



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Tomas Sakari

Excel-pohjaisten työkalujen kehittäminen pumpuille ja kompressoreille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

08.05.2019

Tekijä Otsikko	Tomas Sakari Excel-pohjaisten työkalujen kehittäminen pumpuille ja kompressoreille
Sivumäärä Aika	28 sivua 08.05.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine	Koneensuunnittelu
Ohjaajat	Suunnittelupäällikkö Petri Poikonen Lehtori Janne Nuotio
<p>Insinööriyön tarkoituksena, oli kehittää pumpuille ja kompressoreille Excel-pohjaiset työkalut, joissa on sisään rakennettuna tarvittavat laskentakaavat sekä lopputuotteena syntyvä laitekortti. Näistä Excel-työkaluista pyrittiin tekemään mahdollisimman selkeitä, jotta niitä pystyttäisiin vaivattomasti käyttämään.</p> <p>Insinööriyö toteutettiin pääsääntöisesti FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n tiloissa. Yritykseltä saatiin tarvittavat materiaalit, koulutukset ja työkalut työn tekemiseen.</p> <p>Insinööriyö aloitettiin kirjallisen materiaalin läpi käynnillä, josta selvitettiin tarvittavat laskentakaavat Excel-työkaluun. Kaikki kaavat tarkistettiin ainakin kahdesta lähteestä, niiden oikeellisuuden varmistamiseksi. Kun kaavat ja taulukot olivat Excel-työkaluissa ja niiden toimivuus tarkistettu, Excel-työkalujen ulkoasu muokattiin mahdollisimman käyttäjäystävälliseksi ja niin, että manuaalisesti syötettävien arvojen määrä oli minimoitu.</p> <p>Kehitetystä kahdesta Excel-työkalusta lopputuotteena syntyy kyselylomake, laitekortti, mihin tulee suurin osa arvoista automaattisesti laskennan tuloksena. Tällä tavoin on mahdollista vähentää työssä käytettävää aikaa, kun laskenta ja kyselylomake tulevat yhdestä Excel-työkalusta.</p> <p>Molemmat Excel-työkalut tulevat FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n käyttöön.</p>	
Avainsanat	Excel, kompressori, laitekortti, mitoitus, pumppu

Author Title	Tomas Sakari Development of Excel Based Tools for Pumps and Compressors
Number of Pages Date	28 pages 8 May 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Professional Major	Machine Design
Instructors	Petri Poikonen, Planning Manager Janne Nuotio, Senior Lecturer
<p>The aim of this Bachelor's thesis was to create Excel-based machine cards for pumps and compressors. Machine cards should include correct calculation formulas. In addition, a user-friendly interface is very important.</p> <p>FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy commissioned this thesis. They also provided all the required material, training and tools to make the execution of the thesis possible.</p> <p>The thesis process was started with examining formulas from topic-related literature and adding them to an Excel spreadsheet. All formulas were double-checked to ensure that they were correct. When all formulas and tables were included in the Excel tool, then the functionalities were checked, and the Excel interface was modified to be as user-friendly as possible and the number of manually filled cells was minimized.</p> <p>In the end of those two Exceles were merged questionnaire, datasheet. The output datasheet gathers all needed values from calculations automatically. This way it is possible to save working time, because calculations and questionnaire are in the same Excel.</p> <p>In conclusion, FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy will utilize the developed Excel-based tool for pumps and compressors in their operations.</p>	
Keywords	Excel, compressor, machine card, dimensioning, pump

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	FCG-konserni	1
3	Työn toteutus	2
3.1	Koulutukset ja kokoukset	2
3.2	Excel-työkalun laskentaosion muodostaminen	2
3.3	Excel-työkalun ulkoasun muodostaminen	3
3.4	Excel-työkalun toimivuuden tarkistus	4
4	Laitekortti	4
5	Pumppujen Excel-työkalu	4
5.1	Pumpun toiminta	5
5.2	Pumpun mitoitus	6
5.2.1	Lähtötiedot	7
5.2.2	Tasot	8
5.2.3	Virtaus putkessa	9
5.2.4	Painehäviöt	11
5.2.5	NPSHa:n määrittäminen	12
5.2.6	Keskipakopumpun moottorin teho	14
6	Kompressorien Excel-työkalu	15
6.1	Kompressorien toiminta	15
6.2	Kompressorien mitoitus	16
6.2.1	Lähtötiedot	16
6.2.2	Ilman paineistaminen	17
6.2.3	Putkistonpainehäviöt	18
6.2.4	Paineilman arvot	19

7	Excel-työkalujen luominen	20
7.1	Taulukot-välilehti	20
7.2	Mitoitus-välilehti	21
7.3	Käyrät-välilehti	23
7.4	Datasheet- ja infovälilehdet	24
8	Testaus	25
9	Yhteenveto	25
	Lähteet	27

Lyhenteet

FCG	Finnish consulting group (suomalainen konsultointiyritys)
KSB	Klein, Schanzlin und Becker (saksalainen pumppuvalmistaja)
NPSHa	Net positive suction head available (käytettävissä oleva pumpun imukorkeus)
NPSHreq	Net positive suction head required (vaadittu pumpun imukorkeus)

1 Johdanto

Tämän insinööriyön tarkoituksena oli luoda FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n Microsoft Word -pohjaisten laitekorttien tilalle Excel-pohjaisia laitekortteja, joihin on sisäänrakennettuna tarvittavat laskentakaavat. Piti siis luoda kahden työkalun kokonaisuudesta koostuva Excel-työkalu, jonka lopputuotteena olisi laitekortti. FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy on käyttänyt Word-pohjaisia laitekortteja sekä Excel-taulukoita monissa projekteissa, ja näitä oli käytettävä lähtötietoina.

Excel-pohjainen laskentatyökalu oli tehtävä mahdollisimman käyttäjäystävälliseksi, siten että jokainen yrityksessä työskentelevä pystyisi tarvittaessa käyttämään sitä. Käyttäjäystävällisyyden, laskennan sekä laitekorttien tuominen yhteen tulisi säästämään läpimenoaikaa suunnittelussa.

FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy halusi laitekortit pumpuista sekä kompressoreista.

2 FCG-konserni

FCG-konserni on suomalaisessa omistuksessa oleva konserni, joka keskittyy kansainvälisesti toimivaan ohjelmistoliiketoimintaan, konsultointiin, koulutukseen ja monialaiseen yhdyskuntasuunnitteluun. Konsernissa toimii kaikkiaan noin 750 työntekijää. Liikevaihto on noin 80 miljoonaa euroa. FCG:n emoyhtiön toimitusjohtajana ja konserninjohtajana toimii Mari Puoskari. (1.)

FCG-konserni sisältää monia yrityksiä. Tämä insinööriyö on toteutettu FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n alaisuudessa, jonka liiketoimintaryhmän johtajana toimii Pauli Santala. (1).

3 Työn toteutus

Insinööri työ toteutettiin FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n toimitiloissa. Yritykseltä saatiin tarvittava aineisto ja työkalut työn suorittamiseen.

