



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Joonas Salmi

Sintering Helium Recovery -järjestelmän automaattiosuunnittelun alustus ja osaprosessin säätöratkaisun etsiminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja Automaatiotekniikka

Insinöörityö

5.3.2020

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Joonas Salmi Sintering Helium Recovery -järjestelmän automaatio suunnittelun alustus ja osaprosessin säätöratkaisun etsiminen 36 sivua 5.3.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	Automaatiotekniikka
Ohjaajat	Engineering Manager, Automation SW Jani Latvala Lehtori Markku Inkinen
<p>Insinööritö on tehty itävaltalaiselle Rosendahl Nextrom GmbH:lle, sen tarkoitus on alustaa automaatio suunnittelua ja etsiä Nextromin Sintering Helium Recovery -järjestelmän osaprosessille mahdollisia säätöratkaisuja. Automaatio suunnittelussa on otettava huomioon järjestelmän testausvaihe, missä sen osaprosessit testataan erikseen. Testaamisen jälkeen osaprosessit on pystyttävä yhdistämään helposti yhdeksi toimivaksi kokonaisuudeksi.</p> <p>Sintering Helium Recovery -järjestelmä on jaettu kolmeen osaprosessiin, joita ovat prosessikaasun keräys ja puhdistus, heliumin rikastaminen ja heliumin puhdistaminen. Joitakin heliumin rikastamisosaprosessiin mahdollisesti sovellettavia säätöratkaisuja ovat myötäkylkyntä, kaskadikytkentä ja monimuuttujasäätö. Heliumin rikastamisosaprosessiin valittujen instrumenttien pohjalta pystytään määrittämään osaprosessin ohjaus- ja mittausu-reet.</p> <p>Järjestelmän ohjelmistosuunnittelun helpottamiseksi ohjelmalle määritellään valtahierarkia, johon kuuluvat pääohjain-, osaprosessi- ja prosessisäädintaso. Pääohjaimen tarkoitus on muodostaa järjestelmälle yhteinen tila, osaprosessitaso ohjaa prosessitasonsäätimiä ja prosessisäädintasolla säätimien tarkoitus on ohjata säädettävien toimilaitteiden ohjattavat suureet mahdollisimman lähelle annettua asetusarvoa.</p> <p>Insinööritöössä saatiin luotua modulaarinen tasoarkkitehtuuri järjestelmälle, joka mahdollistaa osaprosessien yhdistämisen testauksien jälkeen. Lisäksi työssä esiteltyjä prosessinsäätömenetelmiä pystytään hyödyntämään lopullisen säätöratkaisun löytämiseen prosessissa.</p>	
Avainsanat	Nextrom, heliuminkierrätys, säätömenetelmät, tasoarkkitehtuuri

Author Title Number of Pages Date	Joonas Salmi Initializing Sintering Helium Recovery system automation design and finding a subprocess control solution 36 pages 5 March 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Automation Engineering
Instructors	Jani Latvala, Engineering Manager Automation SW Markku Inkinen, Senior Lecturer
<p>The thesis study was made for Rosendahl Nextrom GmbH. The purpose of the study was to initialize an automation design for Sintering Helium Recovery system and to find a subprocess control solution. Automation design must consider separate subprocess testing before the whole process is combined.</p> <p>Sintering Helium Recovery System is divided into three subsystems. The subsystems are called collecting and purifying process gases, helium enrichment, and helium purifying. Some possible control systems for helium enrichment subsystem are feed forward control, cascade control and multi variable control. The instruments selected for the helium enrichment subprocess can be used to determine the control and measurement variables for the subprocess.</p> <p>To facilitate software design for the system, a level hierarchy was defined for the program. The level hierarchy includes the master controller level, subprocess level, and process control level. The purpose of the master control level is to create a common state for the system, the subprocess level controls the process control level controllers and at the process control level controllers are intended to control the actuators as close as possible to the set values.</p> <p>As a result, modular level architecture for the system was created and process controls which can be used for the final process control were introduced.</p>	
Keywords	Nextrom, helium recovery, control systems, level architecture

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lähtökohdat ja alustus	1
2.1	Rosendahl Nextrom GmbH	1
2.2	Valokuitu	2
2.3	Valokuidun valmistus	4
2.4	Heliuminkierrätys	8
3	Prosessin kuvaus	9
3.1	Prosessikaasun keräys ja puhdistus	9
3.2	Heliumin rikastaminen	9
3.3	Heliumin puhdistaminen	10
4	Erilaisia säätömenetelmiä	10
4.1	Negatiivinen takaisinkytkentä	11
4.2	Myötäkytkentä	12
4.3	Kaskadikykentä	14
4.4	Monimuuttujasäätö	15
4.5	Muita säätöjä	15
5	Kierrätysjärjestelmän heliumin rikastusvaiheen tarkastelua	16
5.1	Prosessin tarkastelua	16
5.2	Mäntäkompressori, jälkijäähdytin ja jäähdytyskuivain	17
5.3	Suhteellinen paineensäätöventtiili	18
5.4	Terminen massavirtausmittaus	19
5.5	Lämpötilamittaus	20
5.6	Konsentraatiomittaus	21
5.7	Kastepistemittaus	21
5.8	Järjestelmän tiedonsiirto	22
6	Järjestelmän ohjelmiston suunnittelu	23

6.1	Tasoarkkitehtuuri	23
6.2	Pääohjain	25
6.3	Osaprosessien ohjaimet	28
6.4	Prosessisäädintaso	28
6.5	Käynnistyssekvenssi, prosessitila ja pysäytyssekvenssi	28
7	Järjestelmän ohjauksen suunnittelu	30
8	Yhteenveto	32
	Lähteet	34

Lyhenteet

lpm	Litraa/ minuutti (Liters per minute).
MCVD	Preformin valmistusmetodi, Modified Chemical Vapour Deposition.
MEMS	Mikrosysteemit (Micro Electro Mechanical Systems).
NTP	Normaalilämpötila ja -paine (normal temperature and pressure).
OSI	Tiedonsiirtoprotokollien yhdistelmä seitsemässä kerroksessa (Open System Interconnection).
OVD	Preformin valmistusmetodi, Outside Vapour Deposition.
PLC	Ohjelmoitava logiikka, Programmable Logic Controller.
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse-Width Modulation).
SHR	Nextromin sintrausjärjestelmän heliuminkierrätysjärjestelmä, Sintering Helium Recovery.
VAD	Preformin valmistusmetodi, Vapour Axial Deposition.

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena on antaa alustus Rosendahl Nextrom Oy:n Sintering Helium Recovery (SHR) -järjestelmän automaatio suunnitteluun ja etsiä mahdollisia säätöratkaisuja SHR:n heliumin rikastamisvaiheeseen. Automaatio suunnittelun alustuksessa on otettava huomioon järjestelmän testausvaihe, jossa osaprosessit testataan erillisinä järjestelminä. Prosessin onnistuminen vaatii kuitenkin kaikkien osaprosessien toimimisen, joten osaprosessit on pystyttävä yhdistämään helposti yhdeksi kokonaisuudeksi testausten jälkeen.

Insinööriyön alussa esitellään yritys, valokuitu ja valokuidun valmistus pääpiirteittäin, jonka jälkeen avataan hiukan käsitteillä olevaa prosessia ja paneudutaan järjestelmälle mahdollisesti sovellettaviin säätötapoihin ja niiden toimintoihin. Seuraavaksi syvennyttään heliuminkierrätyksen heliumin rikastamisvaiheeseen, siinä käytettyihin instrumentteihin ja tiedonsiirtotapoihin. Tämän jälkeen suunnitellaan logiikkaohjelmaan tasoarkkitehtuuri ja määritellään tasojen tehtävät. Insinööriyön lopussa pohditaan esiteltyjen säätötapojen soveltamista heliumin rikastamisvaiheprosessin säätämiseen.

2 Lähtökohdat ja alustus

2.1 Rosendahl Nextrom GmbH

Itävaltalainen Rosendahl Nextrom GmbH on yksityisen itävaltalaisen perheyhtiö Knill Gruppen omistuksessa oleva maailmanlaajuinen akku-, kuparikaapeli- ja valokuituvalmistusratkaisuiden kehittäjä. Kuvasta 1 nähdään Rosendahl Nextrom GmbH:n toiminnan levittäytyminen.



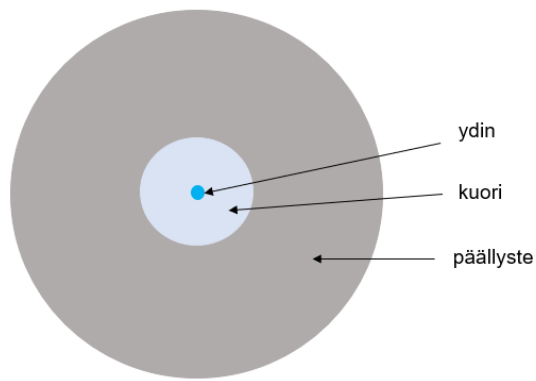
Kuva 1. Rosendahl Nextrom GmbH:n pääkonttorit, tuotantolaitokset, myynti ja huoltoyksiköt ja edustuspaikat. [1.]

Rosendahl Nextrom GmbH on jaettu kolmeen strategiseen liiketoimintayksikköön (Strategic Business Units), joihin kuuluvat lyijyakkujen valmistusratkaisuiden toimittaja BM-Rosendahl, kuparikaapelivalmistusratkaisuiden toimittaja Rosendahl sekä optisen kuidun ja valokuitukaapelin valmistusratkaisuiden toimittaja Nextrom. [1.]

Nextromin pääkonttori sijaitsee Vantaalla, jonka yhteydessä on myös Rosendahl Nextromin sekä kuparikaapelin ja valokuidun valmistusjärjestelmien kokoonpano- ja testaus-tilat että Preform R&D Center. Preform R&D Center on nimensä mukaan preformin eli valokuituaihion tuotekehitysympäristö, jossa pystytään myös demonstroimaan asiakkaille tällä hetkellä osa preformin valmistusvaiheista. [2.]

2.2 Valokuitu

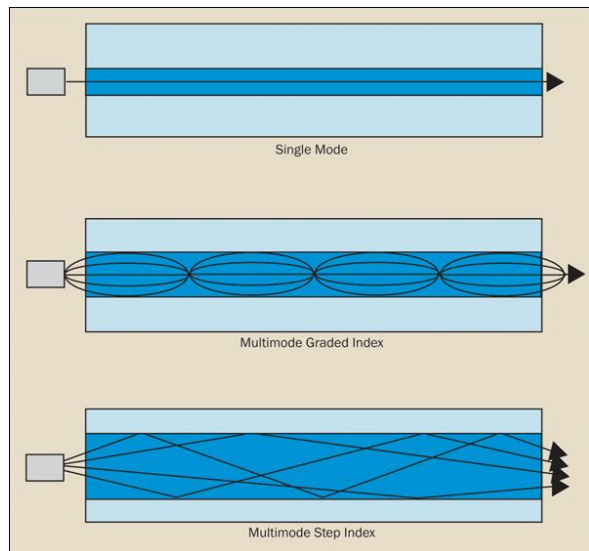
Yksi optisen signaalin siirtämISRatkaisuiSTA on valokuitu. Valokuitua käytetään muun muassa tietoliikenneverkoissa tiedonsiirtoon. Valokuitu koostuu pääsääntöisesti kolmesta osasta: ytimestä (core), kuoresta (clad) ja päällysteestä (buffer). Kuvassa 2 on hahmotelma valokuidun poikkileikkauksesta.



Kuva 2. Hahmotelma valokuidun poikkileikkauksesta, johon on sijoitettu ydin, kuori ja päälyste.

Karkeasti ottaen tietoliikenneverkoissa käytetyssä valokuidussa ytimen tarkoitus on toimia valon väliaineena. Kuoren tarkoitus on pitää valo ytimessä, päälyste suojaa kuorta mekaanisilta vaurioilta.

