

Toni Hämäläinen

Vortex flow wing Voxerin toiminta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

27.5.2018

Tekijä Otsikko	Toni Hämäläinen Vortex flow wing Voxerin toiminta
Sivumäärä Aika	31 sivua + 4 liitettä 29.4.2018
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	
Ohjaajat	Kaj Lindedahl
<p>Insinööriyössä oli päämääränä verifioida ja varmistaa Sansox Ltd:n kehittämän Vortex flow wing Voxerin soveltuvuus sille aiottuun käyttötarkoitukseen. Voxerin toimintaedellytyksien toteutuessa sen avulla voidaan säästää mm. erilaisten tuotantolaitosten putkistokustannuksissa putkikoon pienentyessä.</p> <p>Insinööriyössä tehtiin laboratoriokokeita, joissa mitattiin Voxer 30°:n ja Voxer 40°:n vaikutusta putkiston paine-eroon erilaisilla kombinaatioilla. Mittausdatan perusteella arvioitiin Voxerin suorituskykyä putkiston mittauspisteiden välillä. Laboratoriotestien jälkeen vuorossa oli kenttätestaus Keravan Energian biovoimalaitoksella, jonka pohjatuhkan kuljettimen jäähdytysputkistoon Voxer oli määrä asentaa. Kenttätestauksessa saadun mittausdatan perusteella pystyttiin määrittämään ne toimintaedellytykset, joiden on toteuduttava, jotta Voxer voidaan valjastaa sille aiottuun käyttötarkoitukseen.</p> <p>Insinööriyön lopputuloksena syntyi suuri määrä mittausdataa, jota voidaan hyödyntää Voxerien sijoittelussa putkistoon. Projektin aikana havaittiin, että oikein sijoitettuna erityisesti Voxer 30° vähentää painehäviötä.</p> <p>Vaikka lisätyötä tarvitaan mittausten lisätekijöiden osalta, projekti oli onnistunut. Kokemukset osoittivat Voxerin kaltaisen innovaation toiminnan verifiointin olevan haastavaa sen toimintaedellytyksien riippuessa hyvin monista muuttujista.</p>	
Avainsanat	painehäviö, virtaus, pyörrevirtaus

Author Title Number of Pages Date	Toni Hämäläinen Operation of the Vortex flow wing Voxer 31 pages + 4 appendices 29 April 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Technology
Professional Major	
Instructors	Kaj Lindedahl, Senior Lecturer
<p>The main goal of this thesis was to verify and confirm the applicability in operation of the Vortex flow wing Voxer designed by Sansox Ltd. When the requirements of operation of the Voxer are met, the costs of piping can be reduced since the diameter of the piping can be smaller.</p> <p>This project included laboratory experiments in which the effect of Voxer 30° and 40° to the pressure loss was measured with different types of combinations. With the measurement data we estimated the Voxer's efficiency between the measuring points along the pipeline. After the laboratory tests were concluded, the next step was to carry out field testing at Keravan energia's bio power plant. The Voxer was installed in the pipe line of the ash conveyor's cooling system . The data gathered from the field testing made it possible to determine the requirements that has to be fulfilled so that Voxer can function as intended.</p> <p>As a result, a large quantity of data were gathered and can be utilized in the positioning of the Voxer in the pipeline. During the project it was noticed that properly positioned in the pipeline, the Voxer can reduce the pressure loss specially the Voxer 30°.</p> <p>Even though more work is needed regarding the extra variables, this project was a success. Experience has shown that the verification of operational applicability of an innovation like Voxer is quite challenging when the optimal functioning depends on multiple variables.</p>	
Keywords	pressure loss, flow, swirling flow, spiral flow

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Sansox Ltd ja tuotteet	1
3	Vortex flow wing Voxer ja sen toimintaperiaate	2
4	Teoria	4
4.1	Paine	4
4.2	Kavitaatio	4
4.3	Laminaarinen ja turbulenttinen virtaus	5
4.4	Pyörteisyys	6
4.4.1	Pakotettu pyörrevirtaus ja vapaa pyörrevirtaus	10
4.4.2	Kiertovirtaus	11
4.5	Painehäviö	12
4.6	Painehäviöt mutkissa	14
5	Voxerin testaus laboratoriossa	17
5.1	Laboratorion testilaitteisto	18
5.2	Mittausten suoritus	19
5.3	Tulokset	19
5.3.1	Mittausepävarmuudet	21
6	Voxerin asennus Keravan energialle	22
6.1	Keravan biovoimalaitos	22
6.2	Testiputken valmistus	23
6.3	Putkiston kokoonpano ja asennus	24
6.4	Kenttätestauksen tulokset	25
7	Yhteenveto	29
	Lähteet	31

Liitteet

Liite 1. Laboratoriotestien mittauspöytäkirja

Liite 2. Putken piirustukset

Liite 3. Paine-erot mittauspisteiden funktiona

Liite 4. Keravan Energian mittauksen mittauspöytäkirja

Symbolit

d	putken halkaisija [m]
h	nostokorkeus [1m H ₂ O]
Re	Reynoldsin luku
Γ	kiertovirtaus
ϵ	materiaaleille ominainen keskimääräinen epätasaisuuksien korkeus [mm]
ζ	pyörteisyyys
λ	putken materiaalille ominainen kitkakerroin
ρ	nesteen tiheys [kg/m ³]
ω	kulmanopeus [rad/s]
ν	nesteen kinemaattinen viskositeetti [m ² /s]
v	nesteen virtauksen keskinopeus [m/s]

1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä käytännön tutkimus Sansox Ltd:n kehittämälle virtausta helpottavalle Vortex flow wing Voxerille ja selvittää sen toiminnan teoreettinen pohja. Tutkimuksen keskiössä on laitteen virtausta helpottavien ominaisuuksien verifiointi ja sen osoittaminen teorian ja käytännön tasolla.

Voxerin toimintaan liittyvien ilmiöiden teoreettinen perusta selvitettiin tutkimalla virtausmekaniikan- ja dynamiikan kirjallisuutta. Käytännön toiminnan osalta selvitystyöhön kuului myös kenttätestaus Keravan Energian voimalaitoksella. Voxerin testaukselle suunniteltiin ja rakennettiin puitteet, jotta sen vaikutusta virtauksen laatuun voitiin mitata ja arvioida erilaisten teoreettisten mallien soveltuvuutta.

Virtausdynamiikan suomenkielisen kirjallisuuden ollessa suppeaa pyörteilevään virtaukseen liittyen, on joitakin englanninkielisiä termejä jouduttu kääntämään Suomeksi. Ristiriitatapauksissa pätevät englanninkieliset termit.

2 Sansox Ltd ja tuotteet

Sansox Ltd on osa Suomen cleantech-yritysten klusteria, joka on omistautunut kehittämään ja markkinoimaan uusia innovatiivisia ratkaisuja ja teknologioita maailmanlaajuisille puhtaan veden markkinoille. Sansoxin tavoitteena on olla kiertotalouden edelläkävijä maailmanlaajuisen vesipulan osalta.

Sansox Ltd on dynaaminen ja kasvuun orientoitunut start up -yritys, joka on perustettu v.2012. Sansoxin toimintaan kuuluu vahva verkostoituminen ja halu tehdä yhteistyötä soveltuvien ja uskottavien yhteistyökumppanien kanssa puhtaan veden -markkinoilla. Tulevaisuudessa Sansox valmistautuu listautumaan pörssiin voimistaakseen edellytyksiään toiminnan laajentamiseksi ja brändin tunnettavuuden kannalta. (1.)

Sansoxin tuotevalikoima koostuu veden hapetus ja puhdistusjärjestelmistä, joiden suunnittelun perustana on minimaalinen energian kulutus. Alla esimerkkinä kaksi Sansoxin kehittämää ja markkinoimaa tuotetta, jotka kuvaavat millaisista tuotteista on kyse.

OxTube

Oxtube on nesteen hapetukseen kehitetty laite, jonka toiminta perustuu pyörrevirtaukseen OxTuben sisällä. Liotettava kaasu imeytyy pyörrevirtauksen sisään, jonka jälkeen kaasu ja virtaava neste muodostavat homogeenisen seoksen.

SaoxFuge

SaoxFuge on kiintoaineksen erottamiseen kehitetty laite. SaoxFugen toiminta perustuu nesteen ja kiintoaineksen erottamiseen spiraalivirtauksen keskipakovoimalla, joka saa tiheysiltään erilaiset materiaalit eri radoille SaoxFugen sisällä. (1.)

3 Vortex flow wing Voxer ja sen toimintaperiaate

Vortex flow wing Voxerin (josta jäljempänä käytetään nimitystä Voxer) toiminnan tarkoituksena on vähentää putkistoissa esiintyvien turbulenssien ja kitkan aiheuttamaa painehäviötä, jossa neste tai kaasu virtaa joko painovoiman tai dynaamisen paineen vaikutuksesta. Voxer ottaa tarvitsemansa energian nesteen paineesta.

Voxerin toimintaa ja designia voidaan verrata 1970 -luvulta asti kehitettyihin nesteiden ja kaasujen homogenisointiin tarkoitettuihin staattisiin sekoittimiin, ja joista on kehitetty laaja kirjo erilaisia applikaatioita ja joita käytetään useissa teollisuuden käyttökohteissa kuten öljynjalostamoilla, vedenkäsittelyssä, elintarviketeollisuudessa, paperiteollisuudessa sekä energia- ja ympäristötekniikassa (2).

Kokonaisuutena Voxer koostuu Voxer-siivestä ja putkesta. Voxer voidaan asentaa putkeen, joka on geometrialtaan pyöreä eikä sen halkaisijalle ole rajoitusta. Putkeen sijoitettava Voxer-siipi mitoitetaan putken sisähalkaisijan perusteella.

Voxer on geometrisiltä ominaisuuksiltaan yksinkertainen ja kustannuksiltaan edullinen valmistaa. Se voi toimia monien erilaatuisten nesteiden siirrossa, esimerkiksi prosessi-vesiä, jätevesiä ja lietettä. Voxeria voidaan hyödyntää myös putkistoissa, joissa virtaa kaasuja esimerkiksi, ilmaa, happea, typpeä, maakaasua, hiilidioksidia ja vetyä.

Voxereita voidaan asentaa oikein sijoitettuna koko putkiston pituudelta. Optimaalisimmat asennuspaikat Voxerille ovat sellaisissa putkiston kohdissa, jotka sijaitsevat ennen putkiston osuutta, jossa esiintyy turbulენტtista virtausta mm. mutkat ja käyrät. Voxer voidaan asentaa putken sisään useilla eri virtauksen laatuun vaikuttamattomilla kiinnitystavoilla, kuten laipalla, ahdistussoviteella, hitsaamalla tai uraan muhvin sisälle.

Voxer valmistetaan ohuesta metallilevystä, joka väännetään haluttuun kulmaan (3, s. 1). Voxer on asennattavissa myös pumpun imupuolelle siipipyörän akseliin, jossa se kääntää pumpun siipipyörälle tulevan virtauksen liikeradan optimaaliseksi nostoen pumpun suorituskykyä ja samalla vähentäen kavitaatiota. (3, s. 2.)



Kuva 1. Staattinen sekoittaja (10).

Voxer-siiven toimintaperiaatteen ideana on kääntää virtaus sulavasti pyörimisliikkeeseen, joka kiertää virtauksen keskilinjan ympäri. Vesipartikkelitasolla Voxer tasoittaa yksittäisten vesipartikkelien virtausnopeudet putken koko poikkileikkauksen alueelta, jolloin virtausprofiili on tasaisempi verrattuna virtaukseen ilman Voxeria, jossa partikkelien nopeudet alenevat mentäessä ulommas kartiomaisen virtausprofiilin keskilinjalta (Kuva 2). Virtausnopeusprofiili säilyy tasaisena siitä huolimatta, että virtaussuunta muuttuu putken mutkassa. Voxerin jakaessa virtauksen kahteen osaan virtausten eri kerrokset liikkuvat

eri pituisia ratoja pitkin, mikä synnyttää rullausilmiön, jossa nämä kaksi erillistä virtausta rullaavat toisiaan vasten rullalaakerin tavoin. (3, s. 2.)

