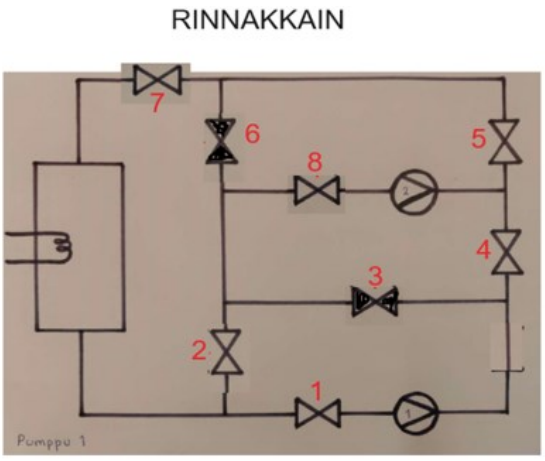
Kuva 3. Pumppu 2 ajotapa (mukaillen Energiatekniikan projektityö 2022)

Ajotavalla ”sarjassa” molempia pumppuja pyöritetään sarjassa (kuva 4). Tällöin vesi kiertää molempien pumppujen läpi takaisin säiliöön, eli venttiilien 1, 3, 8, 5 ja 7 kautta. Tällöin saavutetaan kaksinkertainen nostokorkeus tilavuusvirtaa kohti, jolloin toimintapiste muuttuu (Sulzer 2008, 47–52).



Kuva 4. Sarjassa ajotapa (Energiatekniikan projektityö 2022)

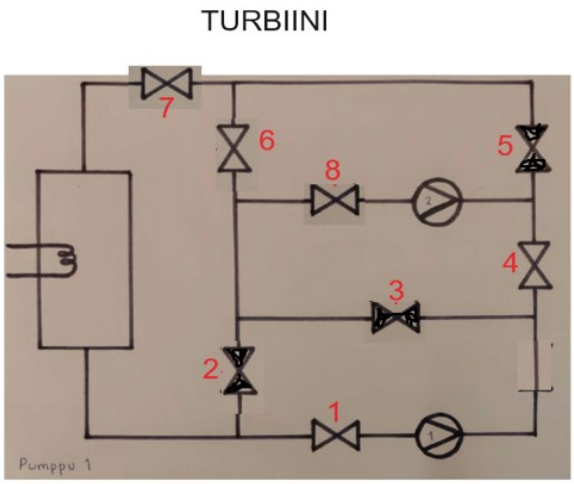
Pumppuja pyöritetään samanaikaisesti ajotavassa ”rinnakkain”, jolloin vesi jakautuu molemmille pumpuille. Vesi haarautuu venttiilien 1 ja 2 kohdalla ja jatkaa matkaa molempien pumppujen kautta venttiilien 4, 5, 7 ja 8 läpi takaisin säiliöön (kuva 5). Tällöin saadaan nostokorkeutta kohti kaksinkertainen tilavuusvirta, jolloin toimintapiste muuttuu (Sulzer 2008, 47–52).



Kuva 5. Rinnakkain ajotapa (Energiatekniikan projektityö 2022)

Viimeisessä ajotavassa ”turbiini” järjestelmän kakkospumppu pyörii veden virtauksen avulla turbiinina väärinpäin, jolloin voidaan tutkia, kuinka paljon prosessisäätöjen aikana voidaan generoida sähköä pumpun sähkömoottorista

(Pulli 2018, 173). Vesi kiertää ykköspumpun kautta kakkospumpulle venttiilien 1, 4, 8, 6 ja 7 läpi takaisin säiliöön (kuva 6). Generoitu sähkö palaa taajuusmuuttajalle, joka kompensoi generoidun sähkön estäen syötön takaisin sähköverkkoon (ABB 2018, 75). Näin saadaan myös mitattua generoidun sähkön määrä. Emme kuitenkaan saa generoitua enempää sähköä kuin mitä syötämme järjestelmään.



Kuva 6. Turbiini ajotapa (Energiatekniikan projektityö 2022)

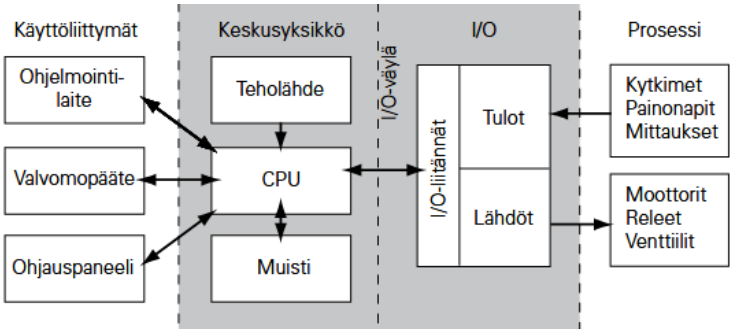
Eri ajotavat tarjoavat mahdollisuuden havainnollistaa vesiprosessin toimintaa ja sen vaikutuksia järjestelmään. Sarjassa ajaminen nostaa painetta, rinnakkain käyttö lisää virtausmäärää ja turbiinikäyttö voi parantaa energiatehokkuutta (Sulzer 2008, 47–52; Pulli 2018, 173). Näitä ajotapoja voidaan hyödyntää opetuksessa demonstroimalla niiden vaikutuksia, jolloin opiskelijat saavat käytännön ymmärryksen virtaustekniikasta.

3 AUTOMAATIOTEKNIIKKA

3.1 Automaatiojärjestelmät

Automaatiojärjestelmä on kokonaisuus, joka ohjaa, valvoo ja optimoi erilaisia prosesseja. Sen tavoitteena on parantaa tehokkuutta, turvallisuutta ja tarkkuutta monilla teollisuuden aloilla. Automaation ohjaus perustuu mittauksiin ja takaisinkytkettyyn säätöön, jossa prosessista saatua mittaustietoa verrataan vertailusignaaliin. Järjestelmä voi koostua useista hajautetuista laitteista, jotka kommunikoivat keskenään kenttäväylien avulla. Mittalaitteet sisältävät anturin

ja mittauslähettimen, joka muuntaa tiedon standardimuotoon ja kommunikoi logiikan kanssa. Järjestelmät sisältävät toimilaitteita, kuten venttiileitä, jotka vaikuttavat suoraan prosessiin. Valvomolaitteet ja käyttöliittymät mahdollistavat prosessin hallinnan ja työn jakamisen käyttäjien kesken. (Kippo ym. 2022, 11–14.)



Kuva 7. Automaatiojärjestelmän hierarkia (Kippo ym. 2022, 56)

Automaatiojärjestelmän perusrakennetta voidaan kuvata visuaalisesti tasoilla (kuva 7). Kuvan vasemmalla puolella, hallintotasolla, nähdään valvomo- ja ohjauslaitteet, joilla ohjataan prosessin toimintaa. Tällä tasolla seurataan anturelta saatua tietoa ja valvotaan järjestelmän reaaliaikaista tilaa. Keskellä kuvataan ohjausjärjestelmää, joka vastaa prosessin ohjauksesta ja toiminnan säätämisestä. Tasolta löytyy ohjelmoitavat logiikat ja muut ohjauslaitteet, jotka vastaanottavat tulevaa dataa kenttä- ja hallintatasolta sekä lähettävät komentoja takaisin kenttälaitteille. Hierarkian alimpana, eli kuvan oikealla puolella, vaikutetaan prosessin toimintaan fyysisillä laitteilla, kuten toimilaitteilla ja anturelilla. (Liedes ym. 2023, 7.)

3.2 Ohjelmoitava logiikka

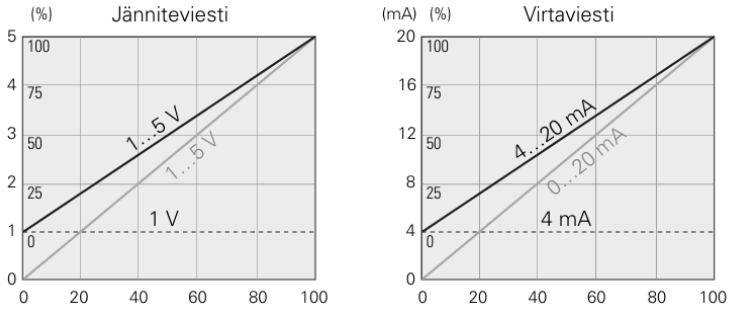
Ohjelmoitava logiikka (engl. Programmable Logic Controller), josta käytetään lyhennettä “PLC”, on teollisuudessa käytettävä pieni ohjaustietokonejärjestelmä, joka on suunniteltu automaatiojärjestelmien ohjaamiseen. Ohjelmoitava logiikka kehitettiin alun perin korvaamaan monimutkaiset relekytkennät. PLC käyttää pääasiassa loogisia laskentaoperaatioita, kuten AND-, OR-, NAND- ja NOR-operaatioita. PLC saa tietoa prosessista tulojen, esimerkiksi kytkintietojen kautta ja ohjaa lähtöjen avulla esimerkiksi releitä. Nykyään se käsittelee myös analogisia signaaleja, mutta loogiset toiminnot ovat edelleen keskiössä.

PLC-järjestelmät ovat kehittyneet avoimemmiksi ja lähentyneet hajautettuja ohjausjärjestelmiä, eli DCS (Distributed Control System) -järjestelmiä. (Kippo ym. 2022, 54.) Ohjelmoitavan logiikan valinta on tärkeä osa prosessia. Ohjelmoitavat logiikat ovat kehitetty kestäviksi, luotettaviksi ja tehokkaiksi, jotta ne voivat toimia tulevaisuudessakin teollisuusympäristöissä (SIMATIC controllers s.a.).

3.3 I/O-moduulit

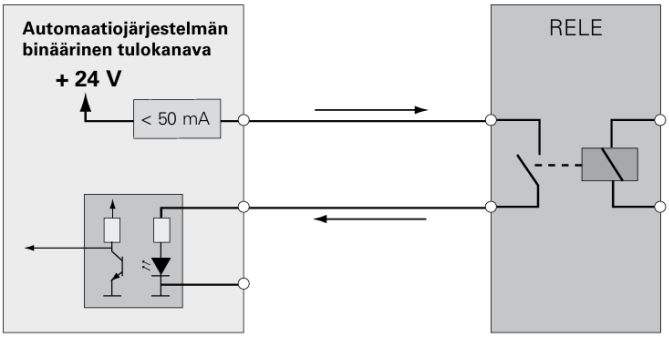
I/O-moduulit (engl. Input/Output-modules) muodostavat rajapinnan PLC:n ja prosessin toimilaitteiden välille. Nämä mahdollistavat kenttälaitteilta tulevien signaalien lukemisen ja niiden avulla toimilaitteiden ohjaamisen. Moduulit toimivat usein 24 voltin tasajännitteellä. (Kippo ym. 2022, 49, 51.)

I/O-moduulit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: digitaalisiin ja analogisiin. Digitaaliset I/O-moduulit käsittelevät on/off-tyyppisiä (binääri/boolean) signaaleja ja vaihtavat tilaansa, kun logiikan sisääntuloon kytketään tai katkaistaan jännite. Tällaisia ovat esimerkiksi rajakytkimien auki/kiinni-tiedot ja releiden ohjaustiedot, jolloin logiikka ohjaa ulostuloa. Näin voidaan vastaanottaa tietoa tai lähettää signaaleja useille eri kenttälaitteille. (Kippo ym. 2022, 50, 53.) Viestityyppejä on havainnollistettu graafisilla kuvaajilla (kuva 8). Viestit vaativat tietyn määrän jännitettä tai virtaa toimiakseen.



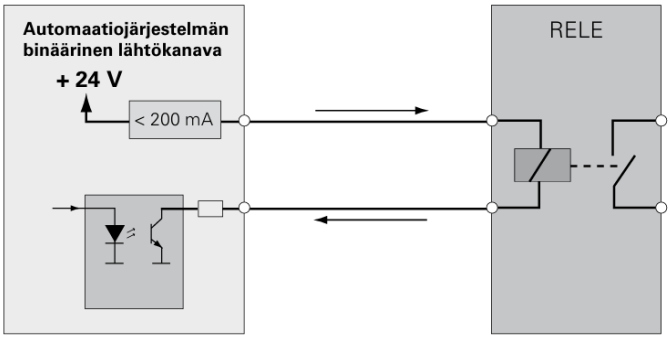
Kuva 8. Jänniteviesti ja virtaviesti (Kippo ym. 2022, 51)

Kuvassa 9 esitellään koskettimen/kytkimen auki/kiinni -tiedon mittaus binäärisellä tulokanavalla. Kun rele aktivoituu, logiikalle tulee signaali releen koskettimelta ja tulo aktivoituu (Kippo ym. 2022, 53–54).



Kuva 9. Releen koskettimen tiedon lukeminen binäärisellä tulolla (Kippo ym. 2022, 53)

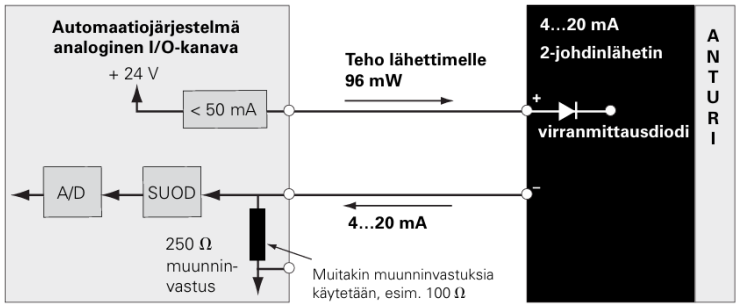
Kuvassa 10 nähdään releen ohjaaminen binäärisen lähtökanavan avulla. Releelle lähetetään ohjaussignaali, jolloin se aktivoituu (Kippo ym. 2022, 53–54).



Kuva 10. Releen kelan ohjaus binäärisellä lähdöllä (Kippo ym. 2022, 54)

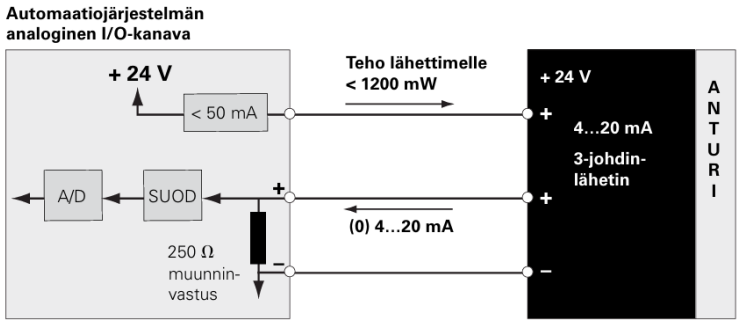
Analogiset I/O-moduulit käsittelevät jatkuvia signaaleja ja toimivat esimerkiksi milliampeeri- (0–20 mA, 4–20 mA) tai jänniteviesteillä (0–10 V). Niillä voidaan lukea analogisia mittaustietoja ja ohjata esimerkiksi venttiilien asentoa. (Kippo ym. 2022, 50–53.)

2-johdinanturia käytetään milliampeeriviestillä (4–20 mA). 2-johdinanturi saa käyttöjännitteensä samasta johdosta, jota käytetään mittaustiedon lähettämiseen. Kyseessä voisi olla esimerkiksi lämpötila-anturi (kuva 11). (Kippo ym. 2022, 50, 52.)



Kuva 11. Analoginen 2-johdinkytkentä (Kippo ym. 2022, 50)

Kuvassa 12 käytetään 3-johdinanturia milliampeeriviestillä (4–20 mA). Tämä eroaa 2-johdinanturista siten, että siinä anturi saa tarvittavan tehon viestikaapelia pitkin, kun taas 3-johdinkytkennässä virralle on oma johdin. Tätä kytkentää voidaan käyttää, jos anturi vaatii enemmän tehoa. (Kippo ym. 2022, 50, 52.)



Kuva 12. Analoginen 3-johdinkytkentä (Kippo ym. 2022, 52)

Datatyyppeinä analogisilla tiedoilla voi olla esimerkiksi Int, Real tai Word. Näiden avulla voidaan käyttää ja skaalata tietoja eri tavoilla. Int (integer) on kokonaislukutyyppi, jolla arvot voidaan esittää ilman desimaaleja. Se soveltuu esimerkiksi yksinkertaisten säätöarvojen tai laskentatulosten tallentamiseen. Real on liukuluku, jota voidaan käyttää tilanteissa, joissa tarvitaan tarkempaa mittaustietoa ja desimaalien käsittelyä. Esimerkiksi lämpötila- tai painemittaukset voivat olla Real-tyyppisiä, jotta mittaustulokset olisivat tarpeeksi tarkkoja. Word koostuu 16 bitistä ja mahdollistaa suuremman arvovälin kuin Int. Word voi myös sisältää binäärimuotoista dataa, jota voidaan käyttää esimerkiksi bitin tarkkuudella tehtävään ohjaukseen. (Siemens 2024b.)

Kentältä tuleva signaali voidaan muuntaa digitaaliseksi arvoksi erilaisten skaalausten avulla. Skaalaus voidaan tehdä suoraan PLC:n ohjelmassa laskukaavojen avulla, jossa muunnetaan datatyypin raaka-arvo mitta-asteikolle. (Siemens 2024b.) Oikeanlaisten I/O-moduulien valinta on logiikalle tärkeää, jotta järjestelmä pystyy tarkasti ja tehokkaasti hallitsemaan vesiprosessia. Moduulien valinnassa tulee huomioida signaalityypit, tarvittavien kanavien määrä ja järjestelmän laajennettavuus.

3.4 TIA Portal

Siemensin Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) on monipuolinen ja tehokas työkalu automaatiojärjestelmien suunnitteluun, ohjelmointiin ja valvontaan. Ohjelman avulla voidaan luoda monimutkaisia ja erilaisia ohjelmia. Se yhdistää useita Siemensin työkaluja, kuten SIMATIC STEP 7, WinCC ja SINAMICS Startdrive, yhdeksi ympäristöksi, mikä helpottaa ohjelmistojen ja käyttöliittymien suunnittelua. (Totally Integrated Automation Portal s.a.)

3.5 Ohjelmointikielet

PLC-järjestelmissä käytetään standardoituja ohjelmointikieliä, jotka on määritelty kansainvälisessä IEC 61131-3 -standardissa. IEC 61131-3 -standardi säätelee teollisuusautomaation tietorakennetta, datatyyppejä ja ohjelmointiliittymiä, mahdollistaen ohjelmien yhteensopivuuden eri valmistajien laitteiden välillä. Teollisuusautomaatioon tarkoitetut ohjelmointikielet eroavat perinteisistä ohjelmointikielistä, koska ne on optimoitu teollisuusympäristöihin ja koneiden ohjaukseen. (White 2023, 7.)

IEC 61131-3 -standardissa on sisälletty viisi ohjelmointikieltä:

Yksi yleisimmin käytetyistä ohjelmointikielistä on **Ladder Diagram (LD)**, joka muistuttaa ulkoasultaan perinteistä relelogiikkaa. LD perustuu graafisiin symboleihin, joiden avulla ohjelman rakenne on helppo hahmottaa. Se tarjoaa selkeän käytettävyyden, mutta monimutkaisemmissa järjestelmissä sen hallinta voi osoittautua haasteelliseksi. (White 2023, 7.)

Sequential Function Chart (SFC) on toinen graafinen ohjelmointitapa, joka soveltuu erityisesti monivaiheisten prosessien hallintaan. SFC rakentuu vaiheista ja siirtymistä, jolloin prosessi jäsennetään loogisiksi osakokonaisuuksiksi. SFC muistuttaa Ladder Diagram -kieltä, mutta eroaa siten, että se jäsentää prosessin vaiheittain ja määrittää siirtymät vaiheiden välillä. (White 2023, 8.)

Function Block Diagram (FBD) on graafinen ohjelmointikieli, jossa ohjelma koostuu lohkoista, jotka edustavat tiettyjä toimintoja tai operaatioita. Lohkot voivat suorittaa tehtäviä kuten logiikkaoperaatioita, matemaattisia laskelmia tai tiedonsiirtoa. Lohkot yhdistetään viivoilla, jotka osoittavat tiedon tai signaalin virtauksen. FBD visualisoi prosessit selkeästi ja tekee monimutkaisista järjestelmistä helpommin ymmärrettäviä ja ylläpidettäviä. (White 2023, 8.)

Instruction List (IL) on puolestaan tekstipohjainen ohjelmointikieli, jossa käytetään yksittäisiä käskyjä yksinkertaisten toimintojen suorittamiseen. Sen käyttö voi olla työlästä, sillä koodi on usein vaikealukuista ja hankala ylläpitää. IL on ollut yleinen erityisesti vanhemmissa automaatiojärjestelmissä, mutta sen suosio on vähentynyt merkittävästi nykyaikaisissa sovelluksissa. (White 2023, 8–9.)