Aluksi piti tarkastella yrityksen aiempia Excel-pohjaisia laskentatyökaluja sekä Word-pohjaisia laitekortteja ja miettiä, miten nämä saataisiin helpointen yhdistettyä yhdeksi kokonaisuudeksi, joka toimisi mahdollisimman automaattisesti. Mallia lopputuotteen, laitekortin, ulkoasuun otettiin useista eri tahojen laitekorteista ja erittelylomakkeista.

3.1 Koulutukset ja kokoukset

Ennen Excel-pohjaisten työkalujen tekemisen aloittamista järjestettiin sekä pumppuja että kompressoreja koskevat erilliset koulutukset. Näissä koulutuksissa käytiin läpi pääpiirteittäin laitteiden toimintaan vaikuttavia asioita ja hieman laitteen rakenteen teoriaa.

Excel-työkalujen tekoa varten yrityksen sisällä pidettiin muutamia työpajoja, joihin osallistuivat Excel-työkaluja tulevaisuudessa käyttävät henkilöt. Näiden työpajojen pohjalta saatiin käsityksiä siitä, miten ennen on toimittu ja miten haluttaisiin toimia.

Koulutusten tarkoituksena oli helpottaa Excel-työkalun laskentaosion tekemistä, koska niistä saatiin tarpeellinen lähtötieto siitä, mitä valmistajien pitää tietää, kun heiltä kysytään tarjouksia kyseisistä laitteista. Laitteiden tarkempi tuntemus auttoi myös laskemisessa, kun osattiin hahmottaa, mikä liikkuu laitteen sisällä ja miksi se liikkuu.

3.2 Excel-työkalun laskentaosion muodostaminen

Yritykseltä saatiin riittävästi aineistoa, minkä seurauksena sitä ei tarvinnut etsiä muualta. Kirjat olivat pääsääntöisesti englanninkielisiä.

Työtä tehtiin aloittaen lopputuotteesta, eli ensin muodostettiin raakaversio laitekortista. Sen perusteella tiedettiin, mitkä olivat ne muuttujat, mitkä haluttiin laskea. Näin ollen

saatiin selkeä idea siitä, miten laskentaosio tulisi toteuttaa. Laskennassa käytettiin yleisiä kaikkien saatavilla olevia kaavoja, varmistaen näin tietojen saatavuus ja niiden paikkansapitävyys.

Aluksi Excel-työkaluun piti lisätä valmiiksi taulukoitua tietoa, josta itse kaavat pystyisivät hakemaan arvoja. Itse laskentaosio aloitettiin lisäämällä peruskaavoja ja sen jälkeen lisäämällä laitteen toimintaa koskevia kaavoja. Materiaalin läpikäyminen ennen laskentaosion tekemistä osoittautui hyödylliseksi, koska näin saatiin monimutkaisemmat kaavat tarkistettua paikkansapitäviksi eri lähteiden avulla.

Laskujen valmistuessa tietyistä muuttujista piirrettiin käyrät, joista pystytään helpommin tarkastelemaan laitteen käyttäytymistä eri arvoilla.

3.3 Excel-työkalun ulkoasun muodostaminen

Ulkoasusta tehtiin mahdollisimman hillitty ja selkeä. Tämä toteutettiin käyttämällä mahdollisimman vähän vaaleita värejä, poikkeuksena tässä oli soluun manuaalisesti kirjoitettava arvo ja oletusarvoon verrattuna poikkeava arvo, joille annettiin tummanvihreä ja tummanpunainen solun väri.

Selkeyttä Excel-työkaluun tuotiin vetovalikkojen avulla. Vetovalikoilla saatiin karsittua mahdollisia vääriä arvoja esimerkiksi putkikokoja valittaessa. Tietyille muuttujille annettiin oletusarvot, joita käyttäjä voi itse muokata sovelluksesta riippuen. Näillä oletusarvoasetuksilla saataisiin karsittua mahdolliset virheelliset tulokset.

Excel-työkalun laskentaosiota selkeytettiin yrityksen aiempiin versioihin verrattuna myös sillä, että se käydään läpi ylhäältä alas. Vanhemmissa yrityksen Exceleissä oli epäjohdonmukaisuuksia siinä, mitä solua seuraavaksi pitäisi muokata.

3.4 Excel-työkalun toimivuuden tarkistus

Excel-työkalun toiminnan ja laskujen paikkansapitävyyden tarkistamiseksi tuloksia vertailtiin yrityksen vanhojen Excel-työkalujen kesken sekä aineistoissa löytyvien esimerkkien kautta. Myös muutamien pumppu- ja kompressoritoimittajien verkkosivuilta löytyvien laskentaohjelmien tuloksia käytettiin mukana vertailussa.

4 Laitekortti

Laitekortilla (**datasheet**) tarkoitetaan laitteen teknisillä ominaisuuksilla varustettua tiedostoa. Tätä käytetään esimerkiksi tarjouskilpailussa työkaluna.

Laitekorteissa on yleisesti yrityksen logo, osoitetiedot sekä laitekortin tekijän nimi ja päiväys, ennen varsinaisia laitetietoja. Niihin saatetaan lisätä joitain käyriä, mitkä havainnollistavat laitteen haluttua toimintaa oleellisesti. Laitekorteissa on myös lisätiedoille varattu alue, mihin voidaan sijoittaa esimerkiksi erikoisten sovellusten vaatimia tietoja tai muita ylimääräisiä tietoja, joille ei ole varattua saraketta.