4 Teoria

Ymmärtääkseen Voxerin toiminnan taustalla vaikuttavia tekijöitä on hyvä tietää muutamia virtausteknisiä asioita, jotka liittyvät nesteen käyttäytymiseen sen ollessa liikkeessä. Koska Voxerin virtausta tasapainottava ominaisuus on seurausta virtauksen kääntymisestä spiraalimaiseen liikkeeseen, on perusteltua olettaa, että syy painehäviöiden alenemiseen liittyy virtausdynamiikkaan liittyviin ilmiöihin, jotka osaltaan selittävät, miksi nesteen pyörivä liike etenemissuunnan keskiakselin ympäri on edullista siirrettävän nesteen liike-energian säilymisen kannalta.

Tässä osiossa on esitettyä pyörteilevän virtauksen kannalta keskeisiä asioita, jotka avaavat niitä ilmiöitä, joita esiintyy Voxerin ollessa asennettuna putkistossa.

4.1 Paine

Nesteen virratessa putkessa siihen on sitoutuneena energiaa paineen muodossa. Paineen yksikkö on tapauksesta riippuen joko pascal tai bar. Putkessa virtaavan nesteen tapauksessa vallitsee dynaaminen sekä hydrostaattinen paine. Dynaamisesta paineesta käytetään joskus myös nimitystä patopaine ja se kuvaa nesteen kineettistä energiaa tilavuusyksikköä kohden (4).

Hydrostaattinen paine kuvaa nesteen oman painon aiheuttamaa painetta, joka on riippuvainen ainoastaan nesteen syvyydestä eikä määrästä tai säiliön geometriasta (5, s. 328).

4.2 Kavitaatio

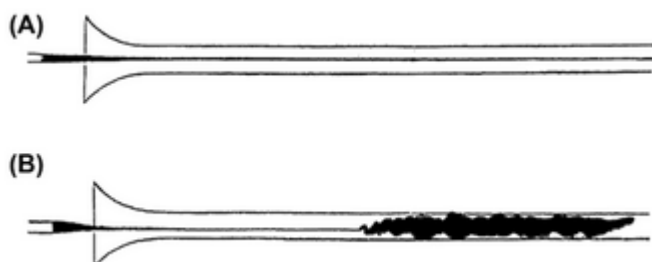
Kavitaatiolla tarkoitetaan tilannetta, jossa esimerkiksi putkiston jossakin pisteessä nesteen paine laskee riittävän alhaiseksi, jolloin siihen alkaa muodostua höyrykuplia. Kavi-

taatio perustuu veden kiehumispisteen ja paineen yhteydestä. Kavitaatiota esiintyy paikoissa, joissa virtausnopeus on suuri tai järjestelmässä esiintyy suuria korkeuseroja. Kavitaatiossa syntyneet höyrykuplat alkavat aiheuttaa ongelmia, kun ne siirtyvät suuremman paineen alueelle, jossa ne luhistuvat aiheuttaen paineiskuja rakenteisiin kuten esimerkiksi pumpun siipipyörään. (5, s. 371.)

4.3 Laminaarinen ja turbulентtinen virtaus

Laminaarisella virtauksella tarkoitetaan virtauksen tilaa, jossa virtauksen paine, nopeus ja tiheys eivät muutu ajan funktiona. Laminaarisessa virtauksessa nestepartikkelit eivät risteä kulkusuunnassaan sen säteissuunnassa olevien vesipartikkeleiden kanssa. Laminaariselle virtauksen virtausnopeudelle on olemassa raja-arvo, jonka ylittyessä virtaus muuttuu turbulenttiseksi. Laminaarinen virtaus on havainnollistettuna kuvassa 3 (6, s. 54).

Laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi virtauksen saavuttaessa nk. kriittisen nopeuden. Turbulenttisessa virtauksessa virtauksen tila muuttuu ajan funktiona ja jossa nestepartikkelien kulkureitit risteilevät kaoottisesti verrattuna laminaariseen virtaukseen. Turbulentti virtaus on havainnollistettuna kuvassa 3 (6, s. 55).



Kuva 2. Laminaarin (A) ja turbulentin (B) virtauksen havainnekuva (6, s. 45).

Englantilainen matemaatikko ja fyysikko Osborne Reynolds johti kokeellisesti yksiköttömän, virtauksen keskinopeudesta, putken halkaisijasta, viskositeetista ja tiheydestä riippumattoman virtauksen tilaa kuvaavan luvun, joka tunnetaan Reynoldsin lukuna (1) (6, s. 46).

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{v d}{\nu} \quad (1)$$

jossa Re on Reynoldsin luku

jossa ρ on nesteen tiheys kg/m^3

jossa ν on nesteen kinemaattinen viskositeetti m^2/s

jossa v on nesteen virtauksen keskinopeus m/s

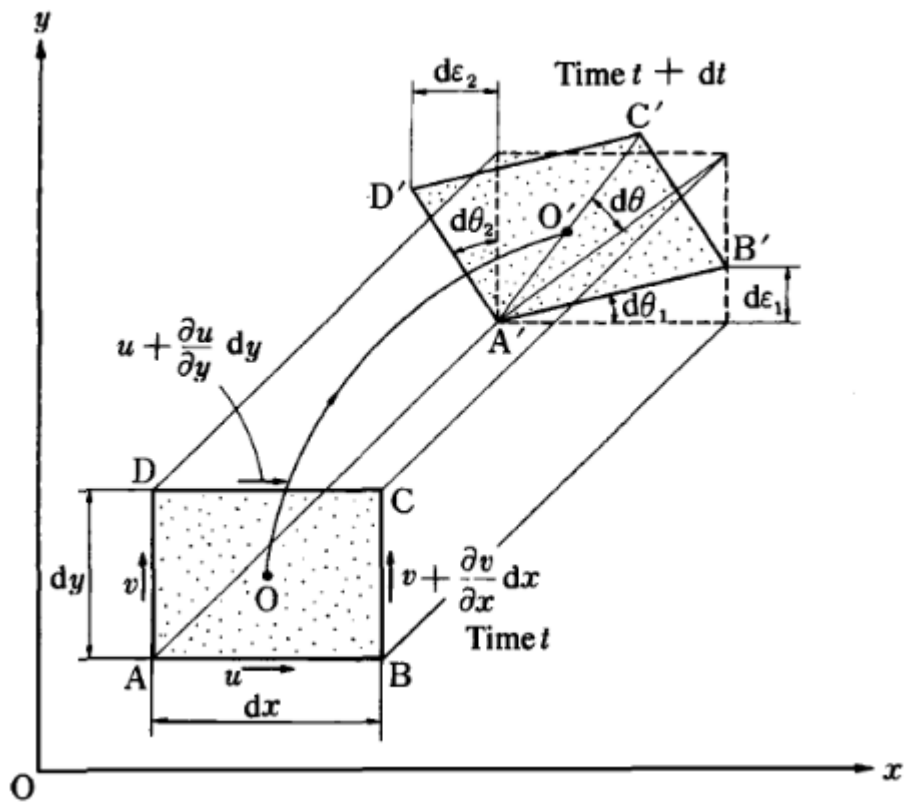
jossa d on putken halkaisija m

Reynoldsin luvun ollessa ≤ 2000 on kyseessä laminaari virtaus. Reynoldsin luvun ollessa > 2000 on kyseessä turbulenti virtaus. (7, s. 101)

4.4 Pyörteisyys

Pyörteisyydellä tarkoitetaan nesteen pyörimisliikkeessä nestepartikkelin ominaisuutta pyöriä oman akselinsa ympäri. Tämä ominaisuus jakaa pyörteilevät virtaukset kahteen ryhmään: rotationaalisiin ja irrotationaalisiin virtauksiin.

Pyörteisyys on havainnollistettuna kuvassa 4, jossa havainnollistetaan suorakulmion muotoisen nestepartikkelin siirtymiä tietyssä ajanjaksona.



Kuva 3. Nestepartikkelin eri pisteiden positioiden muutokset aikavälillä $t+dt-t$ (6, s. 48).

Suorakulmio ABCD on hetkellä t positiossa O . Ajan dt kuluttua suorakulmio on siirtynyt asentoon $A'B'C'D' O'$.

Pisteiden AB pystysuuntainen siirtymä $d\epsilon_1$ positioon $A'B'$ ja pisteiden AD $d\epsilon_2$ positioon $A'D'$ sivuttaissuuntainen kierto voidaan määrittää kaavojen 2 ja 3 mukaisesti. (6, s. 48):

$$d\epsilon_1 = \frac{\partial v}{\partial x} dx dt \quad (2)$$

jossa $d\epsilon_1$ on AB ja $A'B'$ siirtymä

jossa v on osittaisderivoitu x :n suhteen

$$d\epsilon_2 = \frac{\partial u}{\partial y} dy dt \quad (3)$$

jossa $d\epsilon_2$ on AD ja $A'D'$ siirtymä

jossa u on osittaisderivoitu y :n suhteen

Pisteiden AB kiertokulma $d\theta_1$ positioon A'B' ja pisteiden AD kiertokulma $d\theta_2$ positioon A'D' voidaan esittää kaavojen 4 ja 5 mukaisesti. (6, s. 48):

$$d\theta_1 = \frac{d\varepsilon_1}{dx} = \frac{\partial v}{\partial x} dt \quad (4)$$

jossa $d\theta_1$ on pisteiden AB ja A'B' välinen kiertokulma

jossa $d\varepsilon_1$ on AB ja A'B' välinen siirtymä

jossa dx on pisteiden AB välinen ero x -suunnassa

jossa ∂v on osittaisderivoitu x :n suhteen

jossa dt on muutokseen kulunut aika

$$d\theta_2 = \frac{d\varepsilon_2}{dy} = -\frac{\partial u}{\partial y} dt \quad (5)$$

jossa $d\theta_2$ on pisteiden AD ja A'D' välinen kiertokulma

jossa $d\varepsilon_2$ on pisteiden AD ja A'D' välinen kiertokulma

jossa dy on pisteiden AD välinen ero y -suunnassa

jossa u on osittaisderivoitu y :n suhteen

jossa dt on muutokseen kulunut aika

Pisteiden AB ja A'D' kulmanopeudet ω_1 ja ω_2 voidaan ilmaista kaavojen 6 ja 7 mukaisesti. (6, s. 48):

$$\omega_1 = \frac{d\theta_1}{dt} \quad (6)$$

jossa ω_1 on pisteiden AB kulmanopeus

jossa $d\theta_1$ on pisteiden AB ja A'B' välinen kiertokulma

jossa dt on position muutokseen kulunut aika

$$\omega_1 = \frac{d\theta_1}{dt} \quad (7)$$

jossa ω_2 on pisteiden AD kulmanopeus

jossa $d\theta_2$ on pisteiden AD ja A'D' välinen kiertokulma

jossa dt on position muutokseen kulunut aika

Keskipisteen O keskikulmanopeus voidaan esittää kaavan 8 mukaisesti. (6, s. 48):

$$\omega = \frac{1}{2}(\omega_1 + \omega_2) = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (8)$$

jossa ω on pisteen O keskikulmanopeus

jossa ω_1 on pisteiden AB kulmanopeus

jossa ω_2 on pisteiden AD kulmanopeus

jossa v on osittaisderivoitu x :n suhteen

jossa u on osittaisderivoitu y :n suhteen

Kaavan 8 sulkeissa olevien termien avulla ilmaisten

$$\zeta = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}\right) \quad (8)$$