Structured Text (ST) on korkeatasoinen tekstipohjainen ohjelmointikieli, joka muistuttaa rakenteeltaan perinteisiä ohjelmointikieliä, kuten Pascalia tai C:tä. ST tarjoaa monipuoliset mahdollisuudet logiikkatehtävien toteuttamiseen ja monimutkaisten laskentatoimintojen ohjelmointiin. ST on nykyisin suosittu valinta teollisuusautomaatiossa ja erityisesti sovelluksissa, jotka vaativat monimutkaisempaa laskentaa. (White 2023, 9.)

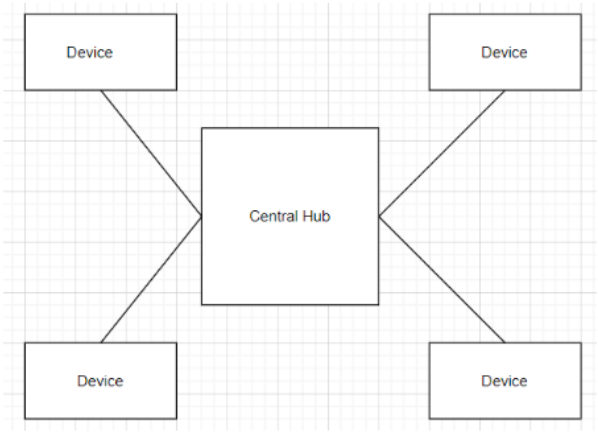
3.6 Kenttäväylä

Kenttäväylä on tiedonsiirtojärjestelmä, joka mahdollistaa automaatiojärjestelmän eri komponenttien, kuten antureiden, toimilaitteiden ja logiikkaohjainten, välisen yhteyden ja kommunikaation. Laitteet yhdistetään yleensä parikaapeleilla. (Kippo ym. 2022, 70–71.) Kenttäväylät toimivat erilaisten verkkotopologi-

oiden, kuten väylän, tähden, renkaan tai silmukan mukaisesti. Verkkotopologialla tarkoitetaan tapaa, jolla laitteet on rakennettu, järjestetty ja kytketty toisiinsa verkossa. Jokaisella topologialla on oma hyöty ja tarkoitus. (White 2023, 330.) Kenttäväyläratkaisun valinnassa tulee huomioida järjestelmän skaalautuvuus, tiedonsiirron nopeus sekä laitteiden yhteensopivuus (Liedes ym. 2022, 72).

PROFINET on kenttäväylä, joka mahdollistaa reaaliaikaisen, nopean ja luotettavan tiedonsiirron teollisuudessa yhdistäen laitteet ja järjestelmät helppokäyttöisyydellä ja yksinkertaisuudella. PROFINET käyttää IEEE 802.3-standardin TCP/IP Ethernet-tekniikkaa. Se on myös modulaarinen ja skaalautuva järjestelmä, mikä tekee siitä hyvän ratkaisun automaatioon. (PROFINET s.a.)

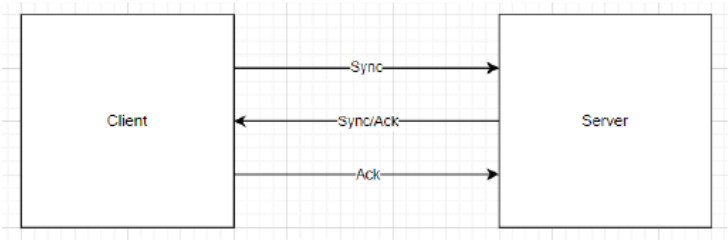
Kuvassa 13 on esitelty muun muassa PROFINET:n käyttämä tähtitopologia, jossa kaikki laitteet on yhdistetty keskitettyyn laitteeseen, kuten reitittimeen tai kytkimeen. Tässä rakenteessa jokainen verkon laite kommunikoi suoraan keskuspisteen kautta, mikä helpottaa verkon hallintaa ja vianmääritystä. (White 2023, 331-332.)



Kuva 13. Tähtitopologia (White 2023, 336)

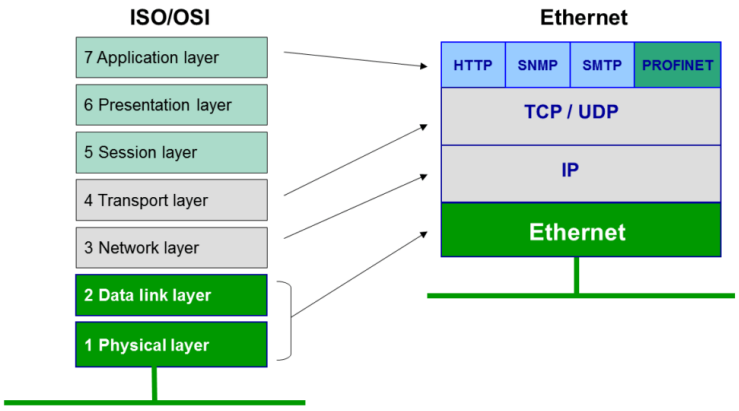
Ethernetin TCP-protokolla (Transmission Control Protocol) on yksi yleisimmistä tietoliikenneprotokollista. TCP kuuluu IP (Internet Protocol) -protokollaan ja näitä kahta käytetään usein yhdessä, jolloin niistä käytetään nimitystä TCP/IP. Vaikka TCP ja IP ovat erillisiä protokollia, ne toimivat saumattomasti yhdessä tietoliikenteessä. Yksi TCP:n tärkeimmistä ominaisuuksista on sen

luotettavuus, sillä se varmistaa, että kaikki lähetetyt tiedot saapuvat perille oikeassa järjestyksessä ja virheettöminä. Tätä kutsutaan three-way handshakeksi. Tämä tekee TCP:stä hieman hitaamman kuin jotkin vaihtoehtoiset viestintäprotokollat. (White 2023, 331-332.)



Kuva 14. Three-way handshake (White 2023, 332)

TCP-protokollan three-way handshake (kuva 14) yhteydenmuodostus käynnistyy, kun asiakas (Client) haluaa aloittaa tiedonsiirron palvelimen (Server) kanssa. Ensin asiakas lähettää palvelimelle SYNC-viestin, jolla se ilmoittaa haluavansa muodostaa yhteyden. Kun palvelin vastaanottaa tämän pyynnön, se vastaa SYNC-ACK-viestillä, joka kertoo asiakkaalle, että palvelin on valmis muodostamaan yhteyden. Seuraavaksi asiakas lähettää palvelimelle ACK-viestin, joka vahvistaa, että yhteys on muodostunut onnistuneesti. Tämän jälkeen molemmat osapuolet voivat aloittaa varsinaisen datan siirron. Tämä prosessi varmistaa, että molemmat osapuolet ovat valmiita muodostamaan yhteyden ja siirtämään dataa. Yhteys luodaan ennen varsinaisen datansiirron alkamista, mikä estää pakettien katoamisen siirron aikana. Näin saadaan myös varma ohjaus toteutettua toimilaitteiden ja logiikan välille. (White 2023, 331–332.)



Kuva 15. ISO/OSI malli (Henning 2015)

Ethernet-standardissa määritellään ISO/OSI-mallissa fyysinen- ja siirtoyhteyskerros, mutta sovellustoiminta vaatii myös sovelluskerroksen (kuva 15). PROFINET käyttää näitä kerroksia tiedonsiirtoon ja hyödyntää TCP/IP:tä konfigurointiin ja diagnostiikkaan. Teollisuus-Ethernet eroaa perinteisestä Ethernetistä siten, että se on suunniteltu erityisesti kestämään teollisuusympäristön vaativia olosuhteita, kuten kulumista, tärinää, sähkömagneettisia häiriöitä ja lämpötilavaihteluita. (Henning 2015.)

3.7 HMI- ja SCADA-järjestelmät

Käyttöliittymä (Human Machine Interface, HMI) ja SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) ovat molemmat tärkeitä osia automaatiojärjestelmissä. SCADA:lla tarkoitetaan laitteistoa tai valvomo-ohjelmistoa, joka kerää ja analysoi tietoa sekä mahdollistaa kommunikoinnin automaatiojärjestelmän kanssa, kun taas käyttöliittymä (HMI) on rajapinta, jonka kautta käyttäjä vuoro vaikuttaa laitteiston kanssa. Toisin sanoen, HMI on yksi SCADA-järjestelmän osista. (Kippo ym. 2022, 46, 55.)

SCADA mahdollistaa järjestelmätilan tarkkailun, säätää parametreja ja reagoi mahdollisiin häiriötilanteisiin. Järjestelmiä voidaan ohjata paikallisesti tai etänä riippuen käytetystä automaatiolaitteistosta. Teollisuusautomaation ja prosessien valvonnassa käytettäviä käyttöliittymiä on monenlaisia ja ne voivat vaihdella laitteiston ja ohjelmiston mukaan. (Liedes ym. 2023, 7, 10.)

HMI-järjestelmät voidaan jakaa kolmeen tyyppiin: fyysisiin HMI-paneeleihin, tietokonepohjaisiin HMI-järjestelmiin ja yksinkertaisimmillaan pelkkiin painonappeihin ja valoihin (Kippo ym. 2022, 56). Digitaaliset paneelit ovat halvempi vaihtoehto suurille, fyysisille ohjauspöydille (White 2023, 226). Tässä tarkastellaan HMI-paneelien ja tietokonepohjaisten järjestelmien eroja.

Fyysiset paneelit, kuten Siemens SIMATIC HMI ja Beckhoff TwinCAT HMI, voivat olla vaativissa olosuhteissakin suoraan kiinni ohjauskaapeissa ja toimia erillään muusta tietoverkosta. Fyysisten paneelien käyttö onnistuu ilman erillistä tietokonetta. (SIMATIC HMI Panels s.a.) Haittapuolina on, että ne voivat

esimerkiksi rajoittaa käyttöliittymän kehittämistä pienemmän koon tai laskentatehon takia.

Tietokonepohjaiset HMI-järjestelmät, kuten AVEVA InTouch, Siemens WinCC Advanced ja Siemens WinCC Unified, voivat tarjota monipuolisempia ominaisuuksia. Ne ovat suurempia, helpompia päivittää, toimivat useammilla laitteilla ja ovat helpompia laajentaa. Haittapuolena voi olla esimerkiksi niiden kestävyys verrattuna fyysisiin paneeleihin, sillä nämä vaativat tietokoneen ja näytön. (White 2023, 227; SIMATIC HMI Panels s.a.)

4 VIRTAUSTEKNIIKKA

Tässä luvussa käymme läpi tarkemmin vesiprosessin opetustapoja ja selvennämme tähän kuuluvaa virtaustekniikan teoriaa.

4.1 Painehäviöt

Tilavuusvirta tarkoittaa nesteen tai kaasun tilavuuden virtausta aikayksikössä. Se ilmaisee, kuinka suuri tilavuus liikkuu tietyn poikkipinta-alan läpi tietyssä ajassa, mikä nähdään yhtälöstä 1. (Bohl 1984, 53–54.)

$$q_v = wA \tag{1}$$

jossa	q_v	tilavuusvirta	[m³/s]
	w	virtaavan aineen virtausnopeus	[m/s]
	A	putken poikkipinta-ala	[m²]

Putkistossa virtaava neste kohtaa vastusta, mikä aiheuttaa energiankulutusta ja paineen alenemista. Tämä ilmiö tunnetaan kitkahäviöinä, jotka muuttuvat lämmöksi nesteen ja putken seinämien välisen kitkan seurauksena. Kitkahäviöiden vuoksi paine laskee virtaussuunnassa ja tätä ilmiötä kutsutaan painehäviöksi. Bernoullin lakiin perustuva kokonaispainehäviö voidaan määrittää yhtälöstä 2. (Bohl 1984, 91–92, 122.)

$$\Delta p = \left(\lambda \frac{l}{d} + \Sigma\xi\right) \cdot \frac{1}{2} \rho w^2 \quad (2)$$

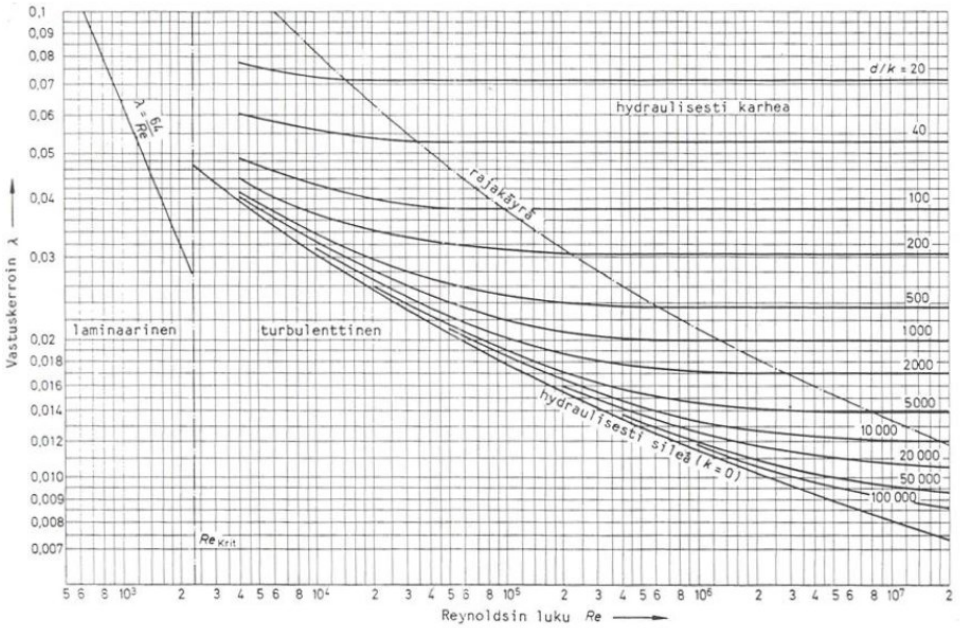
jossa	Δp	kokonaispainehäviö	[Pa]
	λ	vastuskerroin	[-]
	l	putken pituus	[m]
	d	putken sisähalkaisija	[m]
	$\Sigma\xi$	kertavastuskertoimien summa	[-]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/m^3]
	w	virtausnopeus	[m/s]

Putkistossa on joko tasaista laminaarista virtausta tai pyörteistä turbulenttista virtausta. Virtauksen tyyppi voidaan määrittää Reynoldsin luvun avulla. Luvun ollessa alle 2 300, virtaus on laminaarista. Luvun ollessa yli 2 300 virtaus muuttuu turbulenttiseksi. Reynoldsin luku voidaan laskea yhtälöstä 3. (Bohl 1984, 87–88.)

$$Re = \frac{\rho w d}{\mu} \quad (3)$$

jossa	Re	Reynoldsin luku	[-]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/m3]
	w	virtaavan aineen virtausnopeus	[m/s]
	d	putken sisähalkaisija	[m]
	μ	aineen dynaaminen viskositeetti	[kg/ms]

Painehäviön määrittämiseen tarvittava vastuskerroin λ voidaan määrittää yhtälöiden avulla tai hyödyntämällä valmiita käyrästöjä. Yksi yleisimmin käytetyistä käyrästöistä (kuva 16), jossa vastuskerroin voidaan määrittää putken sisähalkaisijan d, pinnankarheuden k, suhteellisen karheuden d/k funktiona ja Reynoldsin luvun Re perusteella. (Bohl 1984, 98.)



Kuva 16. Putkivirtauksen vastuskertoimen selvittäminen käyrästöstä (Bohl 1984, 253)

Kertahäviöitä muodostuu putkistossa, kun virtaussuunta, poikkipinta-ala tai tilavuusvirta muuttuu. Kertapainehäviö voidaan määrittää yhtälöstä 4. Putkistossa syntyviä kertapainehäviöitä tutkitaan vesiprosessissa kokeellisesti esimerkiksi muuttamalla veden tilavuusvirtaa venttiiliä kuristamalla ja mittaamalla paine-ero tietyllä putkiosuudella. (Bohl 1984, 105.)

$$\Delta p_k = \xi \cdot \frac{1}{2} \rho w^2 \tag{4}$$

jossa	Δp_k	kertapainehäviö	[Pa]
	ξ	kertavastuskerroin	[-]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/m^3]
	w	virtausnopeus	[m/s]

Putkiston vastuskäyrä voidaan määritellä staattisen nostokorkeuden yhtälön 5 ja tilavuusvirrasta riippuvan dynaamisen nostokorkeuden yhtälön 6 perusteella. (Sulzer 2008, 47–48; Bohl 1984, 55, 59.)

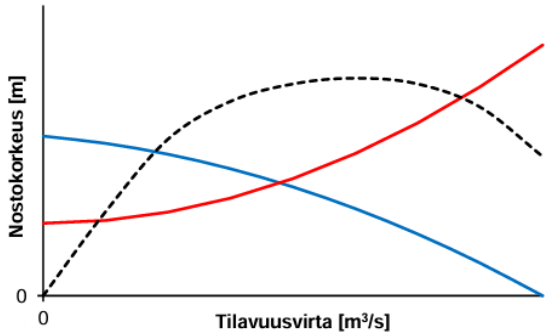
$$H_{sta} = h_2 - h_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} \tag{5}$$

$$H_{dyn} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2g} + \frac{\Delta p}{\rho g} \quad (6)$$

jossa			
	H_{sta}	staattinen nostokorkeus	[m]
	H_{dyn}	dynaaminen nostokorkeus	[m]
	h	pinnan korkeusasema	[m]
	p	paine	[Pa]
	Δp	painehäviö	[Pa]
	w	virtausnopeus	[m/s]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/m^3]
	g	maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s^2]

4.2 Käyrästöjen määrittäminen

Vesiprosessissa tarkasteltavia käyriä ovat putkiston vastuskäyrä, pumpun ominaiskäyrä ja hyötysuhdekäyrä (kuva 17). Punainen viiva esittää putkiston vastuskäyrää, sininen viiva pumpun ominaiskäyrää ja musta katkoviiva pumpun hyötysuhdetta. Kuvasta käy myös ilmi järjestelmän toimintapiste, joka sijaitsee putkiston vastuskäyrän ja pumpun ominaiskäyrän leikkauskohdassa.



Kuva 17. Putkiston vastuskäyrä, pumpun ominaiskäyrä ja hyötysuhdekäyrä (Sarvelainen 2024)

Ominaiskäyrä kuvaa nostokorkeutta tietyllä tilavuusvirralla. Hyötysuhde lasketaan yhtälön 7 mukaisesti. Vesiprosessissa pumpun ominaiskäyrä ja hyötysuhde voidaan määrittää kokeellisesti siten, että aluksi pumpun painepuolella oleva säätöventtiili suljetaan kokonaan kiinni. Pumppua pidetään vakiokierroksilla ja tämän jälkeen venttiiliä avataan pienin välein. Jokaisesta venttiilin

asennosta kirjataan pumpun tuottama paine-ero, tilavuusvirta ja sähköteho. (Sulzer 2008, 17.)

$$\eta = \frac{q_v \rho g H}{P_{tod}} = \frac{q_v \Delta p}{P_{tod}} \tag{7}$$

jossa	η	hyötysuhde	[-]
	q_v	tilavuusvirta	[m³/s]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/m^3]
	g	maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s^2]
	H	nostokorkeus	[m]
	P_{tod}	todellinen tehontarve	[W]
	Δp	painehäviö	[Pa]

4.3 Virtauksen säätäminen

Virtausta halutaan säätää vesiprosessissa säätöventtiilin avulla ja muuttamalla pumpun kierroslukua. Kierroslukusäädössä pumpun nopeutta säädetään taajuusmuuttajan avulla, mikä vaikuttaa laitteen ominaiskäyrään. Tämän muutoksen taustalla ovat niin sanotut affiniteettisäännöt, jotka kuvaavat, miten pyörimisnopeuden muutos vaikuttaa pumpun suorituskykyyn. Nämä säännöt kuvaavat, miten tilavuusvirta yhtälö 8, nostokorkeus yhtälö 9 ja teoreettinen teho yhtälö 10 riippuvat pyörimisnopeudesta. (Sulzer 2008, 55.)

$$\frac{q_{v1}}{q_{v0}} = \frac{n_1}{n_0} \tag{8}$$

$$\frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \tag{9}$$

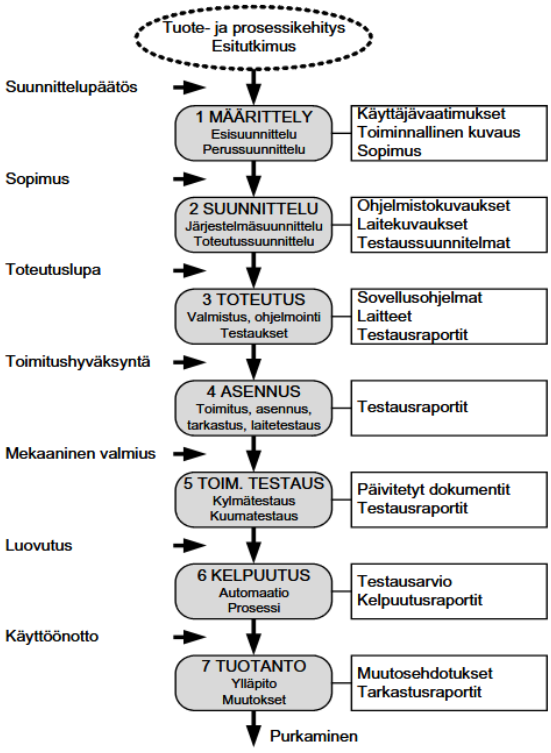
$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \tag{10}$$

jossa	q_v	tilavuusvirta	[m³/s]
	n	pyörimisnopeus	[1/s]
	H	nostokorkeus	[m]

P	teoreettinen teho	[W]
0	alkutilanne	[-]
1	uusi tilanne	[-]

5 SUUNNITTELU

Hyödynsimme suunnitteluvaiheissa Suomen Automaatioseura ry:n tekemää automaatiosuunnittelun elinkaarimallia (kuva 18). Järjestelmien elinkaari voidaan jakaa vaiheisiin, jossa käsitellään järjestelmän tietoja, prosesseja ja resursseja (Strömman ym. 2010, 15).