Valokuidun toiminta perustuu sopivassa kulmassa ytimeen ohjatun valon taittumiseen ja heijastumiseen ytimen ja kuoren rajapinnassa. Valokuidut voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: yksimuotokuituihin (single mode) ja monimuotokuituihin (multimode). Päätyypit sisältävät erilaisia tyyppejä, kuten esimerkiksi monimuotokuitu sisältää asteittaiskuitutyypin ja askelkuitutyypin. Yksimuotokuitujen ja monimuotokuitujen selkeänä rakenteellisenä erona voidaan pitää ytimen kokoa. Yksimuotokuidun ydin on tyypillisesti 5-10 μm halkaisijaltaan eikä valon heijastumista teoriassa tapahdu valon edetessä. Monimuotokuiduilla ytimen halkaisija on tyypillisesti 50-100 μm , ytimessä valo hajautuu useaan muotoon. Kuvassa 3 on esitetty valon kulkeminen eri valokuitutyypien ytimessä. [3; 4.]



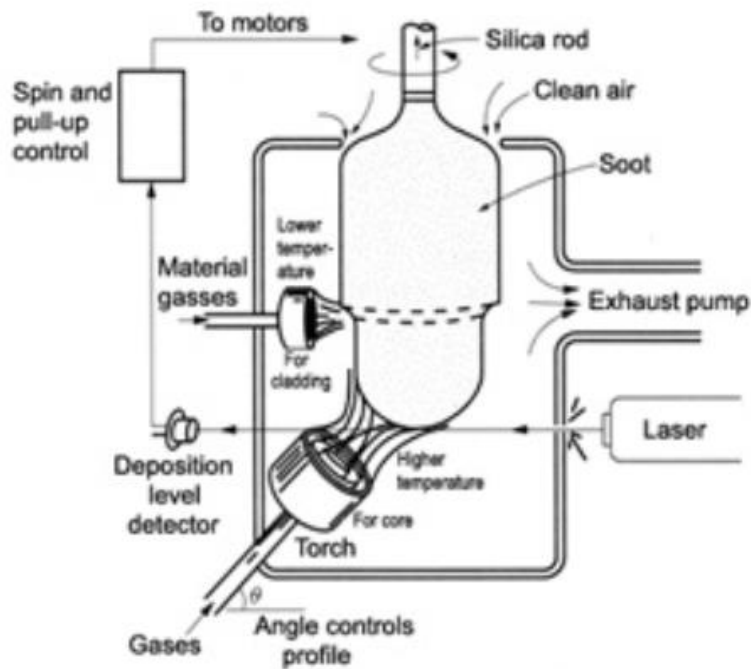
Kuva 3. Hahmotelma valon kulkeutumisesta yksimuoto-, asteittais- ja askelkuidussa. [5.]

Tietoliikenneverkoissa käytettyjen valokuitujen lisäksi olemassa on myös useita erilaisia erikoiskuituja, joita käytetään erilaisia ominaisuuksia vaativiin tehtäviin. Esimerkiksi polarisointia ylläpitävät kuidut, joita käytetään esimerkiksi kuituoptisessa gyroskoopissa. [6.]

2.3 Valokuidun valmistus

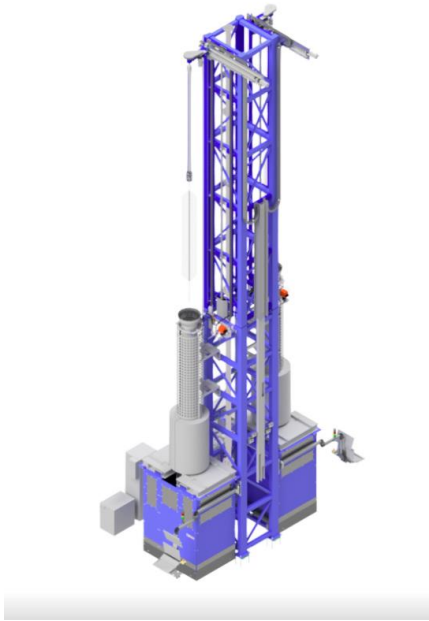
Valokuidun valmistaminen voidaan jakaa kahteen pääosaan: valokuituaihion eli preformin valmistus ja valokuidun vetäminen valokuituaihiosta valokuiduksi. Valmis preformi koostuu ydin- ja kuorikerroksesta, jotka kumpikin kerros voidaan luoda esimerkiksi jollakin seuraavista metodeista: VAD eli Vapour Axial Deposition, OVD eli Outside Vapor Deposition tai MCVD eli Modified Chemical Vapor Deposition. [7.]

VAD-prosessissa preformi valmistetaan pystyasennossa polttamalla piitetrakloridia (SiCl_4), happea (O_2) ja germaniumtetrakloridia (GeCl_4) työn alla olevan preformin eli sootin pohjaan. Soottia pyöritetään ja nostetaan sen kasvaessa siihen asti, kunnes on saavutettu halutun kokoinen sootti. Kuvassa 4 on esitetty VAD-kasvatuskoneen perustoiminnot. [8.]



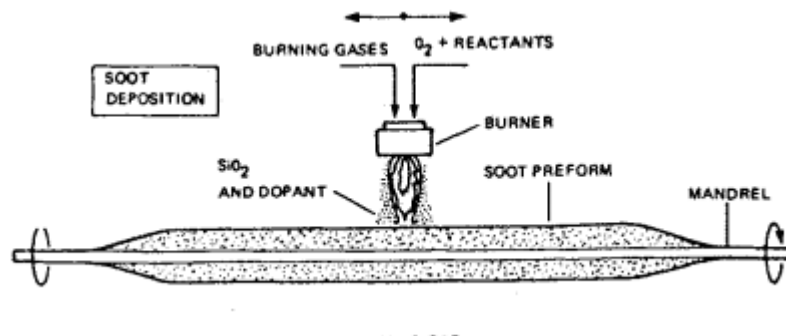
Kuva 4. Sootin kasvatus VAD-metodilla. Soottia pyöritetään samalla, kun core-poltin kasvattaa sitä. Sootin kasvua mitataan lasermittauksella, jonka mukaan sootia nostetaan sen kasvaessa [7.]

Kasvatuksen jälkeen sootti kuivataan altistamalla se helium-klooriseokselle noin 1000°C:ssa. Kuivatuksen jälkeen sootti kovetetaan sintraamalla 1400-1600°C, jossa heliumia käytetään estämään kuplien synty preformiin. Kuvassa 5 on Nextromin OFC 08 Clad Sintering System (Dual), jolla pystytään suorittamaan sootin kuivatus ja sintraus. [9, s. 297.]



Kuva 5. Nextromin OFC 08 Clad Sintering System (Dual). [10.]

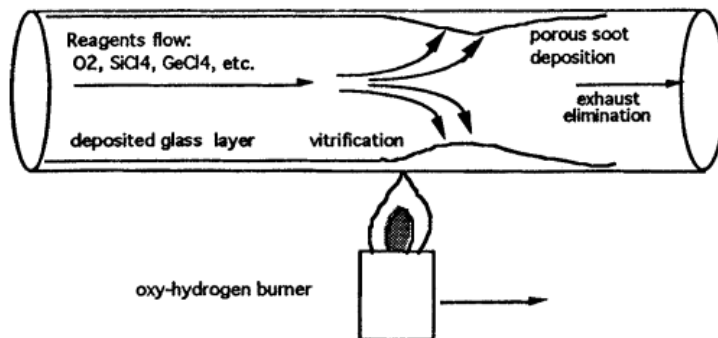
OVD-prosessi eroaa VAD-prosessista kasvatusvaiheessa. OVD:n kasvatus tapahtuu sootin ollessa vaakaa-asennossa kuvan 6 mukaisesti, jossa piitetrakloridi, germaniumtetrakloridi ja happi syötetään polttimeen metaanin tai vedyn kanssa ja kasvatus tapahtuu kerros kerrallaan. Kasvatuksen jälkeen sootti sintrataan samoin kuin VAD-metodissa. [8.]



Kuva 6. OVD-kasvatus, jossa poltin polttaa reaktantit sootin pintaan. [8.]

MCVD poikkeaa VAD- ja OVD-prosesseista siten, että siinä sootti kasvatetaan ontion sylinterin sisälle. MCVD-kasvatuksessa sylinteriin syötetään kaasuseos, joka lämmite-

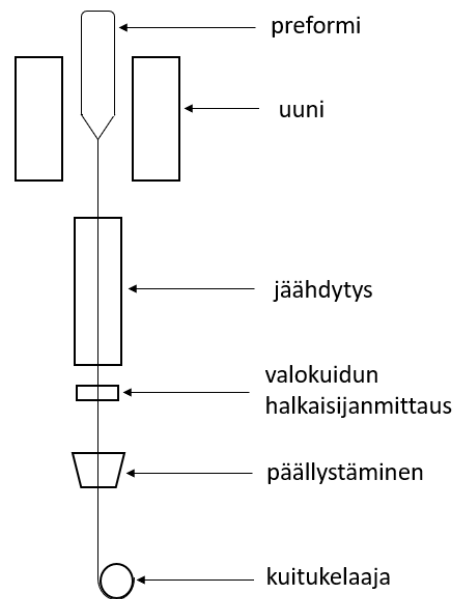
tään polttimella sylinterin ulkopuolelta kuvan 7 mukaisesti. MCVD-metodi on laajalti käytetty tutkimus laboratorioissa sen monipuolisuuden vuoksi, joka mahdollistaa myös erikoiskuitujen valmistamisen. [8.]



Kuva 7. Hahmotelma MCVD:n kasvatusprosessista. Reaktantivirtaus tulee vasenmalta lasisylinteriin ja virtauksen tullessa polttimen lämmittämään putken osaan reaktantit reagoivat ja ajautuvat sylinterin reunoille. [8.]

Valmiin preformin valmistamiseen sisältyy kasvattamisen ja sintraamisen lisäksi myös muita työstövaiheita, esimerkkinä preformin venytys, jossa preformi venytetään valokuidun vetämisvaiheen vaatimusten mukaiseksi. [11.]

Valokuidun veto preformista tapahtuu korkean tornin avulla. Preformi syötetään tornin yläosassa olevaan grafiittiuuniin. Uuni lämmittää preformin kärkeä ja kärjen lämpötilan noustessa tarpeeksi korkeaksi (noin 1900°C:een). Painovoiman avulla kärki alkaa tippumaan venyttäen lämmitettyä preformin alaosa ohueksi kuiduksi. Kuitu kulkee tornissa erilaisten vaiheiden läpi, kuten kuidun jäähtymisen, kuidun halkaisijamittauksen ja kuidun päällystämisen. Kuvassa 8 on esitetty pääpiirteittäin valokuidun vetoprosessi. [8.]



Kuva 8. Tornin ylhäällä preformi syötetään uuniin. Uuni lämmittää preformia niin, että siitä valuu valokuitua, joka kulkee jäähdytyksen, halkaisijamittauksen ja päälystämisen läpi kuitukelaajalle.

Tornin alhaalla kuitu kiinnitetään kuitukelaajaan, joka prosessin käydessä puolaa kuidun kelaan. Kuidun paksuutta ohjataan uunin lämpötilalla ja kuitukelaajan puolaimen nopeudella. [12.]

2.4 Heliuminkierrätys

Valokuidun valmistamisessa käytetään heliumia eri vaiheissa, kuten valokuidun vetoprosessin jäähdytysvaiheessa ja preformin sintrausvaiheessa. Valokuituihin liittyvä heliumin käyttö on 6 % kaikesta heliuminkäytöstä. Heliuminkierrätys näyttäisi tulevan hetki hetkeltä kannattavammaksi, sillä teollisuuteen tarkoitetun laadukkaan heliumin hinta oli vuonna 2000 noin $\$3/\text{m}^3$ ja vuonna 2015 hinta oli noussut yli $\$12/\text{m}^3$.

Opinnäytetyössä esitellään heliuminkierrätysjärjestelmää ja keskitytään pääsääntöisesti heliumin rikastamisvaiheen ohjelmisto- ja prosessinohjaussuunnitteluun. Kokonaisuutena heliuminkierrätysjärjestelmä on suunniteltu erilliseksi järjestelmäksi, minkä pystyy liittämään sekä Nextromin Core- ja Clad Sintering -järjestelmiin että mahdollisesti muiden valmistajien sintrausuuneihin. [13., 14.]