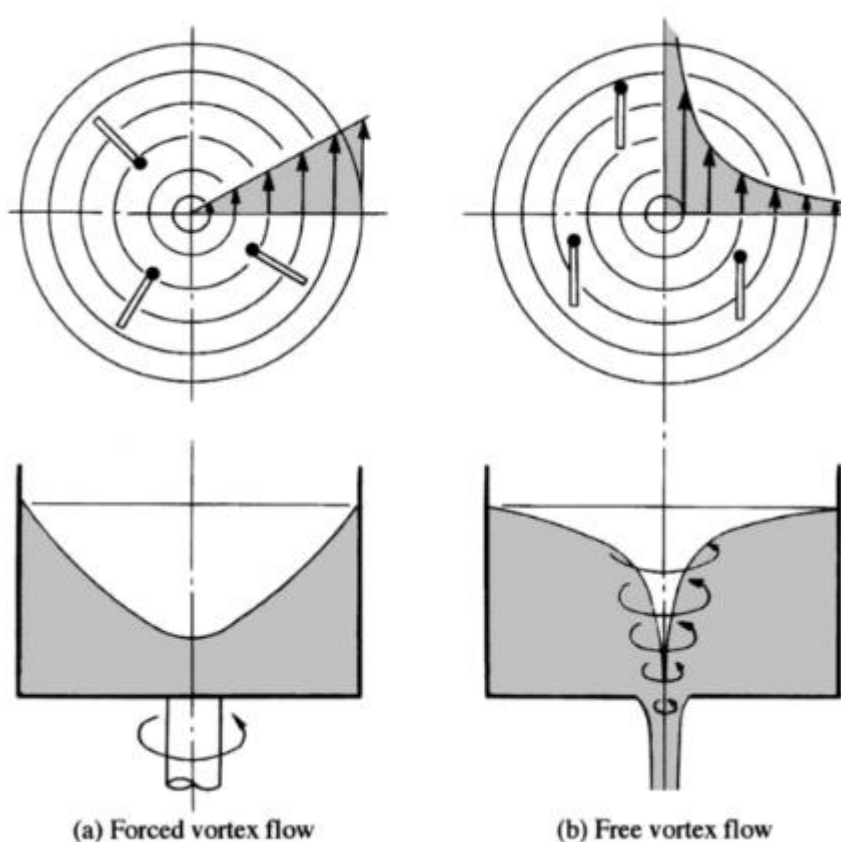
saadaan z-akselin pyörteisyys eng. vorticity, joka ilmaisee nestekiteen taipumusta pyöriä oman massakeskipisteensä ympäri.

Tilannetta, jossa $\zeta=0$, kutsutaan irrotationaaliseksi virtaukseksi (eng. irrotational flow).

Tilannetta, jossa $\zeta>0$, kutsutaan rotationaaliseksi virtaukseksi (eng. rotational flow).

4.4.1 Pakotettu pyörrevirtaus ja vapaa pyörrevirtaus

Irrotationaalisen virtauksen ja rotationaalisen virtauksen ero on havainnollistettuna kuvassa 5.



Kuva 4. Pakotetun ja vapaan pyörrevirtauksen havainnekuva (6, s. 49).

Kuvassa 5a neste saadaan pyörteilevään liikkeeseen pyörittämällä säiliötä mekaanisesti. Nesteen kiertäessä säiliön keskiakselin ympäri nesteen nestepartikkelit pyörivät samalla oman massakeskipisteensä ympäri. Nestepartikkelien pyörivä liike saa nesteseen asetetut tikut pyörimään oman massakeskipisteensä ympäri. Tätä ilmiötä kutsutaan pakotetuksi pyörrevirtaukseksi (eng. forced vortex flow).

Kuvassa 5b nesteen pyörteilevä liike saadaan aikaiseksi antamalla nesteen virrata säiliöstä pienen reiän kautta. Nestepartikkelien pyöriessä säiliön keskiakselin ympäri nestepartikkelit ovat niin ikään lukittuneet tiettyyn positioon, jolloin ne eivät pyöri oman massakeskipisteensä ympäri ja sama koskee nesteeseen asetettuja tikkuja. Tällaista pyörteilevää virtausta kutsutaan vapaaksi pyörrevirtaukseksi (eng. free vortex flow).

Näiden kahden pyörrevirtaustyyppin syntymekanismi on erilainen, ja niitä erottaa ulkoisen momentin vaikutus.

Tyypillisesti luonnossa esiintyvät pyörrevirtaukset, kuten tornadot ja vesipyörteet ovat vapaita pyörrevirtauksia ja ne syntyvät ilman ulkoista momenttia.

Pakotettua pyörrevirtausta esiintyy tyypillisesti kohteissa, joissa nesteen pyörteily saa alkunsa ulkoisen momentin vaikutuksesta. Näistä esimerkkejä ovat mm. pesukoneet, vesiturbiinit ja keskipakopumput. (6, s. 50.)

4.4.2 Kiertovirtaus

Kiertovirtauksella (eng. circulation), kuvataan pyörrevirtauksen makroskooppista liikettä suljetulla radalla, alueella, joka on etäisyydellä keskipisteestä r ja jolla on kulmanopeus ω z-akselin ympäri. Toisin kuin pyörteisyys ζ , joka kuvaa mikrokooppisella tasolla mikroelementin liikettä suhteessa sen omaan massakeskipisteeseen, kiertovirtaus kuvaa makroskooppisella tasolla mikroelementtien pyörteisyyden yhteisvaikutusta virtauksen liikkeeseen suuremmalla alalla (6, s. 51).

Kiertovirtaus voidaan esittää kaavalla 9:

$$\Gamma = \oint \zeta dA \quad (9)$$

Yksinkertaistetusti voidaan sanoa, että määrättyllä suljetulla radalla kiertovirtaus on samansuuruinen, kuin radan sisäpuolelle jäävän alueen mikroelementtien pyörteisyyksien summa, eli pyörteisyyden pintaintegraali on samansuuruinen, kuin kiertovirtaus. (6, s. 51.)

4.5 Painehäviö

Nesteen virratessa putkistossa on tavoiteltavaa, että sen kulku olisi mahdollisimman esteetöntä, jotta siirrettävä neste saadaan siirrettyä kohteeseensa minimaalisella energi-ankulutuksella. Nesteen virratessa putkistoa pitkin syntyy kuitenkin energiahäviötä, joka ilmenee nesteen paineen alenemisena ja joka johtuu suurimmaksi osaksi putkiston sisäpinnan karheudesta, putkiston mutkista ja sen geometrian muutoksista. Tarve kompensoida painehäviöt aiheuttavat sen, että putkiston läpimittaa on suurennettava, mikä näkyy suurempina materiaalikustannuksina tai nestettä siirtävän pumpun on toimittava suuremmalla teholla, jolloin pumpun tarvitseman energian kustannukset nousevat.

Kitkan aiheuttama painehäviö ilmaisee kitkan aiheuttaman energiahäviön painoyksikköä kohden suhteessa nesteen liike-energian määrään. Puhuttaessa painehäviöistä pumppujen yhteydessä käytetään painehäviön alenemasta nimitystä nostokorkeuden alenema, joka ilmaistaan metreissä vesipatsasta.

Pyöreässä putkessa, jossa virtaus on laminaarinen, painehäviö on suoraan verrannollinen virtausnopeuteen v . Turbulenttisen virtauksen tapauksessa painehäviö on suoraan verrannollinen virtausnopeuden v potenssiin 1,75 – 2.

Nostokorkeuden häviö voidaan ilmaista Darcy-Weisbachin yhtälöllä kaavan 10 mukaisesti.

$$h = \lambda \frac{lv^2}{d2g} \quad (10)$$

jossa h on kitkan aiheuttama häviö nostokorkeudessa

jossa λ on putken materiaalille ominainen kitkakerroin ja se lasketaan erikseen laminaariselle ja turbulenttiselle virtaukselle kaavojen 11 ja 12 mukaisesti (6, 115-116):

jossa l on suoran putkiosuuden pituus

jossa v on nesteen virtausnopeus putkessa

jossa d on putken halkaisija

jossa g on maan putoamiskiihtyvyyys

Kitkakertoimen λ laskeminen laminaariselle virtaukselle

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (11)$$

jossa λ on kitkakerroin laminaariselle virtaukselle

jossa Re on reynoldsin luku

Toisin kuin laminaariselle virtaukselle, turbulenttisen virtauksen kitkavastuskertoimen suuruuteen vaikuttaa sekä Reynoldsin luku että putken seinämän suhteellinen pinnankarheus ε . Turbulenttiselle virtaukselle, tasaiselle putkelle, jossa seinämän epätasaisuuksien keskimääräinen korkeus $\varepsilon \leq 5\nu/v$, kitkavastuskerroin voidaan määrittää Reynoldsin luvun perusteella kaavojen 12–14 mukaisesti.

Blasiuksen kaava

$$\varepsilon \leq 5\nu/v \quad \lambda = 0,3164Re^{-1/4} \quad Re=3000-100000 \quad (12)$$

Nikuradsenin kaava

$$\lambda = 0,0032 + 0,221Re^{-0,237} \quad Re=100000-3000000 \quad (13)$$

Kármán-Nikuradsenin kaava

$$\lambda = \frac{1}{(2 \log_{10}(Re\sqrt{\lambda}) - 0,8)^2} \quad Re=3000-3000000 \quad (14)$$

Turbulenttiselle virtaukselle, jossa neste virtaa karheen putken lävitse, jonka seinämän suhteellinen pinnankarheus $\varepsilon \geq 70\nu/v$, kitkavastuskertoimen määrittämiseen vaikuttaa ainoastaan putken karheus. Tapauksessa, jossa putken suhteellinen pinnankarheus $\varepsilon \geq 70\nu/v$, kitkavastuskerroin voidaan määrittää kaavan 15 mukaisesti. (2, s. 115-116.)

$$\lambda = \frac{1}{\left[1,74 - 2 \log_{10} \left(\frac{2\varepsilon}{d}\right)\right]^2} \quad (15)$$

Taulukossa 1 on esitettyä muutamille putkimateriaaleille tyypillisiä suhteellisia pinnankarheuksia.

Taulukko 1. Putkimateriaaleille tyypillisiä suhteellisiä pinnankarheuksia.

Materiaali	ε (mm)
Alumiini (uusi)	0,0013-0,0015
Alumiini (kulunut)	0,03
Messinki (uusi)	0,0013-0,0014
Messinki (kulunut)	0,03
Valurauta (uusi)	0,2-0,6
Valurauta (kulunut)	1,5
Kupari (uusi)	0,0013-0,0015
Kupari (kulunut)	0,03
Muovi (uusi)	0,0013-0,0015
Muovi (kulunut)	0,03
Kumi (uusi)	0,0016
Teräs (pitkittäin hitsattu, galvanoitu,uusi)	0,008
	0,15-
Teräs (kulunut,puhdistettu)	0,20
	0,15-
Teräs (hieman ruostunut)	0,40

4.6 Painehäviöt mutkissa

Virtauksen kulkiessa mutkan lävitse, esiintyy putken epätasaisuuksien aiheuttaman painehäviön lisäksi virtauksen suunnanmuutoksesta aiheutuvaa painehäviötä, joka johtuu nesteeseen kohdistuvasta keskipakoisvoimasta.

Virtauksen suunnanmuutoksesta, johtuvalle painehäviölle käytetään kerrointa, joka on riippuvainen mutkan säteen ja sen halkaisijan osamäärästä sekä mutkan jyrkkyydestä. Sitä ilmaistaan tunnuksella ζ . Putken kääntyessä jyrkästi puhutaan kulmasta, jonka aiheuttama häviö on suurempi verrattaessa mutkaan, koska virtaus irtoaa putken seinämästä sen ohittaessa mutkan keskikohdan. Tämä on omiaan aiheuttamaan turbulenssia

putkistossa. Mutkan tai kulman sekä putken sisäpinnan pinnan kitkasta aiheutuvien painehäviöiden yhteisvaikutus kokonaispainehäviöön on ratkaistavissa kaavan 16 avulla. Taulukoista 2 ja 3 selviää mutkan säteen ja läpimitan osamäärän sekä kulmien suuruuden yhteys häviökertoimen suuruuteen. (6, s. 126.)

$$h_b = \left(\zeta + \lambda \frac{l}{d} \right) \frac{v^2}{2g} \quad (16)$$

jossa h_b on kokonaispainehäviö

jossa ζ on mutkan häviökerroin

jossa λ on kitkan aiheuttaman painehäviön kerroin

jossa l on mutkan pituus

jossa d on mutkan sisähalkaisija

jossa v on virtausnopeus

jossa g on maan putoamiskiihtyvyyys

Taulukon 2 sisältämät kertoimet pätevät tilanteeseen, jossa putken epätasaisuuksien keskimääräinen korkeus on $\epsilon \leq 5v/v$.