5 Pumppujen Excel-työkalu

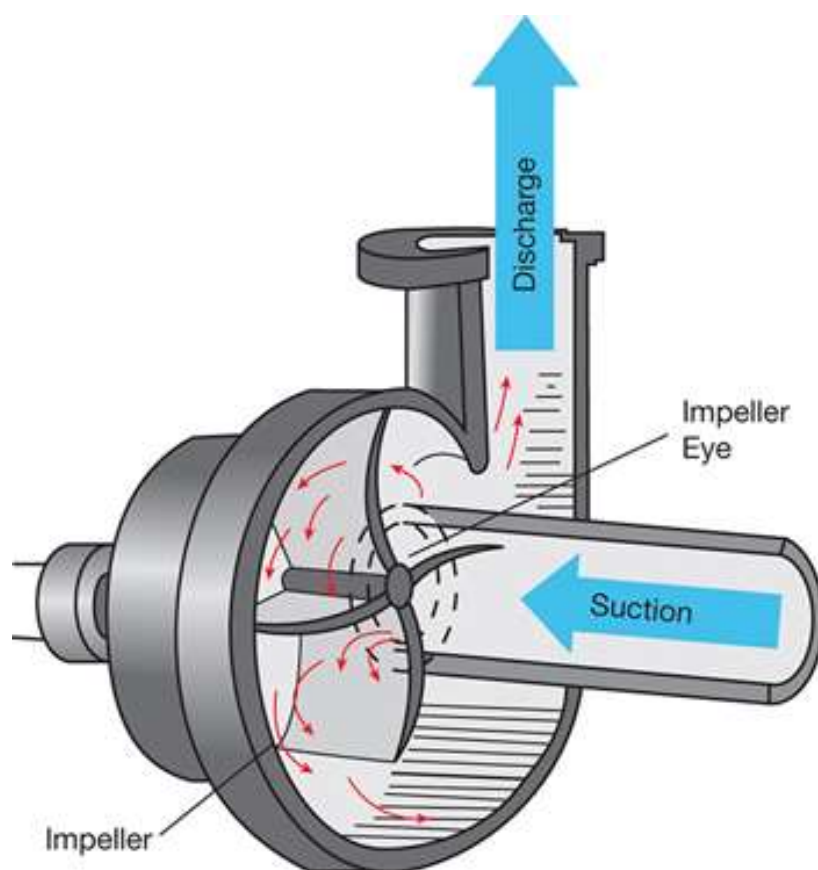
Opinnäytetyö aloitettiin pumppujen Excel-työkalulla, koska pumppujen toimintaa oli helppompi sisäistää, koska pumpuissa kulkeva neste erottuu fyysisesti toisin kuin kompressoreissa kulkeva kaasu. Pumppukorttia varten pidettiin FCG Oy:n tiloissa kokous, johon osallistui KSB Oy:n myyntipäällikkö. KSB Oy on kilpailukykyinen ja tunnettu pumppuvalmistaja, minkä takia oli hyvä pitää kokous tämän yrityksen kanssa. Kokouksessa käytiin läpi, mitä kaikkea pumppuvalmistajat haluaisivat asiakkaalta saada lähtötietoina. Myöhemmin KSB Oy:n tiloissa pidettiin erillinen pumppukoulutus.

Pumppujen Excel-työkaluun tulisi sisällyttää mahdolliset laskentakaavat, jotta lopputuote, pumppukortti, tulisi tuotettua mahdollisimman helposti. Tätä varten tulee tietää, miten pumppuja mitoitetaan ja millaisia laskukaavoja tulisi käyttää.

5.1 Pumpun toiminta

Vuonna 1689 fyysikko Denis Papin kehitti epäkeskopumpun, ja tämä on nykyään eniten käytetty pumpputyyppejä. Kyseistä pumppua kutsutaan yleisesti keskipakopumpuksi.

Epäkeskopumpun toiminta on varsin yksinkertainen, minkä pystyy näkemään kuvasta 1. Siinä pumpun tulopuolelta (**suction**) johdetaan nestettä juoksupyörän navalle (**impeller eye**), josta neste sinkoutuu juoksupyörän reuna-alueille muodostaen paineistetun nesteen, joka purkautuu (**discharge**) paineputkeen. Juoksupyörän suuren pyörimisnopeuden ansiosta sen akselille voi kytkeä suoraan tai kytkimellä suuren pyörimisnopeuden omaava sähkömoottori. (2, s. 8.)



Kuva 1. Epäkeskopumpun toiminta. (3)

Pumppuja on kehitetty monenlaiseen eri käyttöön, joista keskipakopumppu on perinteiseen kuivalla maalla pumppaukseen tarkoitettu yleispumppu.

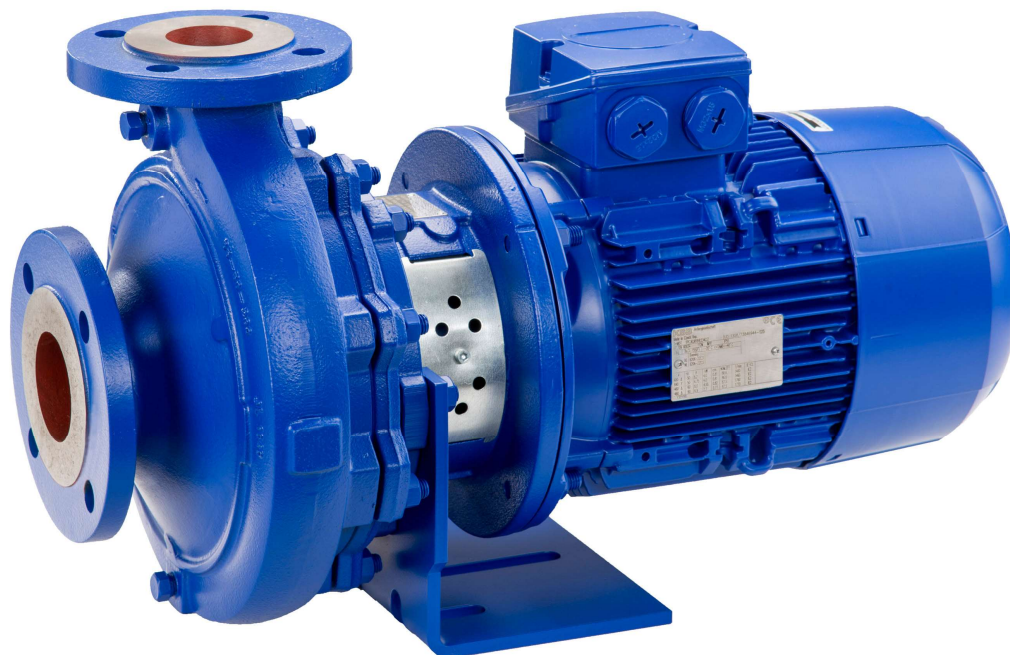
Paineenkorotuspumppua käytetään teollisuudessa nostattamaan pumpattavan nesteen paine sopivalle tasolle.

Uppopumppuja käytetään tilanteissa, joissa pumppu upotetaan nesteeseen, jota se pumppaa sieltä käsin. Uppopumput ovat yleisesti nestejäähdytteisiä ja toimittajilta on mahdollista tilata, myös kuiva-asenteisia uppopumppuja, jotka asennetaan kuivaan tilaan. Tällaisen uppopumpun etuna on, että se toimii ongelmitta, vaikka tila jostain syystä alkaisi tulvia ja pumppu jäisi veden alle.

5.2 Pumpun mitoitus

Ensimmäisenä tulee selvittää, minkälaisia putkia, pumppuun liitetään. Tässä kyseisessä Excel-työkalussa käytetään paineluokkaan P10 kuuluvia teräsputkia, joiden halkaisija ja seinämänpaksuus määräytyvät standardin SFS-EN 10217-7 (4) mukaisesti.

Imu- ja painepuolen putkistot lasketaan täysin samanlaisilla kaavoilla, mutta niissä on tyypillisesti eri putkikoot. Kuvan 2 pumpun vasempaan pätyyn tulee kiinnittää imupuolen putkisto ja pumpun päälle painepuolen putkistot. (5.)



Kuva 2. KSB:n etabloc-tyyppisarjan keskipakopumppu (6).