3 Prosessin kuvaus

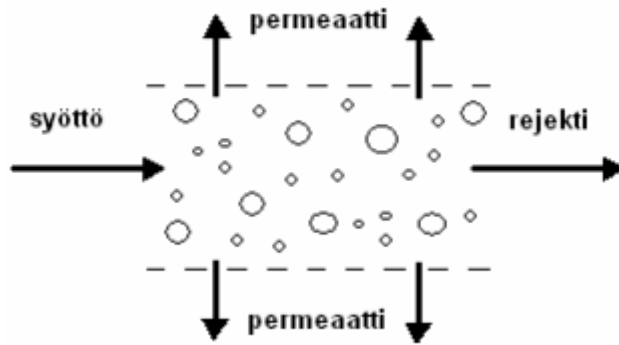
Heliuminkierrätysjärjestelmän on pystyttävä keräämään heliumpitoista kaasua sintrauskoneen kaasunpoistoputkesta vaikuttamatta itse sintrausprosessiin tai sintrauskoneeseen. Kerätty kaasuseos on pystyttävä puhdistamaan sintrauksessa käytettävistä myrkykaasuista, kuten kloorista. Puhdistamisvaiheen jälkeen järjestelmään tulisi päästä vain ilmahelium-kaasuseosta. Seuraavaksi heliumkierrätysjärjestelmä rikastaa heliumin jäljellä olevasta kaasuseoksesta mahdollisimman puhtaasti, jonka jälkeen se puhdistetaan nesteyttämällä ja adsorboimalla. Prosessi on jaettu kolmeen eri vaiheeseen: prosessi-kaasun keräykseen ja puhdistukseen, heliumin rikastamiseen ja heliumin puhdistamiseen.

3.1 Prosessikaasun keräys ja puhdistus

Prosessin ensimmäinen vaihe on jaettu kahteen eri osaan. Ensimmäisen osan tarkoitus on kerätä imemällä heliumia sisältävää kaasuseosta sintrauksen prosessikaasujen poistoputkesta. Kun prosessikaasu on saatu järjestelmään, se kulkeutuu märkäpesuriin. Märkäpesuri puhdistaa kaasuseoksen, jotta jäljelle jää vain ilma ja helium. Puhdistuksen jälkeen kaasu kuivatetaan, jonka jälkeen se siirtyy prosessin toiseen vaiheeseen.

3.2 Heliumin rikastaminen

Heliumin rikastaminen prosessissa tapahtuu membraaneilla eli kalvoerottimilla. Kalvoerottimilla kaasuerotuksessa paineistettu kaasu syötetään kalvoerottimille, jossa sen komponentit osuvat selektiiviseen kalvoon. Kalvosta läpimenevää suodosta kutsutaan permeaatiksi ja läpäisemätöntä ainetta rejektiksi. Kalvon tarkoitus on päästää vain helium läpi permeaattipuolelle ja antaa muun kaasuseoksen poistua järjestelmästä rejektinä. Heliumin rikastamisvaiheessa käytetään poikittaisvirtaussuodatusta, missä kaasuseos kulkee poikittain selektiiviseen kalvoon nähden. Kuvassa 9 on esitetty poikittaisvirtaussuodatuksen periaate. [15.]



Kuva 9. Poikittaisvirtaussuodatuksen periaate, jossa syöttönä on ilmaheliumkaasuseos. [15.]

Tarkoituksena on siis paineistaa ilmaheliumseos sopivaksi, jotta pääsääntöisesti vain helium pääsee membraanien läpi. Ennen kalvoerottimia kaasuseos on kuitenkin jäähdytettävä ja kuivatettava kompressoinnin jälkeen. Permeaattipuolella ennen seuraavaa vaihetta helium paineistetaan uudelleen ja siirretään viimeiseen vaiheeseen.

3.3 Heliumin puhdistaminen

Prosessin viimeisessä vaiheessa helium nesteytetään ja adsorboidaan typpi, happi ja vesi, jotta saadaan >99,99% puhdasta heliumia. Puhdistus tehdään cryogenisessä lämpötilassa molekyyliseulojen avulla. Tämän jälkeen helium siirretään takaisin sintraimen heliuminsyöttö putkeen.

4 Erilaisia säätömenetelmiä

Seuraavaksi insinööriyössä esitellään säätöjärjestelmien termejä ja tutkitaan mahdollisia säätöratkaisuja prosessille ja sen osaprosesseille eli säätöjärjestelmille. Säätöjärjestelmänä voidaan pitää esimerkiksi kompressoria, venttiiliä, niistä koostuvaa yksikköprosessia tai näiden yhdistelmiä. Säädetävän järjestelmän olosuhteita pystytään kuvaamaan tilasuureina, kuten paine tai virtaus, ja tilasuureet muodostavat yhdessä järjestelmän tilan eli tilavektorin. Järjestelmän tilaan vaikuttavia ulkoisia tekijöitä voidaan pitää tulosuureina, joita ovat toimisuuret ja kuormittavat suureet. Järjestelmän vaikutusta ympäristöön voidaan kuvata lähtösuureina, joista säädön kohteena oleva on säätösuure.

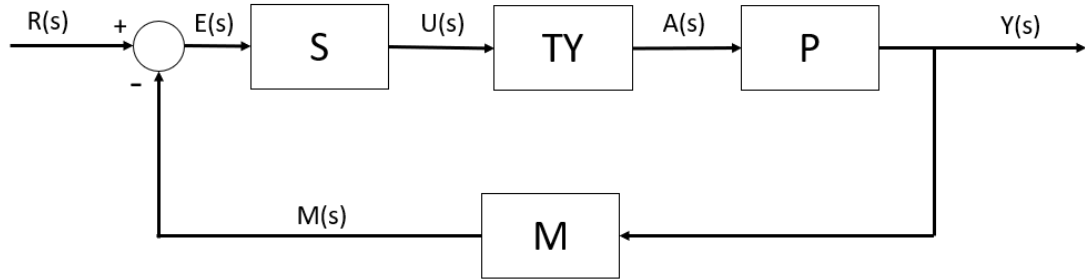
Huomioitava asia säätöjärjestelmässä on, että säätösuure ei ole välttämättä sama kuin suure, jota halutaan muuttaa lopullisessa prosessissa eli säädettävä suure. Esimerkiksi autolla ajaessa, kun kuljettaja haluaa lisätä nopeutta, hän painaa kaasupoljinta tietyllä voimalla. Kaasupolkimen painamisvoima on tässä tapauksessa toimisuure, vaikka säädettävä suure on nopeus. [17, s.10.]

Järjestelmää voidaan säätää erilaisilla säätörakenteilla riippuen, minkälainen prosessi on kyseessä. Säätörakenteen valintaan vaikuttavat monet eri asiat, kuten prosessin yhtälön muodostaminen, prosessinkuorman vaihtelut, viive ja itsestään säätyminen. Järjestelmän tai osajärjestelmän dynaamista käyttäytymistä voidaan ilmaista erillisten differentiaaliyhtälöiden tai siirtofunktioiden avulla. Järjestelmän lohkokaaavioesityksessä differentiaaliyhtälöt voidaan muuttaa aikatasosta s-tasoon Laplace-muunnoksella ja sijoitella järjestelmään lähtö- ja tulosignaalien riippuvuuksien mukaan. Lohkokaaavioesityksestä pystytään hahmottamaan järjestelmän dynamiikka lohkokaaviolaskennan avulla ja käänteisellä Laplace-muunnoksella. Seuraavaksi esitellään erilaisia säätörakenteita ja käydään pintapuolisesti läpi niiden hyviä ja huonoja puolia sekä lohkokaaviolaskentaa. [18. s.84-85; 17. s.148]

4.1 Negatiivinen takaisinkytkentä

Negatiivinen takaisinkytkentä eli suljettu takaisinkytkettysäätöjärjestelmä (closed loop control system) perustuu yhdellä muuttujalla selitettynä asetusarvon ja mittauksen eli mittaussuureen erotukseen, josta saadaan erosuure. Erosuure toimii säätimen ohjaussuureena, jonka säädin pyrkii pitämään mahdollisimman pienenä. Säätimen ohjaus toimii vuorostaan toimilaitteen ohjaussuureena, jonka muodostama toimisuure vaikuttaa prosessiin. Prosessiin voi vaikuttaa myös häiriösuure eli kuormittava suure, jota ei pystytä ohjaamaan. Joissakin tapauksissa kuormittava suure tai sen vaikutus voidaan summata toimisuureeseen. Toimisuure vaikuttaa säädettävään järjestelmään eli prosessiin, ja näin ollen säädettävään suureeseen. Säädettävä suure mitataan ja mittaussuureta kytketään takaisin piiriin alkupäähän ja sitä käytetään erosuureen laskemisessa. Suljettu takaisinkytketty säätöjärjestelmä on yleisin teollisuudessa käytetty säätöpiiri. [18, s.166.]

Negatiivisen takaisinkytkennän ilman häiriösuuretta pystyy esittämään lohkokaaaviona s-tasossa kuvan 10 mukaisesti.



Kuva 10. Säättöpiirin lohkokaaavioesitys. Säättöpiirin komponentit (ja siirtofunktiot) ovat säädin S, toimiyksikkö TY, prosessi P ja mittauslaite M. Laplace-muunnetut signaalit ovat: $R(s)$ asetussarvo, $E(s)$ erosuure, $U(s)$ ohjaussuure, $A(s)$ toimitus suure, $Y(s)$ säädettävä suure ja $M(s)$ mittaussuure.

Kuvan 10 lohkokaaavio voidaan esittää lausekkeena

$$Y(s) = (S \cdot TY \cdot P) \cdot (R(s) - M \cdot Y(s))$$

joka pystytään sieventämään välivaiheiden

$$Y(s) = (S \cdot TY \cdot P) \cdot R(s) - (S \cdot TY \cdot P)M \cdot Y(s)$$

$$Y(s) + (S \cdot TY \cdot P)M \cdot Y(s) = (S \cdot TY \cdot P) \cdot R(s)$$

$$Y(s) \cdot (1 + S \cdot TY \cdot P \cdot M) = (S \cdot TY \cdot P) \cdot R(s)$$

jälkeen muotoon:

$$Y(s) = \frac{S \cdot TY \cdot P}{1 + S \cdot TY \cdot P \cdot M} \cdot R(s) \quad (1)$$

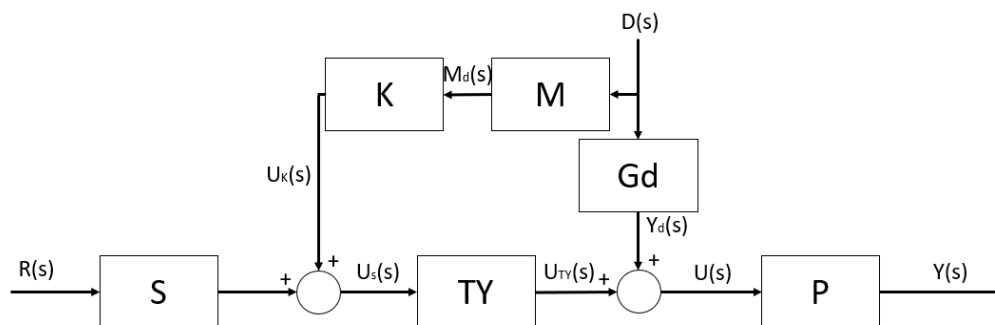
4.2 Myötäkyykentä

Myötäkyykentän tarkoituksena on reagoida häiriösuureeseen jo ennen sen vaikutusta järjestelmään mittaamalla häiriösuureta, jonka mittaussuure korjaa säätimen ohjaussuureta. Myötäkyykentä vaatii kuitenkin tarkkaa tietämistä häiriösuureiden vaikutuksesta

prosessiin, joten sitä käytetään yleensä takaisinkytketyn säätöjärjestelmän kanssa. Myötäkytkennän ja takaisinkytkennän yhdistelmä säädöllä saadaan yleensä nopein korjausprosessiin, sillä mitä parempi myötäkytkentä, sitä pienempi erosuure tulee säätimelle. [18, s.167.]

Myötäkytkennän toteuttaminen vaatii tarkkaa prosessin tietämystä ja mahdollisesti testaamista, joten sen toteuttaminen on kalliimpaa kuin pelkän takaisinkytkennän. Tämän takia on määriteltävä, onko myötäkytkennän hyödyt prosessille tarpeeksi suuret sen toteuttamiseksi. [18, s.167.]