Kuva 18. Automaatiojärjestelmän elinkaari (Strömman ym. 2010, 16)

Ensimmäiseksi määrittelyvaiheessa käydään projektin vaatimukset ja toiminnalliset tarpeet tilaajan kanssa. Tämän vaiheen tavoitteena on luoda selkeä käsitys projektin laajuudesta ja tavoitteista. Suunnitteluvaiheessa laaditaan tarvittava rakenne ohjausjärjestelmän ja prosessin välille. Suunnittelussa määritellään myös tekniset ratkaisut standardeja noudattaen. Toteutusvaihe sisältää ohjelmoitavan logiikan ohjelmoinnin, jonka avulla vesiprosessi automati-

soidaan ja määritellään, kuinka laitteet kommunikoivat logiikan kanssa. Luodaan samalla graafinen käyttöliittymä eli valvomonäkymä, jonka avulla käyttäjä voi ohjata prosessia ja seurata sen toimintaa visuaalisesti. Fyysisen laitteiston valmistuttua suoritetaan toimilaitteiden kytkennät, jonka jälkeen työ etenee automaatiojärjestelmän testaukseen. Toiminnallisessa testausvaiheessa toteutettua järjestelmää testataan käytännössä. Testauksen aikana varmistetaan, että kaikki säätötoiminnot ja automaatiojärjestelmän osat toimivat suunnitellusti ja täyttävät asetetut tavoitteet. Testauksen tulosten perusteella tehdään tarvittavat korjaukset ja hienosäädöt ennen lopullista käyttöönottoa. Tilaajan hyväksyttyä toteutuksen, siirrytään työn viimeiseen vaiheeseen eli tuotantovaiheeseen. Tässä vaiheessa automaatiojärjestelmä otetaan aktiiviseen käyttöön ja sitä ylläpidetään. Tarvittaessa järjestelmää voidaan myös tehdä pieniä muutoksia prosessin kehittämistä varten. (Strömman ym. 2010, 16–17.)

5.1 Standardit

Automaatiojärjestelmän standardit on valittu järjestelmän ominaisuuksien ja vaatimusten perusteella. Sähkösuunnittelussa sovelletaan SFS 6000-1:2022-standardia, joka määrittelee pienjännitesähköasennusten perusperiaatteet, yleiset ominaisuudet ja määritelmät. Järjestelmän turvallisuus varmistetaan SFS 6000-4-41:2022-standardin mukaisilla perussuojausmenetelmillä. Ylivirtasuojaus toteutetaan SFS 6000-4-43:2022-standardin mukaisesti.

Syöttökaapelien ominaisuudet määritellään SFS 6000-5-55:2022-standardin mukaisesti, jossa määritellään esimerkiksi minimipoikkipinta. Pienoisjännitteisen tasasähkötehon jakelu ja kaapelien valinta toteutetaan SFS 6000-7-716:2022-standardin mukaisesti. Järjestelmän turvalaitteiden, kuten suojakytkinten ja erotuslaitteiden, valinta ja sijoittelu tehdään SFS 6000-5-53:2022-standardin mukaisesti.

Automaatiolaitteiden suunnitteluohje ST 711.12:2022 määrittelee automaatio- ja mittauslaitteiden vaatimukset ja toimitusohjeet. Dokumentointi ja huoltotilat otetaan huomioon suunnittelussa. Tiedonsiirtotapoina käytetään standardi-

viestiä. Laitteet on suojattu vaatimuksen mukaisilla IP-luokituksilla. Tiedonsiirtoyhteydet ovat potentiaalivapaita, sillä niitä käytetään vain tiedonsiirtoon ja niissä ei synny maadoitussilmukoita. Asennustapojen ja johtojärjestelmien toteutuksessa noudatetaan ST-käsikirja 34:2020:n käytäntöjä, jotta asennukset saadaan tehtyä ammattitaitoisesti.

Suunnittelussa otettiin huomioon konedirektiivin 2006/42/EY vaatimukset, jotka ohjaavat koneiden turvallista suunnittelua, rakentamista ja käyttöönottoa. Huomiota kiinnitettiin hätäseis-painikkeiden ja turvakytkinten sijoitteluun, jotta ne ovat helposti saavutettavissa kaikissa käyttötilanteissa SFS-EN ISO 13850:2015 standardin mukaisesti. Hätäseis-toiminnon ohjelmallinen kuittaus on toteutettu tämän mukaisesti, varmistaen koneen turvallisen uudelleenkäynnistyksen. Ohjauspaikka on suunniteltu turvalliseksi standardin SFS-EN 13857:2008 mukaisesti siten, että käyttäjä voi operoida järjestelmää joutumatta vaaravyöhykkeelle.

5.2 Laitteiston valinta

Automaatiojärjestelmän logiikan valintaan oli useita hyviä vaihtoehtoja ja valmistajia. Siemensin tarjoamat PLC:t osoittautuivat kuitenkin parhaaksi valinnaksi vesiprosessiin hinnan ja yhteensopivuuden takia. Siemensin SIMATIC-logiikoista harkitsimme S7-1200- ja S7-1500-sarjoja sekä ET 200SP -mallia.

S7-1200-sarjan logiikat ovat kustannustehokkaita ja sopivat hyvin yksinkertaisiin sovelluksiin. Ne olivat meille entuudestaan tuttuja, mikä houkutteli kyseisen logiikan valintaa. S7-1500-sarjan logiikat puolestaan tarjoavat enemmän suorituskykyä ja kehittyneempiä diagnostiikkatoimintoja, minkä vuoksi ne soveltuvat vaativampiin prosesseihin. Siemens ET 200SP on hajautettu ohjausjärjestelmä, joka yhdistää SIMATIC S7-1500 -sarjan edut. ET200SP kompaktin rakenteensa ansiosta se on tilaa säästävä ja helposti laajennettavissa. Rakenne mahdollistaa useiden moduulien käytön kustannustehokkaasti, mikä tekee siitä joustavan vaihtoehdon monipuolisiin automaatioratkaisuihin. (SIMATIC controllers s.a.)

Siemens tarjosi edullisen oppilaitospaketin, joka vastasi erinomaisesti vesiprosessin tarpeisiin. Pakettiin sisältyi CPU 1512SP F-1 PN -logiikka, neljä kahdeksankanavaista digitaalista I/O-korttia, BusAdapter-moduuli taajuusmuuttajien kytkentää varten sekä tarvittavat lisenssit. Valittu CPU perustuu ET200SP -malliin, joka on ihanteellinen silloin, kun tarvitaan useita lisäkortteja. Järjestelmään toivottiin tulevaisuudessa laajennusmahdollisuuksia, joten valittu ratkaisu tukee tätä.

Siemensin logiikan valintaan vaikuttivat tekninen soveltuvuus ja saatavilla oleva oppilaitospaketti, joka tarjosi komponentit kilpailukykyiseen hintaan. Järjestelmään lisättiin kuusi analogista neljän kanavan tulomoduulia ja yksi analoginen neljän kanavan lähtömoduuli. Jokaiselle I/O-moduulille tarvitaan oma BaseUnit (BU), johon moduuli liitetään ja jonka kautta toimilaitteet voidaan kytkeä järjestelmään (BaseUnits s.a.).

Virransyötön osalta valitsimme Siemensin SITOP PSU6200 -mallin, joka on teollinen 24 voltin virtalähde. Virtalähde tarjoaa luotettavaa ja tehokasta virransyöttöä teollisuusympäristöihin (SITOP PSU6200 s.a.). Järjestelmän turvaamiseksi asensimme Siemensin selektiivisyysmoduulin SITOP SEL1200, joka mahdollistaa yksittäisten syöttöjen katkaisun ja suojauksen ilman, että koko järjestelmän sähkönsyöttöä tarvitsee katkaista. Tämä selektiivisyysmoduuli tekee järjestelmästä entistä luotettavamman ja varmistaa, että virransyöttö ei häiriinny turhaan. Tämä myös tarkoitti, että emme tarvinneet erillisiä sulakkeita muihin laitteisiin kuin itse virtalähteelle. (Siemens 2020.) Valitsimme laitteistolle Rittalin 600x600 mm kokoisen sähkökaapin. Kaappi mitoitettiin siten, että siihen mahtuivat kaikki edellä mainitut laitteet, riviliittimet ja kaapelikourut. Kaappiin jätettiin myös tilaa mahdollisille jatkokehitystarpeille.

5.3 Kenttäväylän valinta

Kenttäväyläksi taajuusmuuttajille valittiin PROFINET-tiedonsiirto. Taajuusmuuttajia olisi voinut ohjata I/O-liitäntöjen kautta, mutta koska taajuusmuuttajissa oli valmiiksi FPNO-21-kenttäväyläsovittimet (kuva 19), ohjaus toteutettiin PROFINET-väylällä. FPNO-21 on ABB:n valmistama PROFINET I/O-kenttä-

väyläsovitin, joka mahdollistaa ABB:n taajuusmuuttajien liittämisen PROFINET-verkkoon (ABB 2024). Tämä ratkaisu vähensi logiikan lisämoduulien tarvetta ja kaapelointityötä, sillä PROFINET vaatii vain yhden Ethernet-kaapelin.

Kuva 19. ABB FPNO-21 PROFINET-IO moduuli (ABB 2024)

Ohjelmoitavan logiikan ja tietokoneen välinen kommunikointi toteutettiin Teollisuus Ethernetin (Industrial Ethernet) avulla. Muiden kenttälaitteiden luku ja ohjaus toteutettiin I/O-liitäntöjen kautta.

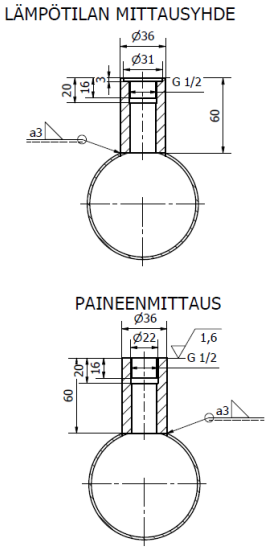
5.4 SCADA- ja HMI-järjestelmän valinta

Päädyimme tietokonepohjaiseen toteutukseen ja valitsimme uuden selainpohjaisen Siemensin Simatic WinCC Unified -visualisointijärjestelmän. Valintaan vaikutti Siemensin suositus järjestelmän käytöstä ja aiempi kokemus Siemensin käyttöliittymistä, mikä vähensi mahdollisia ongelmatilanteita ohjelmoinnissa. Oppilaitospaketti sisälsi myös WinCC-lisenssit ja saimme oppilaitokselta tietokoneen prosessin käyttöön.

Simatic WinCC Unified on Siemensin kehittämä nykyaikainen SCADA- ja HMI-järjestelmä, joka on integroitu osaksi TIA Portal -ohjelmointiympäristöä. Järjestelmällä voidaan suunnitella ja toteuttaa joustavia valvonta- ja ohjausratkaisuja teollisuuden automaatiosovelluksiin. WinCC Unified hyödyntää moderneja web-teknologioita, kuten HTML5:ttä ja SVG:tä, mikä mahdollistaa käyttöliittymän käytön eri laitteilla ilman erillisiä lisäosia. Järjestelmä tukee monikosketusohjausta ja tarjoaa laajat mahdollisuudet mukauttaa käyttöliittymiä käyttäjien tarpeiden mukaan. (WinCC Unified s.a.)

5.5 Kenttälaitteet

Prosessia seurataan useilla eri toimilaiteilla ja antureilla. Ne ovat vesiprosessin tärkeitä komponentteja, jotka mahdollistavat järjestelmän valvonnan ja ohjauksen. Anturit keräävät tietoa prosessin tilasta, kuten paineesta, lämpötilasta ja virtausnopeudesta, kun taas toimilaitteet suorittavat ohjaustoimenpiteitä, kuten venttiilien ja pumppujen säätämistä (Kippo ym. 2022, 59). Valitsimme paine- ja lämpötila-anturit oikean kommunikointiprotokollan ja oikeiden prosessiliitäntöjen perusteella (kuva 20). Kenttälaitteiden sijainnit käyvät ilmi kuvasta 48.



Kuva 20. Yhdekuva (Tarhonen 2024)

Mittausanturit muuttavat prosessisuureet sähköisiksi suureiksi. Tämän jälkeen mittauslähetin muuttaa saadun tiedon mittausviestiksi ja lähettää sen logiikalle. Nämä ovat usein yhdistetty samaan laitteeseen. (Kippo ym. 2022, 59–60.)

5.5.1 Paineanturit

Käytämme vesiprosessissa SITRANS P200 -painelähettimiä (kuva 21). Niitä käytetään vesiprosessin putkiston paineen mittaamiseen ja pinnankorkeuden mittaamiseen säiliössä. Pinnankorkeutta mitataan hydrostaattisella paineella,

joka voidaan laskea yhtälöstä 11 (Bohl 1984, 29). Yhtälöä pyörittämällä saadaan pinnankorkeus h, jolloin 0,1 bar vastaa noin 1 metriä vettä.

$$p_h = \rho g h \tag{11}$$

jossa	p_h	hydrostaattinen paine	[Pa]
	ρ	virtaavan aineen tiheys	[kg/m^3]
	g	maan vetovoiman kiihtyvyys	[m/s^2]
	h	pinnan korkeusasema	[m]

SITRANS P200 on elektroninen paineanturi, joka käyttää keraamista sensoria paineen mittaamiseen yhdistettynä lähettimeen. Anturi tunnistaa paineen muutokset ja lähettää signaalin ohjausjärjestelmälle, josta käyttäjä tai logiikka voi säätää muita järjestelmän komponentteja, kuten pumppuja tai venttiilejä, saadakseen halutun paineen tason. (SITRANS P200 s.a.)

Kuva 21. SITRANS P200 paineanturi (SITRANS P200 s.a.)

Vesiprosessiin on asennettu yhteensä kahdeksan paineanturia, jotka ovat mitoitettu toimimaan 0–10 baarin painealueella. Antureiden valinta perustuu siihen, että prosessin paine ei koskaan ylitä 10 baaria ja käytössämme on G ½ tuuman prosessiliitännät. Anturit toimivat 4–20 milliampeeriviestillä.

5.5.2 Lämpötila-anturit

Vesiprosessissa on käytössä IFM TA3435 -lämpötilalähettimet (kuva 22). Ne perustuvat DIN EN 60751 -standardin mukaiseen PT1000-tekniikkaan, jossa

lämpötilan muutos vaikuttaa lineaarisesti vastusarvoon ja yhdistettynä lähettimeen ne lähettävät logiikalle tiedon (IFM 2022). Käyttäjä voi tämän avulla tarkkailla käyttöliittymästä prosessin lämpötilaa eri kohdissa putkistoa.

Kuva 22. IFM TA3435 (IFM 2022)

Prosessiin on asennettu viisi anturia, jotka mittaavat veden lämpötilaa eri kohdissa. Anturit ovat mitoitettu -50–150 °C lämpötila-alueelle. Ne toimivat 4–20 milliampeeriviestillä. Anturit ovat mitoitettu siten, että niiden mittauspiste on keskellä putkea, jolloin saadaan optimaalinen lämmönmittaus. Lämpötila-anturit ovat myös varustettu G ½ tuuman prosessiliitännöillä.

5.5.3 Virtausmittarit

Vesiprosessissa käytämme SITRANS FMS500 -virtausantureita (kuva 23), jotka on yhdistetty SITRANS FMT020 -lähettimiin (kuva 24). Nämä ovat elektromagneettisia mittalaitteita, jotka yhdessä lähettimien kanssa pystyvät siirtämään tietoa logiikalle (SITRANS FMT020 s.a.).

Kuva 23. SITRANS FMS500 virtausanturi (Siemens 2024a, 14)

Virtausmittarit mittaavat veden virtausnopeutta putkistossa, jolloin käyttäjä voi tarkastella virtausnopeuden muutoksia esimerkiksi säätämällä venttiileitä. Tämä mahdollistaa myös virtausvastuksien tarkistelun putkistossa.

Kuva 24. SITRANS FMT020 virtauslähetin (SITRANS FMT020 s.a.)

Virtausmittareita on asennettu kolme kappaletta eri kohtiin prosessia. Anturit toimivat usealla eri kommunikointiprotokollalla, mutta käytämme 4–20 milliampeeriviestiä. Anturit ovat mitoitettu alueelle 0–50.27 litraa sekunnissa.

5.5.4 Pumput ja moottorit

Prosessissa käytämme Sulzerin pumppuja, joita pyöritämme ABB:n moottoreilla. Pumput ovat prosessissa vastuussa veden siirtämisestä prosessin eri vaiheisiin. Moottoreiden avulla PLC saa ohjattua pumppujen nopeutta, jolloin saadaan haluttu virtaus ja paine putkistoon.

Kuva 25. ABB sähkömoottori (3GBP181410-ADK s.a.)

Moottorit ovat ABB:n 3GBP181410-ADK 22 kilowatin kolmivaiheoikosulkumoottoreita (kuva 25). 400 voltilla ja 50 hertsillä kolmioon kytkettynä moottorien maksiminopeus on 2 956 kierrosta minuutissa, virta 37,7 ampeeria. (3GBP181410-ADK s.a.).

Kuva 26. Sulzer SNS 1 80 -pumppu (Sulzer 2024, 1)

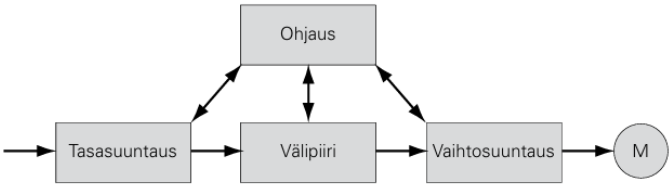
Pumppuja on kaksi kappaletta asennettuna prosessiin ja niiden moottorien toimintaa ohjataan ABB:n taajuusmuuttajilla. Pumput ovat Sulzerin SNS 1 80 -pumppuja (kuva 26) ja niiden maksiminopeus on 2 982 kierrosta minuutissa, virtausnopeus 39 litraa sekunnissa ja nostokorkeus 33 metriä (Sulzer 2024).

5.5.5 Taajuusmuuttajat

Vesiprosessissa käytetään ABB ACS880-01 -taajuusmuuttajia (kuva 27) säätämään prosessimoottoreiden nopeutta, jolloin saadaan säädettyä veden virtausta.

Kuva 27. ABB ACS880-01 taajuusmuuttaja (ACS880-01 s.a.)

Kuvasta 28 nähdään yksinkertaistetusti, miten taajuusmuuttaja ja logiikka ohjaavat moottoria ja näin ne samalla ohjaavat prosessissa pumppua. Tasasuuntaaja muuntaa vaihtovirran tasavirraksi, jonka jälkeen logiikka määrää halutun taajuuden ja nopeuden, jonka jälkeen virta syötetään vaihtosuuntaajan läpi moottorille. Näin saadaan tehtyä tarkka nopeuden ohjaus. (Kippo ym. 2022, 68.)