5.2.1 Lähtötiedot

Pumpusta riippumattomat muuttujat on tärkeää selvittää jo alkuvaiheissa. Näihin alkuarvoihin kuuluvat virtaavan aineen tiheys $[\rho]$, dynaaminen viskositeetti $[\eta]$, normaali putoamiskiihtyvyys $[g]$, tilavuusvirta $[Q]$ sekä pumppujen lukumäärä. Dynaamiselle viskositeetille on olemassa laskukaavoja, mutta tässä Excelissä tyydytään taulukkoarvoihin. Tilavuusvirta lasketaan kaavan 1 mukaisesti (7, s. 186).

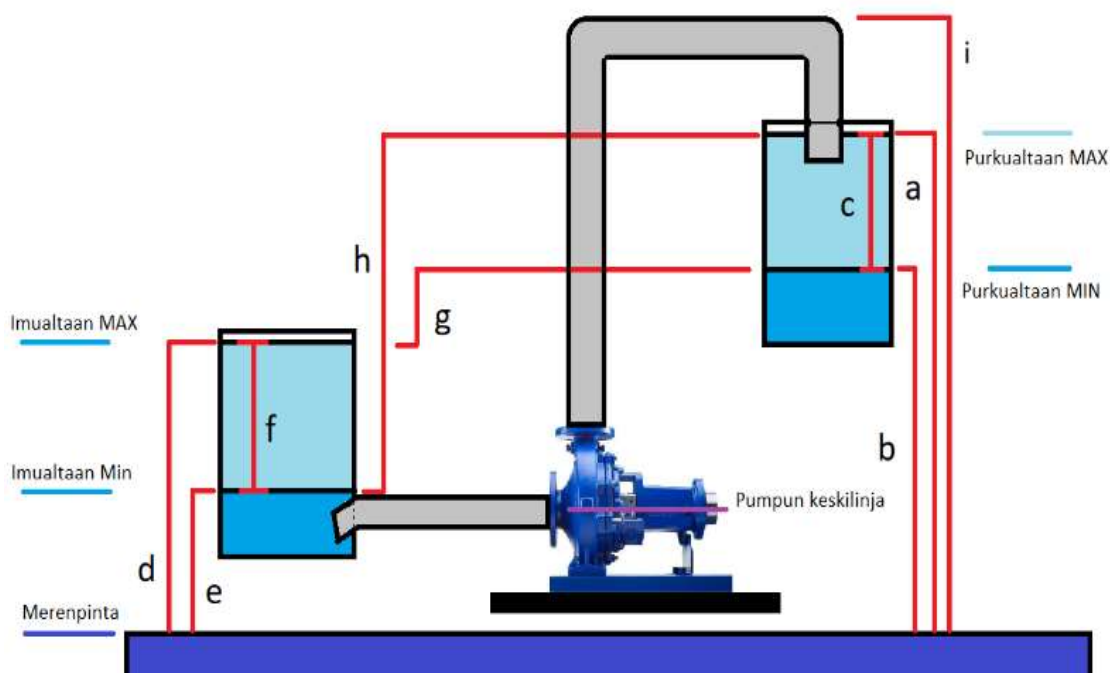
$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

(1)

5.2.2 Tasot

Pumpun sijoitus on kriittinen osa putken mitoitus, koska pumpulle saattaa tulla nestettä gravitaation avulla, jolloin imuallas tai -säiliö on pumpun yläpuolella tai sitten pumpu saattaa sijaita imualtaan tai -säiliön yläpuolella, jolloin pumpun tehoa on lisättävä, koska pumpulta vaaditaan paljon suurempaa imutehoa.

Kuvassa 3 on havainnollistettu imualtaan minimi- ja maksimikohdat merenpinnasta katsottuna, purkualtaan minimi- ja maksimikohdan merenpinnasta tarkasteltuna, pumpun keskilinjan taso. Laskennassa on otettava huomioon, että purkuputki saattaa olla korkeammalla kuin purkuallas, jolloin käynnistystilanteessa pitää laskea nostokorkeudet tämän putken mukaisesti eikä altaan.



Kuva 3. Pumppuun kohdistuvat tasot.

5.2.3 Virtaus putkessa

Kun on valittu sopiva putkikoko, niin seuraavaksi pitää todentaa putken pituus [l].

Pumppuja mitoittaessa otetaan laskennassa huomioon virtausnopeus [w], jonka avulla pystyy selkeämmin todentamaan, kuinka nopeasti neste etenee putkessa eteenpäin. Virtausnopeus lasketaan tilavuusvirran ja putken sisäpoikkipinta-alalla kaavan 2 mukaisesti (7, s. 5). Ohjearvoina voidaan käyttää pumpun imuputkelle 0,5 – 1,5 m/s ja paineputkelle 1,5 – 3,0 m/s, kuitenkin riippuen sovelluksesta.

$$w = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

Putkistot eivät ole sisäpuolelta absoluuttisen sileitä, joten on otettava huomioon putken karheusarvo [k], mikä riippuu putken iästä ja materiaalista. Suonion (8, s. 9) koulutusmateriaalissa esitetään, että uudelle hitsatulle teräsputkelle karheusarvo on 0,03 – 0,05 mm ja kuluneelle hitsatulle teräsputkelle kerroin on 0,15 – 1,5 mm.

Virtaus putkessa on joko laminaarista tai turbulenttista. Laminaarisessa virtauksessa neste kulkee tasaisesti, mutta turbulenttisisä virtauksessa neste muodostaa putken sisällä pieniä pyörteitä aiheuttaen virtaukselle enemmän häviöitä ja kitkaa. Virtauksen kitkavastuskerrointa määrittäessä täytyy selvittää Reynoldsin luku [Re], mikä määritellään kaavassa 3 (7, s. 190).

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta} \quad (3)$$

Reynoldsin luvun kehitti englantilainen fyysikko Osborne Reynolds (1842 – 1912), jotta saataisiin määriteltyä tunnusluku turbulenttisen ja laminaarisen virtauksen välille. Kokeellisesti on osoitettu, että kun $Re < 2000$, virtaus on laminaarista ja kun $Re > 3000$, virtaus on turbulenttista. Näiden kahden alueen välille jää siirtymäalue, jossa virtaus on epästabiilia, jolloin virtauksen muoto, laminaarisen ja turbulenttisen välillä, voi vaihdella. (9, s. 335 – 336)

Tapauksissa, joissa Reynoldsin luvun kautta ollaan päädytty siihen, että virtaus on laminaarista, on laskettava virtauksen kitkavastuskerroin $[\xi]$ laminaarisen virtauksen kitkavastuskertoimen kaavalla. Laminaarisessa virtauksessa kitkavastuskerroin riippuu ainoastaan Reynoldsin luvusta, ja se lasketaan kaavan 4 mukaisesti. (8, s. 8.)