Kuvassa 11 on esitetty myötäkytkentä ilman takaisinkytkentää lohkokaaaviona s-tasossa:

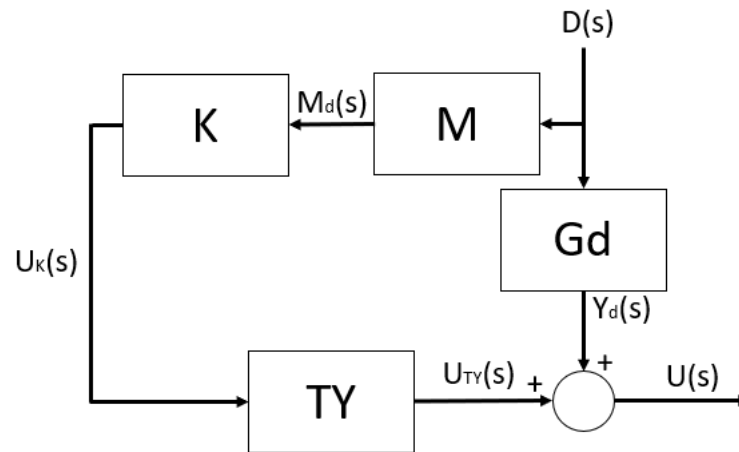


Kuva 11. Säätöpiirin komponentit (ja siirtofunktiot) ovat säädin S, toimilaitte TY, prosessi P, häiriödynamiikka G_d, häiriönmittaus M ja häiriön kompensoaattori K. Laplace-muunnetut signaalit ovat: U_s(s) säätimen toimilaitteen ohjaussuure, U_k(s) kompensoaattorin lähtösuure, M_d(s) häiriön mittaussuure, D(s) häiriösuure, Y_d(s) häiriösuureen aikaansaama häiriö prosessiin, U_{TY}(s) toimitus, U(s) säädettävä suure ja Y(s) ohjattava suure.

Matemaattisesti tarkasteltuna yhtälöksi muodostuu

$$U(s) = G_d \cdot D + (TY \cdot (R(s) \cdot S + K \cdot M \cdot D(s)))$$

Myötäkytkennän tarkoituksena on kompensoida häiriön vaikutus ennen prosessia, ideaalisen kompensoaattorin arvo pystytään laskemaan jättämällä sekä asetusarvo että säädin pois tarkastelusta, jolloin saadaan kuvan 12 mukainen lohkokaavio



Kuva 12. Häiriön kompensoittorin arvon laskemiseen hyödynnettävä lohkokkaavio.

Sen matemaattinen malli on

$$U(s) = G_d \cdot D(s) + TY \cdot K \cdot M \cdot D(s)$$

Tilanteessa häiriö on siis kompensoitu, kun $U(s)=0$, joten

$$0 = G_d \cdot D(s) + TY \cdot K \cdot M \cdot D(s)$$

$$-G_d \cdot D(s) = TY \cdot K \cdot M \cdot D(s)$$

ja ideaalisen kompensoittorin arvoksi saadaan:

$$K = -\frac{G_d \cdot D(s)}{TY \cdot M \cdot D(s)} \quad (2)$$

4.3 Kaskadikytkentä

Kaskadikytkennällä tarkoitetaan säätöpiiriä, jossa on sisäkkäisesti kaksi säätöpiiriä eli takaisinkytkentää, tai useampia. Yleisin tapaus on kahden sisäkkäisen säätöpiirin ra-

kenne, jossa on kaksi säädintä (yläsäädin ja alasäädin), kaksi ohjaussuuretta, kaksi säädettävää suuretta sekä yksi toimisuure. Ohjauksessa yläsäädin säätää alasäätimen asetusarvoa oman erosuureen perusteella. Alasäädin toimii omana takaisinkytkentänä, jonka prosessi vaikuttaa yläsäätimen prosessiin. [18, s.173.]

Kaskadikytkennän hyötynä on alasäätimen tilasuureen oma säätäminen, joka vähentää kyseisen tilasuureen häiriösuureiden muutoksien vaikutusta. Näin ollen vaikutus yläsäätimen prosessiin pienenee. Kaskadikytkennän hyödyt vaikuttavat kuitenkin vain silloin, kun alasäätimen prosessi on paljon yläsäätimen prosessia nopeampi. [18, s.174.]

4.4 Monimuuttujasäätö

Monimuuttujasäädöllä tarkoitetaan säätöä, jossa yksikkösäädin tai kaskadisäätö ei ole riittävä. Tällaisissa järjestelmissä on monta ohjaussuuretta ja monta säädettävää suuretta, jota säädin ohjaa hallitusti eri mittauksen perusteella. Monimuuttujasäädön toteuttamisessa on tiedettävä muun muassa, kuinka monta tilasuuretta otetaan ”tarkasti” ohjattaviksi suureiksi, mitä ohjattavia suureita mitataan ja luokitellaanko ne ”päämittauksiksi”, joista pystytään näkemään suoraan ohjaustavoitteiden onnistuminen vai ”toisiomittauksiksi”, joita ei seurata kokonaisuuden kannalta vaan ovat apumittauksia esimerkiksi kaskadisäädölle. Lisäksi on tiedettävä, mitä järjestelmän tulosuureita pystytään mittaamaan ja mitä ohjaussuureita pitää käyttää. Sopivien ohjaussuureiden valinta on tehtävä harkiten, sillä eri ohjaussuureilla voi olla suuri vaikutus ohjattaviin suureisiin. Myös säätöpiirin rakenne on tiedettävä ennen toteutusta. [18, s.204-206.]

4.5 Muita säätöjä

Valikoivan säädön ”Override Control” on tarkoitus pysyä passiivisena siihen saakka, kunnes sen valvoma tilasuure on ylittämässä tai alittamassa sallitun raja-arvon. Tässä tilanteessa valikoiva säätö ottaa prosessin hallintaan normaalilta prosessisäätimeltä pitääkseen valvottavan tilasuureen sallituissa rajoissa. Esimerkkinä on kompressorin purkauspaine, jota normaalissa prosessissa ohjataan virtaussäätimellä, mutta purkauspaineen noustessa ylärajalle paineensäädin alkaa säätämään järjestelmää virtaussäätimen sijasta. [18, s.183-184.]

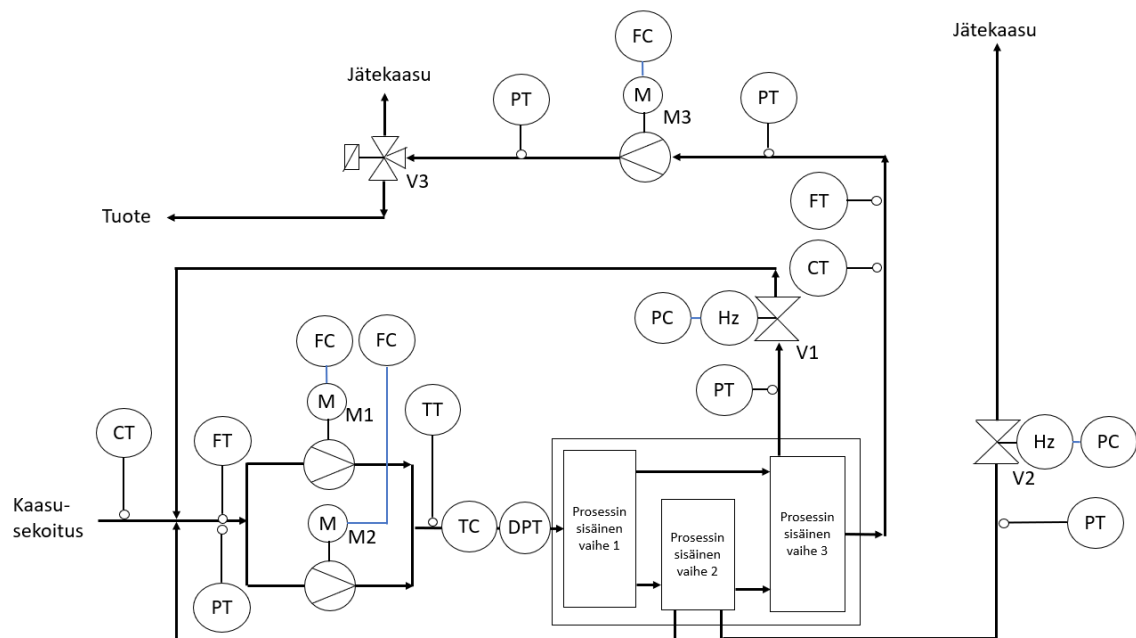
Toinen valikoiva säätö on myös ”korkeimman arvon” säätö, jossa säätöpiirillä on useita samankaltaisia mittauksia, joiden mittaussuureista se valitsee suurimman tai pienimmän riippuen säädön tarkoituksesta. [18, s.186.]

Muita säätimiä ovat mm. kaksipistesäädin, kelluva pistesäädin ja mukautuvat säätimet.

5 Kierrätysjärjestelmän heliumin rikastusvaiheen tarkastelua

5.1 Prosessin tarkastelua

Heliumin kierrätysjärjestelmän rikastusprosessin tarkoitus on erotella helium ilmahelium seoskaasusta ja syöttää helium seuraavaan prosessivaiheeseen, josta puhdas helium kiertää takaisin prosessiin. Koska kierrätysjärjestelmään on tehty instrumentointi, prosessin mahdolliset ohjaus- ja mittaussuureet ovat määritelty valmiiksi toimilaitteiden ja mittausten perusteella. Lisäksi kaikille prosessivaiheille on yksi yhteinen PLC (Programmable logic controller), joka vastaa koko prosessista. Kuvassa 13 esitellään yksinkertaistettuna havainnekuva rikastusprosessin instrumenteista.



Kuva 13. Kierrätysjärjestelmän putkistoa kuvaavat mustat nuolet, jotka näyttävät kaasun virtausuuntaan. Pääkompressorien moottorit ovat M1 ja M2, uudelleen paineistamisen komp-

ressorin moottori on M3, prosessin paineenohjausventtiili on V2 ja sisäisen takaisinkytkennän paineenohjaus venttiili on V1. Kuvassa on myös näytetty osaprosessin mittaus-
ten lähettimet (xT), kompressorien taajuusmuuttajat FC ja pääkompressorien jälkijähdytys ja kuivaus TC.

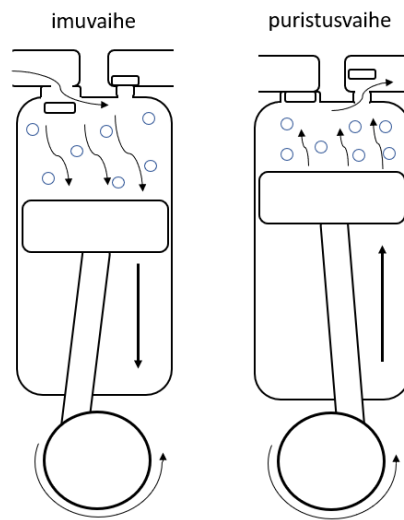
Kuvasta 13 pystytään näkemään koko järjestelmän säädössä mahdolliset ohjaussuureet toimilaitteiden perusteella eli pääkompressorien (M1 & M2) virtaus, uudelleen paineistamisen kompressorin virtaus (M3), sisäisen takaisinkytkennän paine (V1), prosessin paine (V2) ja pääkompressorien tuottaman virtauksen lämpötila (TC).

Mittaussuureina kuvasta nähdään sisääntulon kaasusekoituksen konsentraation (CT) virtaus (FT) ja paine (PT), pääkompressorien jälkeisen kaasun lämpötila (TT) ja kastepiste (DPT), sisäisen takaisinkytkennän paine V1:n vierestä (PT), prosessin paine V2:n vierestä (PT) sekä permeaattipuolen konsentraatio (CT), virtaus (FT) ja paine (PT). Uudelleen paineistetusta puolesta saadaan mitaussuureena paine (PT).

Järjestelmän tilasuureina voidaan pitää painetta, virtausnopeutta, konsentraatiota ja lämpötilaa, jotka pysyvät tilasuureina koko järjestelmässä riippumatta tarkastelupisteestä. Häiriösuureena koko järjestelmälle on järjestelmän ympäristön lämpötila, johon ei pystytä vaikuttamaan ainakaan hallitusti prosessin käydessä. Huomioitavaa on kuitenkin, että ympäristön lämpötila mahdollisesti nousee kompressorien ja moottoreiden käydessä prosessin aikana, mikä vaikuttaa joissakin määrin häiriösuureen suuruuteen.