Taulukko 2. Mutkien häviökertoimia.

θ	R/d	1	2	3	4	5
15°		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
22,5°		0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
45°		0,14	0,14	0,08	0,08	0,07
60°		0,19	0,12	0,095	0,085	0,07
90°		0,21	0,135	0,1	0,085	0,105

Taulukko 3. Sisäpinnaltaan karheen mutkan häviökertoimia.

θ	R/d	1	2	3	4	5
90°		0,51	0,51	0,23	0,18	0,2

Taulukon 3 sisältämät kertoimet pätevät tapauksissa, joissa putken epätasaisuuksien keskimääräinen korkeus on $\epsilon \geq 70v/v$.

Putkeen voidaan asentaa ohjaussiivet, jotka voivat vähentää virtauksen suunnanmuutoksesta aiheutuvaa painehäviötä merkittävästi, mutta tämän ilmiön juurisyyt eivät vielä tätä kirjoittaessa ole selvinneet (6, s. 126).

Spiraalimaista pyörrettä on tutkittu sen ollessa tärkeä tekijä virtauksessa sen sisältämän energiamäärän vuoksi.

Tutkijat rakensivat putkikäyrästä virtauksesta simulaatiomallin GAMBIT -ohjelmistolla. Simulaatiossa pyörrevirtaus aiheutettiin siten, että putkikäyrän sisääntuloaukolle "sijoitettiin" ohjaussiivekkeitä, jotka olivat kaltevuuskulmiltaan 20°, 30°, 40°, 50°, 60° ja 70°. Putkikäyrän sisähalkaisijaksi valittiin 0,02m, säteeksi 0,1m, jyrkkyydeksi valittiin 90° ja putkikäyrää seurasi pituudeltaan 0,1m:n suora osuus.

Käyrän sisään tulevan virtauksen reunaehdot määriteltiin siten, että sisään tulevan virtauksen nopeuskomponentit olivat ekvivalentteja käyrän sisääntuloaukolle sijoitetun ohjaussiivekkeen installaation suhteen virtauksen nopeuskomponenttien erottelun x,y,x -suunnassa helpottamiseksi.

Sisääntuloaukon virtausnopeuksien nopeuskomponenteiksi valittiin käytännön syistä aksiaali- ja radiaalisuunnassa 1m/s. Virtaus tangentiaalisuunnassa määrittyy radiaalikomponentin, eli y-akselin suuntaisen nopeuskomponentin mukaan. Edellä mainittujen yhteys on selitettävissä kaavan 17 avulla.

$$w = v \tan \theta \quad (17)$$

jossa w on virtausnopeuden tangentiaalikomponentti

jossa v on virtausnopeuden radiaalisuuntainen komponentti

jossa $\tan\theta$ on ohjaussiivekkeen ja vaakatason välinen kaltevuuskulma

Edellä mainitut virtauksen nopeuskomponentit jakaantuvat siten, että virtauksessa hallitsevin komponentti on tangentialikomponentti, seuraavaksi suurin on aksiaalikomponentti. Virtauksen y-suuntaisen radiaalikomponentin osuus on niin merkityksetön, että sen vaikutus voidaan jättää huomioimatta.

Tutkimuksessa havaittiin, että paras kaltevuuskulma ohjaussiivekkeelle ulostulovirtauksen tangentialikomponenttia tarkastellessa oli 60° jolloin ulosvirtausnopeus oli suurimmillaan. Kaltevuuskulman suurentuessa spiraalivirtauksen aallonpituus lyheni aiheuttaen tangentialisen virtausnopeuden laskun.

Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että tangentialinopeus ei laske suoralla putken osuudella vaan päinvastoin virtausnopeus suurenee virtauksen edetessä putken sisäpintaa pitkin. Tästä voitiin päätellä, että tangentialikomponentin spiraalivirtausta kiihdyttävän vaikutuksen lisäksi 90° :n mutka kykenee tehokkaasti ylläpitämään virtausta. (8, s. 159-163.)

5 Voxerin testaus laboratoriossa

Yksi tämän opinnäytetyön keskeisimmistä asioista oli tutkia ja verifioida Voxerin toiminta kenttätestauksella Keravan Energian tiloissa. Tarkoituksena oli asentaa Voxereita Keravan Energian voimalaitoksen pohjatuhkan kuljettimen jäähdytysputkistoon.

Ennen varsinaista kenttätestausta halusimme saada dataa siitä, millä tavalla Voxer vaikuttaa putkistossa paineeseen ja virtausnopeuteen. Tarkoitus oli myös kartoittaa, millaisilla yhdistelmillä ja Voxerin kulmilla on optimaalisin vaikutus putkiston painehäviön kannalta. Päätimme replikoida Keravan Energian jäähdytysveden putken Metropolian Myyrmäen kampuksen laboratoriossa.

5.1 Laboratorion testilaitteisto

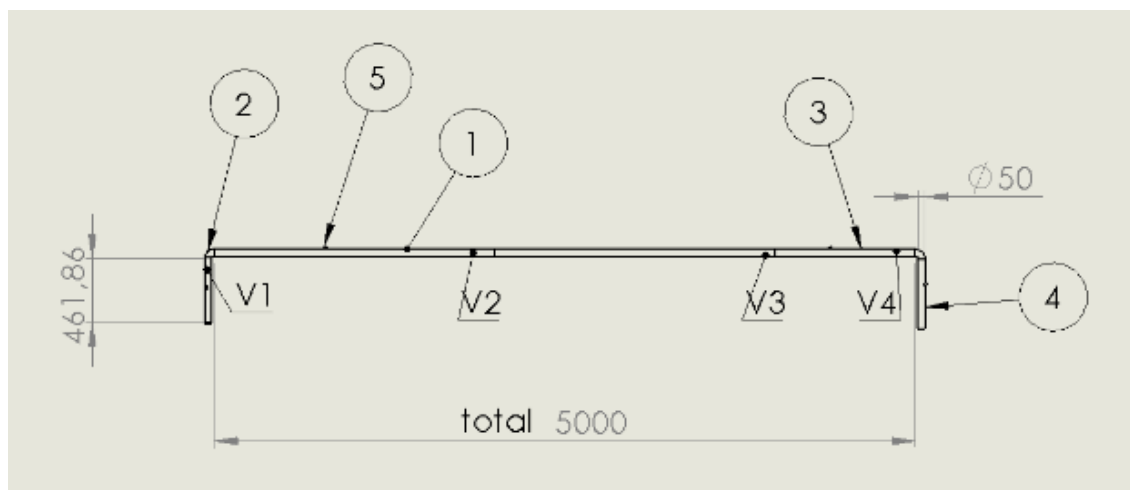
Tavoitteena oli rakentaa samankaltainen putkiston osuus, kuin Keravan energialla, jotta saadaan, paremman kuvan siitä, millä tavalla Voxer vaikuttaa putkessa esiintyviin painehäviöihin, millä tavoin Voxerit tulisi sijoitella putkistoon ja onko Voxerilla putkistoon painehäviötä kasvattava vaikutus. Voxerin sijoituspaikaksi valittiin Keravan Energialla sijaitseva pohjatuhkan kuljettimen jäähdytysveden putkisto sen yksinkertaisen rakenteen ja asennuspaikan turvallisuuden vuoksi. Paikallisen mittauksen mukaan putkessa on tilavuusvirta 2L/s 1 baarin paineessa, pohjatuhkan kuljettimelle saapuvan veden lämpötila on 6°C ja ulos menevän veden lämpötila on 16°C. Putki koostuu yhdestä 5,7m pitkästä, ulkohalkaisijaltaan 60,3mm (dn50), suorasta osuudesta, joka on materiaaliltaan mustaa terästä. Putken molemmissa päissä on 90°:n kulmayhteet, jotka kiinnittyvät letkunipan ja letkukiristimien avulla letkuun.

Testauslaitteiston putken materiaaliksi valittiin viemäröinneissä käytettävä polypropeeni sen alhaisen hinnan ja asennusta helpottavien seikkojen vuoksi. Putken suora vaakaosuus oli pituudeltaan 5m, ja putken päihin liitimme 90°:n kulmayhteet, joihin edelleen liitimme suorat osuudet putkea. Pumpuksi valitsimme uppopumpun, jonka tuotto oli 2L/s 0,5 baarin paineella. Alustavien laskelmien mukaan valitsemallamme putken sisähalkaisijalla sekä karheudella, 20°C lämpötilassa ja 2L/s tilavuusvirralla painehäviö olisi ollut 13,17mbar. Halusimme kuitenkin kasvattaa painehäviön riittävän suureksi, jotta ero painehäviössä ei häviäisi mittauslaitteen toleranssin sisään. Päätimme hioa putken sisäpinnan karhealla hiekkapaperilla suuremman kitkan aikaansaamiseksi ja painehäviön nostamiseksi.

Paine-eroa mitattiin Danfossin PFM100-mittalaitteella, joka on tarkoitettu venttiilien paine-erojen mittaamiseen. Mitattava paine tulee mittalaitteelle letkuja pitkin, joten putkeen oli tehtävä R21-liittimiin sopivat liitännät. Koska putken kaarevaan pintaan on vaikeaa tehdä painetta kestävää tiivistä liitosta, putken kylkeen tehtiin 3d-tulostamalla kuu- tion muotoinen palikka, johon oli helppoa kiinnittää paineilmailiitin.

5.2 Mittausten suoritus

Järjestelmässä oli 4 mittauspistettä, jotta nähtäisiin Voxerin vaikutus putken eri osissa. Mittauspisteet ja Voxerien sijoituspaikat käyvät ilmi kuvasta 6.



Kuva 5. Voxereiden (V1–V4) ja mittauspisteiden (1–5) sijoittelu.

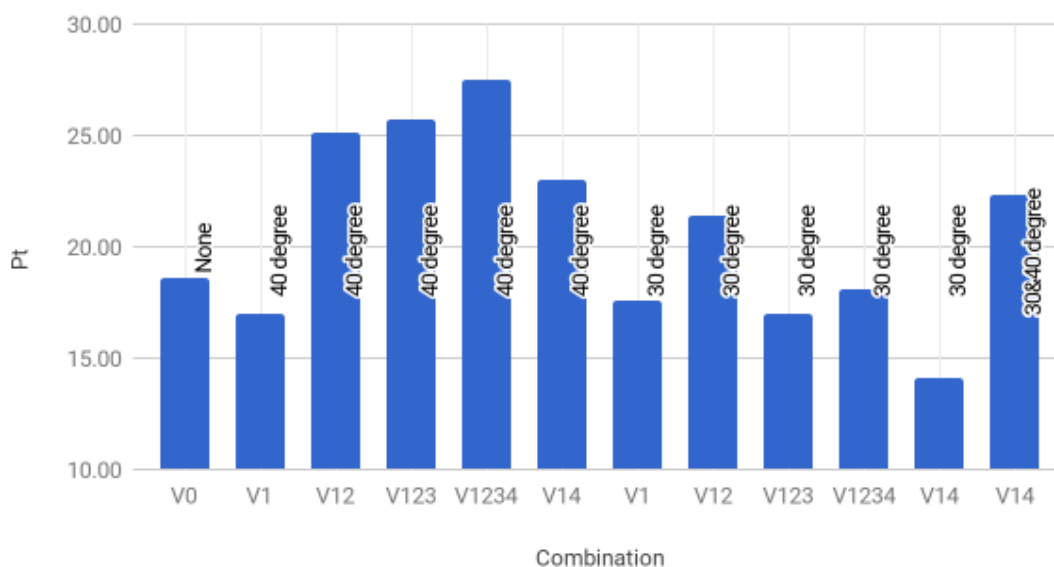
Systeemi jaettiin mittauspisteiden perusteella neljään osaan A, B ja C. A-osuudella mitattiin pisteitä välillä 1 ja 2, B-osuudella 2 ja 3 ja C-osuudella 3 ja 4. Koko järjestelmän paine-eroa mitattiin pisteistä 1 ja 4.