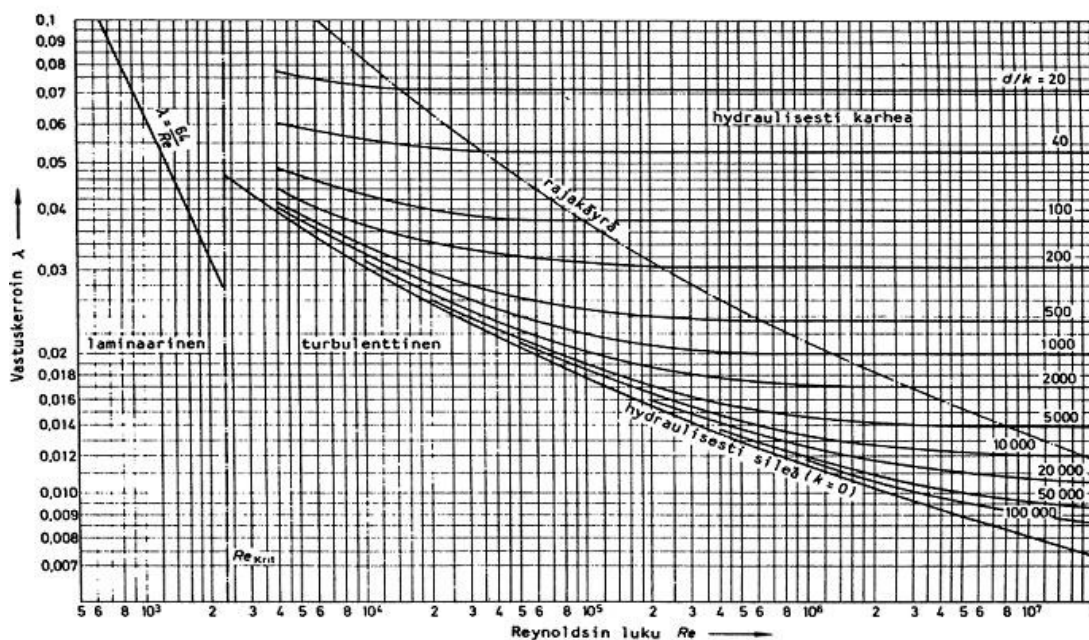
$$\xi = \frac{64}{Re} \quad (4)$$

Kuitenkin, jos on päädytty siihen, että virtaus on turbulenttista, niin voidaan riittävällä tarkkuudella käyttää Moodyn yhtälöä, kaava 5, virtauksen kitkavastuskertoimen selvittämiseen. (10, s. 19.)

$$\xi = 0,005 + 0,15 + \sqrt[3]{\frac{k}{d}} \quad (5)$$

Käytettäessä Moodyn yhtälöä Reynoldsin lukua ei tarvita, vaan muuttujana toimii pinnan karheuden suhde sisäpoikkipinta-alaan.

Kitkavastuskertoimia voidaan tarkastella myös Moodyn käyrästä avulla kuvasta 4. Moodyn käyrästä tarkastellaan Reynoldsin lukua suhteessa pinnan karheuteen, kun halutaan selvittää kitkavastuskerrointa. Siinä on esitettyä myös rajapinta, jolloin virtaus tyyppi muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi. (10, s.19.)



Kuva 4. Moodyn käyrästä (10, s.19).

5.2.4 Painehäviöt

Painehäviöitä tarkastellessa täytyy ottaa huomioon putken muotokappaleet ja mahdolliset putkessa olevat venttiilit. Putken muotokappaleilla tarkoitetaan putkistoissa olevia käyriä, supistuksia, haaroja jne. Jokaiselle venttiilille ja putken muotokappaleelle on annettava paikallisvastuskerroin $[\zeta]$, joka on suuntaa-antava ja riippuu täysin kyseisen muotokappaleen koosta tai venttiilityypistä. Näistä erityyppisistä paikallisvastuskertoimista löytyy paljon taulukoituja tietoja, joista Suonion (8, s. 12) koulutusmateriaalissa esitellään esimerkiksi palloventtiin paikallisvastuskerroin, mikä on 1 – 4.

Paikallisvastusten määrittämisen ja tiettyjen muotokappaleiden sekä venttiilien kappalemäärän tarkastuksen jälkeen, pystytään laskemaan jokaiselle omalle muotokappaleelle ja venttiilille kertavastuksen painehäviö $[\Delta p]$ kaavan 6 mukaisesti (10, s. 24). Tärkeää on määrittää mahdollisimman tarkasti kaikkien eri muotokappaleiden ja venttiilien määrät ja paikallisvastuskertoimet.

$$\Delta p = \zeta * \frac{\rho w^2}{2} \quad (6)$$

Pelkät kertavastusten painehäviöt ovat toisarvoisia, ja niitä ei tule sen enempään ottaa huomioon. Kuitenkin kokonaispainehäviö [Δp_{KOK}] on tärkeä laskea kaavalla 7, jotta saadaan selkeys systeeminpainehäviöistä. (8, s. 8.)

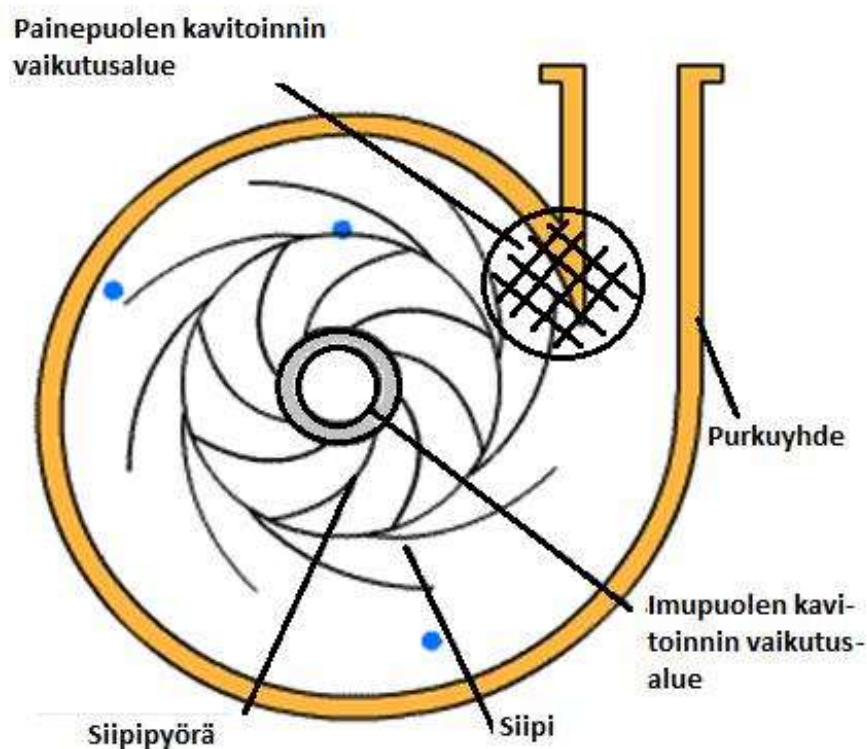
$$\Delta p_{KOK} = \left(\xi * \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) * \frac{\rho * w^2}{2} \quad (7)$$

