

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Radiaalikompressoritestiaseman käyttöönotto

Commissioning of a centrifugal compressor test stand

Työn tarkastaja: TkT Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaajat: TkT Ahti Jaatinen-Värri

TkT Petri Sallinen

Lappeenranta 5.10.2015

Eetu Rantala

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Eetu Rantala

Opinnäytteen nimi: Radiaalikompressoritestiaseman käyttöönotto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2015

28 sivua, 10 kuvaa, 1 taulukko ja 4 liitettä

Hakusanat: kompressoritestiasema, suurnopeusradiaalikompressori, tiedonkeruu

Tässä kandidaatintyössä käsitellään Lappeenrannan teknilliseen yliopistoon rakennettua radiaalikompressoritestiasemaa ja sen käyttöönottoa. Käyttöönottoa varten selvitetään laitteiston toimintaperiaatetta ja standardinmukaisuutta.

Testiasemassa voidaan koeajaa erityyppisiä radiaalikompressoreja ja laskea niille tunnuslukuja. Kompressorin tunnuslukujen laskemista varten mitataan prosessin eri vaiheista paine, lämpötila, massavirta ja kosteus. Mittaustulokset kerätään tiedonkeruujärjestelmällä tietokoneelle. Mittausohjelmaan syötetyillä yhtälöillä lasketaan tunnusluvut koeajetulle kompressorille.

Työssä on esitelty testiaseman laitteisto ja sen toiminta, käytössä olevat mittalaitteet sekä mittausohjelma yhtälöineen. Liitteissä on mittauspöytäkirja, komponenteista kerätyt tunnistetiedot ja mittausohjelman kanavalista.

SISÄLLYSLUETTELO

Symboliluettelo	5
1 Johdanto	8
2 Yleiskuvaus kompressoritestiasemasta	9
2.1 PI-kaavio	9
2.2 Laitteisto	11
3 Mittalaitteet	15
3.1 Painemittaus	15
3.2 Lämpötilamittaus	15
3.3 Massavirtamittaus	16
3.4 Kosteusmittaus	18
3.5 Ympäristön olosuhteiden mittaus	19
4 Mittausohjelma	20
4.1 Tiedonkeruulaitteisto	20
4.2 Mittausohjelmassa käytetyt yhtälöt	20
4.2.1 Lämpötila	21
4.2.2 Paine	22
4.2.3 Tilavuus- ja massavirta	23
4.2.4 Virtausnopeus	23
4.2.5 Kosteus	24
4.2.6 Kaasuvakio	25
4.2.7 Tiheys	26
4.2.8 Reynoldsin luku	26
4.2.9 Ominaislämpökapasiteetti	27
4.2.10 Kaasuteho	28
4.2.11 Isentrooppihyötysuhde	28
5 Yhteenveto	31
Lähdeluettelo	32

Liite 1. Radiaalikompressorin mittauspöytäkirja	34
Liite 2. Komponenttien tunnistetiedot	35
Liite 3. Tiedonkeruulaitteiston tunnistetiedot	36
Liite 4. Mittausohjelman kanavalista	37

SYMBOLILUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	putken poikkipinta-ala	[m ²]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
D	putken halkaisija	[m]
h	entalpia	[J/kg]
k_1	virtausvakio	$\left[\sqrt{\frac{\text{kg}\cdot\text{m}^3}{\text{s}^2\cdot\text{mbar}}} \right]$
M	moolimassa	[g/mol]
p	paine	[Pa]
Δp	paine-ero	[mbar]
P	kaasuteho	[W]
q_m	massavirta	[kg/s]
q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
R	kaasuvakio	[J/kgK]
R_u	yleinen kaasuvakio	[J/molK]
T	lämpötila	[K]
v	ominaistilavuus	[m ³ /kg]
w	virtausnopeus	[m/s]

Kreikkalaiset aakkoset

η	hyötysuhde	[-]
μ	dynaaminen viskositeetti	[Ns/m ²]
π	painesuhde	[-]

ρ	fluidin tiheys	[kg/m ³]
ω	kosteussuhde	[kg _{vesi} /kg _{ilma}]
φ	suhteellinen kosteus	[-]

Dimensiottomat luvut

C_D	virtausmittarin kerroin
F_a	materiaalin lämpölaajenemiskerroin
Pr	Prandtlin luku
Re	Reynoldsin luku
Y	kaasun laajenemiskerroin

Yläindeksit

'	kylläinen
---	-----------

Alaindeksit

0	kokonais-
1	ennen kompressoria
2	kompressorin jälkeen
cr	kriittinen
h	höyry
i	ilma
k	kostea
r	recovery
s	isentropinen
ts	kokonais-staattinen-

tt	kokonais-kokonais-
u	yleinen
v	vesihöyry
ymp	ympäristö

1 JOHDANTO

Radiaalikompressoritestiasema sijaitsee Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan laboratoriossa. Se on rakennettu 2013-2015 aikana ja on käyttöönottoaiheessa. Testiasemassa voidaan koeajaa erilaisia radiaalikompressoreja ja laskea niille tunnuslukuja. Tärkeimpiä tunnuslukuja kompressoreille ovat esimerkiksi hyötysuhde, painesuhde ja teho. Testiaseman tärkein perustehtävä on tuottaa kaikille avoimeksi tarkoitettua dataa muiden tutkijoiden käyttöön. Lisäksi sillä voidaan tuottaa kaupallisia mittauksia sellaisista kiinnostuneille yrityksille.

Testiasemassa on suljettu kierto ja kiertoaineena on ilma. Suljetussa kierrossa voidaan vähentää olosuhteiden vaihtelusta johtuvia vaikutuksia kiertoaineen ominaisuuksiin. Testiaseman tärkeimmät suunnitteluparametrit ovat: massavirta 1.8 kg/s, painesuhde 2.5 ja teho 200 kW. Kompressoria ohjataan suoravetoisesti taajuusmuuttajaohjatulla sähkömoottorilla. Mittaustulokset kerätään tietokoneelle tiedonkeruujärjestelmällä.

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on dokumentoida testiasemassa käytetty laitteisto ja helpottaa sen käyttäjiä ymmärtämään laitteiston toimintaa. Komponenttien nimet ja sarjanumerot on kerätty, jotta mahdollisen vian sattuessa komponenteista on olemassa tunnistetiedot.