Käytävissä oli kahta kaltevuuskulmiltaan erilaista Voxeria, 30° DN40 ja 40° DN40. Oli määrä kokeilla Voxereilla erilaisia yhdistelmiä, joista erottuisivat parhaat yhdistelmät paine-eron kannalta. Jokaiselle Voxel-typille kokeiltiin viittä eri yhdistelmää Voxereille 1–4. Lisäksi kokeilimme myös molempia Voxel-typpejä positioissa 1 ja 4. Jokaista yhdistelmää mitattiin 10 kertaa mittaustulosten oikeellisuuden varmistamiseksi. Paine-eron lisäksi testien aikana mitattiin myös tilavuusvirtausta ja veden lämpötilaa. Referenssiksi osuuskien ABC paine-erot mitattiin ennen Voxelien asennusta.

5.3 Tulokset

Vertailimme potentiaalisimpia Voxel-kombinaatioita, erilaisiin Voxel-variaatioihin ja referenssimittaukseen. Tuloksista voidaan nähdä selkeästi paine-eron ja mittauspisteiden välinen korrelaatio, joka on lähes lineaarinen. Alhaisimmat paine-erot saavutettiin Voxel-

yhdistelmillä V1 40° ja V14 30° ja joiden paine-erot mittauspisteiden funktiona ovat lähes rinnakkaiset, kun taas yhdistelmä V1 30° ja V4° johtaa paine-eron kasvuun. Tuloksista voidaan päätellä, että pienin paine-ero saavutettiin yhdistelmällä V14 30°. Useampi Voxer putkessa johtaa paine-eron kasvuun, erityisesti putken suoralla vaakaosuudella. Kuvasta 7 selviää eri Voxer -kombinaatioiden vaikutukset paine-eroon.



Kuva 6. Eri Voxer -kombinaatioiden vaikutus paine-eroon. Paine-eron yksikkönä on mbar.

Esitettäessä paine-eron ja Voxereiden sijoittelun yhteyttä hyödynnettiin lineaarista regressiota. Kuvaajan trendiviiva osoittaa, että Voxereiden lukumäärä sekä paine-eron muutos ovat suoraan verrannollisia keskenään. Kuvaajat löytyvät liitteestä 3. Kuvaajasta ei voida päätellä suoraan syytä siihen, mikä aiheuttaa nousun paine-erossa. Ensiksi, kerätty data ei kata tarpeeksi erilaisia yhdistelmiä, jolloin osat optimaalisimmista ja ei-optimaalisista kombinaatioista jää aineistosta pois ja näin ollen jää vertailun ulkopuolelle. Datan keräämisessä olisi otettava huomioon mittauspisteiden lisäksi kaksi lisämuuttujaa, Voxereiden keskinäinen etäisyys toisistaan ja Voxereiden kulma. Tarkasteltaessa dataa nähdään, että Voxereita ollessa useampia kuin kaksi johtaa paine-eron nousuun. Tämä johtuu todennäköisimmin siitä, että Voxerin aiheuttama pyörrevirtaus ei pysty kompensoimaan Voxerin virtauksen jarruttamisesta aiheutuvaa painehäviötä. Toiseksi, Voxereiden välinen etäisyys vaikuttaa pyörrevirtauksen muodostumiseen. Voxereiden ollessa liian lähellä toisiaan pyörrevirtaus ei ehdi kehittyä yhtenäiseksi ennen seuraavaa Voxe-

ria, joka aiheuttaa turbulenssia virtaukseen ja on nähtävissä voimakkaana putken värähtelynä. Kolmanneksi, tuloksista voidaan nähdä, että 40°:n Voxerit aiheuttivat suuremman paine-eron, kuin 30° Voxerit, tämä johtuu todennäköisesti siitä, että 40°:n Voxerit muodostavat pyörteen, jonka aallonpituus on pienempi, kuin 30°:n Voxerin, joka johtaa värähtelyn taajuuden nousuun ja sitä kautta paineen laskuun virtauksen törmäillessä putken seinämään.

Bernoullin lain mukaan virtausnopeus on kääntäen verrannollinen painehäviöön, jolloin virtausnopeuden kasvaessa paine laskee samanaikaisesti. Ideaaliputkessa ja muuttumattomissa olosuhteissa tämä voidaan ilmaista kaavan 18 mukaisesti.

$$v_1 p_1 = v_2 p_2 \tag{18}$$

jossa v_1 on virtausnopeus pisteessä 1

jossa v_2 on virtausnopeus pisteessä 2

jossa p_1 on paine pisteessä 1

jossa p_2 on paine pisteessä 2

Voxerin vaikutuksesta virtausnopeus kasvaa kertoimella $1/\cos\alpha$, jossa α ilmaisee Voxerin kaltevuuskulmaa. Spiraalivirtauksessa virtaus kulkee pitempää rataa mentäessä radiaalisuunnassa keskipisteestä poispäin virtausnopeuden kasvaessa samalla. Virtausnopeuden kasvusta seuraa paineenlasku, joka ei kuitenkaan ole yhtä suuri kuin ideaaliputken tapauksessa suuremman virtausvastuksen takia. Tämä vaikuttaa erityisesti putken seinämän läheisyydessä, jossa virtausnopeus on suurimmillaan ja sillä on oma vaikutuksensa mittaustulokseen.

5.3.1 Mittausepävarmuudet

Värähtelyn vaikutus on olennainen tekijä, joka on otettava huomioon mittaustuloksia tarkasteltaessa. Voxerilla on virtaukseen aksiaalisuuntaista värähtelyä vähentävä, mutta radiaalisuuntaista värähtelyä voimistava vaikutus. Tämä värähtely aiheuttaa putken

matalataajuista huojuntaa, ja sillä on vaikutus virtaushäviöön, mutta ei välttämättä painehäviöön.

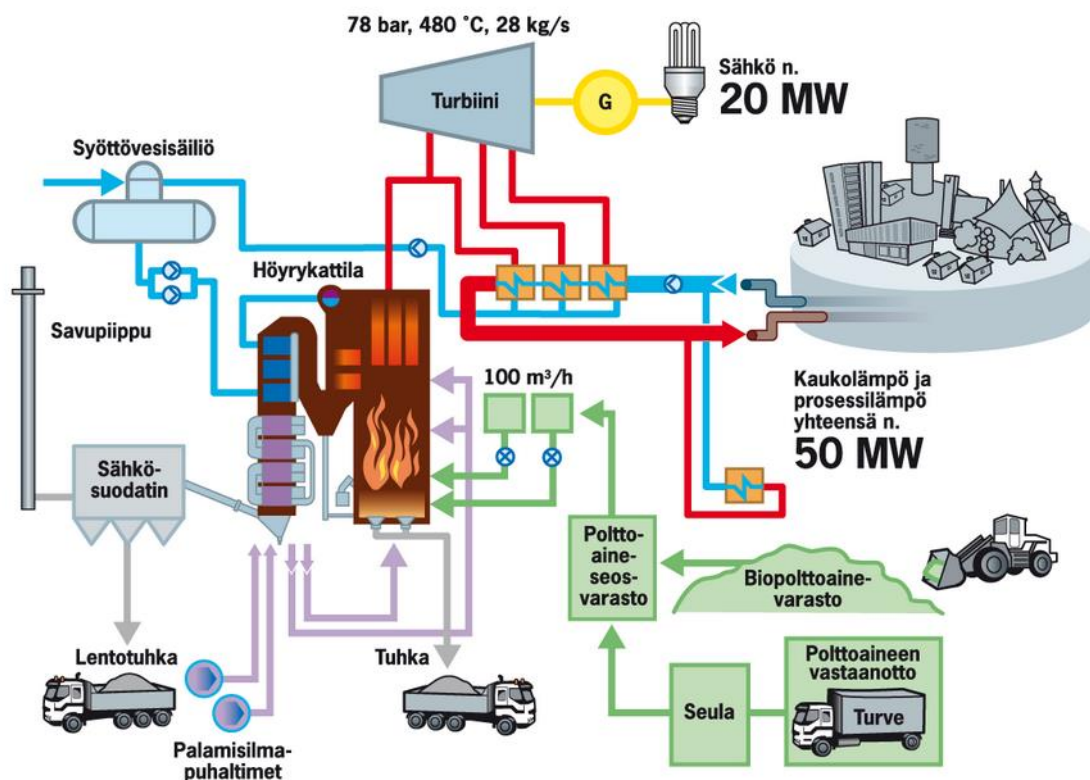
On otettava huomioon myös se, että Voxerin virtauksen energiahäviötä pienentävä vaikutus kasvaa yhdessä virtausnopeuden kanssa.

Pyörrevirtauksen kehittämä keskipakoisvoima on suurimmillaan putken seinämän lähellä, ja se saattaa myös vaikuttaa painearvoon.

6 Voxerin asennus Keravan energialle

6.1 Keravan biovoimalaitos

Keravan biovoimalaitos sijaitsee Keravan Myllykorventiellä Keravan ja Vantaan rajalla. Voimalaitos on tyypiltään vastapainevoimalaitos, jossa käytetään pääpolttoaineena puuta ja jyrshinturvetta. Voimalaitos tuottaa sähkötehoa 21 MW, prosessilämpötehoa 10 MW ja kaukolämpötehoa noin 50 MW. Tuotanto kattaa noin 75 % Keravan kaukolämmön tarpeesta ja 25 % Keravan energian sähkönhankinnasta. Biovoimalaitos monipuolistaa Keravan energiapalettia. Voimalaitos käyttää noin yhden rekkalastillisen polttoainetta tunnissa. Reservissä polttoainetta on usean viikon tarpeiksi. Laitoksen kattila on leijukerroskattila. Leijukerroskattilassa on luonnonvesikierto, jonka vesi-höyrypiiri muodostuu ekonomaisesta eli syöttöveden esilämmittimestä, höyrystipinnoista, lieriöstä ja tulistimista. Voimalaitoksen kattilan polttoainevirta on mitoitettu siten, että kapasiteetista puupolttoaineiden osuus on 80%. Savukaasuista poistetaan kiintoaineksi sähkösuodattimen avulla. Kuvassa 7 on Keravan biovoimalaitoksen periaatekaavio. (9.)



Kuva 7. Keravan Energian biovoimalaitoksen periaatekaavio (9).

6.2 Testiputken valmistus

Voxerin testausputki esivalmistettiin Metropolian Kalevankadun kampuksella ja se vastasi dimensioiltaan pohjatuhkan kuljettimen jäähdytysputkea. Alkuperäisen putken täydellisen replikoimisen sijaan päätimme käytännön syistä johtuen liittää putkiston osat hitsaamalla kierrelitosten sijaan.

Putki oli materiaaaliltaan mustaa terästä ja se koostui kolmesta osasta: kahdesta noin metrin pituisesta dn 50 putkesta, joiden päihin hitsattiin 90°:n mutkat ja 60,3 mm/48 mm*2,9 mm supistusyhteet ja yhdestä n.3m pitkästä suorasta vaakaosuudesta. Putken liitokset tehtiin pn 10 kauluslaipoilla ja putkien välissä oli putkista ja laippaliitoksista hitsaamalla valmistetut koteloinnit Voxerin sijoitusta varten. Putkien supistusyhteisiin ja keskelle koko putkiosuutta tehtiin putkesta kierteittämällä ja hitsaamalla paineliittimet mittauslaitteen liittämistä varten. Kaikki hitsausliitokset tehtiin mig-hitsauksella. Supistusyhteisiin tehtiin sorvaamalla kynnet, jotta putken liittäminen voimalaitoksella olevaan kumiletkuun olisi helpompaa.