5.2 Mäntäkompressori, jälkijähdytin ja jäähdytyskuivain

Mäntäkompressorit toimivat imemällä kaasun imuventtiilistä sylinteriin, jossa liikkuva mäntä puristaa kaasun. Kaasun puristus nostaa painetta ja aiheuttaa paineventtiilin avautumisen, jolloin paineistettu kaasu poistuu sylinteristä. Kuvassa 14 on hahmoteltu mäntäkompressorin kompressointiperiaatetta sylinterissä.



Kuva 14. Imuvaiheessa imuventtiili on auki, kaasu pääsee sylinteriin männän liikkua kuvassa alaspäin. Puristusvaiheessa mäntä liikkuu kuvassa ylöspäin puristaen samalla kaasua, jolloin paineventtiili avautuu ja paineistettu kaasu poistuu sylinteristä.

Kierrätysjärjestelmässä käytetään taajuusmuuttajalla ohjattavaa sähkömoottoria männien liikuttamiseen sylinterissä.

Kompressoitu kaasu ajetaan järjestelmässä jälkijähdyttimen ja jäähdytyskuivaimen läpi. Puristusvaiheen jälkeen kaasun tilavuus pienenee ja lämpötila nousee, jonka vuoksi tarvitaan jälkijähdytin, minkä läpi kaasu kulkee järjestelmään. Jälkijähdyttimessä kaasun lämpötila putoaa, mikä aiheuttaa kaasun veden sitomiskyvyn putoamisen verrattuna kompressoimattomaan kaasuun. Tämä aiheuttaa veden kondensoitumista ja erottumista kaasusta. Jotta lauhdetta ei pääse syntymään järjestelmän kalvoerottimilla kaasu on kuivatettava jälkijähdyttimen jälkeen jäähdytyskuivaimella. [19.]

5.3 Suhteellinen paineensäätöventtiili

Järjestelmässä käytetyllä suhteellisella paineensäätöventtiilillä tarkoitetaan kahteen suuntaan liikkuvaa lineaarista normaalisti sulkeutuvaa solenoidiventtiiliä, jota ohjataan pulssinleveysmodulaatio-ohjaimella (Pulse-Width Modulation, PWM).

Solenoidi on yleinen venttiilitoimilaite, joka muuttaa sähköisen energian yleensä lineaariseksi liikkeeksi. Solenoidiventtiili koostuu normaalisti venttiilikopasta, solenoidista eli

sähkömagneetista, varresta ja venttiilinpäästä. Normaalisti sulkeutuva solenoidi venttiili sulkeutuu jousen avulla, mikäli sähkömagneetissa ei kulje virtaa. Virran kulkiessa sähkömagneetti avaa venttiilin. Suhteellisesti säädettävässä solenoidiventtiilissä virran suuruudella pystytään hallitsemaan, kuinka paljon solenoidi tuottaa voimaa ja liikuttaa venttiilin vartta ja venttiilinpäätä. Jotta liikuttamiseen tarvittava voima pysyisi vakiona, suhteellisesti säädettävät venttiilit ovat erikoismuotoiltuja niin, ettei venttiilinmännän liikkumiseen varatun tilan eli ilmaraon pieneneminen kasvata liikuttamiseen tarvittavaa voimaa. [18, s.223; 20.]

Pulssinleveysmodulaatio-ohjaus perustuu solenoidin jännitteen nopeaan päälle/pois kytkemiseen, joka aiheuttaa venttiilinpäähän nopeaa pieniamplitudista värähtelyä. Venttiilinpään siirtymä riippuu siitä, kuinka pitkään jännite on päällä suhteessa jännitteettömään aikaan. [21.]

Venttiin valmistaja on ilmoittanut venttiilin virtauskerroimen laskukaavan suhteessa vedenvirtausnopeuteen NTP:ssä (m³/h). Tilanteessa, jossa venttiilin ulostulon paine on alle puolet sisääntulopaineesta:

$$k_v = \frac{q_n}{257p_1} \sqrt{T_1 \rho_n}$$

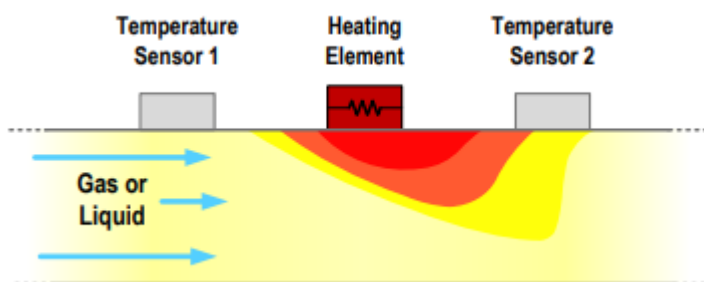
, missä k_v on virtauskerroin (m³/h), q_n on normaali virtaus (m³/h), p_1 on sisääntulopaine (bar), T_1 on keskimääräinen lämpötila ((273+t) K) ja ρ_n on kaasun normaali tiheys (kg/m³).

PWM-ohjaimesta on ilmoitettu, että sille pystyy asettamaan venttiilin ramppaukselle aikavakioksi 0 – 10 s, se pystyy ohjaamaan venttiilin asennon 4-20 mA signaalin mukaan. Venttiilin asennosta ei kuitenkaan ole takaisinkytkettyä mittaustietoa, joten suhteellisten paineensäätöventtiilien asentotietona muissa säätimissä käytetään PWM-ohjaimen saamaa ohjearvoa, joka kuitenkin todennäköisesti poikkeaa oikeasta asentoarvosta.

5.4 Terminen massavirtausmittaus

Kierrätysjärjestelmässä käytetään termisiä massavirtausmittareita, joiden anturointi käyttää MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) -teknologiaa eli mikrosysteemeitä, joilla

voidaan tarkoittaa erilaisia anturiratkaisuja kuten tässä tapauksessa lämpötilaeron mitaamista. Järjestelmässä käytetyt termiset massavirtamittaukset perustuvat kahteen lämpötilamittaukseen ja niiden välissä olevaan lämpövastukseen kuvan 15 mukaan.



Kuva 15. Kaasunlämpötila mitataan ennen lämmitin elementtiä ja sen jälkeen, jolloin pystytään kaasunlämpöominaisuudet tietäen laskea virtausnopeus. [23.]

Kyseinen massavirtausmittaus mittaa ensimmäisellä anturilla tulevan virtauksen lämpötilan, lämmittää vastuksella kaasua ja pystyy hahmottamaan kaasun lämpöominaisuuksien avulla ja vertailemalla lämpötilamittauksien jännitteitä. Laskettujen lämpöominaisuuksien mukaan anturin lähdöstä pystytään laskemaan virtausnopeus. Koska anturi pystyy erottamaan vain kaasun lämpöominaisuuden, on tiedettävä tarkkaan, mitä kaasuseosta mittarista kulkee läpi kaasujen eri lämpöominaisuuksien vuoksi. Tämän vuoksi kierrätysjärjestelmän virtausnopeusmittaus on muuttuvien ilmahelium seoksen vuoksi vaikea toteuttaa tämän tyyppisellä termisellä massavirtausmittarilla. [22; 23.]

5.5 Lämpötilamittaus

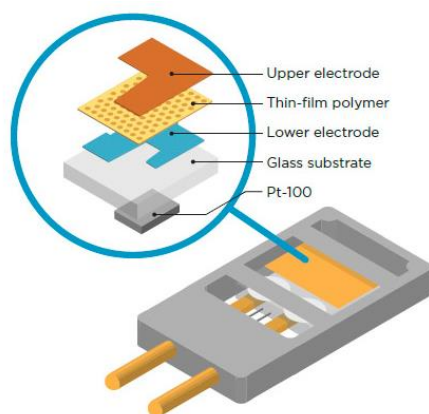
Järjestelmässä käytetään pääsääntöisesti platinasta valmistettuja vastuslämpömittareita, joiden nimellisresistanssiarvo on 100 Ω , toisin sanoen Pt-100 -antureita. Anturin lämpötila saadaan selville mittaamalla sen resistanssia, joka muuttuu Pt-100 anturilla noin $+0,385 \Omega / +1 \text{ }^\circ\text{C}$. Koska kyseinen lämpötilamittaus perustuu resistanssimittaukseen, on anturin johdinten resistanssin vaikutus mittaustulokseen vältetty ns. nelipistekytkenä. Nelipistekytkenässä anturiin syötetään vakiovirtalähteestä virta, jonka aiheuttama jännite anturissa mitataan suuri-impedanssisella mittarilla. Mittausvirhettä kuitenkin aiheuttaa anturin läpi kulkeva virta, joka aiheuttaa anturin lämpenemistä. [24.]

5.6 Konsentraatiomittaus

Järjestelmässä käytetään konsentraatiomittauskaasun heliumpitoisuuden analysoimiseen. Kaasumittauksissa huomioon on otettava näytteenotto-, kalibrointi- ja mittausmenetelmät. Koska järjestelmässä konsentraatiota käytetään järjestelmän ohjaukseen, on mittauksen ja näytteenoton oltava jatkuvaa. Järjestelmässä konsentraatiomittariin kuuluu piirilevyyn kuuluvien komponenttien lisäksi, näytteenotto-putki, näytteenottopumppu, mittapää ja näytteen palautusputki. [24.]

5.7 Kastepistemittaus

Järjestelmässä on otettava huomioon myös kaasun kastepistelämpötilan nouseminen paineen noustessa, sillä kalvoerotimet voivat vaurioitua veden päästessä kondensoitumaan niihin. Ongelma on pyritty poistamaan kompressorin jälkeisellä jäähdytin-kuivaimella, mutta kastepisteen varmistamiseksi järjestelmässä käytetään ohutkalvopolymeeritekniikkaan perustuvaa kastepisteanturia. Anturin toiminta perustuu polymeerin eristeominaisuuksien, kuten kapasitanssin muutokseen. Kuvassa 16 on kuvaus kapasiivisesta ohutkalvopolymeerianturista. [25.]



Kuva 16. Vaisalan ohutkalvopolymeeritekniikkaan perustuva DRYCAP-anturi. [25.]

Ohutkalvopolymeeri vapauttaa vesihöyryä ympäröivän kosteuden lisääntyessä tai vähentyessä, jolloin anturin kapasitanssin pystyy muuntamaan kosteuslukemaksi. Kaste-piste pystytään laskemaan anturiin liitetyn lämpötila-anturin ja kosteuslukeman pohjalta. [25.]

5.8 Järjestelmän tiedonsiirto

Järjestelmän ohjaamiseksi prosessin eri instrumenttien on pystyttävä kommunikoimaan ohjaimen eli tässä tapauksessa PLC:n kanssa. Järjestelmän tiedonsiirto sekä antureiden että toimilaitteiden ohjaimien ja PLC:n välillä tapahtuu sähköisesti, joko digitaalisilla- tai analogisilla PLC:n lähtö- ja tuloporteilla tai PROFINET-kenttäväylällä riippuen instrumentista.

Sähköisiä analogiaviestejä ovat virtaviestit ja jänniteviestit. Analogisten viestien ymmärtämiseen on sovittu ns. standardiviestit, joiden mukaan jänniteviesti tulisi olla joko 1-5 V tai 2-10 V ja virtaviesti 4-20 mA. Samoja standardiviestejä noudattaen laitteet pystyvät ymmärtämään ja käsittelemään vastaanotettua tietoa oikein. Esimerkiksi PLC:n analoginen tulokortti pystyy muuttamaan anturin 4-20 mA tiedon digitaalseksi, jonka jälkeen tietoa pystytään käsittelemään logiikassa ja päinvastoin analoginen tulokortti muuttaa logiikalta saadun digitaalisen tiedon analogiseksi virtaviestiksi toimilaitteen ohjaimelle. [17.]

PROFINET on kommunikointiprotokolla, joka on tarkoitettu digitaaliseen tiedonvaihtoon ohjaimien kuten PLC:n ja erilaisten laitteiden välillä. PROFINET käyttää kolmea eri kommunikointikanavaa, jotka soveltuvat eri tarkoituksiin.

Standardisoitu TCP/IP-protokola kanava, jolla pystytään kommunikoimaan ylempi tasoisten tietojärjestelmien kanssa. [26.]