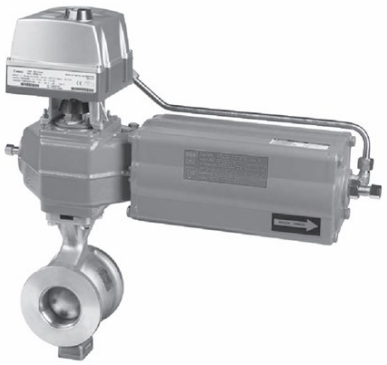


Kuva 28. Taajuusmuuttajien ohjausrakenne (Kippo ym. 2022, 68)

Taajuusmuuttajia on kaksi kappaletta vesiprosessissa ohjaamassa pumppuja. ABB:n ACS880-01 -taajuusmuuttajat ovat tehokkaita ja yksinkertaisia käyttää (ACS880-01 s.a.).

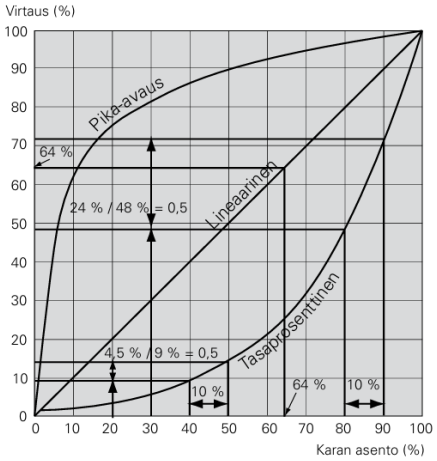
5.5.6 Säätöventtiilit

Vesiprosessissa on käytössä Valmet Neles V-Port segmenttisäätöventtiilit (kuva 29). Säätöventtiilit ovat tärkeä osa automaatiota, sillä niiden avulla käyttäjä tai logiikka voi säätää muun muassa virtauksia ja luoda virtausvastusta (Kippo ym. 2022, 64).



Kuva 29. Neles V-Port säätöventtiili ja asennoitin (Valmet 2022b, 1)

Säätöventtiilejä on asennettu kolme kappaletta prosessiin. Venttiilejä ohjataan logiikan ohjauksella ja paineilmalla ND9000 asennoittimen avulla.



Kuva 30. Venttiilin ominaiskäyrä (Kippo ym. 2022, 66)

Kuvassa 30 esitetään säätöventtiilien ominaiskäyrä. Kuvasta voidaan tarkastella venttiilin vedenläpäisykykyä sen eri asennoissa vakion paine-eron alaisena. Säätöventtiilin ominaiskäyrä voi olla joko tasaprosenttinen tai lineaarinen. (Kippo ym. 2022, 66.)

5.5.7 Venttiilit

Vesiprosessiin kuuluu myös Nelesin pallo- ja läppäventtiileitä, joita käytetään on/off-venttiileinä (kuva 31). Venttiilit ohjaavat veden kulkua putkistossa ja niitä käytetään sulkemaan tai avaamaan putkistojen eri osia, esimerkiksi eri ajotavoissa.

Kuva 31. Neles palloventtiili (Neles modular ball valve s.a.)

Nämä venttiilit eroavat säätöventtiileistä siten, että venttiilin asento on aina täysin kiinni tai auki, eikä niitä voida erikseen ohjata tiettyyn väliasentoon.

Kuva 32. Stonel Quartz rajakytkin (Stonel Quartz s.a.)

Prosessiin on asennettu neljä läppäventtiiliä ja yksi palloventtiili, jotka toimivat paineilmalla logiikan ohjaamana. Venttiileitä ohjataan binäärisesti magneettiventtiilin avulla. Venttiileissä on lisänä Stonel Quartz -rajakytkimet (kuva 32), joilla saadaan tieto venttiilin asennosta.

6 JÄRJESTELMÄN KONFIGUROINTI

6.1 Kenttälaitteiden konfigurointi

Taajuusmuuttajat piti parametrisoida ennen käyttöönottoa. Aluksi taajuusmuuttajissa asetettiin moottorintiedot, joista suurin osa saatiin suoraan moottorin tunnistusajolla. Tunnistusajolla taajuusmuuttaja pyörittää moottoria ja saa näin tietoa käytettävästä moottorista. Osa moottorin tiedoista piti kuitenkin lisätä käsin, kuten sähkömoottorin vaiheiden oikea järjestys, jännite, taajuus, tehokerroin, virta, teho, minimi ja maksiminopeudet. Oikeat tiedot saatiin moottorin arvokilvestä ja moottorin ominaisvääntömomentti laskettiin yhtälöllä 11 (Sulzer 2008, 63).

$$M = \frac{9550 \cdot P}{n} \tag{11}$$

jossa	M	ominaisvääntömomentti	[Nm]
	9550	vakio	[-]
	P	teho	[kW]
	n	pyörimisnopeus	[rpm]

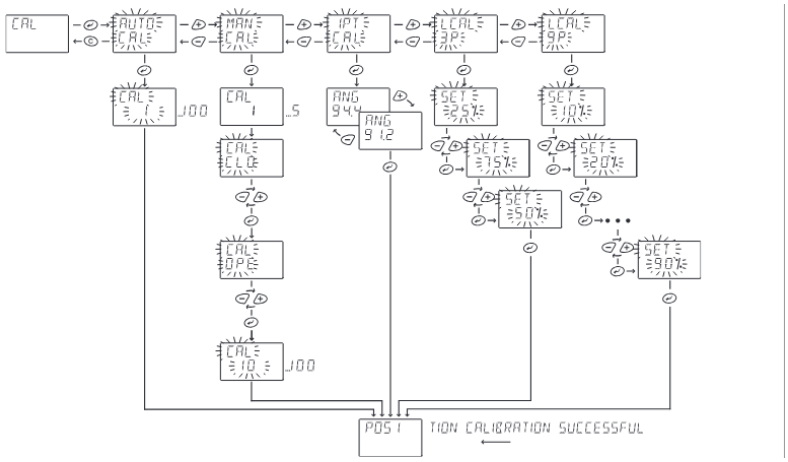
Taajuusmuuttajat konfiguroitiin ulkoiseen ohjaukseen kenttäväyläsovittimen avulla, jotta niiden ohjaus ja valvonta voitiin suorittaa PROFINET-kenttäväylän kautta PLC:n välityksellä. Järjestelmän toiminta perustuu PROFIdrive-profiilin määrittämään ohjausjärjestelmään. Käynnistys- ja pysäytyskäskyt sekä nopeusreferenssi siirretään tämän profiilin mukaisesti. Tässä yhteydessä nopeuden ohjaus toteutetaan PPO-tyypin 4 mukaisesti, mikä tarkoittaa, että viestintään sisältyy perusohjaustietoa ja sovelluskohtaisia lisätietoja. (ABB 2018, 625, 635; ABB 2024, 41–42.)

Taajuusmuuttajien etäohjaamiseen tarvittavat parametrit:

- 50.01 KVS A käyttöön (3 Lisävarustepaikka) – Aktivoi oikean käyttöliittymän, jotta taajuusmuuttaja voi kommunikoida PROFINET:n kautta.
- 50.02 KVS A tiedonsiirron valvontavika (Päällä) – Taajuusmuuttaja valvoo PROFINET-kenttäväylän tiedonsiirtoa ja havaitsee mahdolliset yhteyskatkokset. Viestinnän keskeytyessä PLC:n kanssa taajuusmuuttaja reagoi pysäyttämällä moottorin ja siirtymällä vikatilaan.
- 50.04 KVS A ohjeen 1 tyyppi (Nopeus) – Määrittää, että kenttäväylän kautta annettava ohjausarvo on nopeusreferenssi.
- 50.07 KVS A oloarvon 1 tyyppi (Nopeus) – Määrittää, että taajuusmuuttajan aktuaaliarvo on nopeus ja se skaalataan referenssiin liittyvän asetuksen mukaan.
- 51.01 KVS A tyyppi (PROFINET IO) – Määrittää käytettäväksi kenttäväyläksi PROFINET IO -protokollan.
- 51.02 Protocol/Profile (PNIO Pdrive) – Valitsee PROFINET IO -protokollan ja PROFIdrive-profiilin. PROFIdrive on teollisuusautomaation standardi, joka mahdollistaa taajuusmuuttajien ja muiden liikeohjauslaitteiden viestinnän.
- 51.04 IP configuration (0 = Static IP) – Käytetään staattista IP-osoitetta, joka määritetään PLC:n kautta.
- 51.20 Telegram type (PPO4) – Asetus määrittää, että käytössä on PPO-tyypin 4 viestikehys PROFINET-tiedonsiirrossa.
- 51.22 Map selection (16bit) – Parametri määrittää, että tiedonsiirrossa käytettävät arvot ovat 16-bittisiä.
- 52.01 KVS A Datatulo 1 (Tilasana 16bit) – Tuo sisään tilasanan (status word), jota voidaan käyttää taajuusmuuttajan tilan seurantaan.
- 52.02 KVS A Datatulo 2 (Lähtöjännite 16bit) – Kertoo moottorille syötetyn jännitteen ja mahdollistaa sen seurannan PLC:n kautta.

- 52.03 KVS A Datatulo 3 (Lähtöteho 16bit) – Kertoo moottorille syötetyn tehon ja mahdollistaa sen seurannan PLC:n kautta.
- 52.04 KVS A Datatulo 4 (Tasajännite 16bit) – Näyttää taajuusmuuttajan välipiirin jännitettä ja mahdollistaa sen seurannan PLC:n kautta.
- 52.05 KVS A Datatulo 5 (Moottorin nopeus laskettu 16bit) – Näyttää taajuusmuuttajassa laskettua pyörimisnopeutta ja mahdollistaa sen seurannan PLC:n kautta.
- 52.06 KVS A Datatulo 6 (Moottorin virta) – Kertoo moottorille syötetyn virran ja mahdollistaa sen seurannan PLC:n kautta.
- 53.01 KVS A Datalähtö 1 (Ohjaussana 16bit) – Lähettää ohjaussanan (control word), joka sisältää mm. käynnistys- ja pysäytyskomennot.
- 53.02 KVS A Datalähtö 2 (Ohje 1 16bit) – Lähettää nopeusreferenssin (reference 1) 16-bittisenä ohjauksen kautta.
- 19.12 Ulk1 ohjauskomento (Nopeus) – Määrittää, että ulkoisen ohjauksen ensimmäinen tila (External control location 1) käyttää nopeudenohjausta.
- 20.01 Ulk1 komennot (Kenttäväylä A) – Määrittää, että käynnistys- ja pysäytyskäskyt tulevat kenttäväylän kautta.
- 21.04 Hätäpysäytystapa (Hätäramppipysäytys) – Määrittää, että moottori pysähtyy jarrutusrampilla hätäpysäytyksen aikana.
- 22.11 Nopeusohjeen 1 lähde (KV A ohje 1) – Valitsee kenttäväylä A-liitännän nopeusreferenssin lähteeksi.

Säätöventtiileille suoritettiin asennoittimien automaattinen kalibrointi (kuva 33), jonka aikana venttiili määrittää itsenäisesti oikean sulkeutumis- ja avautumisasennon (Valmet 2022a, 28). Kalibroinnin jälkeen säädimme venttiilien kuollutta kulmaa. Parametri kompensoi sisäisen kuolleen kulman. Tällä tarkoitetaan kiertomäärää, joka tapahtuu ilman, että kiertoventtiileissä on sisäistä virtausta. (Valmet 2023, 44.) Kuolleen kulman hienosäädön avulla saimme venttiilin liikkumaan täsmällisesti haluttuun asentoon.



Kuva 33. ND9000 asennoittimen kalibrointi (Valmet 2022a, 28)

On/off-venttiilien osalta varmistimme, että venttiilit kääntyvät oikeaan asentoon oikean ohjauskäskyn mukaan. Logiikka saa tiedon venttiilin asennosta, kun rajakytkimet aktivoituvat venttiilin ollessa oikeassa asennossa.

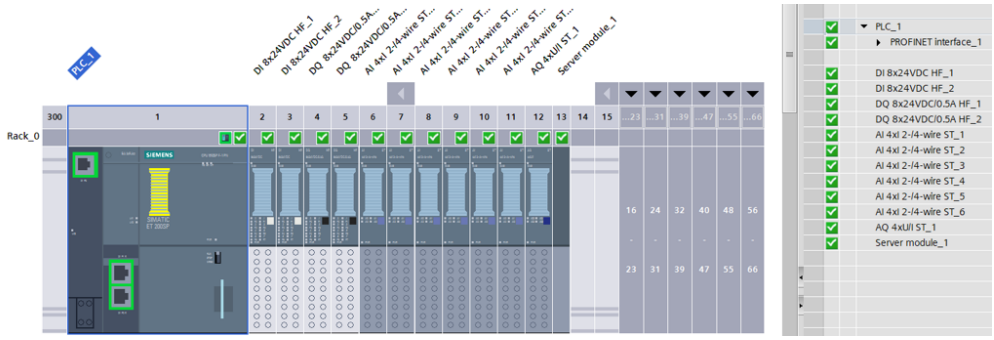
Virtauslähettimille täytyi tehdä käyttöönotto, jossa aktivoitiin käyttöön 4–20 milliampeerin analogiviesti ja muutettiin yksikkö alkuperäisestä kuutiota sekunnissa (m^3/s) tilaajan haluamaan yksikköön litraa sekunnissa (l/s), jolloin saadaan vähennettyä skaalaamista ohjelmassa.

6.2 PLC:n ja käyttöliittymän konfigurointi

PLC-ohjelmointi ja konfigurointi toteutettiin logiikalle käyttäen TIA Portal V19 -ohjelmointiympäristöä. Ohjelmoinnissa käytimme LD ja ST-ohjelmointikieliä. Ohjelmoinnin eri prosessit ja toiminnot jaettiin loogisiin ohjelmointilohkoihin, kuten pääohjelmaan OB1, aliohjelmiin FC, FB sekä tietorakenteisiin DB, toimilaitteet, muistibitit, pumppujenohjaus, turvakytkimet ja venttiilien ohjaus. Tagit ovat muuttujia, jonka avulla voidaan ohjata laitteita, lukea mittauksia ja käsitellä prosessidataa. Ne määritellään TIA Portalissa "Tag Management" -osiossa ja voivat olla erilaisia, kuten boolean, word, integer, reaali tai string-tietotyyppejä, riippuen siitä, mitä dataa niiden kautta käsitellään. (Siemens 2024b.)

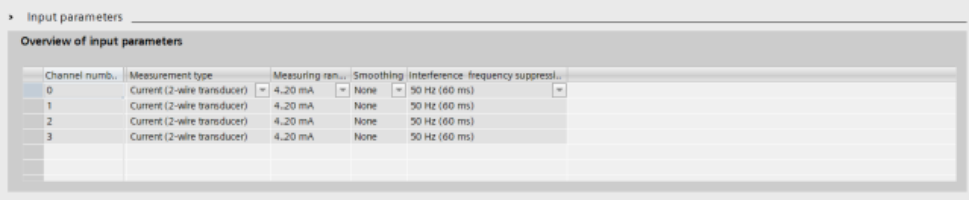
Lisäsimme ohjelmaan oikean PLC:n ja I/O-moduulit sekä varmistimme, että lisätyillä komponenteilla on oikeat firmware versiot (kuva 34). Järjestelmän pa-

rametrit ohjelmoitiin huolellisesti, jotta I/O-moduulit, viestintä ja prosessin ohjaus toimivat suunnitellusti. Lisäkorteille asetettiin oikeat Base Unit -yksiköt, jotta laitteisto toimisi oikein. PLC:n asetuksissa huomioitiin PUT/GET-kommunikaation hyväksyntä, jotta tiedonsiirto eri laitteiden välillä onnistuisi.



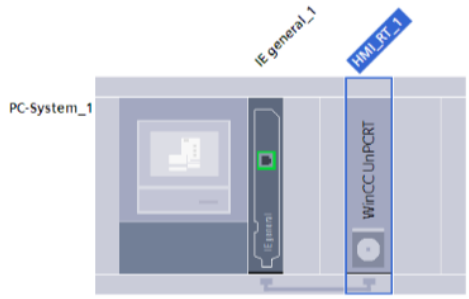
Kuva 34. PLC konfiguraatio

Analogisten tulojen osalta konfiguroitiin sekä 2-johdin- että 4–20 mA -signaalit, varmistaen mittausten tarkkuuden ja oikeiden arvojen vastaanoton kenttälaitteilta (kuva 35).



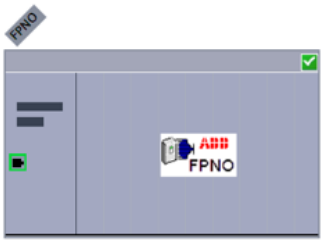
Kuva 35. Analogisen sisääntulomoduulin parametrit

TIA Portaliin lisättiin PC-System, joka toimii alustana WinCC Unified PC Runtime -ohjelmistolle. PC:hen lisättiin myös WinCC ja IE General -kortti. IE General -kortti on teollisuus Ethernetin RJ-45-liitäntäpaikka, joka mahdollistaa yhteyden muodostamisen eri laitteiden välillä (kuva 36).



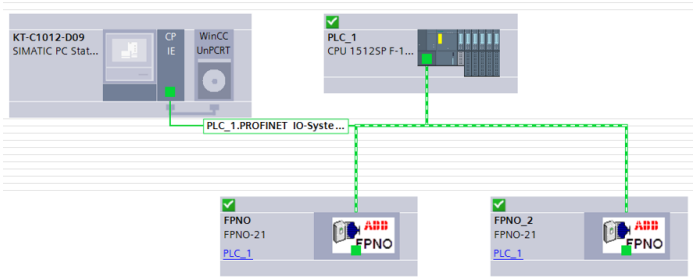
Kuva 36. PC System

Kuvassa 37 on ABB:n FPNO 21 -moduuli, joka ladattiin ABB:n verkkosivuilta GSDML-tiedostona ja liitettiin TIA Portal -ohjelmaan. On tärkeää, että PLC:n asetuksista määritettiin oikeat portit, koska automaattinen asetus ei tunnistanut taajuusmuuttajia. TIA Portaliin lisättiin molemmille taajuusmuuttajille omat FPNO 21 -moduulit ja näihin moduuleihin määritettiin PPO4-tiedonsiirtoprotokolla. PPO Type 4 -moduulin avulla voidaan lisätä oikeat lähdöt ja tulo-osoitteet, jotka määräytyvät taajuusmuuttajan asetettujen parametrien mukaan.



Kuva 37. TIA Portal FPNO-21 moduuli

Lopuksi määritettiin tarvittavat IP-osoitteet PLC:lle, HMI:lle ja taajuusmuuttajan moduuleille. Tämän jälkeen määritimme PROFINET-kenttäväylän taajuusmuuttajien ja PLC:n välille sekä HMI yhteyden PLC:n ja tietokoneen välille. Ohjelman latauksen jälkeen device configurationista nähdään onnistuneet yhteydet vihreänä valintamerkkinä (kuva 38).

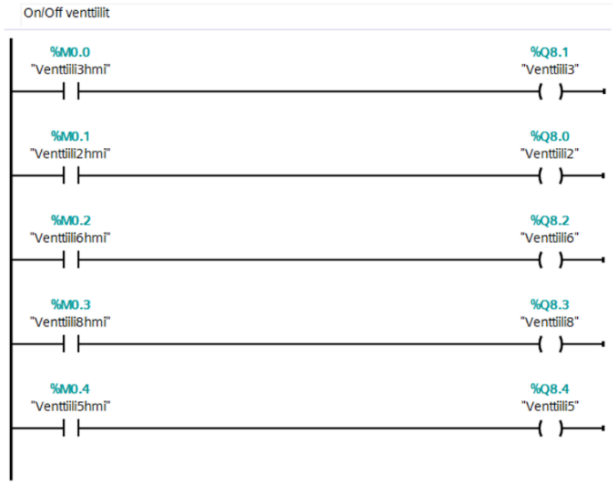


Kuva 38. Yhteydet

WinCC Unified Configuration -sovelluksessa HMI järjestelmä konfiguroitiin paikallisen käyttöliittymän luomiseksi. Projektin luominen ja projektin tyypin varmistaminen tehtiin WinCC Runtime Managerissa, jossa tarkistettiin, että projekti on oikea eikä pelkkä simulaatio. WinCC Unified Certificate Managerissa tehtiin tarvittavat varmenteiden määritykset ja Windowsin IIS-palvelimeen luotiin sertifikaatit, jotta käyttöliittymä saatiin toimintaan selaimessa. Tämän jälkeen tietokoneen ohjauspaneelin "Set PG/PC Interface" -valikosta määritettiin oikea TCP/IP.1-yhteys, mikä mahdollisti HMI:n kommunikoinnin logiikan kanssa. Käyttöliittymän hakuaikoja säädettiin tärkeille tageille, jotta tiedot päivittyisivät nopeammin ja näkyisivät käyttöliittymässä sulavammin.