6.3 Putkiston kokoonpano ja asennus

Voxerin kenttätestaus alkoi sulkemalla valvomosta jäähdytysputkistolle vettä syöttävä pumppu, jonka jälkeen suljimme käsiventtiilit pohjatuhkan kuljettimelta ja sen jälkeen pumpulta tulevalta linjalta. Suljettuamme venttiilit purimme putkiston osuuden, jonka tilalle Voxerin sisältämä putki oli määrä sijoittaa. Ensin kasasimme testiputkiston ilman Voxeria, jotta saimme referenssi-painehäviön vertailukohtaksi. Kun putki oli paikallaan, avasimme käsiventtiilit, jonka jälkeen ilmoitimme valvomoon, että pumppu voidaan jälleen käynnistää. Referenssiarvot saatuamme mittasimme paine-erot erikseen 30°:n että 40°:n Voxereille. Lopuksi mainittakoon, että virtausnopeuden säilyttäminen jokaisella mittauskerralla oli haastavaa, koska valvomossa ei ollut virtausnopeuden mittausta linjassa jota operoimme. Virtausnopeutta säädettiin siten, että säätöventtiiliä avatessa valvomosta seurasimme samanaikaisesti linjassa olevaa rotametriä. Arvon ollessa noin 0,8L/s ilmoitimme radiopuhelimella valvomoon, kun virtausnopeus oli oikea. Virtausnopeudet vaihtelivat 0,8L/s molemmin puolin.



Kuva 8. Voxerin sisältämä putki asennettuna ja alkuperäinen putki. Kuvan vasemmassa alalaidassa Danfoss PFM100 mittalaite.

6.4 Kenttätestauksen tulokset

Mittausdata kerättiin Danfossin PFM100-mittalaitteella. Kenttätestauksen tulokset eivät pysyneet stabiileina vaan arvot vaihtelivat laajalla alueella verrattaessa laboratoriossa tehtyihin kokeisiin siitä syystä, että testiympäristö oli huonommin kontrolloitavissa ja testauksissa käytettävä aika oli rajallinen.

Testaukset suoritettiin erikseen kolmella erilaisella kombinaatiolla: referenssimittauksilla ilman Voxereita, kahdella kaltevuuskulmaltaan 30° :n ja kahdella kaltevuuskulmaltaan 40° :n Voxerilla. Jaoimme putkiston kahteen osaan ja paine-eroa mitattiin kolmesta pisteestä: paine-ero ennen ensimmäistä Voxeria ja sen jälkeen ja ennen toista Voxeria ja sen jälkeen. Putken osuudesta ensimmäisestä mittauspisteestä putken keskelle käytetään nimitystä A-osio ja putken keskeltä loppupäähän käytetään nimitystä B-osio. Osio

AB indikoi kokonaispaineen muutosta putken koko pituudelta. Putken eri osuuksien ollessa sarjassa voidaan kokonaispaine-ero ilmaista kaavan 18 mukaisesti.

$$P_{ab} = P_a + P_b \quad (19)$$

jossa P_{ab} on paine-ero osuuksien A ja B välillä

jossa P_a on osuuden A painehäviö

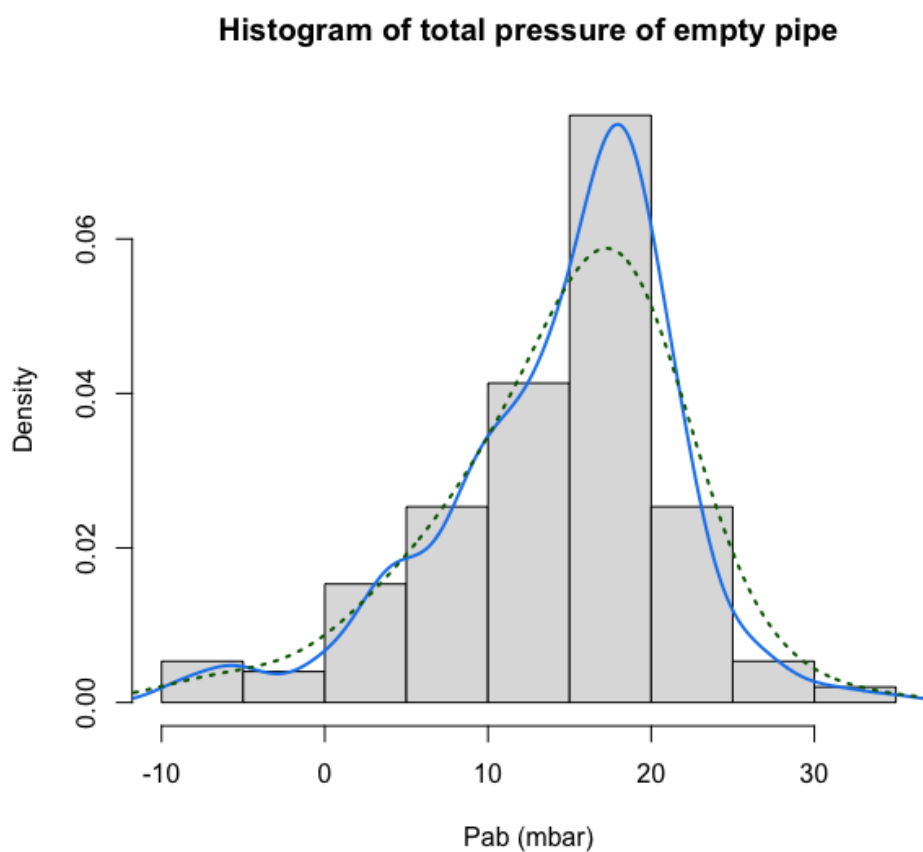
jossa P_b on osuuden B painehäviö

Kokeessa mitattiin paine-eroja P_{ab} ja P_a . Koska tulokset vaihtelivat laajasti, on mittaustapahtumasta kuvattu video ja jokaisesta mittausarvosta on tehty tilastollinen 100 pisteen transkribointi, josta on muodostettu historigrammit, joissa pylväiden pinta-ala on verrannollinen mittaustuloksen prosentuaaliseen esiintyvyyteen. Tilavuusvirtaus on pyritty pitämään joka mittauksella noin 0,8L/s.

Taulukko 4. Kullekin putkiosuudelle tehtyjen mittausten lukumäärä 30°:n ja 40°:n Voxelilla.

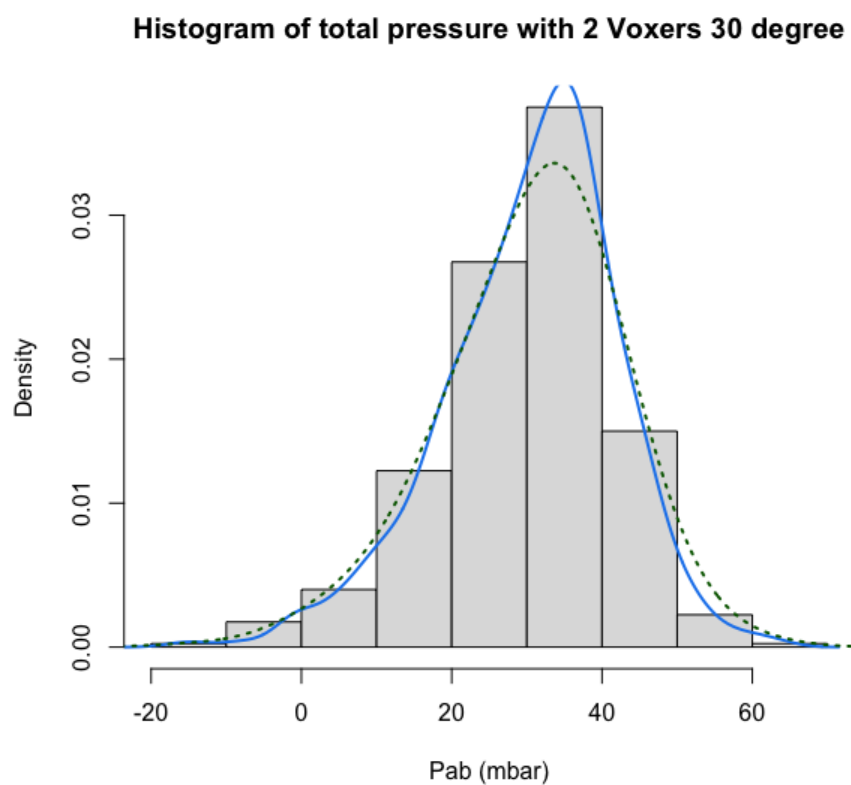
Type	Pressure section	Numbers of repeated measurement
None	Pb	3
	Pab	3
Degree 30	Pb	4
	Pab	4
Degree 40	Pb	2
	Pab	2

Kuvasta 10 selviää mittaustulosten vaihtelu välillä -10–30 mbar. Negatiiviset paine-eron arvot selittynevät putkessa esiintyvällä kavitaatiolla. Mittausarvot kumuloituvat suurimmalta osin alueelle 10–20 mbar. Katkoviivoilla esitetty linja havainnollistaa referenssiputken mittauksien tasoitettua kumuloitumista.



Kuva 9. Mittaustulosten kumuloituminen ilman Voxereita.

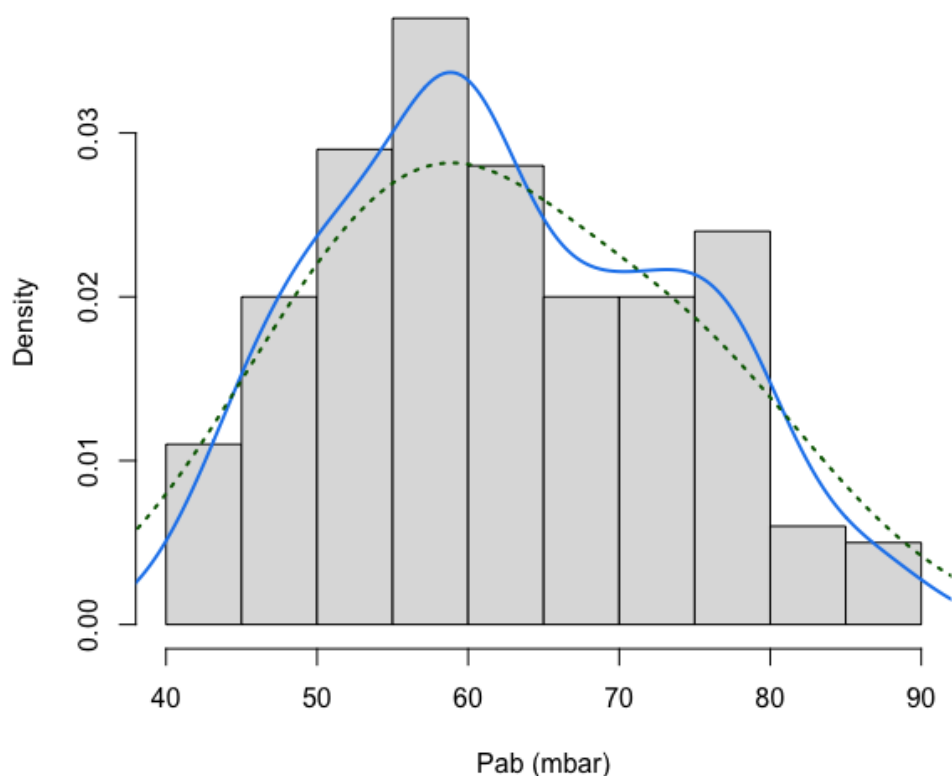
Kuvasta 11 selviää miten paine-erojen mittausarvot jakautuvat alueelle 0-50mbar suurimman osan kumuloituessa alueelle 20–40 mbar, Voxer 30°:n ollessa asennettuna putken sisälle.



Kuva 10. Mittaustulosten kumuloituminen kahdella 30°:n Voxerilla.

Kuvasta 12 selviää mittausten arvot Voxer 40°:n ollessa asennettuna. Paine-erojen mittausarvot jakautuvat alueelle 40–90 mbar. Suurin osa mittausarvoista kumuloituu alueelle 50–65 mbar ja 75–80 mbar.

Histogram of total pressure with 2 Voxers 40 degree



Kuva 11. Mittaustulosten kumuloituminen kahdella 40°:n Voxerilla.