Real Time (RT) -kanava, joka ohittaa TCP/IP -tasot käyttäen vain OSI-mallin tasoja 1 ja 2 tiedonsiirtoon. Tämän ansiosta se pystyy saavuttamaan 1-10 ms vasteajan ja soveltuu näin ollen automaatiosovelluksiin. Huomioitavaa on kuitenkin, ettei RT-kehyksiä pystytä reitittämään verkkojen välillä, koska sillä ei ole IP-osoitetta. [26; 27.]

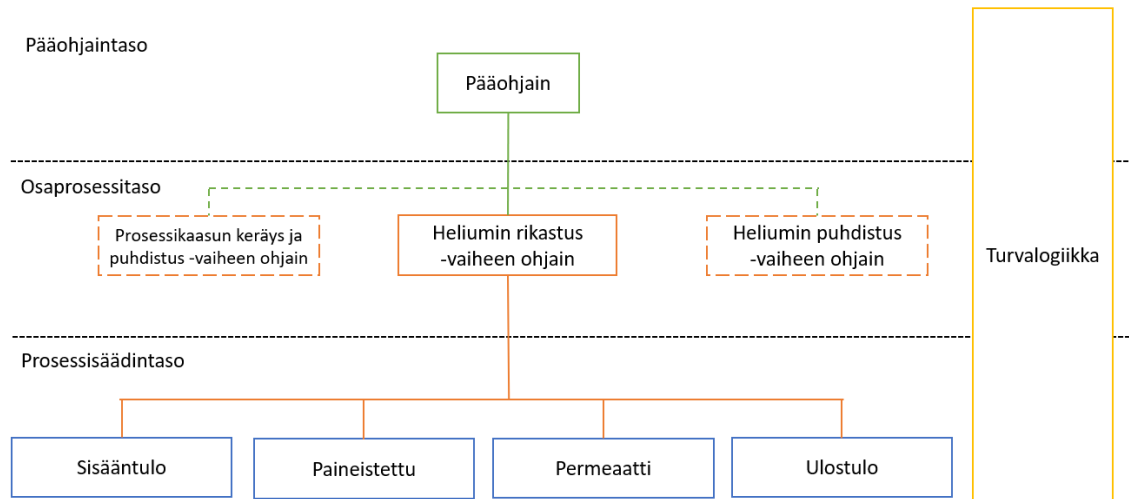
Isochronous Real Time (IRT) kanava, joka varaa ajoitetusti väylän priorisoidulle IRT-kommunikoinnille. IRT-kommunikoinnissa kummankin osapuolen on tiedettävä tarkalleen, koska väylä on tarkoitettu IRT-liikenteelle, joten osapuolten on jaettava kellotieto keskenään. Kellotiedon jakamiseen PROFINET käyttää IEEE 1588-2008 -standardin määrittelemää Precision Time Protocol:in (PTP) muunnelmaa Precision Transparent Clock Protocol (PTCP), joka kellotiedon jakamisen lisäksi pystyy laskemaan median ja kytkinten aiheuttamat viiveet väylässä nanosekunnin tarkkuudella. Tämän ansiosta kaikki IRT-kommunikoinnin osapuolet tietävät tarkalleen, koska käytetään IRT-kommunikointia. Jotta IRT-kommunikointi olisi mahdollista, väylän kummankin osapuolen ja niiden välisten kytkimien on täytettävä PROFINETin Conformance luokka C. Yksi IRT:n hyödyistä RT-kanavaan verrattuna on nopea alle 250 mikrosekunnin kierrosaika. [27.]

6 Järjestelmän ohjelmiston suunnittelu

6.1 Tasoarkkitehtuuri

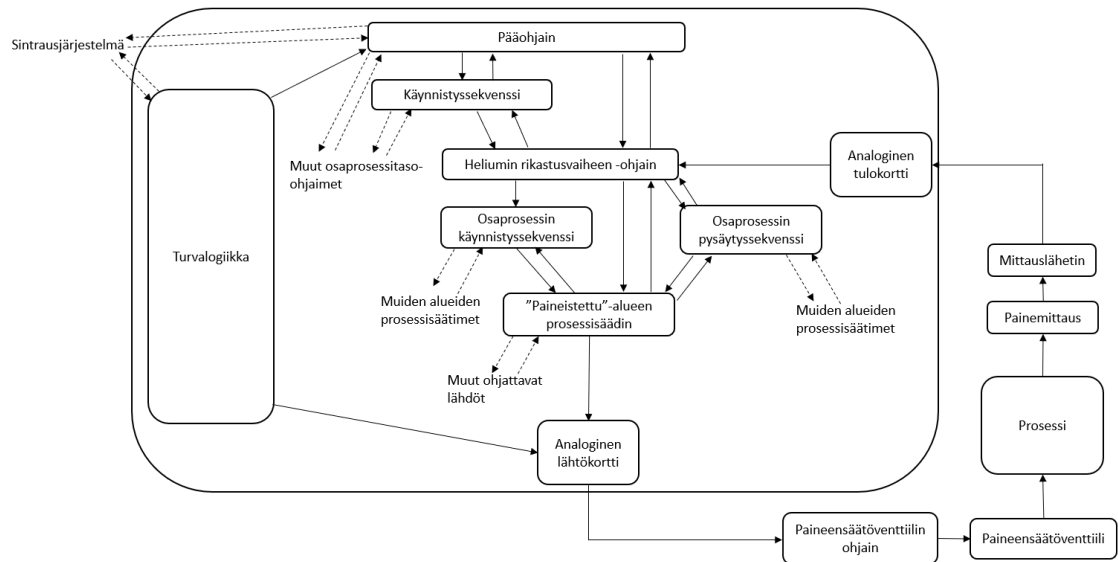
Kokonaisuuden ohjelmistosuunnittelun helpottamiseksi määritellään ohjelmalle valtahierarkia. Valtahierarkialla tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä tasoarkkitehtuuria, jossa ohjelmistomoduulit jaetaan eri tasoihin ja ylemmän tason ohjelmistomoduulit kutsuvat alemman tason palveluita tarpeen mukaan. Hierarkioita voidaan muodostaa esimerkiksi toiminnan, rakenteen tai sijainnin perusteella. [28, s.26.]

Koska onnistunut prosessi on riippuvainen kaikkien kolmen prosessivaiheen onnistumisesta, luodaan valtahierarkian ylimmälle tasolle kaikille osaprosesseille yhteinen pääohjain. Pääohjaimen tarkoitus on hallita kaikkien kolmen prosessivaiheen toimintaa, pääsekvenssiä ja koko järjestelmän yleistä tilaa. Esimerkiksi jos märkäkuivain ilmoittaa pääohjaimelle toimintahäiriöstä eikä päästä kaasuseosta pidemmälle järjestelmässä, pääohjain ilmoittaa alemman tason palveluille esimerkiksi odotustilaan siirtymisestä. Pääohjain sisältää myös rajapinnan sintrauskoneelle, josta saadaan tieto esimerkiksi, koska sintrausprosessi ottaa heliumin käyttöön. Myös turvaohjauspiirin tila menee normaaliin toimintalogiikkaan linjaohjauksen kautta pois lukien välittömät vaikutukset toimilaitteisiin. Kuvassa 17 on esitetty heliuminkierrätysjärjestelmän heliumin rikastusvaiheen tasoarkkitehtuuri.



Kuva 17. Pääohjaintasolla on pääohjain, osaprosessitasolla on kunkin vaiheen ohjaimet ja prosessisäädintason kuuluu kyseisen vaiheen säätimet.

Pääohjaintason alapuolella on osaprosessitaso, johon kuuluvat kunkin osaprosessin omat yläohjaimet. Kunkin osaprosessin yläohjaimet suorittavat pääohjaimen käskyjen mukaan oman prosessivaiheen käynnistys- ja pysäytyssekvenssin, vastaavat osaprosessin hallinnasta ja välittävät pääohjaimelle prosessivaiheen tilan. Käynnistyssekvenssissä prosessivaiheen ohjain antaa alemman tason prosessisäätimille toimilaitteiden käynnistymiskäskyt, alkuasetusarvot ja ilmoittaa pääohjaimelle käynnistyssekvenssin loppumisesta. Pysäytyssekvenssin tarkoitus on ajaa osaprosessi hallitusti lepotilaan. Osaprosessin hallinnalla prosessivaiheen ohjaimien kohdalla tarkoitetaan prosessisäädintason säätimien asetusrvojen muuttamista osaprosessin olosuhteiden muuttuessa. Kuvaan 18 on hahmoteltu signaalien kulkua paineensäädössä heliumin rikastusvaiheessa.

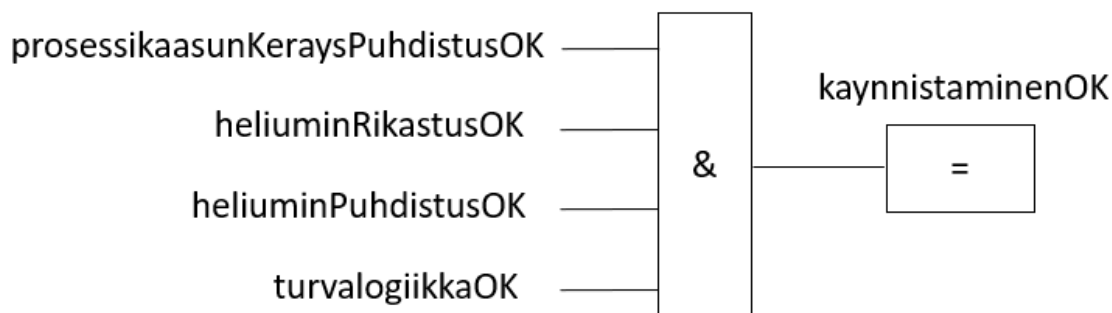


Kuva 18. Signaalien kulku heliumin rikastusvaiheen painesäädössä.

Prosessisäädintason säätimien tarkoituksena on oman alueen ohjaussuureiden säätäminen asetusarvoon mittausten ja toimilaitteiden avulla. Heliumin rikastus -vaiheelle määritellään neljä prosessisäädintä, jotka on eroteltu toisistaan selvien painetilasuure erojen vuoksi. Lisäksi paine on tärkein suure prosessivaiheen onnistumiseen. Prosessisäätimien jakaminen tässä työssä on seuraava: ”Sisääntulo” on tila ennen pääkompressoreja, ”Paineistettu” on tila pääkompressorien, paineensäätöventtiiliin ja membraanien syöttö ja rejekti puoli. ”Permeaatti” vuorostaan on membraanien permeaattipuoli uudelleen kompressointiin asti, jonka jälkeistä prosessisäädintä kutsutaan ”Ulostuloksi”.

6.2 Pääohjain

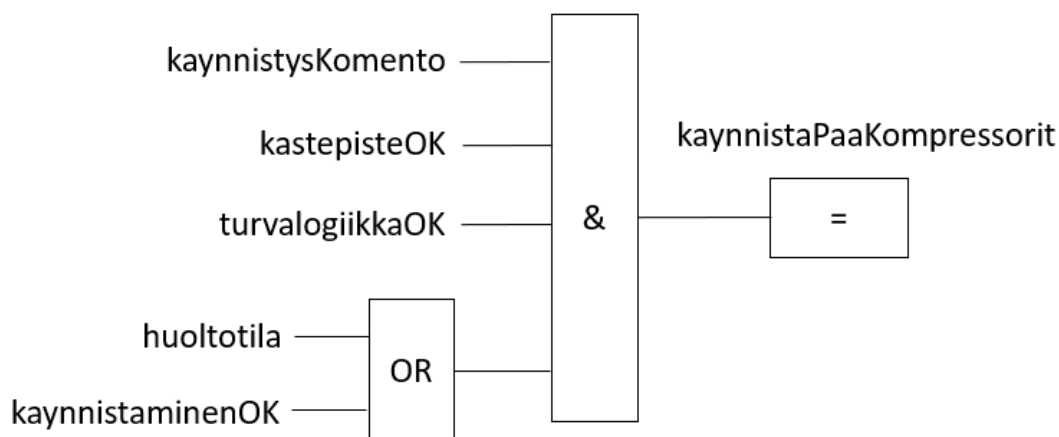
Pääohjaimen tarkoitus on muodostaa järjestelmällä yhteinen tila perustuen turvalogiikan, sintrausjärjestelmän ja eri osaprosessien tilatietoihin. Edellä mainittujen tilatietojen lisäksi pääohjaimen luodaan käyttäjävalintainen huoltotila, jonka avulla pystytään asettamaan toimilaitteiden ohjaukset käsivalinnalle ja ohittamaan käynnistys- ja pysäytyskvenssit esimerkiksi huollon tai testauksen ajaksi. Yksi yhteinen tilatieto, jonka pääohjain generoi toimintolohkolla kuvan 19 mukaisesti on ”KäynnistäminenOK”, jonka tarkoitus on sallia pääsekvenssin ja muiden osaprosessien käynnistäminen ja suorittaminen.