2 YLEISKUVAUS KOMPRESSORITESTIASEMASTA

Kompressorin juoksupyörä on suunniteltu Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Suunnittelu on esitetty lähteessä (Naukkarinen 2013). Kuvassa 1 oleva kompressorin runko sekä magneettilaakerit ja sähkömoottori ovat Sulzer Oy:n toimittamat.



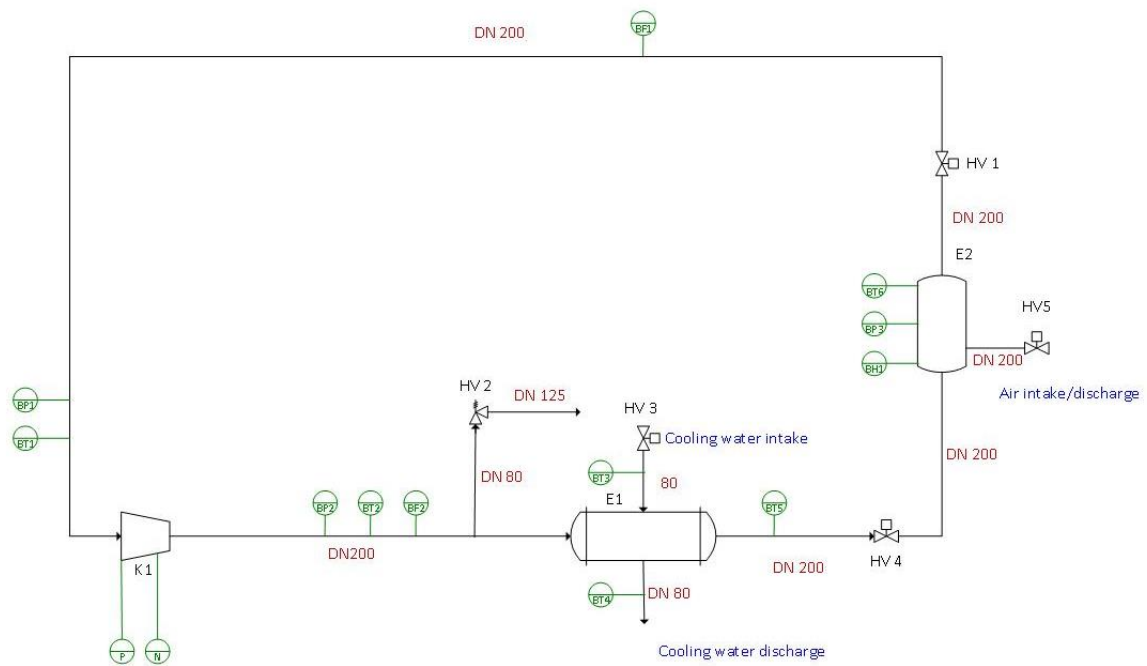
Kuva 1. Kompressorin runko sekä imu- ja poistoputki

2.1 PI-kaavio

Testiaseman prosessi toimii seuraavasti: ennen kompressoria mitataan virtaavan ilman paine, lämpötila ja massavirta. Kompressori imee ilmaa ja puristaa sen korkeampaan paineeseen. Puristetun ilman paine, lämpötila ja massavirta mitataan. Lämmönvaihdin jäädyttää ilman ja samalla mitataan lämmönvaihtimen jäähditysveden sisään- ja ulostulolämpötila. Lämmönvaihtimen jälkeen mitataan ilman lämpötila ja sen painetta alennetaan paineenalennusventtiilillä. Tämän jälkeen ilma virtaa säiliöön, jossa paine,

lämpötila ja suhteellinen kosteus mitataan. Virtaavan ilman määrää säiliön jälkeen voidaan säätää venttiilillä.

Kuvassa 2 on esitetty kompressoritestiaseman PI-kaavio. Taulukossa 1 on esitetty PI-kaaviossa näkyvät tunnuksat ja niitä vastaavat toimilaitteet.



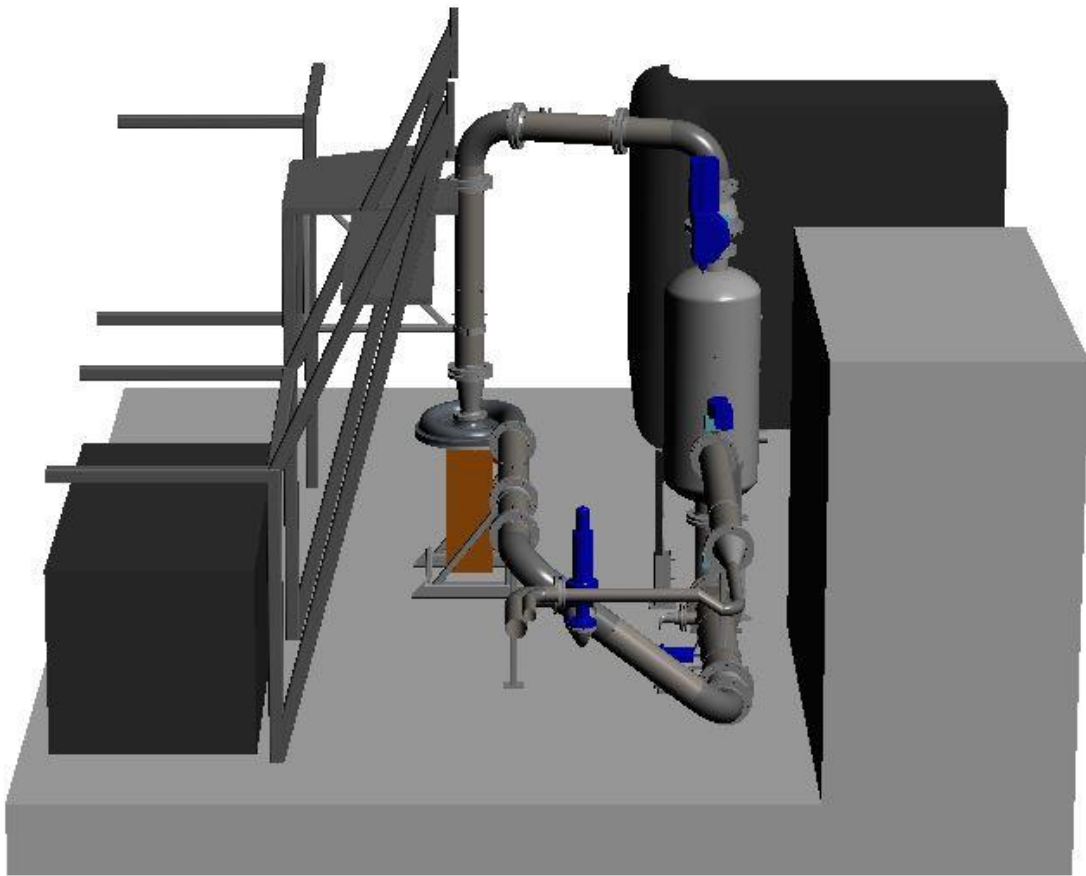
Kuva 2. Kompressoritestiaseman PI-kaavio