Kokonaispainehäviön kaavalla laskettaessa saadaan yksiköksi pascalleita, joita ei pysty käyttämään laskutoimituksissa sen pidemmälle, kun mitoitetaan pumppua. Näin ollen pitää edellisen kaavan kautta saatu vastaus muuttaa vastuskorkeudeksi [h_f], kaavan 8 (10, s.18) esittämällä tavalla, jolla saadaan tulos metreinä ja selkeämmin ymmärrettäväksi. Huomioitavaa on, että paine- ja imupuolella on omat kokonaispainehäviöt, jotka pitää summata yhdeksi. (10, s. 18.)

$$h_f = \Delta \frac{p_{KOK}}{\rho * g} \quad (8)$$

5.2.5 NPSHa:n määrittäminen

NPSH_a tulee englannin kielen sanoista **Net Positive Suction Head**, ja tätä arvoa tarvitaan kavitaatoriskin välttämiseksi. Kuvassa 5 näkyvät kavitaation vaikutusalueet. Jos juoksupyörän (kuvassa siipipyörä) imureunalta tarkastellessa huomataan, että nesteen staattinen paine putoaa alle nesteen pumppaamislämpötilan mukaisen höyrystymispaineen, syntyy kavitaatioilmiö. Siinä neste höyrystyy ja täten muodostaa höyrykuplia. Nämä pumpun sisällä eteenpäin liikkuvat höyrykuplat tiivistyvät paineen alla ja lysähtävät kokoon. Tällöin höyrykuplan ulkopuolella oleva neste lyö pumpun seinämää tai juoksupyörää suurella voimalla. Metallipinnat vaurioituvat kavitaation seurauksena. Tätä ilmiötä kutsutaan kavitaatioeroosioksi. Kavitaatio saattaa johtaa juoksupyörän rappeutumiseen ja hajoamiseen, joten sitä täytyy välttää.



Kuva 5. Kavitaation vaikutusalueet pumpussa (11).

Pumpun imureunalla olevan paineen täytyy olla korkeampi kuin pumpattavan nesteen höyrystymispaine. $NPSH_a$:ta käytetään tässä tilanteessa ilmaisemaan vastuskorkeutena käytettävissä olevaa aluetta. Alaviite "a" tulee englannin kielen sanasta **available** eli käytettävissä. $NPSH_a$:n määrittelee suunnittelija. $NPSH_{req}$ on pumppuvalmistajan kokeellisesti pumpulle määrittelemä NPSH-arvo, johon voidaan tarvittaessa lisätä varmuusmarginaali verrattaessa näitä kahta NPSH-arvoa keskenään. Alaviite "req" tulee englannin kielen sanasta **required** eli vaadittu. (12, s. 13 – 14.)

$NPSH_a$ lasketaan kaavalla 9 (10, s. 43 – 45).

$$NPSH_a = \frac{p_e + p_b - p_d}{\rho * g} + \frac{w^2}{2g} \pm H_{sgeo} - h_f \quad (9)$$

p_e on arvioitu paine imusäiliössä (imualtaassa paine on 0 bar)

p_b on ilmanpaine

p_e on pumpattavan nesteen höyrystymispaine

H_{sgeo} on imusäiliön nestepinnan ja pumpun imuaukon korkeusero (jos pumppu sijaitsee nestepinnan yläpuolella niin positiivinen, jos alapuolella niin negatiivinen)

$NPSH_a$:n on noudatettava seuraavaksi esitettyä ehtoa, jotta pumppu ei kavitoi (10, s. 45).

$$NPSH_a > NPSH_{req} + 0,5m \quad (10)$$

5.2.6 Keskipakopumpun moottorin teho

Olellainen osa pumpun toimintaa on sen sähkömoottori. Tässä Excel-työkalun laskentaosiossa on otettu huomioon yleisimmän pumpputyypin, keskipakopumpun, tehonlaskenta. Moottorin akseliteho [P_{teor}] saadaan laskettua kaavalla 11. (10, s.11.)

$$P_{teor} = \rho * g * H * Q \quad (11)$$

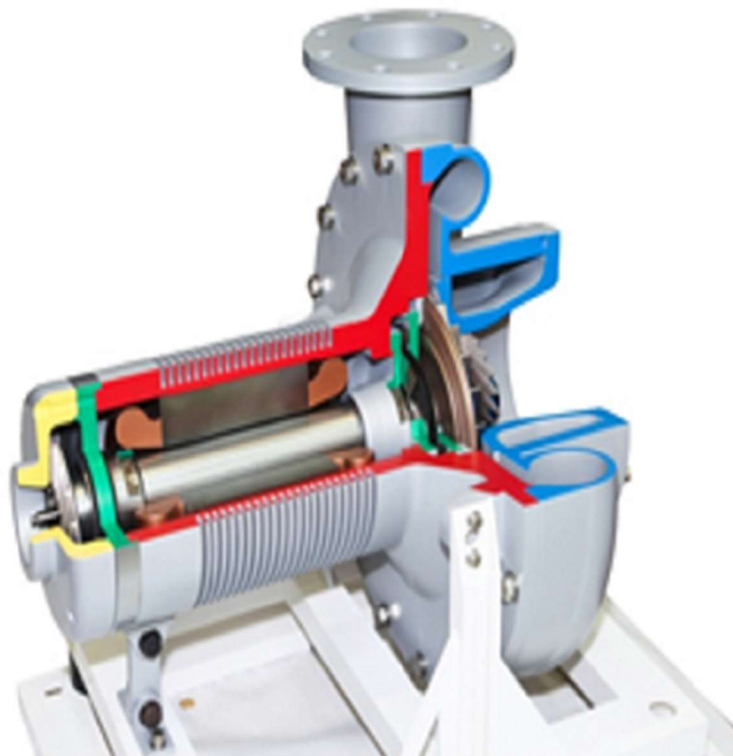
Kun halutaan todellisuutta vastaava tehon tarve, niin jaetaan kaavalla 10 saatu tulos arvioidulla hyötysuhteella [η] (10, s.11). Sähkömoottorin hyötysuhde saadaan yleisesti laitemerkinnöistä tai toimittajalta.

6 Kompressorien Excel-työkalu

Kompressorien mitoitusta varten osallistuttiin AxFlow:n järjestämään kompressorikoulutukseen, jossa esiteltiin korealaisen Neuros-yrityksen kompressoreita ja käytiin läpi kompressorien rakennetta, teoriaa sekä tulevaisuuden näkymiä kompressoritekniikassa.

6.1 Kompressorien toiminta

Kompressori on pumpun tavoin toimiva laite, jonka toimintaperiaate on sama kuin pumpuilla. Kompressoreissa kuitenkin imupuolelta johdetaan kaasua sisään ja sitä paineistetaan tilavuutta pienentämällä. Kuvassa 6 on esiteltyä Neurosin kompressori, jossa on ilmalaakerointi kitkan minimoimiseksi. (14.)



Kuva 6. Neurosin keskipakokompressori, jossa ilmalaakerointi (14).