Kuva 19. Pääohjaimen generoima "kaynnistaminenOK" tilatieto signaali on totta vain silloin kuin kaikki osaprosessiohjaimet ja turvalogiikka ovat kunnossa.

Kuten kuvasta 19 voidaan nähdä, että myös turvalogiikan tilatieto tuodaan "kaynnistaminenOK":n ehdoksi, koska ilmeisesti sen tehtävänä on myös estää prosessin käynnistäminen. "turvalogiikkaOK"-tieto generoidaan pääohjaimen samalla tavalla kuin kuvan 19 "kaynnistaminenOK"-tieto, mutta ehtoina on mm. hätä-pysäytyssignaalit.

Yksi oleellinen tilatieto järjestelmälle on myös huoltotila. Huoltotilassa pystytään käyttämään toimilaitteita yksittäin ilman automaattisia prosessisekvenssejä. Toimilaitteiden käyttäminen vaatii kuitenkin "turvalogiikkaOK"-signaalin ja toimilaitteen sisäisiä käynnistämisen sallimissignaaleja, jotka muodostuvat esimerkiksi järjestelmän mittaussuureista. Jotkut sisäiset sallimissignaalit voidaan ohittaa huoltotilalla, mutta joitain ei. Esimerkiksi pääkompressoreita ei pystytä käynnistämään huoltotilasta huolimatta, mikäli sen jälkeinen kastepistemittaus ei ole sallitulla tasolla. Liian korkealla kastepistelämpötilalla kompressoitu ja jäähdytetty ilma voi kondensoitua vedeksi membraaneilla aiheuttaen vahinkoa niihin. Yllämainittua pääkompressorin käynnistyskäskyä voidaan kuvata toimilohkona kuvan 20 mukaan.



Kuva 20. Pääkompressorien käynnistämiskäskey normaalissa ohjelmalogiikassa. Pääohjaimen "kaynnistaminenOK"-signaali pystytään ohittamaan "huoltotila"-signaalilla.

Kuvasta 20 nähdään, että mikäli huoltotila on päällä pääohjaimen "kaynnistaminenOK"-tilatieto ei pysty estämään pääkompressorien käynnistämistä. Ilmiselvää on myös, että "kaynnistaminenOK"-signaali ei pysty olemaan totta, mikäli "kastepisteOK"-signaali on epätosi, sillä silloin "heliuminRikastusOK" on myös epätosi. Mutta huoltotilalla pystytään ohittamaan muiden toimilaitteiden "kastepisteOK"-signaalia vastaavat sisäiset estot.

Yksi pääohjaimen tehtävistä on myös toimia rajapintana sintrausjärjestelmälle. Rajapinnan toteuttaminen on rajattu tästä opinnäytetyöstä pois, koska se ei ole tällä hetkellä ajankohtainen. Ajatuksen tasolla lähetettävänä signaaleina voisi esimerkiksi olla, "käynnistaminenOK", "varoitustaPaalla", "vikaPaalla", "hatapysaytys", "prosessiPaalla" ja "elavaNumero", josta nähdään yhteyden toimivuus. Lisäksi sintrausjärjestelmälle voidaan lähettää tieto esimerkiksi kerätyn heliumin määrästä viimeprosessissa ja koko aikana. Sintrausjärjestelmältä vastaanotettuina signaaleina voisi olla sintrausuuniin menevä heliuminmäärä, "AutomaattiTila", jolloin kierrätysjärjestelmä aloittaa prosessin, kun sintrausjärjestelmä käyttää tietyn rajan ylittävän määrän heliumia, "KaynnistaProsessi", "PysaytaProsessi", "Estalmu", jolloin kierrätysjärjestelmä ei saa imeä kaasuseosta sintrausjärjestelmän prosessikaasujen poistoputkesta. Pääohjaimen tehtävänä on siis kerätä lähetettävät signaalit yhdeksi datapaketiksi ja lähettää ne oikeaan osoitteeseen, sekä jakaa vastaanotettu data oikeisiin muistipaikkoihin vastaamaan saatua tietoa. Edellä mainitut signaalit voitaisiin pakata seuraavasti, lähetettävät 8(boolean) + 8 (short integer) + 16 (integer) + 32 (double integer) = 64 bit ja vastaanotetut 16 (boolean) + 16 (integer) = 32 bit.

6.3 Osaprosessien ohjaimet

Osaprosessitason ohjainten tarkoitus on ohjata oman prosessivaiheen prosessitasonsäätimiä. Lisäksi osaprosessitason ohjainten vastuulla on toteuttaa oman prosessivaiheen käynnistämisen- ja pysäyttämissekvenssit. Käynnistämissekvenssissä prosessisäädin siis antaa asetusarvoja ja käynnistymiskäskyjä toimilaitteiden säätimille tietyssä järjestyksessä. Pysäytyssekvenssi vuorostaan toteutetaan, kun prosessi on päätetty lopettaa. Sen tehtävänä on pysäyttää toimilaitteet hallitusti oikeassa järjestyksessä. Pysäytyssekvenssiä ei kuitenkaan toteuteta, mikäli hätäpysäytys on aktiivisena, sillä yksikösäätimet ovat siirtyneet jo turvalliseen tilaan/pysähtyneet. Huomioitava asia on kuitenkin, että esimerkiksi huoltotila, ohittaa prosessisäätimien ohjaukset, jolloin käyttäjä pystyy antamaan suoraan asetusarvoja toimilaitteille.

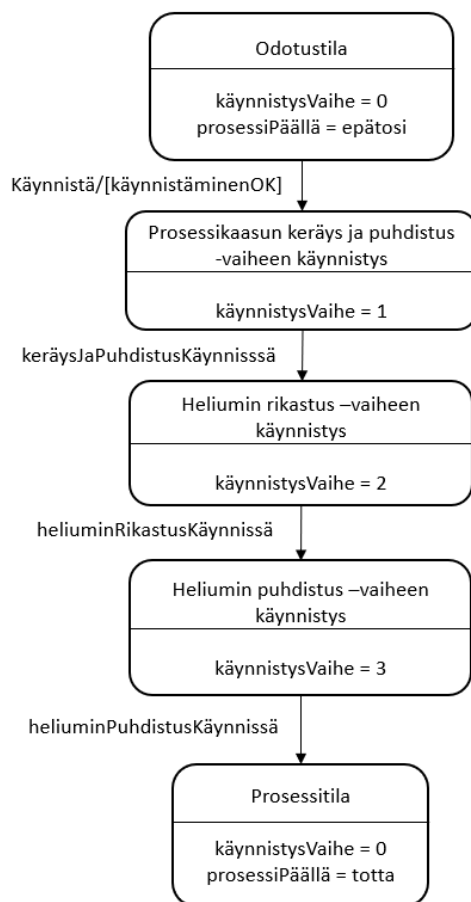
6.4 Prosessisäädintaso

Prosessitason säätimien tarkoitus on ohjata säädettävien toimilaitteiden ohjattavat suuret siihen tilaan, jotta säädettävä suure olisi mahdollisimman lähellä säätimelle annettua asetusarvoa. Esimerkkeinä voidaan pitää permeaattipuolen kompressoria, jolle annetaan asetusarvoksi imupuolen paineen pitäminen vakiona tietyssä arvossa. Tällöin prosessisäätimen tehtävänä on antaa kompressorin moottorin taajuusmuuttajalle tietty nopeuden asetusarvo ja muokata tätä painemittauksen takaisinkytkennän mukaan ohjausalgoritmillä.

6.5 Käynnistyssekvenssi, prosessitila ja pysäytyssekvenssi

Lopullisessa järjestelmässä on tarkoituksena, että operaattorilla on ohjauksista käytössä vain käynnistys/pysäytys-painike ja hätäseis-painike. Operaattori pystyy käynnistämään siis prosessin käynnistyssekvenssin, mikä suorittaa kaikki vaaditut toimenpiteet vaaditussa järjestyksessä. Esimerkiksi käynnistyssekvenssi antaa prosessikaasunkeräys- ja puhdistusohjaimelle käynnistyskäskyn, odottaa vaiheen käynnistymistä, kunnes saa kuittauksen. Kuittauksen jälkeen käynnistyssekvenssi siirtyy seuraavan osan käynnistä-

miseen ja viimeisen kuittauksen jälkeen sekä käynnistyssekvenssi päättyy, että pääohjain siirtyy prosessitilaan. Tilakaaviona esitettynä käynnistyssekvenssi voisi olla kuvan 21 mukainen.



Kuva 21. Pääohjaimen käynnistyssekvenssi käynnistää osaprosessivaiheita, kunnes on saavuttanut prosessitilan ja käynnistyssekvenssi loppuu.

Prosessitilassa pääohjain valvoo yleistä tilaa ja suorittaa pysäytyssekvenssin tarvittaessa. Kun taas osaprosessitason ohjaimet ohjaavat prosessin käyttäytymistä antamalla asetusarvoja prosessisäädintason säätimille, jotka vuorostaan säätävät toimilaitteita säätöalgoritmien mukaan.

Pysäytyssekvenssi toteutetaan silloin, kun prosessi halutaan lopettaa operaattorin painaessa käynnistä/pysäytä-painiketta. Pysäytyssekvenssin ajatuksena on antaa käsky osaprosessien ohjaimille prosessin pysäyttämiseksi samalla ajatuksella kuin käynnistys-

sekvenssissä. Näin prosessi saadaan lopetettua hallitusti ja mahdollisimman pienellä rasituksella järjestelmälle. Vikatiloissa ja hätäpysäytyksissä pysäytyssekvenssiä ei ajeta vaan toimilaitteet pysäytetään tarvittavien aikavaatimusten mukaan.

7 Järjestelmän ohjauksen suunnittelu

Tällä hetkellä järjestelmälle on luotu eri tasoiset ohjaimet ja jaettu niiden vastuualueet. Seuraavaksi tarkastellaan, miten ohjaus mahdollisesti pystyttäisiin toteuttamaan heliumin rikastusvaiheessa. Ohjauksen toteuttaminen jää opinnäytetyössä vain teoria tasolle ja voi muuttua oikeassa järjestelmässä testausten aikana prosessille sopivammaksi.

Prosessin toimimisesta on luotu simulaatioita, joista pystytään näkemään prosessin toimintopisteet riippuen järjestelmään sisään tulevan kaasuseoksen konsentraatiosta ja virtauksesta. Simulaatiosta voidaan siis nähdä, kuinka paljon virtausta järjestelmään on saatava kompressoreilla ja mikä paine on pidettävä ”paineistetulla puolella”, ”prosessin takaisinkytkennässä” ja ”permeaattipuolella”. Esimerkiksi, mikäli heliumin rikastamisvaiheeseen tulee kaasuseosta, jonka heliumpitoisuus on 12,4 % ja virtaus 137 l/min, ”paineistetun puolen” virtauksen ollessa 328 l/min ja paineen ollessa 9,7 bar, ”prosessin takaisinkytkentä” paineen 1,4 bar ja permeaattipuolen paineen 0,0 bar, simulaation mukaan permeaattipuolelle pääsee koostumukseltaan 94,9 % heliumpitoista kaasua 17 l/min. Kuten simulaatioesimerkistä voidaan nähdä, prosessisäätimen on annettava kyseisille toimilaitesäätimille asetusarvot sen mukaan, mikä virtaus ja mikä konsentraatio on sisään tulevalla kaasuseoksella. Yksi testaamisella selvitettävä asia on, millä taajuudella pääkompressorien moottoreita tulee ohjata, jotta saavutetaan vaadittava virtaus. Tässä vaiheessa voidaan todeta, että vaadittava virtaus on silloin, kun ”permeaattipuolelle” tuleva kaasuseos ja virtaus ovat samat kuin simulaatiossa, jos järjestelmään syötetään simulaation mukaista kaasuseosta ja painemittaukset ovat simulaation mukaiset. [29.]