Taulukko 1. PI-kaavion selitykset

Tunnus	Toimilaite
BF1	Massavirtamittaus sisääntulo
BF2	Massavirtamittaus poisto
BH1	Suhteellisen kosteuden mittaus
BP1	Painemittaus sisääntulo
BP2	Painemittaus poisto
BP3	Painemittaus säiliö
BT1	Lämpötilamittaus sisääntulo
BT2	Lämpötilamittaus poisto
BT3	Lämpötilamittaus jäähdytysvesi sisään
BT4	Lämpötilamittaus jäähdytysvesi ulos
BT5	Lämpötilamittaus lämmönvaihtimen jälkeen
BT6	Lämpötilamittaus säiliö
E1	Lämmönvaihdin
E2	Säiliö
HV1	Venttiili ilma sisään
HV2	Venttiili turvalaukaisin
HV3	Venttiili jäähdytysvesi
HV4	Venttiili paineenalennus
HV5	Venttiili ilma sisään/ulos
K1	Kompressori
P	Kompressorin ottama sähköteho
N	Pyörimisnopeusmittaus

2.2 Laitteisto

Radiaalikompressoritestiaseman tärkeimmät suuret komponentit ovat putkisto, lämmönvaihdin, säiliö ja venttiilit. Komponenttien suunnittelu on esitetty lähteessä (Chernov 2013). Kuvassa 3 on esitetty kompressoritestiaseman asemapiirustus, josta nähdään laitteiston sijoittelu.



Kuva 3. Kompressoritestiaseman asemapiirustus

Ilmavirtauksen putkikoko on pääasiassa DN200. Putkien paineluokka on PN10. Putken ulkohalkaisija on 219 mm ja sisähalkaisija 213,5 mm. (Chernov 2013, 46)

Kuvassa 4 on esitetty kompressorin poistoputki. Jäähdytysveden putken koko on DN80. Turvaventtiilille menevän putken koko on DN80 ja siltä lähtevä DN125.



Kuva 4. Poistoputki DN200

Kompressoritestiasemassa on suljettu kierto, joten kompressoitun ilman jäähdyttämiseen tarvitaan lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimena toimii putki-vaippa-tyyppinen lämmönvaihdin, joka on esitetty kuvassa 5. Vaippapuolella jäähdyttävänä nesteinä toimii vesijohtovesi. Lämmönvaihtimen suunnitteluparametrit ovat: paine 6 bar, lämpötila 10 °C ja massavirta 4 kg/s. (Chernov 2013, 32)



Kuva 5. Lämmönvaihdin

Virtaussuunnassa lämmönvaihtimen jälkeen on säiliö. Säiliön tarkoituksena on tasata virtausta ja minimoida virtauksen painevaihteluja. Tällä tavalla saadaan kompressorin imupuolelle tarkoituksenmukaiset olosuhteet. (Chernov 2013, 48)



Kuva 6. Säiliö

Testiasemassa on viisi venttiiliä eri tarkoituksiin. Venttiileitä ohjataan mittausohjelmasta käsin. Kuvassa 6 säiliön alla oleva venttiili on paineenalennusventtiili, jonka tarkoituksena on alentaa ilman paine takaisin ympäristön paineeseen ja luoda tarvittaessa vastapaine. Venttiilityyppinä käytetään perhosventtiiliä. Säiliön jälkeen on palloventtiili, jolla voidaan tarvittaessa tehdä negatiivinen mittaripaine. Lämmönvaihtimen veden säätelyyn käytetään segmenttiventtiiliä, joka näkyy kuvassa 5. Ilman määrää testiaseman kierrossa ennen ja jälkeen koeajon säädellään auki-kiinni-tyyppisellä perhosventtiilillä. Mikäli paine testiaseman kierrossa pääsee nousemaan hallitsemattoman suureksi, aukeaa kompressorin jälkeen oleva turvaventtiili ja tasaa paineen. (Chernov 2013, 37–39)

3 MITTALAITTEET

Testiasemassa virtauksesta mitattavia suureita ovat paine, lämpötila, massavirta ja kosteus. Niiden mittaamiseen käytetään standardin mukaisia mittalaitteita. (ISO 5389, 9) Mittalaitteiden tunnistetiedot on esitetty liitteessä 2.

3.1 Painemittaus

Virtaavan ilman paine mitataan kompressorin imussa ja poistossa sekä säiliössä. Imu- ja poistopaine mitataan neljällä paineyhteellä ja paine kootaan putkeen, joka on kytketty painelähettimeen. Anturit on asennettu putken seinämään 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden. Painemittaus suoritetaan virtaussuunnassa ennen lämpötilamittausta, jotta virtaus on häiriötöntä paineantureiden kohdalla.

Paineyhteiden reiät tulee olla suorat ja halkaisijaltaan mahdollisimman pienet. Putken seinämään ei saa jäädä purseita porauksista. (ISO 5389, 9) Painemittauksen tulee sijaita vähintään 2 kertaa putken halkaisijan etäisyydellä kompressorista (ISO 5389, 75).