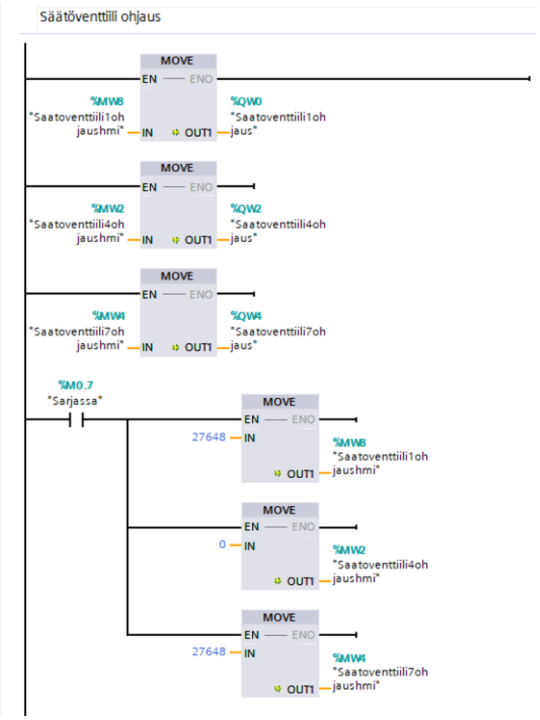
7 PLC:N JA KÄYTTÖLIITTYMÄN OHJELMOINTI

Tässä luvussa käymme läpi järjestelmän toiminnalle keskeisimpiä esimerkkejä, emmekä käsittele koko ohjelmaa toistuvuuden ja pituuden vuoksi. Kuvassa 39 on/off-venttiileitä ohjataan ja valvotaan käyttöliittymän kautta. Ohjelmassa on viisi rinnakkaista ohjauspiiriä, joista jokainen vastaa yhden venttiilin ohjauksesta. Jokainen piiri alkaa HMI:n painikkeeseen tai toimintoon liitetystä muistibitistä. Nämä muistibitit toimivat sisäisinä signaaleina. Muistibitti on liitetty sulkeutuvaan koskettimeen. Koskettimen tehtävänä on toimia logiikkaehtona, joka määrittää, milloin virta pääsee kulkemaan ohjauspiirin läpi. Kun käyttäjä aktivoi vastaavan painikkeen HMI:ssä (kuva 48), kyseinen muistibitti saa arvon 1, mikä symboloi "päällä" -tilaa. Ohjauspiirin lopussa löytyy kela, joka on kytketty PLC:n fyysiseen lähtöön. Kun koskettimen kautta kulkee virta, kela aktivoituu ja kytkee vastaavan fyysisen lähdön päälle.



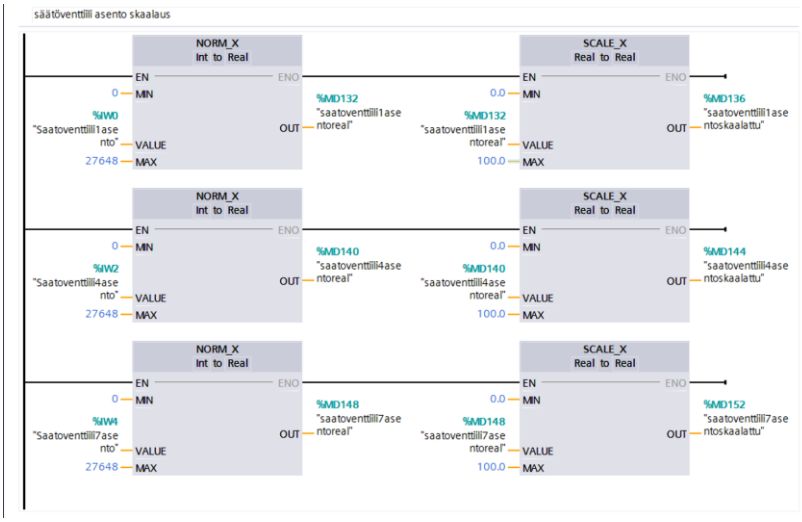
Kuva 39. On/off-venttiilien ohjaus

Säätöventtiileissä MOVE-lohkoja käytetään siirtämään HMI-käyttöliittymästä tulevia ohjausarvoja venttiilien fyysisiin lähtöihin. Ohjelmassa on esimerkkinä ajotavalle ”sarjassa” ohjaus, jossa asetetaan maksimi- ja minimiarvoja venttiileille, kun sarjassa ajovalinnan muistibitti on aktiivinen (kuva 40). Jokaiselle ajotavalle, jossa ohjataan säätöventtiileitä, on tehty samanlainen ohjaus. Ajotapapainikkeilla saadaan myös asetettua on/off-venttiilit oikeisiin asentoihin ja saadaan käyttäjälle tieto, mikä ajotapa on valittuna.



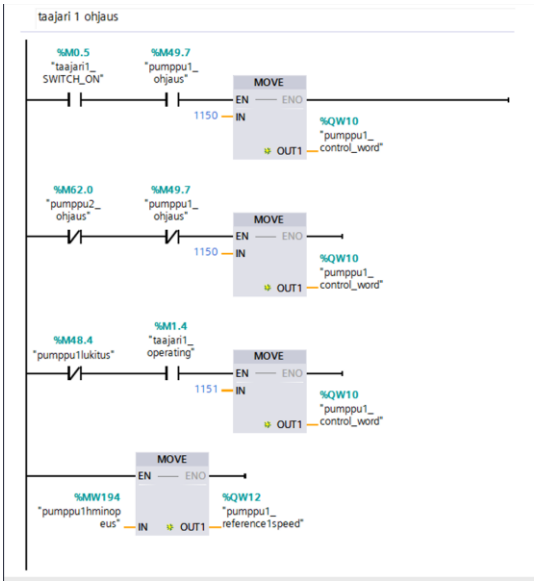
Kuva 40. Säätöventtiilien ohjaus

Kuvassa 41 nähdään säätöventtiilien asentojen skaalaukset. Ohjelma muuntaa säätöventtiileiltä tulevat integer-arvot 0–27 648 reaaliarvoiksi 0,0–100,0 ja tallentaa ne muistibitteihin. Nämä reaaliarvot edustavat venttiilien asentoja prosentteina. Ohjelma käyttää NORM_X-lohkoa tiedon muuntamiseen ja SCALE_X-lohkoa tiedon skaalaukseen.



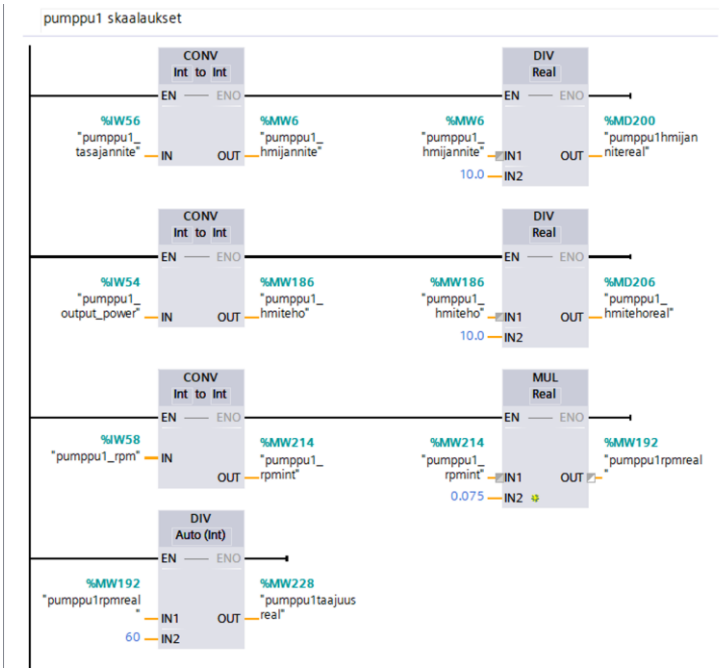
Kuva 41. Säätöventtiilien asentojen skaalaukset

MOVE-lohkoja käytetään myös siirtämään ohjaussanoja ja nopeusarvoja taajuusmuuttajalle. Ohjelma mahdollistaa taajuusmuuttajan käynnistämisen käyttöliittymästä asettamalla muistibitin päälle. Ohjelmassa on lukitus- ja esto-ominaisuuksia, jotka estävät taajuusmuuttajan käynnistymisen, jos lukitus on aktiivinen. Normaalissa tilanteessa lukitusmuistibitit ovat aktiivisia ja taajuusmuuttajaa voidaan ohjata siirtämällä arvo 1 151 ohjaussanaan, mikä mahdollistaa taajuusmuuttajan käynnistämisen. Ohjelma asettaa taajuusmuuttajan nopeuden siirtämällä HMI:stä tulevan nopeusarvon lähtösanaan (kuva 42).



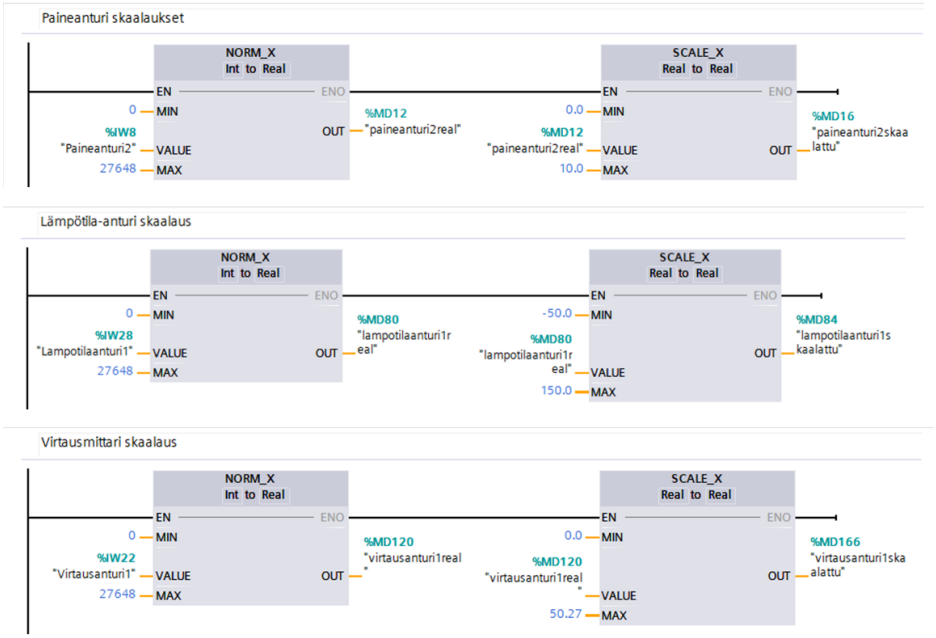
Kuva 42. Ensimmäisen taajuusmuuttajan ohjaus

Taajuusmuuttajilta tulevat tulosignaalit skaalattiin pumppujen piiri-ikkunoihin. Esimerkkinä on ykköspumpun skaalaukset (kuva 43). CONV-lohkot muuntavat pumpun tasajännitteen, lähtötehon ja kierrosluvun integer-arvot muistisanoihin. Vaikka lohko näyttää muuntavan integer luvun integeriin, Todellisuudessa tulosignaali on Word-muodossa. Word ja Int ovat rakenteeltaan samanpituisia (16-bittisiä), mutta ne eroavat siinä, miten ne käsittelevät arvoja. Integer on etumerkillinen arvoalueella -32 768 – +32 767, kun taas WORD on etumerkitön arvoalueella 0–65 535 (Siemens 2024b). CONV-lohkon jälkeen kaksi DIV (Real) -lohkoa jakaa jännite- ja tehoarvot vakiolla 10,0. Näin saadaan oikea arvo desimaaleina näkymään käyttöliittymässä. Kierrosluvun osalta MUL (Real) -lohko kertoo kierrosluvun vakiolla 0,075 ja muuntaa kierrosluvun reaaliarvoksi. Vakioarvo 0,075 saadaan laskemalla maksimikierrosnopeus 2 956 kerrottuna taajuusmuuttajan kertoimella 0,8314, jolloin tulokseksi saadaan laskettu kierrosnopeus 2 457,6184. Laskettu arvo jaetaan Integer-tietotyypin maksimiarvolla 32 767, jolloin lopulliseksi vakioarvoksi saadaan 0,075. Vakioarvo kerrotaan tulosignaalilla, jolloin saadaan käyttöliittymään pumpun oikea pyörimisnopeus. Viimeinen DIV-lohko jakaa muunnetun kierrosluvun 60:llä. Tämä laskee ykköspumpun pyörimisnopeuden taajuuden hertseinä.



Kuva 43. Pumpun tietojen skaalaukset

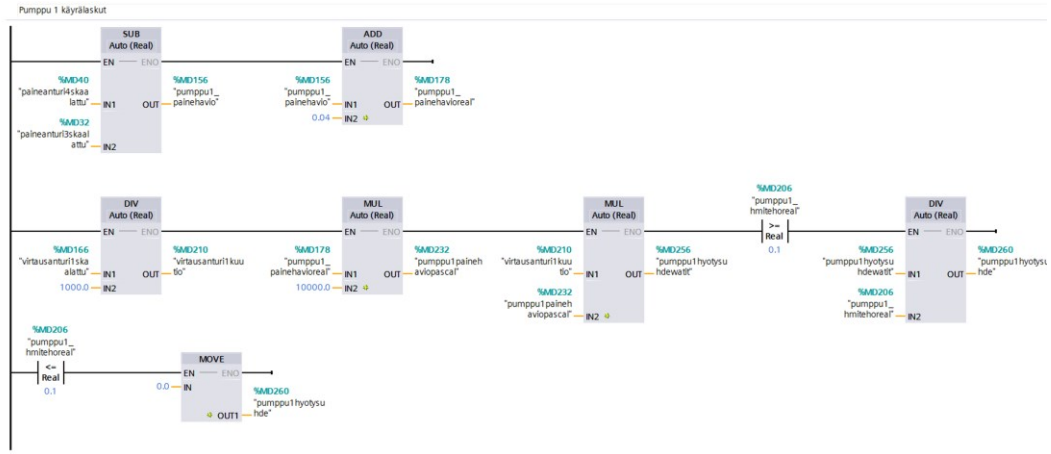
Antureiden skaalauksia nähdään kuvassa 44. NORM_X-lohko muuntaa paineantureilta tulevan 4–20 milliampeerin suuruisen signaalin, joka skaalataan PLC:ssä reaaliarvoksi välillä 0–27 648. SCALE_X-lohko skaalaa NORM_X-lohkon tuottaman reaaliarvon halutulle 0,0–10,0 baarin mittausalueelle. Lämpötila- ja virtausanturit skaalataan samalla tavalla, mutta haluttu mittausalue on lämpötilalle -50–150 °C ja virtaukselle 0–50,27 litraa sekunnissa.



Kuva 44. Antureiden skaalaukset

Kuvassa 45 lasketaan ykköspumpun käyrätietoja. Ohjelma käyttää matemaattisia lohkoja (SUB, ADD, DIV, MUL) laskemaan painehäviön, virtausnopeuden, hyötysuhteen ja muita parametreja, jotka liittyvät ykköspumpun toimintaan. Ohjelma ottaa syötteitä paineanturilta ja virtausanturilta ja tuottaa tuloksia, jotka voidaan näyttää HMI:ssä tai käyttää muissa ohjelman osissa.

Esimerkissä painehäviö on laskettu paineanturien PT-4 ja PT-3 erotuksena, jonka jälkeen siihen on lisätty staattinen nostokorkeus, jolloin saadaan kokonaispainehäviö ykköspumpulle. Virtaus on yksikössä litraa sekunnissa (l/s), joten se täytyy ensin muuntaa yksikköön kuutiota sekunnissa (m^3/s). Paine on yksikössä bar, joten se muunnetaan kilopascaleiksi. Nämä arvot kerrotaan yhteen, jolloin saadaan pumpun teho watteina. Lopuksi pumpun teho jaetaan taajuusmuuttajan lähtöteholla (kW, kilowatti), jolloin saadaan pumpun hyötysuhde. Viimeisessä kohdassa hyötysuhteeksi asetetaan 0 jos pumppu on pois päältä, jolloin saadaan estettyä virheet käyttöliittymässä, sillä muuten teho jakautuisi nollalla.



Kuva 45. Pumpun käyrän laskenta

Osa käyttöliittymän ohjelmoinnista on ohjelmoitu ST-ohjelmointikielillä (kuva 46). Esimerkkinä JavaScript-funktio, jota käytetään on/off-venttiilin ohjauksessa.

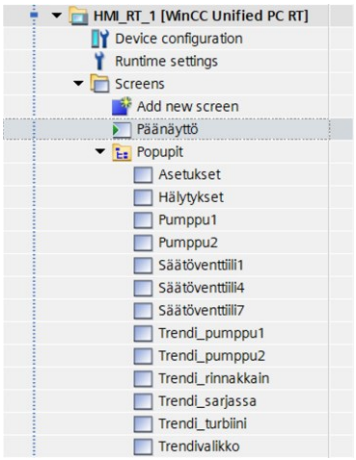
```
export function Button_2_Text_Trigger(item) {
    var value;
let tag2 = Tags("Venttiili2hmi").Read();

if (tag2) {Screen.Items("Button_2").Text = 'AUKI';}
else {Screen.Items("Button_2").Text = 'KIINNI';}
    return value;
}
```

Kuva 46. Koodi

Funktio päivittää käyttöliittymässä venttiilin ohjauspainikkeen tekstin näyttämään sen mukaan, mikä arvo ohjaustagilla on.

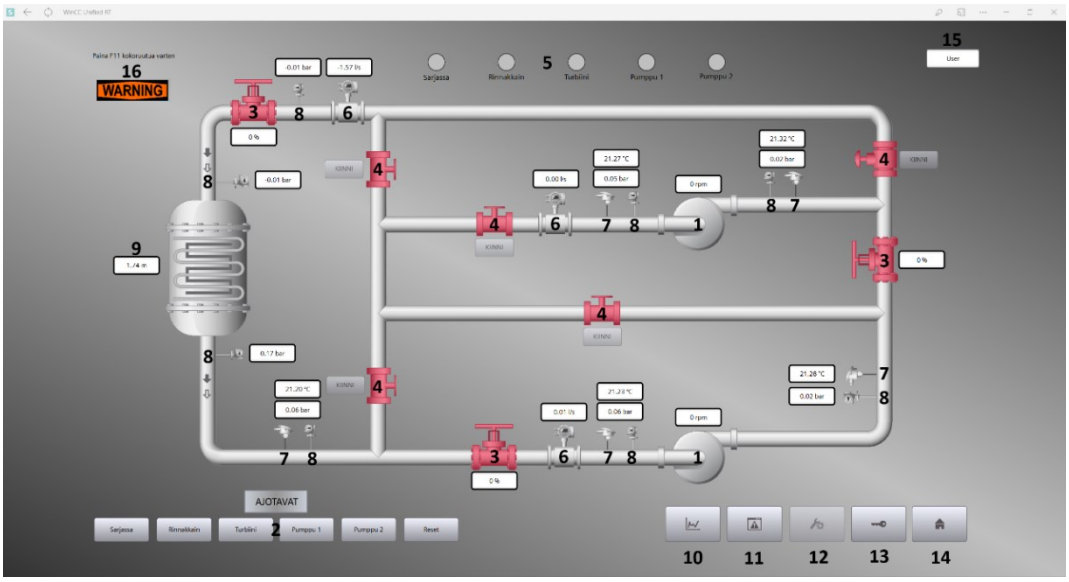
8 GRAAFINEN KÄYTTÖLIITTYMÄ JA VALVOMONÄKYMÄ

Suunnittelimme käyttöliittymän tilaajan vaatimusten mukaiseksi ja käyttäjäystävälliseksi. Hyvin suunniteltu käyttöliittymä on merkittävä osa automaatiojärjestelmää, koska sen avulla käyttäjät voivat helposti hallita ja valvoa prosessin toimintaa (White 2023, 226). Teimme käyttöliittymään pääsivun, joka on aina näkyvillä käyttäjälle ja jonka kautta voidaan tarkastella prosessin tilannetta. Tästä käyttäjä voi myös avata kaikki eri ponnahdusikkunat, joihin kuuluu esimerkiksi trendit ja piiri-ikkunat.