Kompressoreita on muutamia erilaisia tyyppejä. Tunnetuin näistä on turboahdin, joita käytetään mm. autoissa. Polttomoottorisovelluksissa turboahdin saa tyypillisesti moottorin pakokaasuista käyttövoimansa, mutta niitä on myös hihnakäyttöisiä. (15, s. 169.)

Mäntäkompressorissa kaasua puristetaan männän avulla ja täten saadaan paineistettua kaasua, joka johdetaan putkistoon tai paineastiaan. Toiminta on sykkivää, eikä se täten toimi kaikissa sovelluksissa. (15, s. 170.)

Muita yleisesti käytössä olevia kompressorityyppejä ovat esimerkiksi keskipakokompressori ja ruuvikompressori. (15, s. 171.)

6.2 Kompressorien mitoitus

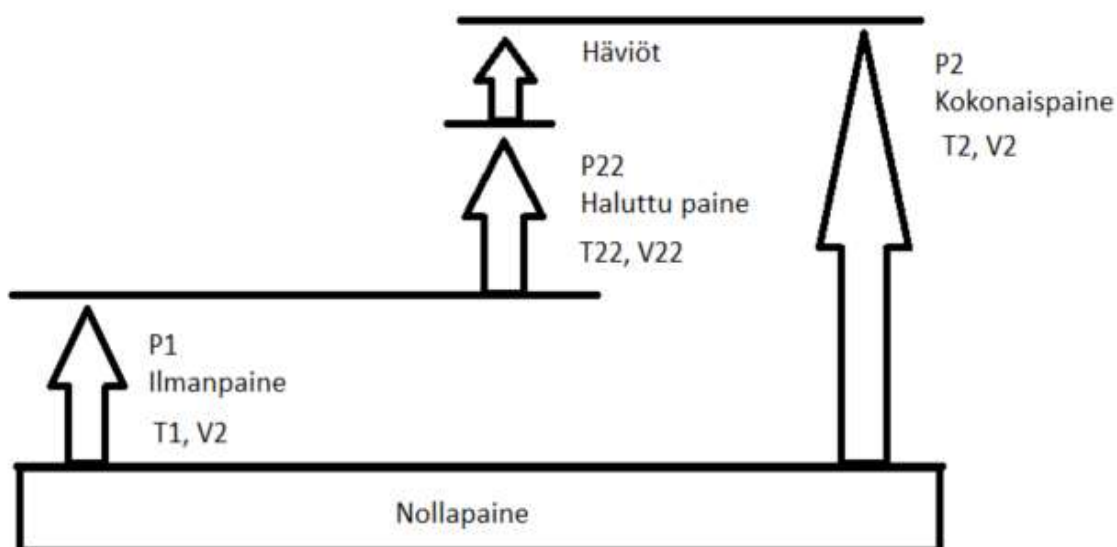
Kompressoria voi siis ajatella perinteisenä pumppuna, mikä paineistaa nesteen sijaan kaasuja, mutta laskennallisesti ne poikkeavat toisistaan hieman. Ere johtuu siitä, että pumpuissa käytettävä neste on käytännössä kokoonpuristumatonta, kun taas kaasut ovat kokoonpuristuvia. (14.)

Ensimmäisenä tulee selvittää, minkälaisia putkia kompressorin liitetään. Tässä kyseisessä Excel-työkalussa käytettiin paineluokkaan P10 kuuluvia teräspanputkia, joidenka halkaisija ja seinämänpaksuus määräytyvät standardin SFS-EN 10217-7 (4) mukaisesti.

6.2.1 Lähtötiedot

Alkuarvoja tässä Excel-työkalussa on kolme: lämpötila [T_1], tilavuusvirta [Q_1] sekä haluttu paineen nosto [P_{22}]. Haluttu paineen nosto tarkoittaa tässä tapauksessa sitä, minkä paineista ilmaa loppukäyttäjä tarvitsee.

Kompressoreiden paineet ilmoitetaan yleisesti baareina [bar]. On kuitenkin otettava huomioon, puhutaanko absoluuttisesta paineesta (engl. absolute) vai suhteellisesta paineesta (engl. gauge). Kuvaa 7 tarkastellessa P_1 ja P_2 ovat absoluuttisia paineita eli niissä on otettu ilmanpaine mukaan, kun taas P_{22} ja häviöt on tässä Excel-työkalussa laskettu suhteellisena paineena. (16, s. 12.)



Kuva 7. Kompressoriin kohdistuvat paineet (14).

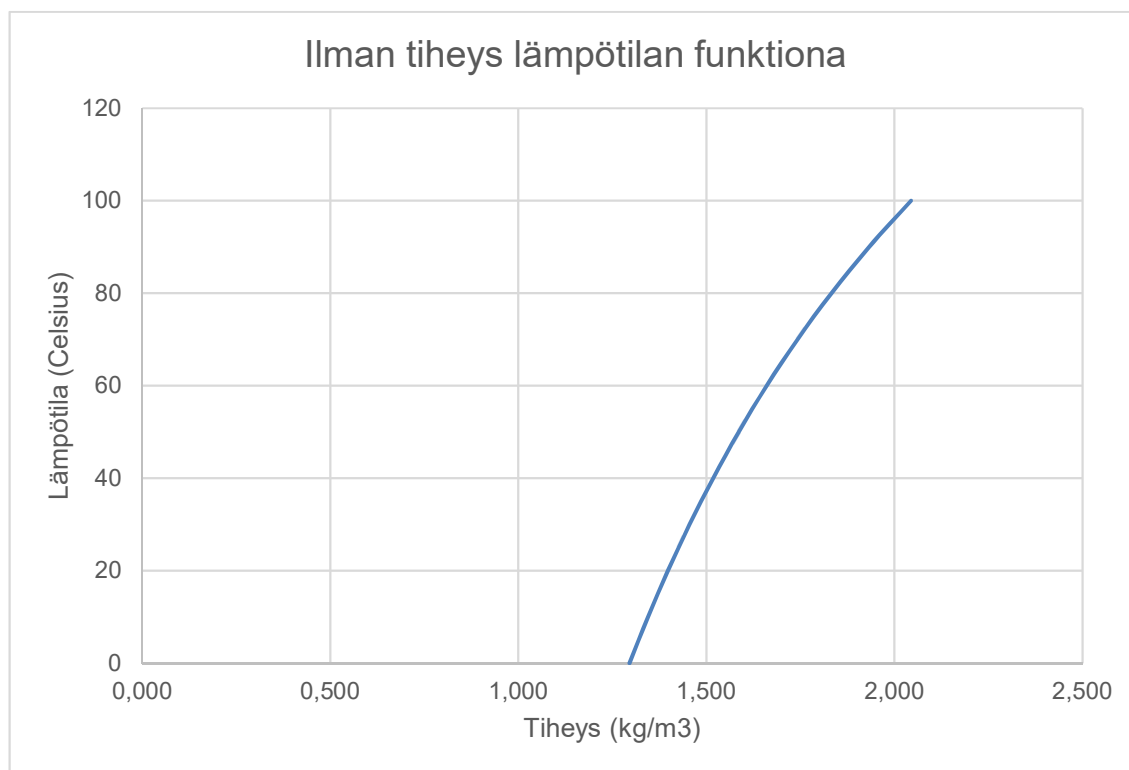
6.2.2 Ilman paineistaminen

Paineistettaessa ilmaa on otettava huomioon ilman alkulämpötila, joka vaikuttaa sen tiheyteen. Ilman tiheys vaikuttaa kaikkiin laskukaavoihin, joita tarvitaan kompressoria määrittäessä. Ilman tiheys voidaan määrittää kaavalla 12 (17, s. 603).

$$\rho = \frac{p_0 * M}{R * T_x} \quad (12)$$

Kaavaa käyttäessä on tiedettävä ilmanpaine normaalitilassa [p_0], yleinen kaasuvakio [R], kaasun moolimassa [M] sekä lämpötila [T_x]. Taulukosta 1 nähdään, ettei ilman tiheys muutu lineaarisesti.