Painelähettimenä toimii GE Drück PTX-601. Se toimii painevälillä 100 mbar–60 bar (mittaripaine) tai 250 mbar–700 bar (absoluuttipaine). Mittausvirhe on $\pm 0,08$ %. Painemittausten signaali lähetetään tiedonkeruulaitteistolle 4–20 mA:n suuruisena virtaviestinä. (GE 2011, 2)

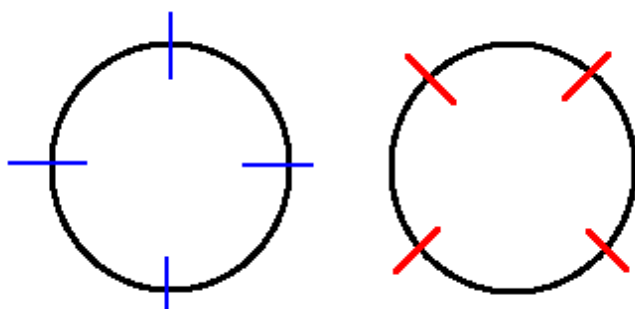
3.2 Lämpötilamittaus

Ilmavirtauksen lämpötila mitataan imu- ja poistoputkessa sekä lämmönvaihtimen jälkeen. Kussakin mittauspisteessä on neljä termoelementtiä. Alkuperäisestä suunnitelmasta (Chernov 2013, 36) poiketen käytetään virtauksen lämpötilan mittaamiseen T-tyypin termoelementtien sijasta K-tyypin termoelementtejä. K-tyyppi on käytetyin termoelementtimalli ja se toimii lämpötilavälillä -270 – 1260 °C (Thermometrics).

Termoelementit on asennettu putken seinämään 90 asteen kulmaan toisiinsa nähden ja 45 asteen kulmaan paineantureihin nähden. Termoelementtien ja paineantureiden sijoittelu on havainnollistettu kuvassa 7. Jäähdytysveden lämpötila mitataan lämmönvaihtimen sisään- ja ulostulossa kahdella vastakkain asennetulla termoelementillä.

Säiliön lämpötila mitataan Vaisala HMT334 -anturilla, joka toimii lämpötilavälillä -70–180 °C ja sen tarkkuus 20 °C:ssa on $\pm 0,2$ °C (Vaisala 2011a, 166).

Termoelementtien ja lämpötila-anturien signaali lähetetään tiedonkeruulaitteistolle jänniteviestinä. Mitatuista lämpötiloista lasketaan aritmeettinen keskiarvo mittausohjelmalle (ISO 5389, 14).



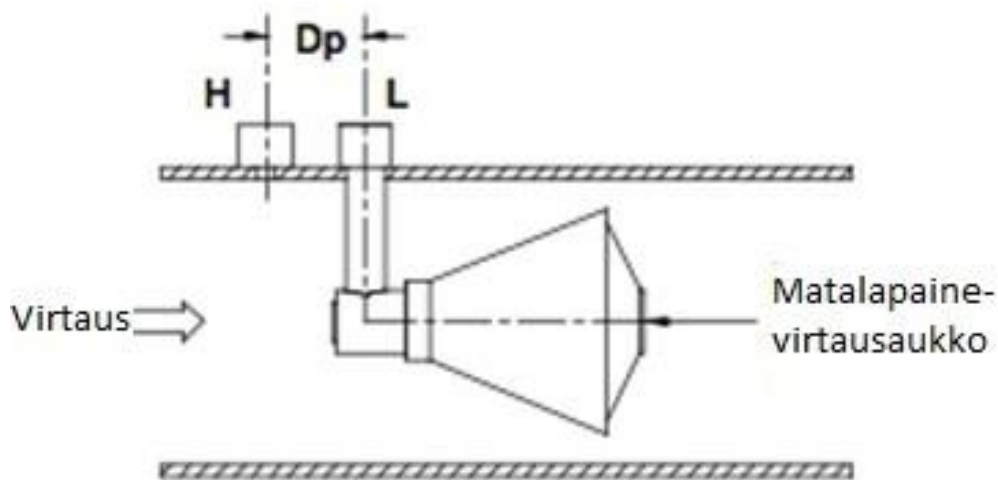
Kuva 7. Mittausantureiden sijoittelu putkessa. Paineanturit merkitty sinisellä ja termoelementit punaisella

3.3 Massavirtamittaus

Massavirta mitataan paine-eron mittaukseen perustuvalla V-Cone-virtausmittarilla. Mittarit on sijoitettu ennen kompressoria ja sen jälkeen, jotta voidaan havaita mahdolliset vuodot kompressorissa. (Chernov 2013, 37)

V-Conen toiminta perustuu Bernoullin teoriaan energian säilymisestä suljetussa putkessa. Bernoullin yhtälön mukaan tasaisessa virtauksessa paine on kääntäen verrannollinen nopeuden neliöön. (McCrometer, 1)

Kuvassa 8 on esitetty V-Conen periaatekuva. V-Conen sisääntulossa virtauksen nopeus kasvaa ja paine pienenee. Virtausmittarin aiheuttama paine-ero vaihtelee eksponentiaalisesti virtausnopeuteen nähden. Kun supistuma putken poikkileikkauspintaan nähden kasvaa, syntyy samalla virtausmäärällä enemmän paine-eroa. (McCrometer, 1)



Kuva 8. V-Cone-virtausmittarin periaatekuva (McCrometer, 1)

V-Cone tasaa virtausta keskellä putkea olevan kartion ansiosta. Tästä syystä V-Cone tuottaa tasaista paine-erosignaalia. Virtausmittaria edeltävän suoran putken pituudeksi riittää 0–3 kertaa putken halkaisija ($0-3D$). (McCrometer, 2–3)

V-Conen aiheuttama paine-ero mitataan Aplisens APR-2000ALW/C -paineanturilla. Poistomassavirran paineanturi on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Aplisens APR-2000ALW/C -paineanturi

3.4 Kosteusmittaus

Säiliön suhteellisen kosteuden mittaamiseen käytetään Vaisala HMT330 -mittaria, johon on kytketty Vaisala HMT334 -anturi. Säiliön kyljessä oleva mittari on esitetty kuvassa 10. HMT334-anturi on tarkoitettu paineistettuihin tiloihin ja teollisuuden prosesseihin (Vaisala 2011a, 43). Mittarin tarkkuus lämpötilavälillä 15–25 °C on ± 1 %RH (0–90 %RH) ja $\pm 1,7$ %RH (90–100 %RH) (Vaisala 2011a, 165). Signaali kosteusmittauksesta lähetetään tiedonkeruulaitteistolle 4–20 mA:n suuruisena virtaviestinä.