7 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön pääpainona oli Voxerin virtausta helpottavien ominaisuuksien verifiointi ja sen todentaminen teorian ja käytännön tasolla. Työn keskeisimpiä osa-alueita olivat laboratoriossa tehdyt kokeet ja Keravan energialla toteutettu kenttätestaus. Työssä kerättiin suuri määrä mittausdataa, jonka perusteella teimme johtopäätökset Voxerin vaikutuksesta virtaukseen. Havaittiin, että Voxerin optimaalisen toiminnan kannalta on kriittistä sen sijoituspaikka, joka mittausdatan perusteella oli ennen putken mutkaa, jonka jälkeen turbulenssia esiintyy. Lisäksi mutkalla on pyörrevirtausta ylläpitävä ominaisuus, joka myös vaikuttaa Voxerin optimaaliseen toimintaan.

Arvioidessa Voxerin vaikutusta virtaukseen mittausdatan keräämisessä olisi otettava huomioon mittauspisteiden lisäksi kaksi lisämuuttujaa, Voxereiden keskinäinen etäisyys

toisistaan ja Voxereiden kulma. Koska kerätty data ei kata tarpeeksi erilaisia yhdistelmiä, osa optimaalisimmista ja ei- optimaalisista kombinaatioista jää aineistosta pois ja näin ollen jää vertailun ulkopuolelle. Mittausdatasta tehdyt merkittävimmät löydökset koskettivat eri Voxer-tyyppien ja painehäviön välistä riippuvuutta. Laboratoriotesteissä Voxer 30° antoi lupaavimmat tulokset painehäviötä tarkastellessa, kun taas kenttätestauksessa tulokset eivät olleet yhtä luotettavia.

Painehäviöiden mittaus virtauksen häviöiden määrittämisessä saattoi olla tässä projektissa väärä menetelmä, sillä painehäviötä voivat aiheuttaa suuremman virtausnopeuden aiheuttama resistanssi ja turbulenssi. Myös virtausnopeuden ja paineen välisen suhteen aiheuttama vaikutus mittaustuloksiin olisi hyvä selvittää jatkotutkimuksin. Vaihtoehtoisesti mittaukset olisi voitu suorittaa mittaamalla virtausnopeutta, joka seuraa tarkasti energiatehokkuutta. Mittausten suorittamisessa oli hyvin vaikeaa tallentaa mittausravot johdonmukaisesti mittausravojen vaihdellessa jatkuvasti, ja tästä syystä tuloksiin saattaa vaikuttaa inhimillinen virhe. Lisäksi hankaluuksia aiheutti tilavuusvirtauksen säilyttäminen staattisena. Tuloksien epästabiiliuteen vaikutti mahdollisesti myös mittauspisteiden vähäinen vuoto.

Lähteet

- 1 Products. Verkkoaineisto. Sansox Ltd. < <http://sansox.fi/fi/products/>>. Luettu 26.4.2018.
- 2 Static mixer. Verkkoaineisto. Thermopedia. < <http://www.thermopedia.com/content/959/>>. Luettu 27.4.2018.
- 3 Pylkkänen, Juhani. Vortex flow wing Voxer. 2017. Yrityksen sisäinen dokumentti. Sansox Oy.
- 4 Dynamic pressure. Verkkoaineisto. Thermopedia. <<http://www.thermopedia.com/content/712/>>. Luettu 26.4.2018.
- 5 Suvanto, Kari. 2008. Fysiikka 1.-3. painos. Edita Prima Oy.
- 6 Nakayama, Y; Boucher, R.F. 1998. Introduction to fluid mechanics. YOKENDO CO. LTD.
- 7 Mäkelä, Mikko; Soininen, Lauri; Tuomola, Seppo; Öistämö, Juhani. 2015. Tekniikan kaavasto 14. painos. Tammertekniikka / AMK-kustannus Oy.
- 8 Lan, Yamei; Guo, Wenhua; Song, Qihong; Li, Yongguo. 2013. Numerical model of the spiral flow in the 90° elbow. Taylor & Francis Group.
- 9 Keravan biovoimalaitos. Verkkoaineisto. Keravan energia Oy. <https://www.keravanenergia.fi/fi/keravan-energia/tuotantolaitokset/keravan-biovoimalaitos/> Luettu 26.4.2018.
- 10 Staattinen sekoitin. Verkkoaineisto. HD process. <http://www.hdprocess.co.nz/products/category/static-mixers.html>. Luettu 20.5.2018.

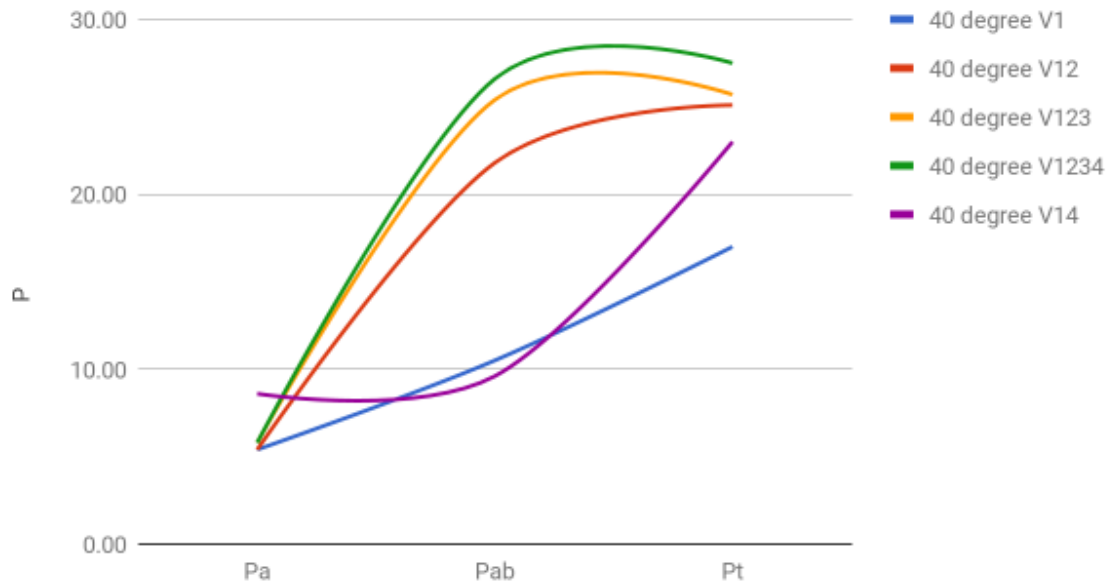
Type	Combination	Number of V	Pt	Qt	Mean T
None	V0	0	16.00	0.035	19.85
None	V0	0	18.00	0.038	19.85
None	V0	0	19.00	0.038	19.85
None	V0	0	20.00	0.039	19.85
None	V0	0	19.00	0.039	19.85
None	V0	0	19.00	0.038	19.85
None	V0	0	18.00	0.037	19.85
None	V0	0	19.00	0.038	19.85
None	V0	0	19.00	0.039	19.85
None	V0	0	19.00	0.038	19.85
40 degree	V1	1	16.00	0.035	17.25
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.65
40 degree	V1	1	18.00	0.037	17.45
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.5
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.5
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.4
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.5
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.9
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.8
40 degree	V1	1	17.00	0.036	17.95
40 degree	V12	2	22.00	0.041	19
40 degree	V12	2	26.00	0.045	19
40 degree	V12	2	26.00	0.045	19
40 degree	V12	2	26.00	0.045	19.15
40 degree	V12	2	26.00	0.045	17.9
40 degree	V12	2	25.00	0.044	17.9
40 degree	V12	2	25.00	0.044	17.9
40 degree	V12	2	25.00	0.044	17.9
40 degree	V12	2	25.00	0.044	17.9
40 degree	V12	2	25.00	0.044	17.9
40 degree	V12	2	25.00	0.044	17.9
40 degree	V123	3	23.00	0.042	18.8
40 degree	V123	3	25.00	0.044	18.8
40 degree	V123	3	26.00	0.045	18.8

40 degree	V123	3	26.00	0.045	18.8
40 degree	V123	3	26.00	0.045	18.8
40 degree	V123	3	26.00	0.045	18.8
40 degree	V123	3	27.00	0.046	18
40 degree	V123	3	27.00	0.046	18
40 degree	V123	3	25.00	0.044	18
40 degree	V123	3	26.00	0.045	18
40 degree	V1234	4	28.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	27.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	28.00	0.047	18.5
40 degree	V1234	4	27.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	28.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	27.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	27.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	28.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	27.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	28.00	0.046	18.5
40 degree	V1234	4	27.00	0.046	18.5
30 degree	V1	1	23.00	0.043	18
30 degree	V1	1	18.00	0.038	18
30 degree	V1	1	17.00	0.036	18
30 degree	V1	1	17.00	0.036	18.2
30 degree	V1	1	17.00	0.036	18.2
30 degree	V1	1	18.00	0.037	18.2
30 degree	V1	1	18.00	0.038	18.2
30 degree	V1	1	17.00	0.036	18.2
30 degree	V1	1	16.00	0.035	18.2
30 degree	V1	1	15.00	0.034	18.2
30 degree	V12	2	20.00	0.039	19.05
30 degree	V12	2	19.00	0.038	19.05
30 degree	V12	2	22.00	0.041	19.05
30 degree	V12	2	21.00	0.04	19.05
30 degree	V12	2	20.00	0.039	19.05
30 degree	V12	2	21.00	0.041	19.05
30 degree	V12	2	21.00	0.041	19.05

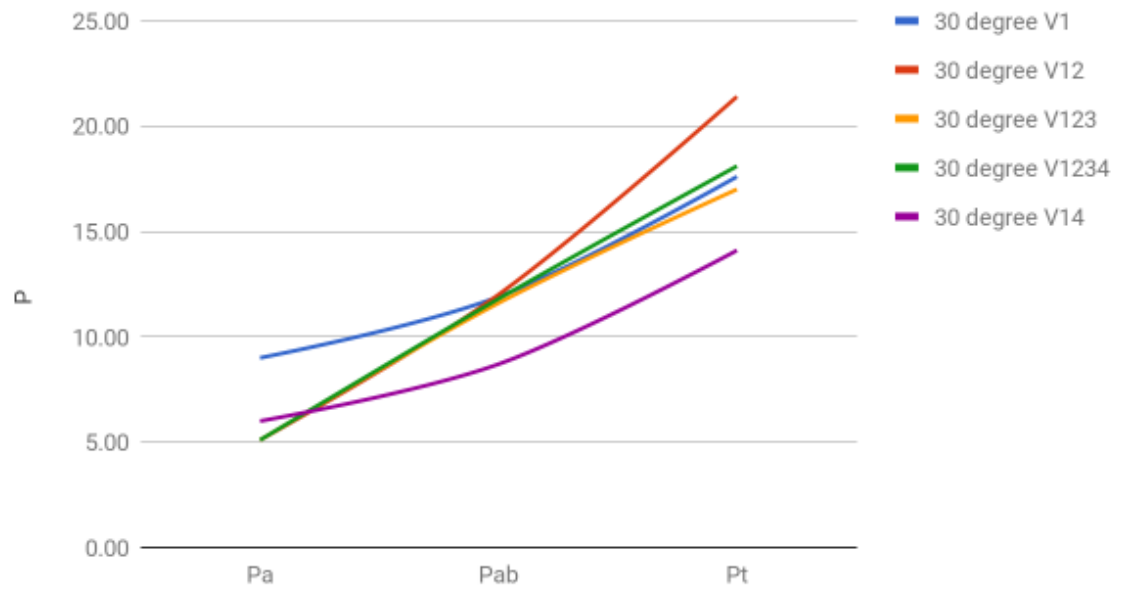
30 degree	V12	2	24.00	0.043	19.05
30 degree	V12	2	22.00	0.041	19.05
30 degree	V12	2	24.00	0.042	19.05
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.037	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V123	3	17.00	0.036	19.5
30 degree	V1234	4	17.00	0.037	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	19.00	0.039	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	19.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V1234	4	18.00	0.038	19.5
30 degree	V14	2	15.00	0.034	18.25
30 degree	V14	2	16.00	0.035	18.25
30 degree	V14	2	14.00	0.033	18.25
30 degree	V14	2	14.00	0.033	18.25
30 degree	V14	2	14.00	0.033	20.25
30 degree	V14	2	14.00	0.033	20.25
30 degree	V14	2	13.00	0.032	20.25
30 degree	V14	2	14.00	0.033	20.25
30 degree	V14	2	13.00	0.032	20.25
30 degree	V14	2	14.00	0.033	20.25
40 degree	V14	2	18.00	0.037	19.6