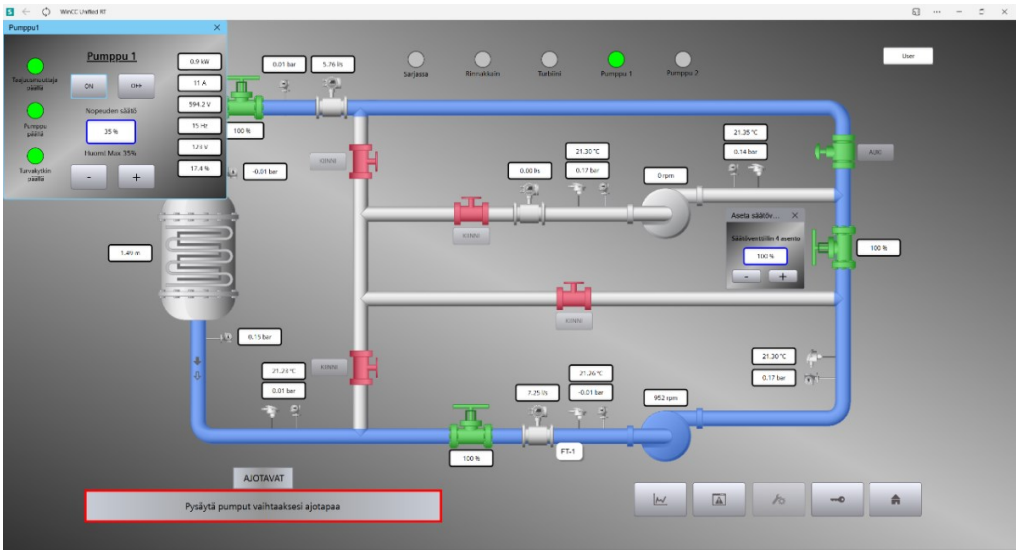
Kuva 47. Ikkunat

Kuvasta 47 nähdään kaikki mahdolliset ikkunavaihtoehdot.



Kuva 48. Käyttöliittymän päänäyttö

Selkeyden vuoksi lisäsimme esittelyä varten numerot päänäyttöön (kuva 48). Päänäytöstä nähdään prosessi kaksiulotteisena. Päänäyttö sisältää navigointi-painikkeet (10–14), joista saadaan auki erilaisia trendejä, asetuksia, hälytyksiä ja mahdollisuus kirjautua eri käyttäjillä. Käytössä oleva käyttäjä nähdään oike-asta ylänurkasta (15). Pumppuja (1) painamalla saadaan auki piiri-ikkunat, joista pumppuja ohjataan sekä nähdään näihin liittyvät tilatiedot. Jokaisen an-turin (virtausmittarit 6, lämpötila-anturit 7 ja paineanturit 8) dataa voidaan tark-kailla päänäytöltä. Säiliön pinnankorkeus nähdään metreinä säiliön vieressä (9). Säätöventtiilit ja venttiilit (3 ja 4) vaihtavat väriä auki-kiinni tiedon mukai-sesti. Ajotapaa voidaan vaihtaa painikkeilla (2) ja ylhäällä olevista valoista (5) nähdään vihreänä valittu ajotapa. Hätäseis ilmoitus tulee tekstinä ”Warning” (16). Valvomonäkymään lisättiin muun muassa toimilaitteisiin ja painikkeisiin työkaluvihjeet (tooltipit), joiden avulla käyttäjä näkee toimilaitteen nimen ja si-jainnin viedessään hiiren sen päälle. Lisäksi käyttäjä saa tarkempaa tietoa esi-merkiksi painikkeiden toiminnasta.



Kuva 49. Käyttöliittymä ajon aikana

Ajotavan ”pumppu1” toiminnan aikainen esimerkkitilanne sekä pumpun ja säätöventtiilin piiri-ikkuna on esitetty kuvassa 49. Päänäytössä putkisto on animoitu vaihtumaan ajotavan mukaan.

Kuva 50. Ohjauspöytä

Järjestelmää ohjataan pääasiassa paikalliselta tietokoneelta (kuva 50). Vesiprosessia voidaan kuitenkin ohjata myös kuvassa oikealla näkyvältä älynäytöltä. Älynäyttö soveltuu erinomaisesti opetustilanteisiin, sillä prosessin seuraaminen isolta näytöltä on helppoa ja havainnollistavaa.

9 TURVALLISUUS

Vesiprosessiin ei ole laadittu virallista, standardien mukaista riskianalyysiä. Turvallisuusnäkökohdista on kuitenkin käyty yhteisiä keskusteluja toimeksiantajan kanssa ja arvioinnin perusteella prosessi voidaan toteuttaa alhaisella turvallisuustasolla. Kaikki projektiin tilatut laitteet ja komponentit on hyväksytetty toimeksiantajalla, eikä järjestelmä sisällä toimintoja, jotka aiheuttaisivat suoraa vaaraa käyttäjille tai ympäristölle. Turvallisuutta on kuitenkin suunniteltu enemmän kuin laitteessa vaaditaan ja järjestelmä toimii turvallisesti suunnitellussa käyttötarkoituksessaan.

Käsiteltävä vesiprosessi on suljettu ja vesi kiertää ainoastaan järjestelmässä. Prosessissa ei ole altistumista korkeille lämpötiloille, paineille tai vaarallisille kemikaaleille. Järjestelmässä ei ole mekaanista liikettä, joka aiheuttaisi fyysistä vaaraa käyttäjille. Putkisto ja rakenne on suunniteltu kestämään prosessissa muodostuvat mahdolliset paineiskut. Turvallisuusstandardien IEC 62061 ja ISO 13849-1 mukaan matala turvallisuustaso (SIL 0 tai PL a) ei edellytä erillisiä turvalaitteita järjestelmään. Turvalaitteet ovat kalliita ja niitä ei erikseen kannata ostaa, ellei vaadita korkeampaa turvallisuusluokitusta.

Projektissa käytetty turvalogiikka F-CPU sisältyi alun perin oppilaitospakettiin. Logiikassa kirjain ”F” tulee sanasta Fail-safe, eli logiikan kykyä toteuttaa teollisuuden turvatoimintoja standardien mukaisesti. Turvalogiikan käyttö edellyttää erillistä ohjelmointia Siemensin TIA Portal -ohjelmointiympäristössä. Ohjelmointi on jaoteltu kahteen erilliseen osaan: tavalliseen ohjelmaan ja turvaohjelmaan. Turvaohjelma toimii erillisellä suojatulla alueella ja on suojattu salasanalla asiattoman käytön estämiseksi. Turvatoiminnot toteutetaan käyttämällä sertifioituja ohjelmalohkoja, jotka ovat saatavilla TIA Portalissa. Kyseiset lohkot on suunniteltu niin, että ne täyttävät turvallisuusstandardien vaatimukset ja ne voidaan integroida suoraan automaatio-ohjelmaan. Logiikan turvallisuustoimintoja voidaan käyttää vasta, kun ohjelmoija on määritellyt turvasalasanan ja aktivoinut turva-alueen. (Siemens 2023, 4–18.)

Turvalogiikan käyttö yksinään ei riitä järjestelmän turvallisuusluokituksen nostamiseen. Järjestelmäkohtaisesti tarvitaan lisäksi esimerkiksi turvatulo- ja lähtökortteja sekä turvaohjelman systemaattista validointia. Turvalogiikka ei ole nykyisessä kokoonpanossa pakollinen, mutta sen olemassaolo mahdollistaa joustavammat ja kustannustehokkaammat laajennusratkaisut tulevaisuudessa, mikäli prosessilta tullaan edellyttämään korkeampaa turvallisuustasoa. Tulevaisuudessa järjestelmää on tarkoitus laajentaa esimerkiksi veden lämmityksellä tai muilla toiminnoilla, jotka voivat tuoda mukanaan uusia turvallisuusvaatimuksia.

Olemme kuitenkin suunnitelleet valmiiksi vaihtoehtoja korkeampaan turvallisuustasoon. Pienillä muutoksilla järjestelmän turvallisuustasoa voidaan tarvittaessa nostaa. Turvallisuusratkaisuja on kehitetty kolmen päävaihtoehdon mukaisesti, mikäli järjestelmältä vaaditaan myöhemmin korkeampaa SIL- tai PL-tasoa.

Vaihtoehto 1: Turvalogiikan hyödyntäminen

- Käytössä oleva F-CPU mahdollistaa turvatoimintojen ohjelmoinnin. Järjestelmään tulisi lisätä F-DI- ja mahdollisesti F-DO-turvamoduulit. Taajuusmuuttajan kenttäväyläsovitin tulisi vaihtaa FSPS-21-malliin, jotta voidaan käyttää PROFIsafe-protokollaa. PROFIsafe on turvasignaalien siirtämiseen tarkoitettu laajennus PROFINET- tai PROFIBUS-väylälle, jonka avulla turvatoiminnot voidaan siirtää normaalin väylän kautta ilman erillisiä turvakaapeleita (Siemens 2023, 42).

Vaihtoehto 2: Turvakortit ja turvamoduuli taajuusmuuttajalle

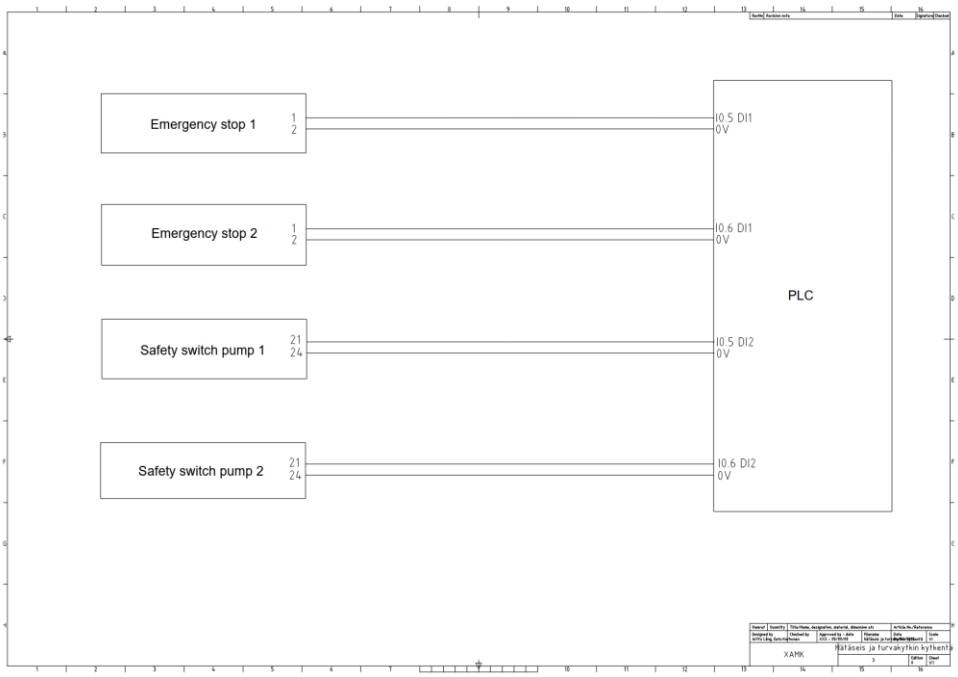
- Käytetään F-DI- ja F-DO-kortteja sekä nykyistä taajuusmuuttajan FPNO-21-väyläsovitinta. Taajuusmuuttajaan lisätään FSO-21-turvamoduuli, jolloin hätäseispainikkeet voidaan kytkeä suoraan taajuusmuuttajaan ilman logiikkaa välikerroksena.

Vaihtoehto 3: Turvarele- ja kontaktoriratkaisu

- Hätäseispainikkeet voidaan kytkeä turvareleen kautta. Turvarele katkaisee moottoreiden syötön, kun hätäseis aktivoidaan. Logiikka antaa järjestelmälle kuittauksen, tai kuittaus voidaan tehdä erillisellä painikkeella. Tämä on yksinkertainen tapa toteuttaa turvapysäytys ja se on helposti toteutettavissa nykyisessä järjestelmässä.

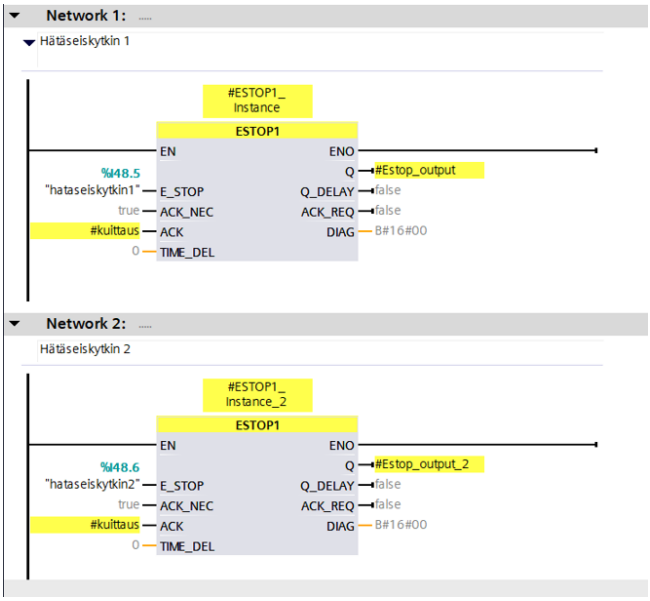
9.1 Turvaohjelmointi

Hätäseis-painikkeet ja turvakytkimet on sijoitettu konedirektiivin mukaisesti eri paikkoihin prosessia, toinen ohjauspöydän luokse ja toinen pumppujen luokse. Hätäseis-painikkeet lähettävät tilatietonsa suoraan logiikalle (kuva 51) ja ohjaavat logiikan kautta taajuusmuuttajia varmistaen, että pumput pysähtyvät hätätilanteessa. Turvakytkimet eivät ohjaa logiikan kautta moottoreita, vaan ne katkaisevat syötön moottoreilta itse ja logiikalle menee vain tilatieto turvakytkimen asennosta (kuva 51). Taajuusmuuttajilla oli valmiina oma hätäseisominaisuus, mikä helpotti ohjelmointia. Mikäli syöttö katkeaa tai ohjausyhteys taajuusmuuttajiin menetetään, niin taajuusmuuttajat siirtyvät automaattisesti hätäseis-tilaan.



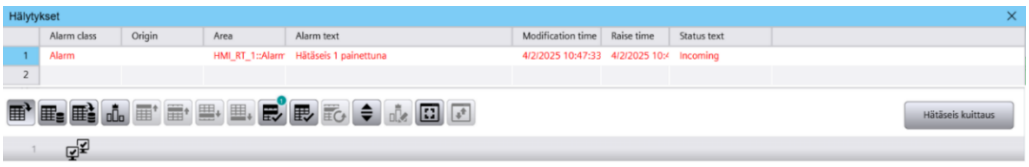
Kuva 51. Hätäseis ja turvakytkin kytkentäkuva

Kuvassa 52 esitetään hätäseis-painikkeiden ohjaukseen käytetyt, TIA Portal -ympäristöstä saatavat valmiit ohjelmalohkot. Hätäseis-painikkeet ovat normaalisti avautuvia koskettimia (NC), mikä tarkoittaa, että ne katkaisevat signaalin esimerkiksi johdon katketessa tai painiketta painettaessa. Tämä varmistaa, että hätäseistoiminto aktivoituu myös vikatilanteessa. Ohjelmalohkot tuottavat ulostulon, joka ohjaa taajuusmuuttajien sisäistä hätäseisominaisuutta. Hätäseispainikkeita painaessa, hätäseiskäsky on kuitattava valvomonäkymän hälytysikkunasta (kuva 53), joka mahdollistaa hätäseis-toiminnon palauttamisen turvallisesti.



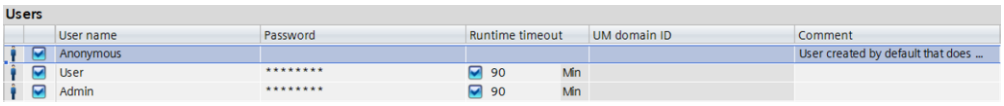
Kuva 52. Hätäseiskytkimien ohjelmointi

Käyttöliittymään on toteutettu erilaisia turvatoimintoja ja lisätty käyttäjäystävällisiä ominaisuuksia, jotka tukevat laitteen turvallista käyttöä ja helpottavat vianselvitystä. Esimerkiksi hätäseis-painikkeen painallus laukaisee näytölle näkyvän ”Warning”-ilmoituksen, jonka ansiosta käyttäjä saa välittömästi tiedon tilanteesta (kuva 48). Käyttäjä saa kaikista mahdollisista vioista ja hälytyksistä ilmoituksen hälytysnäkymään (kuva 53).



Kuva 53. Hälytysikkuna

Käyttöliittymässä on käytössä kirjautumistasot (admin ja user), jotka määrittävät käyttäjän oikeudet eri toimintoihin (kuva 54). User-taso on tarkoitettu opiskelijoille ja se rajoittaa pääsyä kriittisiin toimintoihin. Esimerkiksi yksittäisten on/off-venttiilien ohjaus ja prosessin asetusten muuttaminen on estetty. Näin estetään vahingossa tapahtuvat ohjaukset ja turvataan prosessin hallinta. Admin-taso on puolestaan varattu opettajille, joilla on oikeudet ohjata on/off-venttiileitä ja suorittaa laajempia säätöjä. Tärkeimmät asetukset ja turvallisuuteen liittyvät toiminnot ovat kuitenkin edelleen lukittuna, varmistaen järjestelmän turvallisen ja hallitun käytön opetustilanteissa.

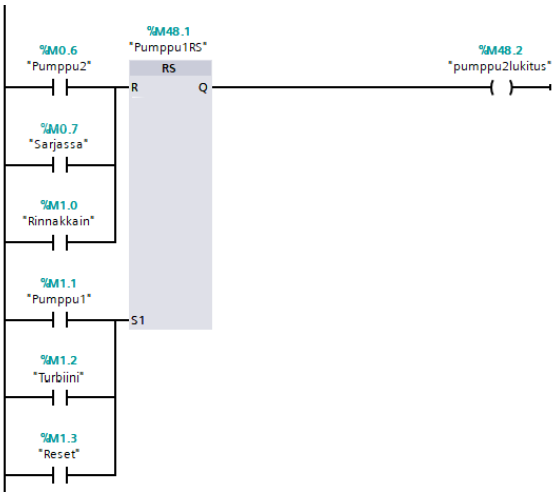


Kuva 54. Käyttäjät

Käyttöliittymässä on myös graafisia lukituksia ohjelmallisten lukitusten lisäksi, jotka estävät muun muassa väärän pumpun ajamisen, pumpun ajamisen kuivana tai ajotavan vaihtamisen kesken toiminnan (kuva 55). Järjestelmässä on väliaikaisesti määritetty pumpun maksimipyörintänopeudeksi 35 prosenttia (1 050 rpm), mikä estää järjestelmän taajuusvärähtelyn ennen tulevaisuudessa tehtävää kannakointia, jolla saadaan vahvistettua putkistoa ja rakennetta. Tämän jälkeen prosessiin voidaan suorittaa lisää testejä ja nostaa rajoitusta tai poistaa se kokonaan.

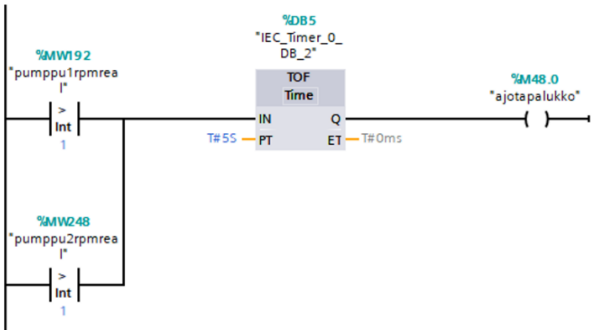
Kuva 55. Graafiset ajotapalukitukset

Kuvassa 56 on esitetty esimerkki pumpun ajonestolukituksesta. Toiminnassa käytetään RS-kiikkua, joka aktivoituu, kun järjestelmä sammutetaan tai valitaan ajotapa, jossa kyseistä pumppua ei saa käyttää.



Kuva 56. Pumpun ajonestolukitus

Tässä tapauksessa toista pumppua ei sallita ajotavoissa ”pumppu1” tai ”turbiini”. Kiikku resetoituu, kun ajotavaksi valitaan jokin sallituista vaihtoehdoista.

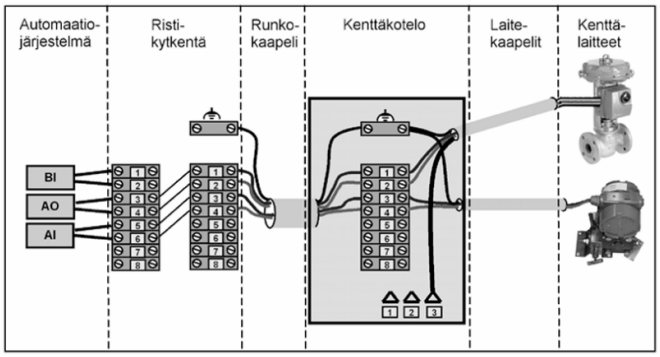


Kuva 57. Ajotapalukitus ohjelma

Ajotapalukko aktivoi sekä graafisen että ohjelmallisen lukituksen estääkseen ajotavan vaihtamisen kesken käynnissä olevan ajon. Lukitus aktivoituu, kun jommankumman pumpun kierrosluku ylittää arvon yksi. Pumpun pysähtyessä, ajastin viivästää lukituksen vapautumista viidellä sekunnilla. Tällä tavalla varmistetaan, että virtaus loppuu putkistosta ja estetään tahottomat paineiskut (kuva 57).