Kuva 10. Vaisala HMT330 -mittari säiliön kyljessä

3.5 Ympäristön olosuhteiden mittaus

Laboratorion olosuhteiden mittaukseen käytetään Vaisala PTU300 -mittaria, johon on kytketty Vaisala PTU301 -anturi. PTU301-anturi soveltuu seinäasennuksiin (Vaisala 2011b, 24). Ympäristöstä mitataan paine, lämpötila ja suhteellinen kosteus. Ympäristön paineen mittaussväli on 500–1100 hPa ja sen mittaustarkkuus ± 0.15 hPa. Ympäristön lämpötilan mittaussväli on -40 – 60 °C ja sen tarkkuus 20 °C:ssa on $\pm 0,2$ °C. Kosteusmittauksen tarkkuus lämpötilavälillä 15 – 25 °C on ± 1 %RH (0–90 %RH) ja $\pm 1,7$ %RH (90–100 %RH). (Vaisala 2011b, 179–181)

4 MITTAUSOHJELMA

Kompressoritestiaseman mittausohjelmanä käytetään National Instrumentsin LabVIEW-ohjelmointiympäristöä. LabVIEW:llä voidaan kerätä ja analysoida mittausdataa sekä ohjata toimilaitteita. Ohjelman toimintoja on mahdollista laajentaa erilaisilla lisämoduuleilla. (National Instruments)

4.1 Tiedonkeruulaitteisto

Tiedonkeruulla tarkoitetaan fyysisten suureiden mittaamista ja niiden muuttamista digitaalisen muotoon tietokoneella käsiteltäväksi. Tiedonkeruulaitteistoon kuuluu mittausanturit, signaalinkäsittelylaite ja AD-muunnin. Kompressoritestiasemassa käytetty tiedonkeruujärjestelmä on National Instrumentsin valmistama NI Compact DAQ system. (Chernov 2013, 50–51)

Paine- ja kosteusmittareiden lähettämät virtaviestit kerätään kahdella 16-kanavaisella NI 9208 -moduulilla. Termoelementtien ja lämpötila-antureiden lähettämät jänniteviestit kerätään 16-kanavaisella NI 9214 -moduulilla.

Tiedonkeruulaitteiston kautta ohjataan venttiilien asentoja. NI 9265 -moduulilla voidaan lähettää venttiilien toimilaitteille virtaviesti, joka ohjaa venttiilin haluttuun asentoon. Virtaviestin suuruus vaihtelee välillä 4–20 mA, jolloin 4 mA vastaa täysin auki olevaa ja 20 mA täysin kiinni olevaa venttiiliä.

Kaikki moduulit on kytketty NI cDAQ-9188 -alustaan. Alusta on kytketty tietokoneeseen Ethernet-kaapelilla.

4.2 Mittausohjelmassa käytetyt yhtälöt

Mitattujen arvojen perusteella määritetään arvoja kompressorin suorituskyvylle käyttämällä erilaisia yhtälöitä. Yhtälöt on upotettu mittausohjelmaan käyttämällä MathScript RT -lisämoduulia. MathScriptin avulla voidaan yhdistää graafista ja

tekstimuotoista ohjelmointia LabVIEW-ympäristössä. MathScript RT sisältää yli 800 sisäänrakennettua funktiota, joten se toimii samalla periaatteella kuin muut tekstimuotoiset laskentaohjelmat. (National Instruments 2011)

4.2.1 Lämpötila

Kaasuvirtauksessa ei voida suoraan mitata staattista tai kokonaislämpötilaa. Staattisella lämpötilalla tarkoitetaan levossa olevan aineen tuntemaa lämpötilaa. Kokonaislämpötila saavutetaan teoriassa, jos virtaavan aineen nopeus hidastetaan häviöttömästi nolnaan. (Tynjälä, 18)

Termoelementit mittaavat virtauksessa ollessaan lämpötilaa, joka sijoittuu staattisen ja kokonaislämpötilan väliin. Tätä lämpötilaa kutsutaan recovery-lämpötilaksi ja se on riippuvainen Prandtin luvusta. Mittausohjelmassa Prandtin luvun arvona käytetään 0,72. (ISO 5389, 10)

Yhteys recovery-lämpötilan ja staattisen lämpötilan välille saadaan yhtälöllä

$$T_r = T + \sqrt[3]{Pr} \frac{w^2}{2c_p} \quad (1)$$

T_r	recovery-lämpötila	[K]
T	staattinen lämpötila	[K]
Pr	Prandtin luku	[-]
w	virtausnopeus	[m/s]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]

Yhtälöstä 1 määritetään staattinen lämpötila

$$T = T_r - \sqrt[3]{Pr} \frac{w^2}{2c_p} \quad (2)$$

Kun tunnetaan staattinen lämpötila, voidaan laskea kokonaislämpötila yhtälöllä

$$T_0 = T + \frac{w^2}{2c_p} \quad (3)$$

T_0 kokonaislämpötila [K]

4.2.2 Paine

Painesuhteella tarkoitetaan ennen ja jälkeen kompressorin vallitsevien paineiden suhdetta. Painesuhde määritetään yhtälöllä

$$\pi = \frac{p_2}{p_1} \quad (4)$$

π painesuhde [-]

p_2 staattinen paine kompressorin jälkeen [Pa]

p_1 staattinen paine ennen kompressoria [Pa]

Kokonaispaine määritetään kokonaislämpötilan ja staattisen lämpötilan avulla yhtälöllä (Japikse et al. 1997, 2-15)

$$p_0 = p \left(\frac{T_0}{T} \right)^{\frac{R}{c_p}} \quad (5)$$

p_0 kokonaispaine [Pa]

p staattinen paine [Pa]

R kaasuvakio [J/kgK]

4.2.3 Tilavuus- ja massavirta

Massavirta lasketaan virtausmittarissa syntyvän paine-eron perusteella yhtälöllä

$$q_v = F_a \cdot C_D \cdot Y \cdot k_1 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (6)$$

q_v	tilavuusvirta	[m ³ /s]
F_a	materiaalin lämpölaajenemiskerroin	[-]
C_D	virtausmittarin kerroin	[-]
Y	kaasun laajenemiskerroin	[-]
k_1	virtausvakio	$\left[\sqrt{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^3}{\text{s}^2 \cdot \text{mbar}}} \right]$
Δp	paine-ero	[mbar]
ρ	fluidin tiheys	[kg/m ³]

Yhtälössä käytettyjen kertoimien laskeminen on esitetty lähteessä (McCrometer, 6).