40 degree	V14	2	24.00	0.043	19.6
40 degree	V14	2	24.00	0.043	19.6
40 degree	V14	2	24.00	0.043	19.6
40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.6
40 degree	V14	2	24.00	0.043	19.6
40 degree	V14	2	22.00	0.041	19.6
40 degree	V14	2	24.00	0.043	19.6
40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.6
40 degree	V14	2	24.00	0.043	19.6
30 degree 40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.75
30 degree 40 degree	V14	2	21.00	0.04	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	22.00	0.041	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	22.00	0.041	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	21.00	0.041	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	23.00	0.042	19.1
30 degree 40 degree	V14	2	22.00	0.041	19.1

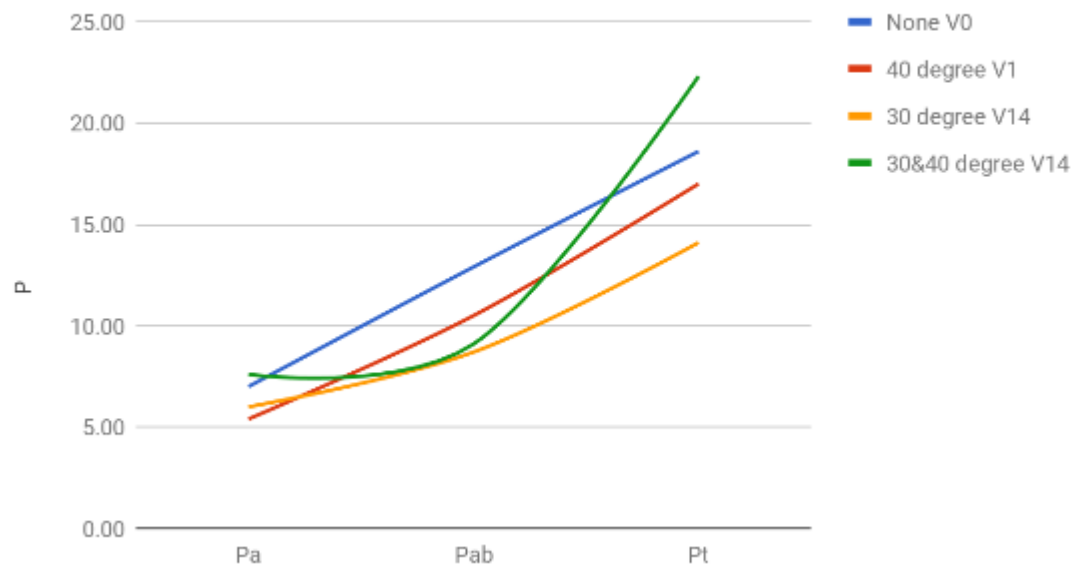
40 degree Voxer combination performance



30 degree Voxer combination performance



Compare good combinations



list1	list2	list3	list4	list5	list6	list7	list8	list9
12	20	30	29	35	28	9	27	29
13	20	27	30	20	37	8	5	43
13	19	30	34	46	34	21	15	38
12	18	30	17	45	45	4	15	25
13	19	28	19	36	35	12	15	32
12	19	27	30	42	44	2	16	36
13	20	30	27	31	11	13	12	36
14	17	29	34	41	37	10	21	12
11	19	30	11	44	44	5	6	34
10	20	29	14	37	33	3	22	45
12	16	29	29	27	29	9	30	34
12	19	28	32	46	39	11	18	37
13	17	30	28	34	30	11	24	47
13	16	29	33	63	33	6	16	33
13	16	29	32	41	27	1	6	32
13	17	29	-15	39	42	7	18	29
14	18	29	17	34	38	11	6	33
13	15	29	0	46	44	11	14	38
10	16	29	29	26	36	15	10	25
12	19	30	22	29	53	16	21	27
12	13	29	10	20	27	16	26	33
10	21	29	0	37	47	7	5	21
13	17	28	36	41	45	7	12	40
13	16	28	22	37	32	11	10	41
11	17	28	6	49	28	12	7	21
13	14	32	14	47	45	9	24	27
13	17	24	10	34	44	11	16	39
12	16	28	24	39	12	4	17	36
13	18	26	9	38	21	-1	17	43
11	19	26	33	38	31	10	7	43
11	19	27	21	33	28	6	18	31
13	18	25	10	41	20	12	11	37
13	16	27	0	39	36	6	14	46
12	19	27	18	31	40	13	15	26
11	14	28	30	28	36	8	8	51
12	16	30	13	18	44	17	12	24
15	18	30	30	40	35	7	21	43
11	18	30	16	37	29	9	16	45
13	21	29	28	25	39	7	10	37
12	21	27	20	32	44	14	22	33
11	21	27	19	49	39	5	20	46
11	18	30	11	36	39	7	14	58

12	19	29	15	29	39	12	9	40
12	19	28	18	40	34	6	17	23
12	15	22	24	30	28	10	23	33
12	17	33	14	45	22	20	18	36
11	16	26	27	37	54	16	14	26
11	20	27	21	43	35	4	23	15
13	21	28	-2	26	27	13	13	19
12	18	26	34	46	25	14	18	47
13	16	31	29	34	40	15	23	24
14	19	29	15	52	40	5	19	36
15	17	30	18	21	35	4	17	38
12	19	27	4	35	30	8	13	38
13	20	26	17	41	36	21	35	28
13	20	27	31	15	38	-1	14	23
12	21	27	22	24	40	8	4	35
10	16	27	-1	18	28	6	26	47
11	17	25	16	25	26	13	16	45
12	12	29	9	27	49	11	5	37
11	17	30	32	47	36	7	15	41
12	16	30	30	38	38	12	19	29
13	18	27	31	39	36	10	15	31
12	18	27	19	18	42	5	24	26
12	20	28	9	29	44	6	8	33
10	19	27	16	37	39	16	8	36
13	16	26	34	40	38	7	22	14
14	17	27	17	43	35	3	9	29
13	22	27	37	33	37	3	14	29
12	14	29	12	26	32	2	20	41
12	16	28	27	15	37	17	14	32
11	19	29	10	35	34	0	12	45
12	19	25	7	46	21	2	22	50
13	16	25	27	55	33	15	6	20
11	22	27	60	40	40	8	5	25
11	18	28	25	42	39	25	17	39
11	21	27	-8	44	35	23	11	51
12	17	28	20	36	35	10	36	37
11	22	30	24	27	41	7	14	44
10	19	29	22	19	30	16	7	32
11	14	27	4	37	41	9	14	24
11	18	26	19	38	34	14	16	42
11	17	27	21	30	30	6	27	28

13	19	28	19	45	28	9	14	30
11	19	30	36	32	28	12	18	17
12	18	31	34	32	31	7	12	29
14	20	34	6	36	30	4	12	38
10	15	30	40	39	23	5	17	18
14	17	29	8	23	40	21	17	32
10	15	29	24	52	43	11	25	23
11	21	29	6	28	28	10	22	31
14	21	26	-1	30	46	6	18	36
12	16	30	11	21	31	6	12	35
13	19	27	4	24	32	14	12	46
12	22	25	5	50	34	5	19	29
12	17	29	26	35	26	26	18	34
14	21	27	19	34	45	-1	11	23
12	19	30	33	44	46	13	12	23
12	19	30	34	37	29	0	13	37
12	18	27	12	53	37	4	21	25

list10	list11	list12	list13	list14	list15	list16	list17	list18
55	69	23	42	48	14	13	18	17
34	86	14	35	60	6	20	7	8
32	72	16	35	46	10	11	23	23
25	76	23	25	45	8	-5	1	17
30	74	17	12	45	14	42	6	25
36	61	17	19	55	-1	0	8	19
21	71	19	26	48	11	8	6	14
33	62	23	23	57	11	1	-6	19
26	59	19	6	53	13	27	9	15
37	76	8	22	60	11	-2	6	12
21	87	16	15	59	10	6	18	16
31	51	20	17	67	5	23	17	11
35	71	16	15	60	11	17	15	19
39	66	25	17	58	10	22	11	27
32	76	25	17	56	7	16	-9	11
42	73	25	31	50	8	18	3	5
30	68	8	13	44	10	17	18	13
20	68	30	30	41	10	11	14	13
41	68	13	20	55	4	23	26	10
36	87	26	10	62	8	11	13	18
31	75	22	12	61	11	17	18	19
38	59	24	23	55	11	14	9	19
36	60	21	22	42	3	2	11	22
40	76	11	22	68	1	11	4	17

25	58	10	22	55	13	10	4	12
42	71	25	12	48	9	19	21	31
37	85	18	21	49	10	8	4	16
35	69	22	20	50	12	10	0	23
32	61	6	19	52	9	3	17	22
42	85	15	18	59	12	14	3	22
39	74	18	18	58	12	21	7	17
39	70	20	24	58	1	8	3	7
29	66	5	24	46	14	11	15	26
23	76	22	21	47	5	23	35	11
34	64	24	18	46	6	10	14	32
29	64	15	9	51	3	19	22	21
28	59	28	17	45	7	31	9	15
30	61	19	13	67	12	17	13	18
22	74	28	24	56	9	18	19	4
37	79	29	21	64	7	16	11	19
29	72	16	26	53	11	15	15	13
21	80	19	27	57	8	-4	10	18
25	53	14	27	44	10	22	-2	18
26	76	12	18	47	10	10	9	14
38	61	20	28	59	8	7	19	10
44	69	17	23	58	2	4	3	15
33	78	32	27	61	13	15	-5	21
25	80	22	9	51	10	3	13	0
35	78	6	13	61	11	-4	14	14
35	77	16	21	52	16	20	10	22
25	73	13	12	51	7	7	10	14
34	75	29	20	60	7	0	10	27
36	78	16	37	56	14	19	-6	22
40	65	20	13	49	11	15	9	13
37	62	18	21	51	13	16	-9	12
45	72	18	22	46	6	18	-1	8
42	90	28	26	52	10	21	1	17
31	77	21	31	58	2	1	2	8
23	72	32	9	46	6	2	9	24
28	81	16	27	59	6	5	8	17
26	78	13	23	52	8	-2	18	12
15	62	14	25	54	11	19	9	4
36	68	14	20	45	2	-8	10	13
46	78	15	30	64	11	2	10	11
29	61	20	18	55	10	4	14	21
31	88	32	15	53	17	21	6	22
35	71	27	18	64	14	18	-4	18

28	78	22	19	55	15	14	11	19
35	64	20	3	42	8	20	16	13
39	76	26	22	57	10	14	7	24
36	61	12	16	48	11	11	4	22
37	72	20	23	62	15	32	5	22
21	77	13	25	54	5	7	12	29
34	60	25	18	59	5	15	10	11
41	79	7	30	49	14	18	15	14
39	66	19	21	46	13	2	11	5
30	73	17	27	58	2	23	-8	26
22	80	23	23	57	7	34	0	14
38	75	22	35	58	6	21	11	20
42	71	21	21	55	16	1	5	9
39	79	13	13	48	12	25	9	24
25	74	19	23	52	12	18	3	9
50	70	11	31	57	8	10	10	14
33	52	24	29	59	7	1	9	24
49	76	20	25	54	19	14	8	18
44	65	15	14	51	10	20	3	12
20	62	34	3	57	2	-7	10	17
18	69	34	28	45	9	12	16	19
34	66	20	28	51	2	12	9	28
34	63	21	14	40	11	12	20	22
36	50	1	28	61	8	13	13	12
32	69	33	29	56	11	10	21	8
35	82	12	7	60	14	13	17	12
25	77	27	38	65	15	-7	20	14
38	65	21	23	59	12	3	-5	14
31	81	23	14	59	8	19	-6	5
42	48	23	25	62	2	17	11	26
11	70	17	34	51	13	4	4	14
39	82	25	6	56	5	19	4	22
41	68	19	23	52	7	-6	5	13