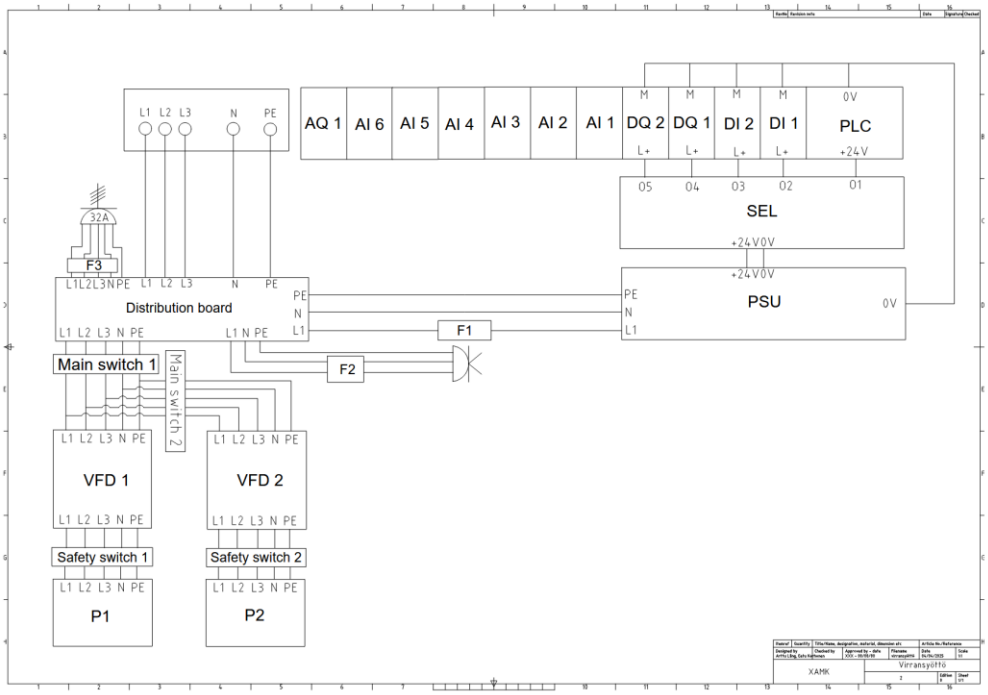
10 FYYSISEN JÄRJESTELMÄN TOTEUTUS

Vesiprosessin mekaanisten kasaustöiden valmistuttua ja tarvittavien komponenttien saavuttua, pääsimme aloittamaan automaatiojärjestelmän asennuksen. Kuvasta 58 nähdään yksinkertaistetusti logiikan ja kenttälaitteiden välinen kaapelointi ja kytkennät.



Kuva 58. Automaatiojärjestelmän kaapelointi ja kytkentä (Kippo ym. 2022, 104)

Logiikalta lähtee tarvittaessa ristikytkennän kautta kaapeli, joka menee joko suoraan toimilaitteelle tai kytkentäkotelon kautta. Jokaiselle toimilaitteelle annettiin oma positiotunnus tunnistamisen helpottamiseksi. Positiotunnus on yhdistelmä standardoituja numeroita ja kirjaimia, joiden perusteella saadaan luotua toimilaitteille yksilölliset nimet (Kippo ym. 2022, 91).

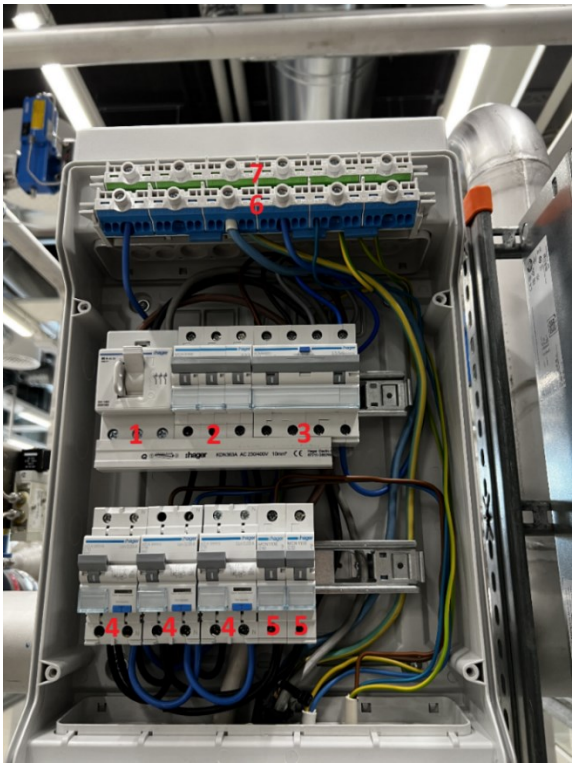


Kuva 59. Virransyöttö

Kytkentäkuvat on tehty Autodesk AutoCAD 2024 -ohjelmistolla. Virransyöttökuvasta (kuva 59) nähdään, miten sähkönjakelu on toteutettu eri laitteille. Sähköpääkeskukselta tulee sähkönsyöttö ryhmäkeskukselle, josta jaetaan sähköt eteenpäin. Moottorit on kytketty 400 voltin kolmiokytkentään valmistajan arvokilven mukaisesti. Voimavirta ohjataan pääkytkimen kautta molemmille taajuusmuuttajille ja edelleen pumpuille, mikä varmistaa turvallisen ja luotettavan sähkönsyötön. Kaikilla laitteilla on omat sulakkeet tai vikavirtasuojat. Selektiivisyysmoduuli toimii sulakkeena PLC:lle ja sen moduuleille.

10.1 Ryhmäkeskus

Ryhmäkeskus toimii vesiprosessin pääkeskuksena. Ryhmäkeskukselle tulee sähköpääkeskukselta kolmivaihesyöttö, jota ohjataan pääkytkimellä ja johdonsuojakatkaisijoilla. Näiltä saadaan jaettua sähkönsyötöt tarvittaville sulakkeille ja vikavirtasuojille. Nollakiskolta ja suojamaakiskolta saadaan helposti kaapeloitua johdot. Taajuusmuuttajille tulee omat syöttökaapelit sähköpääkeskukselta, joita ohjataan taajuusmuuttajien kytkentäkoteloista pääkytkimien avulla.



Kuva 60. Ryhmäkeskus ilman kantta

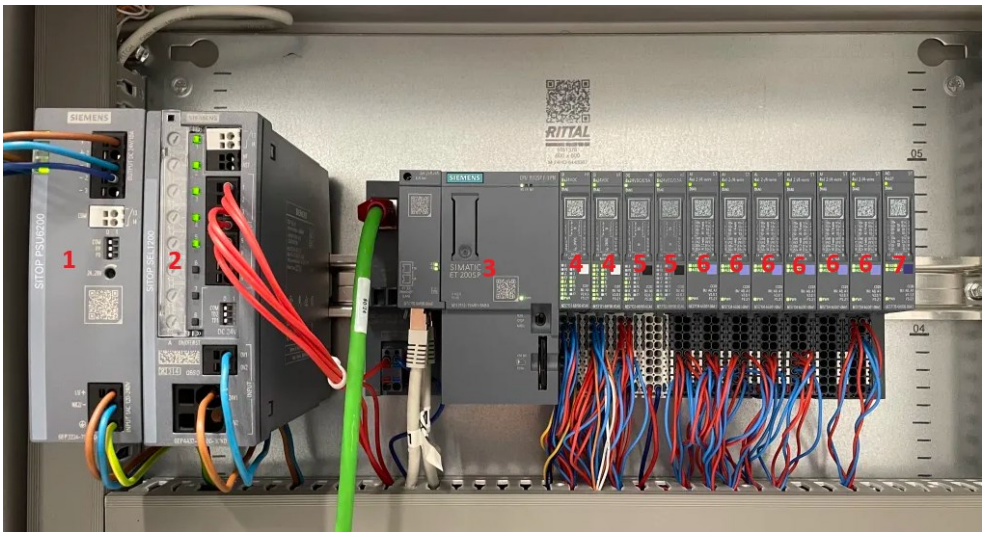
Kuvaan 60 on numeroitu ryhmäkeskuksen eri osat:

- 1 – pääkytkin
- 2 – 16A johdonsuojakatkaisija (varalla)
- 3 – 32A vikavirtasuoja 3-vaihepistorasialle
- 4 – 16A vikavirtasuoja pistorasialle (toinen varalla)
- 5 – 10A sulake logiikkakeskuksen virransyötölle (toinen varalla)
- 6 – nollakisko
- 7 – suojamaakisko

Sulakkeita on jätetty varalle mahdollisia laajennuksia varten. Ryhmäkeskukseen kuuluu myös suojakansi, johon on kirjoitettu, mitä mikäkin sulake ohjaa.

10.2 Logiikkakeskus

Logiikan ja toimilaitteiden välinen kommunikointi sekä tiedonsiirto toteutettiin hyödyntämällä kenttäväyliä ja viestintäprotokollia. Näillä mahdollistetaan tehokas ja luotettava kommunikaatio automaatiojärjestelmän eri osien välillä. Huomiota kiinnitettiin oikeanlaiseen, standardien mukaiseen kaapelointiin, häiriösuojaukseen ja maadoitukseen. Kaikki kytkennät testattiin, jotta saimme varmistuksen siitä, että järjestelmä toimii suunnitellulla tavalla.



Kuva 61. PLC

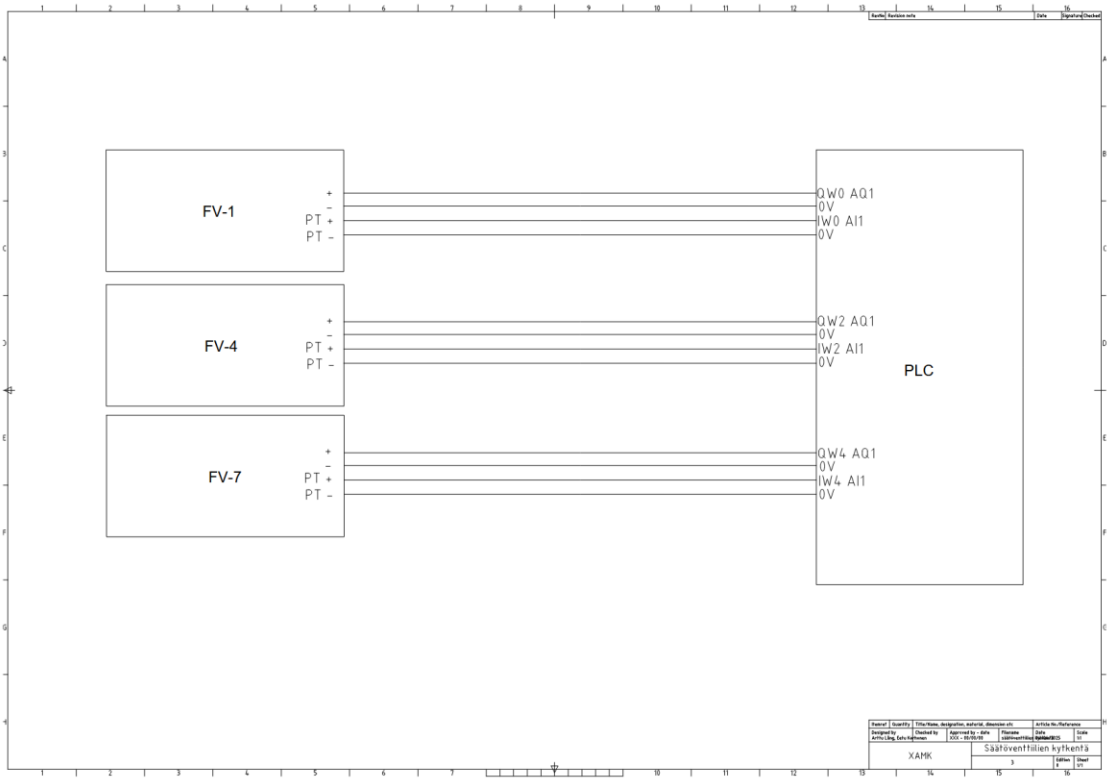
Kuvasta 61 nähdään logiikan eri osat ja moduulit. Vasemmalta oikealle järjestyksessä numeroitu:

- virtalähde (PSU) (1)
- selektiivisyysmoduuli (SEL) (2)
- ohjelmoitava logiikka (PLC) (3)
- kaksi kappaletta digitaalisia sisääntulomoduuleja (DI) (4)
- kaksi kappaletta digitaalisia ulostulomoduuleja (DQ) (5)
- kuusi kappaletta analogisia sisääntulomoduuleja (AI) (6)
- yksi analoginen ulostulomoduuli (AQ) (7)

Logiikkakaapille johdetaan ryhmäkeskukselta 230 voltin syöttö, joka on jaettu riviliittimien kautta PLC:n virtalähteelle ja virtausmittareille. Kaappi ja kaapin ovi on maadoitettu standardin SFS 6000-4-41:2022 mukaisesti.

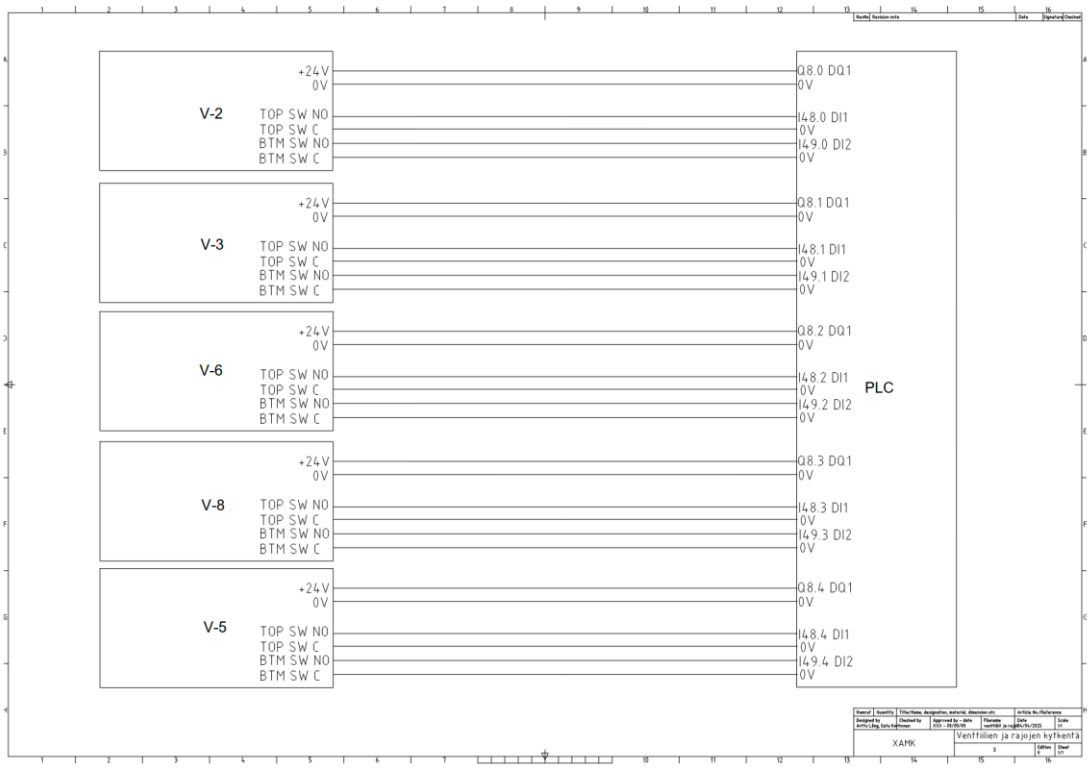
10.3 Kenttälaitteiden kytkentä

Kenttälaitteille vedettiin kaapelit logiikkakeskukselta ja kytkettiin kuvien mukaisesti. Kaikille kenttälaitteille tieto siirtyy instrumentointikaapelia pitkin, lukuun ottamatta taajuusmuuttajia, joiden tiedonsiirto tapahtuu Ethernet-kaapelilla. Kaapelina käytettiin JAMAK-HF D 2 x (2+1) x 0.5-kaapelia.



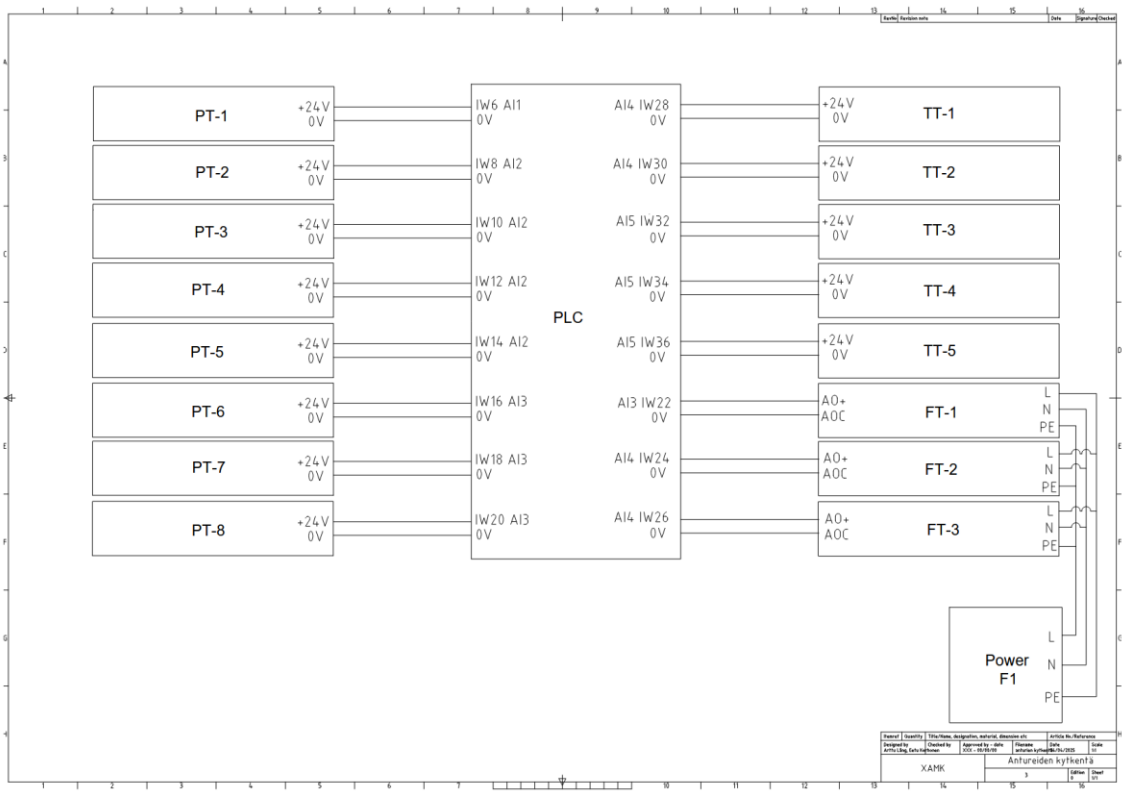
Kuva 62. Säätöventtiilien kytkentä

Säätöventtiilien kytkentä nähdään kuvasta 62. Säätöventtiilit (FV) vaativat 24 voltin 4-20 milliampeeriohjauksen asennoittimen + ja – liittimiin ja ne kytkettiin logiikan analogiseen ulostulomoduulin (AQ) ohjelmoituihin paikkoihin. Asentotunnistin (PT) kytkettiin asennoittimen PT + ja PT – liitäntöihin ja logiikan analogiseen sisääntulomoduuliin (AI).