Vastaavasti yhtälöä 6 muokkaamalla saadaan laskettua massavirta

$$q_m = F_a \cdot C_D \cdot Y \cdot k_1 \cdot \sqrt{\Delta p \cdot \rho} \quad (7)$$

q_m	massavirta	[kg/s]
-------	------------	--------

4.2.4 Virtausnopeus

Virtausnopeus putkistossa määritetään jatkuvuusyhtälön avulla. Jatkuvuusyhtälö kokoonpuristumattomassa ja stationaaritilanteessa on muotoa

$$q_m = \rho_1 w_1 A_1 = \rho_2 w_2 A_2 \quad (8)$$

A putken poikkipinta-ala [m²]

Yhtälössä 8 oletetaan, että massavirta pysyy vakiona pisteissä 1 ja 2. (Larjola 1984, 31) Kompressoritestiasemassa mitataan massavirta imussa ja poistossa mahdollisten vuotojen takia, joten myös virtausnopeus lasketaan molemmissa pisteissä.

Jatkuvuusyhtälöä muokkaamalla saadaan yhtälö virtausnopeudelle

$$w = \frac{q_m}{\rho A} = \frac{4q_m}{\rho \pi D^2} \quad (9)$$

D putken halkaisija [m]

4.2.5 Kosteus

Kylläisen höyryn paine voidaan määrittää eksponenttikorrelaatiolla, jonka parametrina on lämpötila. (Backman 1996, 16)

$$p'_h(T) = p_{cr} e^{[T_{cr}/T(a_1\tau + a_2\tau^{1,5} + a_3\tau^3 + a_4\tau^{3,5} + a_5\tau^4 + a_6\tau^{7,5})]} \quad (10)$$

p'_h kylläisen höyryn paine [Pa]

p_{cr} kriittinen paine (22064000 Pa) [Pa]

T_{cr} kriittinen lämpötila (647,14 K) [K]

kertoimet $\tau = 1 - T/T_{cr}$

$$a_1 = -7,85823$$

$$a_2 = 1,83991$$

$$a_3 = -11,7811$$

$$a_4 = 22,6705$$

$$a_5 = -15,9393$$

$$a_6 = 1,77516$$

Kosteussuhde eli vesihöyryn ja ilman massasuhde määritetään yhtälöllä (Ryti 1966, 717)

$$\omega = \frac{M_v}{M_i} \cdot \frac{p'_h(T)}{\frac{p_{ymp}}{\varphi} - p'_h(T)} \quad (11)$$

ω	kosteussuhde	[kg _{vesi} /kg _{ilma}]
M_i	ilman moolimassa	[g/mol]
M_v	vesihöyryn moolimassa	[g/mol]
φ	suhteellinen kosteus	[-]
p_{ymp}	ympäristön paine	[Pa]

4.2.6 Kaasuvakio

Mittausohjelmassa käsitellään kosteaa ilmaa ideaalikaasuseoksena, koska kastepistettä ei aliteta. Kosteaa ilmaa moolimassa määritetään yhtälöllä (Ryti 1966, 716)

$$M_k = M_v \cdot \frac{1 + \omega}{\frac{M_v}{M_i} + \omega} \quad (12)$$

M_k	kosteaa ilmaa moolimassa	[g/mol]
-------	--------------------------	---------

Kaasuvakio kostealle ilmalle määritetään yhtälöllä

$$R_k = \frac{R_u}{M_k} \quad (13)$$

R_k	kosteaa ilmaa kaasuvakio	[J/kgK]
R_u	yleinen kaasuvakio (8,314 J/molK)	[J/molK]

Vettä ei missään vaiheessa poisteta prosessista, joten samaa kaasuvakiota käytetään kompressorin imussa sekä poistossa.

4.2.7 Tiheys

Kun tunnetaan kostean ilman kaasuvakio, voidaan ideaalikaasuoletuksella laskea virtaavan ilman tiheys. Ideaalikaasun tilanyhtälö määritetään (ISO 5389, 66)

$$pv = R_k T \quad (14)$$

v ominaistilavuus [m³/kg]

Ideaalikaasun tilanyhtälöä muokkaamalla voidaan laskea tiheys yhtälöllä

$$\rho = \frac{p}{R_k T} \quad (15)$$

4.2.8 Reynoldsin luku

Reynoldsin luku määrittää aineen inertiaivoimien suhteen viskoosivoimiin. Reynoldsin luvun avulla voidaan määrittää onko virtaus laminaaria vai turbulenttia. Putkivirtauksessa virtaus on laminaaria, jos $Re < 2000$ – 5000 ja turbulenttia, jos $Re > 2000$ – 5000 . Kompressoritestiasemassa ilmavirtaus on käytännössä aina turbulenttia, koska ilman viskositeetti on hyvin pieni ja putkikoko verrattain suuri. (Larjola 1984, 24-25)

Reynoldsin luku määritetään yhtälöllä

$$Re = \frac{\rho w D}{\mu} \quad (16)$$

Re Reynoldsin luku [-]
 μ dynaaminen viskositeetti [Ns/m²]

Reynoldsin luku voidaan määrittää myös jatkuvuusyhtälön avulla

$$Re = \frac{4q_m}{\pi D \mu} \quad (17)$$

4.2.9 Ominaislämpökapasiteetti

Ilman ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteettien laskemiseen käytetään polynomisovitetta, jonka parametrina on lämpötila. Sovitetta voidaan käyttää lämpötilavälillä 200–1800 K. (Backman 1996, 14)