Käytössä olevien kolmen simulaation avulla saadaan luotua kuvan 22 mukaiset kaaviot toimintopisteille.

Permeaattipuolen paine = 0 bar							
Sisääntuleva virtaus [lpm]	Sisääntulo paine [bar]	Sisääntulo Helium konsentraatio [%]	Kompressorin tuottama virtaus [lpm]	Prosessi paine [bar]	Prosessin takaisinkytkennän paine [bar]	Permeaattipuolen Helium konsentraatio [%]	Permeaattipuolen virtaus [lpm]
137	0,01	12,4	328	9,7	1,4	98,9	17
145	0,01	17,2	352,6	9,7	2	99,1	24
150	0,01	20	359,9	9,7	2,4	99,2	30

Kuva 22. Permeaattipuolen paineen ollessa 0 bar simulaation antamat arvot osaprosessin suu-
reille.

Kuvasta 22 voidaan nähdä, että permeaattipuolen paine pyritään pitämään 0,0 barissa, mikä tarkoittaa, että prosessisäätimen ei tarvitse vaihtaa permeaattipuolen paineen asetusarvoa sisään tulevan kaasuseoksen mukaan. Paineistetulla puolella vuorostaan täytyy säätää pääkompressorien tuottaman virtauksen, prosessin paineen ja prosessin takaisinkytkennän paineen asetusarvoja sisään tulevan kaasun virtauksesta ja konsentraatiosta riippuen.

Permeaattipuolen paine pyritään siis pitämään 0,0 barissa ja permeaattipuolen kompressorin moottorin taajuutta on säädettävä sen mukaan. Testivaiheessa luodaan permeaattipuolen kompressorille PID-säädin, joka säätää moottorin taajuutta tietyssä suhteessa kompressorin imupaineeseen. PID-säätimen ulostuloa eli taajuuden asetusarvoa on myös rajoitettava moottorin toimialueelle. Riittävän kattavan testaustiedon avulla permeaattipuolen kompressorin ohjaukseen voi olla mahdollista rakentaa myötäkytkentä, joka kompensoisi järjestelmän sisään tulevan virtauksen ja konsentraation suhdetta permeaattipuolen virtaukseen ja sen suhdetta moottorin taajuuteen.

Paineistetun puolen asetusarvojen laskeminen prosessin toimintopisteisiin sisään tulevan virtauksen ja konsentraation perusteella ennen testejä vaikuttaa hankalalta. Toimintopisteiden laskemisen vaikeus johtuu kolmen asetusarvon säätämisestä, joiden vaikutus prosessiin ei selviä edellisistä simulaatiotuloksista. Tämän takia laskenta kannattaa toteuttaa vasta testien jälkeen, jolloin todelliset toimintopisteet ovat selvillä.

Yksi testattavista suureista on pääkompressorien tuottama virtaus paineistetulle puolella, koska prosessissa ei ole luotettavaa mittausta tällä hetkellä vaihtuvan kaasuseoksen virtausmittaukseen. Paineistetun puolen virtaus on yksi prosessin onnistumiseen vaikuttavista toimintopisteistä, jonka vuoksi sen suhde sisään tulevaan heliumin konsentraatioon nähden on tunnettava. Testaus voidaan toteuttaa asettamalla prosessipaineen asetusarvo 9,7 bariin, permeaattipuolen paine 0,0 bar ja säätämällä prosessin takaisinkytkennän paineen asetusarvoa niin, että saadaan permeaattipuolelle lähes simulaation

mukainen heliumkonsentraatio (98,5 - 99,2 %) ja virtaus (yli 95 % järjestelmään syötystä heliumista) pääkompressorien pyöriessä vakiotajuudella. Koska simulaatioiden perusteella tiedetään, että prosessin takaisinkytkennän paineen ollessa isompi kompressorien tuoton on oltava suurempi, jotta päästään simuloituun permeaattipuolen virtaukseen ja näin ollen pystytään hahmottamaan, millainen virtaus on paineistetulla puolella. Testin avulla pystytään laskemaan pääkompressorien pyörimisnopeuden vaikutus paineistetun puolen virtaukseen tietyllä sisään tulevalla helium konsentraatiolla ja virtauksella. Huomioitavaa on kuitenkin, ettei sisään tulevasta virtauksesta saada luotettavaa mittaustulosta. Sillä kyseinen terminen massavirtausmittari on kalibroitu tietylle heliumilma kaasuseokselle ja mikäli sisään tulevan kaasun konsentraatio on alle kalibroidun seoksen, tiedetään, että mittauslaitteen antama tieto on todellista virtausta pienempi. Mikäli permeaattipuolen paineen ollessa 0 baria ja haluttuihin toimintopisteihin ei päästä, voidaan pääkompressorien pyörimisnopeutta muuttaa. Tämän jälkeen toteutetaan sama testi eri permeaattipuolen paineilla (esimerkiksi 1 bar ja 2 bar), asetetaan prosessipaine kyseistä simulaatiota vastaavaksi ja yritetään löytää simulaatioita vastaavat arvot. [30.]

Toimintopisteiden löytämisen jälkeen heliumin rikastusprosessivaiheen säätämiseen rakennetaan monimuuttujasäätö, jonka sisääntuloina ovat sisääntulon sekä virtaus että helium-konsentraatio ja ulostuloina prosessipaineen, pääkompressorien nopeuden, prosessin takaisinkytkentä paineen ja permeaattipuolen paineen asetusravot.

8 Yhteenveto

Insinööriyön alkuperäisenä tarkoituksena oli löytää säätöratkaisu heliumin rikastusvaiheeseen, mutta automaation ohjelmistosuunnittelu ja ohjelmiston luonti olivat insinööriyön aikana ajankohtaisemmat. Tämän vuoksi insinööriyön rajausta muutettiin koskemaan enemmän automaatio-ohjelmistosuunnittelua, joka oli toteutettava siten, että prosessien toimintopisteiden etsiminen olisi mahdollista osaprosesseissa erikseen. Lisäksi ohjelmiston suunnittelussa oli otettava huomioon toimintopistetestauksien jälkeen tapahtuva automatisointi ja osaprosessien yhdistäminen toisiinsa. Insinööriyössä luodun ta-soarkkitehtuurin mukaan pystyttiin toteuttamaan modulaarinen rakenne ohjelmistolle, joka mahdollistaa osaprosessien testaamisen erikseen kuin myös helpon yhdistämisen yhdeksi prosessiksi.

Insinööriyössä tuotiin myös esille prosessille mahdollisesti hyödyllisiä säätöratkaisuja, joiden käyttömahdollisuuksia pohdittiin heliumin rikastusprosessivaiheessa sen tullessa ajankohtaiseksi. Lisäksi insinööriyön lopussa esiteltiin heliumin rikastusprosessivaiheiden toimintopisteiden testaamiseen käytettäviä tapoja, joilla mahdollisesti pystytään ymmärtämään prosessin suureiden yhteyksiä ja tätä kautta hakemaan lopullista säätöratkaisua.

Lähteet

- 1 About Rosendahl Nextrom. Verkkoaineisto. Rosendahl Nextrom GmbH. <<http://www.rosendahlnextrom.com/fiber-optics/corporate/in-brief/>>. Luettu 24.9.2019.
- 2 Our Test Laboratories. Verkkoaineisto. Rosendahl Nextrom Oy. <<http://www.rosendahlnextrom.com/fiber-optics/corporate/technology-center/>>. Luettu 24.9.2019.
- 3 Juntunen, Ville. 2015. Optiset kuidut. Opinnäytetyö. Savonia-Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 4 Optical fibers – Principle of operation. Verkkoaineisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <<https://wiki.metropolia.fi/display/Physics/Optical+fibers+-+Principle+of+operation>>. Luettu 25.10.2019.
- 5 Fiber Optics: Understanding Basics. Verkkoaineisto. Photonics. <https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Optics_Understanding_the_Basics/a25151>. Luettu 25.10.2019.
- 6 Gyroscope Fiber. Verkkoaineisto. Fiber Core. <<https://www.fibercore.com/expertise/fiberpaedia/gyroscope-fiber>>. Luettu 25.10.2019.
- 7 Manufacturing of Optical Fibers. Verkkoaineisto. Metropolia Ammattikorkeakoulu. <<https://wiki.metropolia.fi/display/Physics/Manufacturing+of+Optical+Fibers>>. Luettu 25.10.2019.
- 8 L. Cognolato. 1995. Chemical Vapour Deposition for Optical Fibre Technology. Verkkoaineisto. HAL. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00253785/document>>. Luettu 25.10.2019.
- 9 Santos, José Luís & Faramarz, Farahi. 2015. CRC Press. USA. Handbook of Optical Sensors.
- 10 OFC 08. Verkkoaineisto. Rosendahl Nextrom Oy. <<http://www.rosendahlnextrom.com/fiber-optics/manufacturing-solutions/telecom-fibers-and-preforms/ofc08/>> Luettu 11.9.2019.
- 11 OFC 17. Verkkoaineisto. Rosendahl Nextrom Oy. <<http://www.rosendahlnextrom.com/fiber-optics/manufacturing-solutions/telecom-fibers-and-preforms/ofc-17/>>. Luettu 27.10.2019.

- 12 Silvonon, Toni. 2019. Sähkötekkinen tyyppiratkaisu laitteelle Nextrom Deuterium Treatment System (NDS). Opinnäytetyö. Oulun ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 13 Helium recovery during fiber draw. Verkkoaineisto. Rosendahl Nextrom Oy. <<http://www.rosendahlnextrom.com/fiber-optics/helium-recovery/>>. Luettu 20.9.2019.
- 14 Halford, Daniel Thomas. 2018. Isotopic Analyses of helium from wells located in the four corners area, Southwestern, US. <https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/172822/Halford_mines_0052N_11643.pdf?sequence=1&is-Allowed=y>. Luettu 12.10.2019.
- 15 Mäkelä, Mikko. 2006. Kalvoerotusmenetelmien käyttö kemianteollisuudessa. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 16 Ellman, Asko., Hautanen, Juha., Järvinen, Kari & Simpura, Antti. 2002. Edita. Pneumatiikka.
- 17 Savolainen, Jari & Vaitinen, Reijo. 2007. Suomen Robotiikkayhdistys Ry. Säädetekniikan perusteita.
- 18 Krishnaswamy, K. 2011. New Age International Publishers. Process Control.
- 19 Paineilmatekniikka. Verkkoaineisto. Kaeser Kompressorit. <<https://fi.kaeser.com/download.ashx?id=tcm:24-5981>>. Luettu 25.10.2019.
- 20 Bhojkar, Amit. 2004. Fault Simulator For Proportional Solenoid Valves. Thesis. University of Saskatchewan.
- 21 Proportional Control Solenoid Valve. Verkkoaineisto. Tameson. <<https://tameson.com/proportional-solenoid-control-valve.html>>. Luettu 25.10.2019.
- 22 Tomukorpi, Vesa. 2011. Kaasuvirtauksen eri mittausmenetelmiä. Opinnäytetyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 23 Thermal Mass Flow Sensors for Gas and Liquid Applications. Verkkoaineisto. Integrated Device Technology, Inc. <<https://www.idt.com/us/en/document/whp/whitepaper-mems-mass-flow-sensor>>. Luettu 4.11.2019.
- 24 Ikonen, Erkki., Lehto, Ari., Wallin Pekka & Äijälä Anu. 1996. Teknillinen korkeakoulu. Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Mittaustekniikan laboratorio. Anturitekniikan perusteita, 3.painos.

- 25 Vaisala DRYCAP ® -tekniikka. Verkkoaineisto. Vaisala. <<https://www.vaisala.com/fi/vaisala-drycapr-technology>>. Luettu 4.11.2019.
- 26 PROFINET Technology. Verkkoaineisto. PI North America. <<https://us.profinet.com/technology/profinet/>>. Luettu 25.10.2019.
- 27 Isochronous Real Time (IRT) Communication. Verkkoaineisto. PROFINET University. <<https://profinetuniversity.com/profinet-basics/isochronous-real-time-irt-communication/>>. Luettu 25.10.2019.
- 28 Automaatiosovellusten ohjelmistokehitys. 2005. Suomen Automaatioseura ry.
- 29 Rosendahl Nextrom Oy. Sisäinen dokumentti. Luettu 15.10.2019.
- 30 Rosendahl Nextrom Oy. Sisäinen dokumentti. Luettu 15.10.2019.