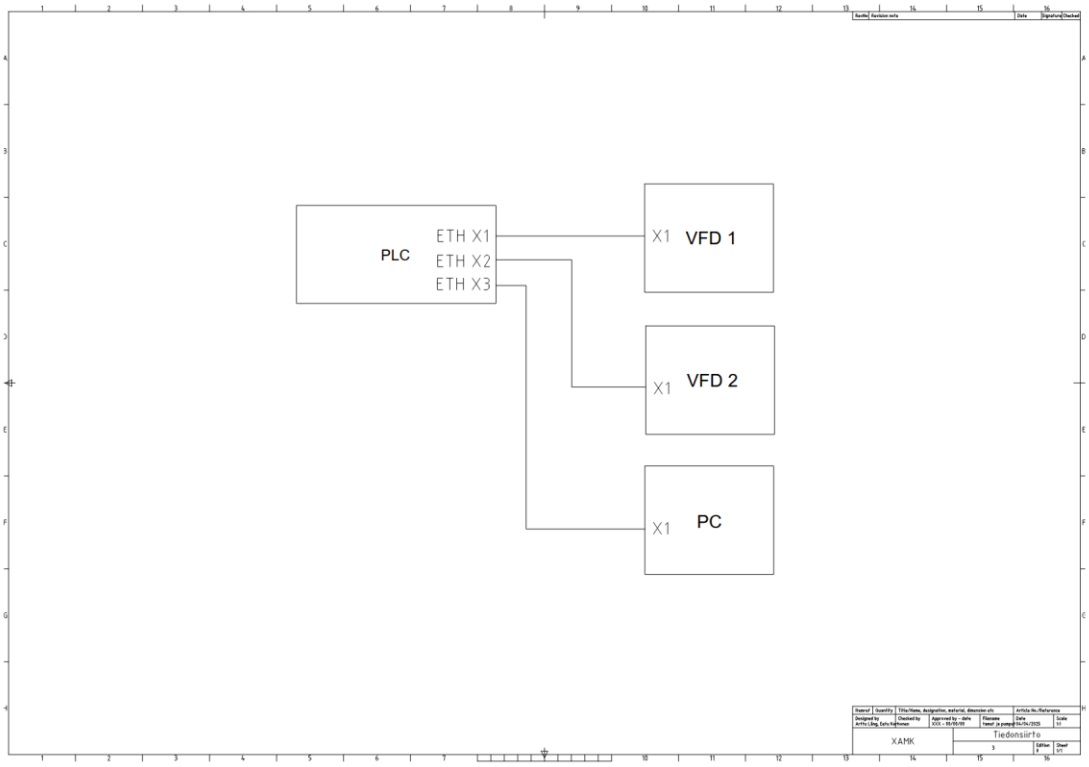
Kuva 63. Venttiilien ja rajojen kytkentä

Kuvasta 63 nähdään on/off-venttiilien ja niiden rajojen kytkentä. On/off-venttiilit (V) kytkettiin logiikan digitaalisiin ulostulo- ja sisääntulomoduuleihin (DQ ja DI). Rajatiedot tulevat digitaaliseen sisääntuloon ja ohjaustieto lähtee digitaalisesta ulostulosta. Ohjaus on kytketty magneettiventtiileihin ja rajatiedot ovat kytketty Stonel Quartzin rajan TOP SW ja BTM SW –liitäntöihin. TOP SW on aukiraja ja BTM SW on kiinniraja.



Kuva 64. Antureiden kytkennät

Kuvassa 64 on antureiden kytkennät. Anturit ovat kytketty analogisiin sisääntuloihin (AI) käyttäen 2-johdin kytkentää. Kaikki anturit toimivat 24 voltin 4–20 milliampeeriviestillä, poikkeuksena virtausmittarit vaativat lisäksi 230 voltin syötön toimiakseen. PT on painelähetin, TT on lämpötilalähetin, FT on virtausmittari.



Kuva 65. Tiedonsiirto

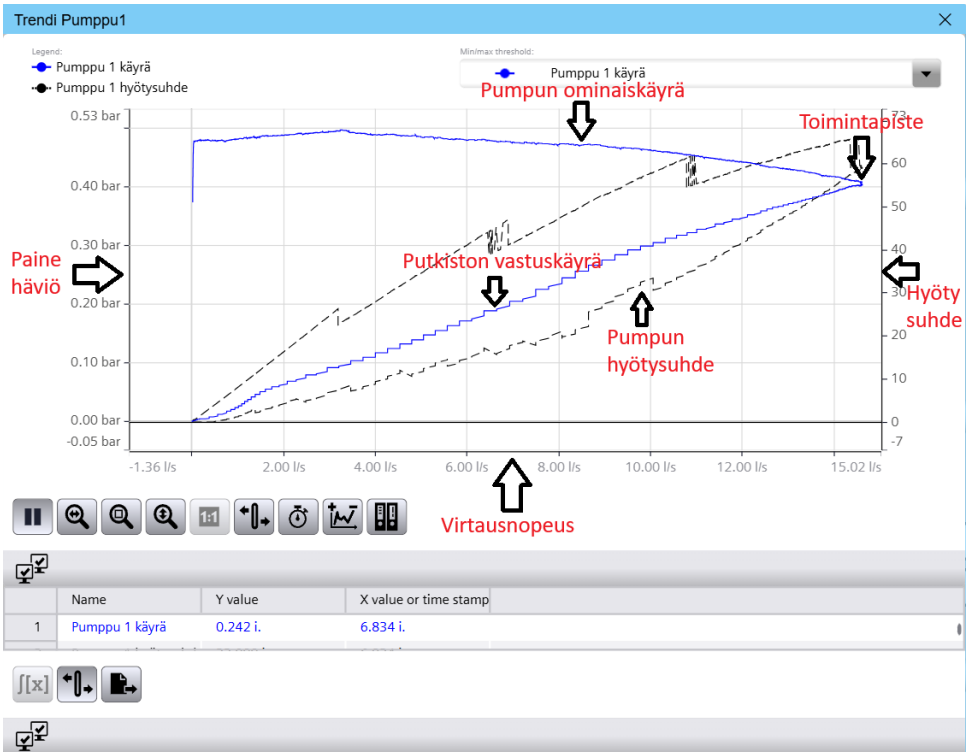
Kuvasta 65 nähdään, miten tiedonsiirto on toteutettu taajuusmuuttajien ja tietokoneen välillä. Logiikassa on kolme liitäntää, josta lähtevät omat kaapelit molemmille taajuusmuuttajille (VFD) ja yksi ohjaustietokoneelle (PC).

11 JÄRJESTELMÄN TESTAUS

Järjestelmän testaus aloitettiin tarkistamalla, että kaikki kenttälaitteet lähettävät oikeita arvoja oikeilta laitteilta ja että ohjaus toimii suunnitellusti. Tarkistimme esimerkiksi, että venttiilit reagoivat oikein ohjaukseen ja asettuvat oikeaan asentoon. Järjestelmän reagointiaika todettiin riittävän nopeaksi, eikä merkittäviä viiveitä havaittu. Lisäksi varmistimme, että käyttöliittymä näyttää oikeat tilatiedot. Seuraavaksi suoritettiin toiminnallinen testaus, jossa testattiin prosessin eri käyttötilanteita, kuten normaali käyttö, häiriötilanteet sekä käynnistys- ja pysäytysprosessit. Näiden avulla varmistettiin, että järjestelmä käyttäytyy odotetusti eri olosuhteissa ja tilanteissa. Testeissä havaitsimme, että virtausanturi 3 menee häiriötilaan prosessin pysähtyessä, sillä anturi on prosessin ylimmässä kohdassa ja vesi valuu tällöin pois virtausanturin putken sisältä. Virhe kuittaantuu itsestään, kun prosessia aletaan ajamaan ja putki täyt-

tyy taas vedellä. Hälytysjärjestelmän testauksessa varmistettiin, että hälytykset aktivoituvat oikeissa tilanteissa ja että ne näkyvät selkeästi ohjausjärjestelmässä. Samalla tarkistimme, että hälytyksiin liittyvä kuittaus- ja lokitoiminta toimii oikein ja varmistimme, että laitteisto toimii suunnitellusti hätäpysäytystilanteessa.

Analysoimme myös järjestelmän trendejä, joiden avulla testasimme putkiston vastuskäyriä ja pumppujen ominaiskäyriä eri venttiilin asennoilla ja moottorin nopeuksilla. Testien aikana havaitsimme, että anturien arvot vaihtelivat nopeassa tahdissa, mikä hankaloitti arvojen lukemista. Tämän vuoksi sisääntuloihin lisättiin smoothing-ominaisuus, joka tasoitti arvoja ja esti niiden nopean ja hallitsemattoman vaihtelun ja samalla helpotti trendien lukemista.



Kuva 66. Pumppu 1 trendi

Kuvassa 66 näkyy ykköspumpun trendi ajotavassa ”pumppu1”, josta voidaan tarkastella putkiston vastuskäyrää asetetulla venttiilin kuristuksella ja samalla saadaan pumpun ominaiskäyrä. Tällä tavoin voidaan luoda erilaisia tilanteita ja trendejä muuttamalla esimerkiksi pumpun nopeutta tai venttiilien asentoja. Katkoviivasta nähdään pumpun hyötysuhde. Käyriä voidaan poistaa näkyvistä, mikäli halutaan tarkastella vain yhtä käyrää.

Vasemmalla pystyakselilla nähdään painehäviö, joka on kahden paineanturin välinen paine-ero, johon on lisätty staattinen nostokorkeus. Tässä kyseisessä tilanteessa painehäviön arvona on käytössä ykköspumpun paineanturien PT4 ja PT3 erotus, johon lisätty staattinen nostokorkeus 0,04 bar. Oikealla pystyakselilla on kuvattu hyötysuhde prosentteina. Trendin alhaalla vaaka-akselilla nähdään virtausanturin FT1 virtausnopeus yksikössä litraa sekunnissa (l/s). Alkutilanteessa venttiili on täysin auki ja pumppua pyöritettiin koko testin ajan vakionopeudella 1 050 kierrosta minuutissa (rpm). Hyötysuhde liikkuu näiden mukana oman laskukaavan mukaan.

Sininen viiva on paineen ja virtauksen välinen suhde, josta saadaan alhaalta vinottain oikealle menevänä viivana putkiston vastuskäyrä. Tämän viivan päässä oikealla toimintapisteessä, kun aletaan kuristamaan venttiiliä pienissä määrin (1–10 %), saadaan virtausta vähennettyä ja saadaan tehtyä pumpun ominaiskäyrä viivana vasemmalle. Järjestelmän toimintapiste on putkiston vastuskäyrän ja pumpun ominaiskäyrän leikkauspiste. Käyrästä nähdään, että järjestelmä toimii odotetusti, sillä se osoittaa, että paine kasvaa lähes lineaarisesti virtausnopeuden mukana. Hyötysuhde on myös korkeimmillaan järjestelmän toimintapisteessä.

12 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOKEHITYS

Opinnäytetyön tuloksena saatiin vesiprosessiin tehokas automaatiojärjestelmä ja selkeä käyttöliittymä, jolla järjestelmää saadaan valvottua ja hallittua helposti. Kaikki suunnitellut toiminnallisuudet ja tavoitteet saavutettiin aikataulussa sekä projektin aikana ilmenevät haasteet ratkaistiin nopeasti. Järjestelmä otettiin käyttöön tilaajan hyväksymänä vaatimusten mukaisesti. Projektin onnistuneesta toteutuksesta huolimatta tunnistimme kehitysmahdollisuuksia, joilla järjestelmää voidaan edelleen parantaa ja laajentaa tulevaisuudessa.

Kehityskohteita ovat muun muassa värähtelymittauksen lisääminen rakenteisiin, säiliön lämmityksen lisääminen järjestelmään, riskianalyysin tekeminen järjestelmästä ja etäkäyttömahdollisuuden kehittäminen. Värähtelymittauksella

saataisiin lisää dataa prosessin tilasta ja taajuusvärinöistä, mikä helpottaisi rakenteen vahvistamissuunnittelua. Säiliön lämmityksellä saataisiin monipuolisempia anturilukemia ja uusia tutkimusmenetelmiä. Riskianalyysillä varmistettaisiin käytössä oleva turvallisuustaso ja saataisiin mahdollisesti nostettua järjestelmän turvallisuusluokitusta. Etäkäyttömahdollisuuden avulla opetusta voitaisiin mahdollisesti toteuttaa etänä sekä simuloida erillisen valvomotilan toimintaa.

Tällä hetkellä pumput toimivat avoimessa takaisinkytkennässä, minkä seurauksena turbiinikäytössä ei saada kierroslukumittausta kakkospumpulta. Tämä voitaisiin ratkaista lisäämällä moottorille erillinen kierroslukumittaus. Olisi myös hyödyllistä lisätä mittaus generoidulle sähkölle, koska turbiiniajotavan tarkoitus on tutkia kakkospumpun generoimaa sähköä.

Lukitusten osalta järjestelmä tukee monia eri ajotapoja, esimerkiksi ajotavoissa ”pumppu1”, ”pumppu2” ja ”turbiini” on estetty pumppujen väärinkäyttö ja kuivana ajo. Pumppujen lukitukset on huomioitu sarja- ja rinnakkaisajossa, mutta opetuskäyttöä varten järjestelmään on jätetty mahdollisuus ohittaa lukitukset tarvittaessa. Tämä mahdollistaa teollisuudessa ei haluttujen toimintojen tutkintaa, esimerkiksi eriävien pumppunopeuksien, mahdollisten kavitaatiotestien ja paineiskujen testaamisen. Jatkossa olisi hyvä pohtia tarkemmin, millaisia rajoituksia järjestelmään voitaisiin lisätä, jotta laitteistoa ei voida vahingoittaa tutkimuksissa, joissa poiketaan normaalista käyttötavasta.

LÄHTEET

3GBP181410-ADK. s.a. ABB. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://new.abb.com/products/3GBP181410-ADK/3gbp181410-adk [viitattu 8.3.2025].

ABB. 2018. ACS880-perusohjausohjelma. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.auser.fi/wp-content/uploads/ACS880-ohjelmointiopas.pdf [viitattu 5.4.2025].

ABB. 2024. FPNO-21. PROFINET fieldbus adapter module. PDF-dokumentti. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AXD50000158614&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch [viitattu 1.4.2025].

ACS880-01. s.a. ABB. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.abb.com/global/en/product/drives/low-voltage-ac-drives/industrial-drives/acs880-single-drives/acs880-01 [viitattu 8.3.2025].

BaseUnits. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Products/10147554?activeTab=ProductInformation# [viitattu 14.3.2025].

Bohl, W. 1984. Teknillinen virtausoppi: Nesteiden ja kaasujen ominaisuudet, hydrostatiikka, aerostatiikka, kokoonpuristumattomat virtaukset, kokoonpuristuvat virtaukset, virtausteknilliset mittaukset. Tampere: Sonator.

Energiatekniikan projektityö. 2022. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti.

Henning, C. 2015. A Beginner's Guide to PROFINET. PROFINET North America. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://us.profinet.com/beginners-guide-profinet/ [viitattu 12.3.2025].

IFM. 2022. TA3435. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.ifm.com/fi/fi/product/TA3435#documents [viitattu 13.3.2025].

Järvinen, P. & Järvinen, A. 2000. Tutkimustyön metodeista. Tampere: Opinpajan kirja.

Kippo, A. K., Tikka, A., Turtiainen, E. & Turtiainen, E. 2022. Automaatiotekniikan perusteet. Helsinki: Edita. E-kirja. Saatavissa: https://www.ellibslibrary.com/book/951-37-4912-5 [viitattu 17.3.2025].

Konedirektiivi 2006/42/EY.

Liedes, R., Uusitalo, S., Asp, R., Laaksonen, T., Härkönen, K. & Sähkötieto. 2023. Rakennusten automaation valvomot. 2., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo oy. E-kirja. Saatavissa: https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.xamk.fi/item/3295 [viitattu 11.3.2025].

Liedes, R., Uusitalo, S., Reinikainen, V., Erkkilä, V., Koivisto, P. & Sähkötieto. 2022. Taloteknisten järjestelmien tiedonsiirto. 3., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo oy. E-kirja. Saatavissa: https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.xamk.fi/item/231 [viitattu 11.3.2025].

Neles modular ball valve. s.a. Valmet. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.valmet.com/flowcontrol/valves/ball-valves/neles-ball-valves/neles-modular-ball-valve-series-m/ [viitattu 9.3.2025].

PROFINET. s.a. Technology Description. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.profinet.com/profinet-explained/technology-description [viitattu 1.3.2025].

Pulli, M. 2018. Virtaustekniikka: Vedensiirtojärjestelmien toiminnallinen suunnittelu nykyaikaisin menetelmin. 3. uusittu painos. Tampere: Tammertekniikka.

Sarvelainen, H. 2024. Virtaustekniikka: putkisto- ja pumppukäyrät. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://learn.xamk.fi/pluginfile.php/2984822/mod_resource/content/6/EN00BH47_teoria_7.pdf [viitattu 14.3.2025].

SFS 6000-1. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Perusperiaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät.

SFS 6000-4-41. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta.

SFS 6000-4-43. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus.

SFS 6000-5-53. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–53: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Erottaminen, kytkentä ja ohjaus.

SFS 6000-5-55. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–55: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Muut sähkölaitteet.

SFS 6000-7-716. 2022. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7–716: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Pienoisjännitteisen tasasähkötehon jakelu tietotekniikan ja tietoliikennetekniikan kaapeloinnin kautta.

SFS-EN IEC 62061. 2021. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvien ohjausjärjestelmien toiminnallinen turvallisuus.

SFS-EN ISO 13849-1. 2023. Koneturvallisuus. Turvallisuuteen liittyvät ohjausjärjestelmien osat. Osa 1: Yleiset suunnitteluperiaatteet.

SFS-EN ISO 13850. 2015. Koneturvallisuus. Hätäpysäytys. Suunnitteluperiaatteet.

SFS-EN ISO 13857. 2008. Koneturvallisuus. Turvaetäisyydet yläraajojen ja alaraajojen ulottumisen estämiseksi vaaravyöhykkeille.

Siemens. 2020. Electronic protection and fast fault localization in 24 V DC load circuits. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/409/109766409/att_1019268/v1/SITOP-select_en.pdf [viitattu 14.3.2025].

Siemens. 2023. TIA Portal Safety Programming Manual. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/255/109750255/att_1132641/v1/109750255_Programming-Guideline-Safety_DOC_V1_3_en.pdf [viitattu 7.4.2025].

Siemens. 2024a. Electromagnetic flowmeters SITRANS FMS500. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://procint.com.au/wp-content/uploads/SITRANS-FMS500-Operating-Instruction.pdf [viitattu 8.3.2025].

Siemens. 2024b. Simatic S7 1200 manual collection. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://docs.tia.siemens.cloud/r/simatic_s7_1200_manual_collection_enus_20/plc-concepts/processing-of-analog-values [viitattu 4.4.2025].

SIMATIC controllers. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc.html [viitattu 12.3.2025].

SIMATIC HMI Panels. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/simatic-hmi/panels.html [viitattu 4.3.2025].

SITOP PSU6200. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/power-supply/sitop-psu6200.html [viitattu 14.3.2025].

SITRANS FMT020. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation/flow-measurement/electromagnetic/sitrans-fmt020.html [viitattu 8.3.2025].

SITRANS P200. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://mall.industry.siemens.com/mall/en/uk/Catalog/Product/7MF1565-3CA00-1AA1 [viitattu 13.3.2025].

ST 711.12. 2022. Automaatio- ja mittauslaitteita koskevat vaatimukset ja toimitusohjeet.

ST-käsikirja 34. 2020. Hyvät asennustavat.

Stonel Quartz. s.a. Valmet. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.valmet.com/flowcontrol/valve-automation/limit-switches/quartz/ [viitattu 7.4.2025].

Strömman, M., Hirvonen, J., Hukki, K., Tommila, T., Suomen Automaatioseura. 2010. Automaatiosuunnittelun prosessimalli. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.automaatioseura.fi/site/assets/files/1426/automaatiosuunnittelun_prosessimalli.pdf [viitattu 12.3.2025].

Sulzer Pumps Centrifugal Pump Handbook. 2008. Second Edition. Sulzer Pumps Ltd.

Sulzer. 2024. SNS. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.sulzer.com/en/-/media/files/products/pumps/single-stage-pumps/brochures/sns_single_stage_centrifugal_pumps_e10333.pdf [viitattu 9.3.2025].

Tarhonen, K. 2024. Vesiprosessin yleiskuva. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti.

Tarhonen, K. 2024. Yhdekuva. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti.

Toimeksiantaja. 2025. Haastattelu 5.2.2025. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu Oy.

Totally Integrated Automation Portal. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal.html [viitattu 18.2.2025].

Valmet. 2022a. Neles ND9000 Älykäs venttiiliohjain. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/sharepoint/imported/7nd9071fi.pdf [viitattu 1.4.2025].

Valmet. 2022b. V-aukkoinen Neles segmenttiventtiili. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/sharepoint/imported/3r74fi.pdf [viitattu 9.3.2025].

Valmet. 2023. Neles NDX Älykäs venttiiliohjain. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.valmet.com/globalassets/sharepoint/imported/7ndx71fi.pdf [viitattu 4.4.2025].

White, M. T. 2023. Mastering PLC Programming: The Software Engineering Survival Guide to Automation Programming. Packt Publishing. E-kirja. Saatavissa: https://ebookcentral.proquest.com/lib/xamk-ebooks/reader.action?docID=30532815&ppg=1 [viitattu 14.3.2025].

WinCC Unified. s.a. Siemens. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.siemens.com/fi/fi/tuotteet/teollisuus/wincc-unified.html [viitattu 4.3.2025].