Sovite on muotoa

$$c_p(T) = a_1 + a_2 T + a_3 T^2 + a_4 T^3 \quad (18)$$

kuivalle ilmalle

$$a_1 = 9,82076E-1 \text{ kJ/kg,K}$$

$$a_2 = 1,64395E-5 \text{ kJ/kg,K}^2$$

$$a_3 = 2,25868E-7 \text{ kJ/kg,K}^3$$

$$a_4 = -8,81495E-11 \text{ kJ/kg,K}^4$$

vesihöyrylle

$$a_1 = 1,80768E-1 \text{ kJ/kg,K}$$

$$a_2 = 1,79273E-5 \text{ kJ/kg,K}^2$$

$$a_3 = 6,80617E-7 \text{ kJ/kg,K}^3$$

$$a_4 = -2,22443E-11 \text{ kJ/kg,K}^4$$

Kun tunnetaan ilman ja vesihöyryn ominaislämpökapasiteetit, voidaan laskea kostean ilman ominaislämpökapasiteetti yhtälöllä

$$c_{p,k} = \frac{c_{p,i} + c_{p,v}\omega}{1 + \omega} \quad (19)$$

$c_{p,k}$	kostean ilman ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]	
$c_{p,i}$	ilman ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
$c_{p,v}$	vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]

4.2.10 Kaasuteho

Kaasuteho määritetään puristuksessa tapahtuvan entalpiamuutoksen avulla. Ideaalikaasuoletuksen pohjalta voidaan entalpia ilmoittaa ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan tulona. Yhtälössä täytyy huomioida, että ominaislämpökapasiteetti määritetään imu- ja poistolämpötilojen keskiarvosta.

$$P = q_m(h_2 - h_1) = q_m \bar{c}_p (T_2 - T_1) \quad (20)$$

P	kaasuteho	[W]
h_2	entalpia kompressorin jälkeen	[J/kg]
h_1	entalpia ennen kompressoria	[J/kg]

4.2.11 Isentrooppihyötysuhde

Isentrooppisen prosessin avulla on mahdollista laskea ideaalisen kompressorin tekemä työ ja sitä käytetäänkin referenssiprosessina todelliselle kompressorille. Kompressorille voidaan määrittää isentrooppihyötysuhde. Kokonaistilojen välinen isentrooppihyötysuhde eli kokonais-kokonais-hyötysuhde määritetään kompressorille entalpioiden avulla yhtälöllä

$$\eta_{s,tt} = \frac{h_{02s} - h_{01}}{h_{02} - h_{01}} \quad (21)$$

$\eta_{s,tt}$	kokonais-kokonais-hyötysuhde	[-]
h_{02s}	isentrooppinen entalpia kompressorin jälkeen	[J/kg]
h_{02}	kokonaisentalpia kompressorin jälkeen	[J/kg]
h_{01}	kokonaisentalpia ennen kompressoria	[J/kg]

Yhtälö 21 ei ole käytännön laskennan kannalta hyödyllinen, koska isentrooppista tilaa 02s ei voida rinnastaa mihinkään fyysiseen tilaan kompressorissa. Entalpiat voidaan korvata ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilan tulolla. Tämän jälkeen yhtälöä muokataan paineen ja lämpötilan isentrooppisuhteella, jolloin saadaan kokonais-kokonais-hyötysuhteelle yhtälö

$$\eta_{s,tt} = \frac{\left(\frac{p_{02}}{p_{01}}\right)^{\frac{R}{c_p}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} \quad (22)$$

p_{02}	kokonaispaine kompressorin jälkeen	[Pa]
p_{01}	kokonaispaine ennen kompressoria	[Pa]
T_{02}	kokonaislämpötila kompressorin jälkeen	[K]
T_{01}	kokonaislämpötila ennen kompressoria	[K]

Toinen laskennassa käytettävä isentrooppihyötysuhde määritetään kokonaistilan ja staattisen tilan välille eli kokonais-staattinen-hyötysuhde

$$\eta_{s,ts} = \frac{\left(\frac{p_2}{p_{01}}\right)^{\frac{R}{c_p}} - 1}{\frac{T_{02}}{T_{01}} - 1} \quad (23)$$

$\eta_{s,ts}$ kokonais-staattinen-hyötysuhde [-]

Täytyy kuitenkin huomioida, että staattinen tila pätee vain isentrooppiselle prosessille.
(Japikse et al. 1997, 2-15–2-17)

5 YHTEENVETO

Radiaalikompressoritestiaseman käyttöönottoa varten tutkittiin koko signaaliketju fyysisistä mittauksista tulosten laskentaan. Testiasema on ISO 5389 -standardin mukainen ja kaikki standardiin kuulumattomat komponentit on asennettu valmistajan ohjeiden mukaisesti.

Mittausohjelmassa tarvittavat yhtälöt ja korrelaatiot selvitettiin kirjallisuudesta. Laskennassa tarvittavien suureiden selvittämiseksi tarvitaan korrelaatioita, koska tekstimuotoisessa laskentaohjelmassa ei voida lukea arvoja kuvaajista.

LÄHDELUETTELO

Backman, Jari. 1996. On the Reversed Brayton Cycle with High Speed Machinery. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Lappeenranta. 103 s.

Chernov, Mikhail. 2013. Design of a test stand for a centrifugal compressor. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 59 s.

ISO 5389. 2005. Turbocompressors – Performance test code.

Japikse, David & Baines, Nicholas C. 1997. Introduction to Turbomachinery. 2. painos. Vermont: Concepts ETI, Inc. ISBN 0-933283-10-5

Larjola, Jaakko. 1984. Turbokoneet, suunnittelun ja laskennan perusteet, osa I. 4. painos. Lappeenranta: Aalef Oy. 129 s. ISBN 951-763-278-9.

McCrometer. The V-cone Installation, Operation & Maintenance Manual [verkkodokumentti]. [Viitattu 22.3.2015].

Saatavissa: <http://www.mccrometer.com/library/pdf/24509-15.pdf>

National Instruments. LabVIEW System Design Software. [National Instrumentsin www-sivuilla]. [viitattu 13.5.2015].

Saatavissa: <http://www.ni.com/labview/>

National Instruments. What is the NI LabVIEW MathScript RT Module?. [National Instrumentsin www-sivuilla]. Published January 12, 2011. [viitattu 13.5.2015].

Saatavissa: <http://www.ni.com/white-paper/6206/en/>

Naukkarinen, Tomi. 2013. Radiaalikompressorin aerodynaaminen suunnittelu. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. 75 s.

Ryti, Henrik. 1966. Termodynamiikka. Teoksessa: Tekniikan käsikirja 2. 8. painos. Jyväskylä: K. J. Gummerus osakeyhtiö. s. 605-766. ISBN 951-20-1075-5.

Thermometrics. Thermocouples Type K. [viitattu 6.4.2015].

Saatavissa: <http://www.thermometricscorp.com/thermocouple.html>

Tynjälä, Tero. Teknillinen termodynamiikka luentomateriaali: Kaasuvirtaus [verkkodokumentti]. [Viitattu 21.4.2015]. Saatavissa (vaatii salasanan): http://moodle.lut.fi/pluginfile.php/64782/mod_resource/content/1/Luento11_kaasuvirtaus.pdf

Vaisala. 2011a. Vaisala HUMICAP® Humidity and Temperature Transmitter Series HMT330 User's guide.

Vaisala. 2011b. Vaisala Combined Pressure, Humidity and Temperature Transmitter PTU300 User's guide

LIITE 2. KOMPONENTTIEN TUNNISTETIEDOT

Tunnus	Mittauskohde	Valmistaja	Malli	Sarjanumero	Muuta
BF1	Massavirta sisääntulo	McCrometer	V-Cone VB08QE01N	13-3200	Paineanturi Aplisens APR-2000ALW/C S/N: 9133741 Paineanturi Aplisens APR-2000ALW/C S/N: 9133742
BF2	Massavirta poisto	McCrometer	V-Cone VB08QE01N	13-3201	
BH1	Suhteellinen kosteus säiliö	Vaisala	HMT330	J4030006	
BP1	Paine sisääntulo	GE	Drück PTX601-O	3876522	
BP2	Paine poisto	GE	Drück PTX601-O	3976519	
BP3	Paine säiliö	GE	Drück PTX601-O	3976523	
BT1	Lämpötila sisääntulo	-	K-tyypin termoelementti	-	
BT2	Lämpötila poisto	-	K-tyypin termoelementti	-	
BT3	Lämpötila jäähdytysvesi sisään	-	K-tyypin termoelementti	-	
BT4	Lämpötila jäähdytysvesi ulos	-	K-tyypin termoelementti	-	
BT5	Lämpötila lämmönvaihtimen jälkeen	-	K-tyypin termoelementti	-	
BT6	Lämpötila säiliö	-	K-tyypin termoelementti	-	
HV1	Venttiili ilma sisään	Metso	Neles High Performance Triple Eccentric Disc Valve	S3596364.01	Toimilaite Remote Control RCEL 050 S/N: AD132608
HV2	Venttiili turvalaukaisin	Leser	High performance Safety Relief Valve, Type 441	10811358	
HV3	Venttiili jäähdytysvesi	Metso	Neles RA Series V-Port Segment Valve	S3574111.02	Toimilaite Remote Control RCEL 005L S/N: BF1308031
HV4	Venttiili paineenalennus	Metso	Neles High Performance Triple Eccentric Disc Valve	H3662712.01	
HV5	Venttiili ilma sisään/ulos	Metso	Neles Flanged Full Bore MBV Ball Valve	H3684430.01	Toimilaite Remote Control RCEL 250 S/N: AJ137880
	Paine, lämpötila, suhteellinen kosteus ympäristö	Vaisala	PTU300	J3920001	

LIITE 3. TIEDONKERUULAITTEISTON TUNNISTETIEDOT

Valmistaja	Malli	Sarjanumero
National Instruments	NI CDAQ-9188, COMPACTDAQ CHASSIS	HB6907007
National Instruments	NI 9214 16-CH ISOTHERMAL TC, 24-BIT C SERIES MODULE	HB6742742, 18A5703
National Instruments	NI 9214 16-CH ISOTHERMAL TC, 24-BIT C SERIES MODULE	HB6742743, 18A570E
National Instruments	NI 9208 WITH DSUB, 16-CH, 24-BIT CURRENT INPUT MODULE	HB6953414
National Instruments	NI 9265 4-CHANNEL 20 MA, 100 KS/S PER CHANNEL, 16-BIT CURRENT OUTPUT MODULE	HB6983050
National Instruments	NI 9901 DESKTOP MOUNTING KIT	HB6637014
National Instruments	NI 9923 FRONT-MOUNT TERMINAL BLOCK FOR 37-PIN D-SUB MODULES	HB6652626

LIITE 4. MITTAUSOHJELMAN KANAVALISTA

Mittauspiste	Moduuli	Kanava
Lämpötila sisääntulo 1	NI 9214	0
Lämpötila sisääntulo 2	NI 9214	1
Lämpötila sisääntulo 3	NI 9214	2
Lämpötila sisääntulo 4	NI 9214	3
Lämpötila poisto 1	NI 9214	4
Lämpötila poisto 2	NI 9214	5
Lämpötila poisto 3	NI 9214	6
Lämpötila poisto 4	NI 9214	7
Lämpötila säiliö 1	NI 9214	8
Lämpötila säiliö 2	NI 9214	9
Lämpötila ympäristö	NI 9214	10
Paine ympäristö	NI 9208	11
Kosteus	NI 9208	12
Taajuus	NI 9208	13
Teho	NI 9208	14
Paine sisään	NI 9208	15
Paine poisto	NI 9208	16
V-Cone paine sisään	NI 9208	17
V-Cone paine ulos	NI 9208	18
Paine säiliö	NI 9208	19
Lämpötila jäähdytysvesi sisään 1	NI 9214	20
Lämpötila jäähdytysvesi sisään 2	NI 9214	21
Lämpötila jäähdytysvesi ulos 1	NI 9214	22
Lämpötila jäähdytysvesi ulos 2	NI 9214	23
Lämpötila lämmönvaihdin ulos 1	NI 9214	24
Lämpötila lämmönvaihdin ulos 2	NI 9214	25
Lämpötila lämmönvaihdin ulos 3	NI 9214	26
Lämpötila lämmönvaihdin ulos 4	NI 9214	27
Venttiilin säätö	Moduuli	Kanava
Paineenalennus	NI 9265	0
Ilma sisään	NI 9265	1
Jäähdytysvesi	NI 9265	2
Ilma sisään/ulos	NI 9265	3