Taulukko 1. Ilman tiheys lämpötilan funktiona.



6.2.3 Putkistonpainehäviöt

Putkiston painehäviöitä laskiessa pitää tietää putken sisähalkaisija ja putken pituus. Näillä tiedoilla voidaan kaavan 2 mukaan laskea virtausnopeus.

Reynoldsin lukua ei välttämättä tarvita putkiston painehäviöiden laskemisessa, mutta se on hyvä laskea, jotta tiedettäisiin, onko virtaus laminaarista vai turbulenttista.

Ilmalle on erilaisille venttiilille ja putkien muotokappaleille omat paikallisvastuskertoimet, jotka poikkeavat nesteiden paikallisvastuskertoimista. Paikallisvastuskertoimien avulla lasketaan paikalliset painehäviöt ja muutetaan ne vastuskorkeudeksi kaavojen 6, 7 ja 8 mukaisesti.

Kokonaispainehäviötä laskiessa on tiedettävä, ettei laskukaava ole sama kuin pumpuilla. Kompressoreiden putkistojen kokonaispainehäviöt lasketaan kaavan 13 mukaisesti.

Kaavassa 13 on esitettyä myös joidenkin arvojen yksiköt, koska ne poikkeavat yleisesti käytetyistä yksiköistä (8, s. 19). Todellisuudessa putkiston painehäviöillä ei ole kompressorien kannalta niin suurta merkitystä kuin pumppujen, koska toimilaitteissa olevat painehäviöt saattavat olla monta kokoluokkaa suuremmat, esimerkiksi lämmönvaihtimilla, äänenvaimentimilla ja säätöventtiileillä.

$$\Delta p_{kok}(kPa) = 1,6 * 10^{12} * Q_1^{1,85} * \frac{l(m)}{d^5(mm)*p_1(kPa)} \quad (13)$$

6.2.4 Paineilman arvot

Todellinen paineilman paine saadaan summaamalla alkupaine, painehäviöt ja haluttu paineenmuutos.

Paineistetun ilman lämpötila on tärkeä laskea, koska toimilaitteille saattaa olla määritetty maksimi lämpötila-arvoja. Paineistetun ilman lämpötila voidaan laskea isokoorisen tilanmuutoksen kaavalla. Isokoorisen tilanmuutoksen kaavaa, käytetään yleisesti, kun sovelletaan käsittää suljetussa säiliössä olevan kaasun lämmitystä tai jäädytystä. Isokoorinen tilanmuutos lasketaan kaavan 14 mukaisesti. (9, s. 450.)

$$\frac{T_1 * p_2}{p_1} = T_2 \quad (14)$$

Luvun alussa todettiin, että kaasut ovat kokoon puristuvia, täten paineilman tilavuusvirta muuttuu huomattavasti ja se on syytä laskea. Sen saadaan laskettua käyttäen kaavaa 15. (16, s. 13.)

$$Q_2 = Q_1 * \frac{T_2}{T_1} * \frac{p_1}{p_2} \quad (15)$$

Tärkeää laitteiden kannalta on myös tietää paineistetun ilman nopeus putkessa.

7 Excel-työkalujen luominen

Sekä pumpuissa että kompressoreissa noudatettiin yhtenäistä periaatetta, jotta Excel-työkaluja olisi helppo käyttää. Periaatteena oli luoda viisi välilehteä: taulukot, mitoitus, käyrät, datasheet ja info.

Työn teettäjän puolelta oli toive, että Excel-työkalut olisivat mahdollisimman automaattisia eikä niihin tarvitsisi manuaalisesti kirjoittaa montaa arvoa.

7.1 Taulukot-välilehti

Taulukot-välilehdellä on nimensä mukaan taulukoita, joita käytetään hyväksi mitoitusvälilehdellä. Tällä välilehdellä löytyy myös kuvia ja liitteitä, joista pystyy tarkistamaan mm. putkien karheuksia, paikallisvastuskertoimia ja putkikokoja. Myös kaikki käytetyt kaavat ja niiden lähteet ovat merkittynä. Taulukossa 2 on havainnollistettu eri DN-putkikoot Excel-muotoisena.

Taulukko 2. DN-putkikoot taulukoituna Excelissä.

	Putki H2 putket	Putken ulkohalkaisi	Seinämän paksuus	Sisähalka isija	Putken poikkipinta-ala
	PN10	[D] (mm)	[t] (mm)	[d] (mm)	[A] (m ²)
DN					
10	DN 10	17,2	1,6	14	0,00015
15	DN 15	21,3	1,6	18,1	0,00026
20	DN 20	26,9	1,6	23,7	0,00044
25	DN 25	33,7	1,6	30,5	0,00073
32	DN 32	42,4	1,6	39,2	0,00121
40	DN 40	48,3	1,6	45,1	0,00160
50	DN 50	60,3	1,6	57,1	0,00256
65	DN 65	76,1	1,6	72,9	0,00417
80	DN 80	88,9	2	84,9	0,00566
100	DN 100	114,3	2	110,3	0,00956
125	DN 125	139,7	2	135,7	0,01446
150	DN 150	168,3	2	164,3	0,02120
200	DN 200	219,1	2	215,1	0,03634
250	DN 250	273	2	269	0,05683
300	DN 300	323,9	2,6	318,7	0,07977
350	DN 350	355,6	2,6	350,4	0,09643
400	DN 400	406,4	3,2	400	0,12566
450	DN 450	457	3,2	450,6	0,15947
500	DN 500	508	4	500	0,19635
600	DN 600	610	4	602	0,28463
700	DN 700	711	5	701	0,38595
800	DN 800	813	6,3	800,4	0,50316
900	DN 900	914	6,3	901,4	0,63815
1000	DN 1000	1016	8	1000	0,78540
1200	DN 1200	1220	8	1204	1,13853
1400	DN1400	1 420,00	15,00	1390	1,51747
1600	DN1600	1 620,00	15,00	1590	1,98557
1800	DN1800	1 820,00	15,00	1790	2,51649

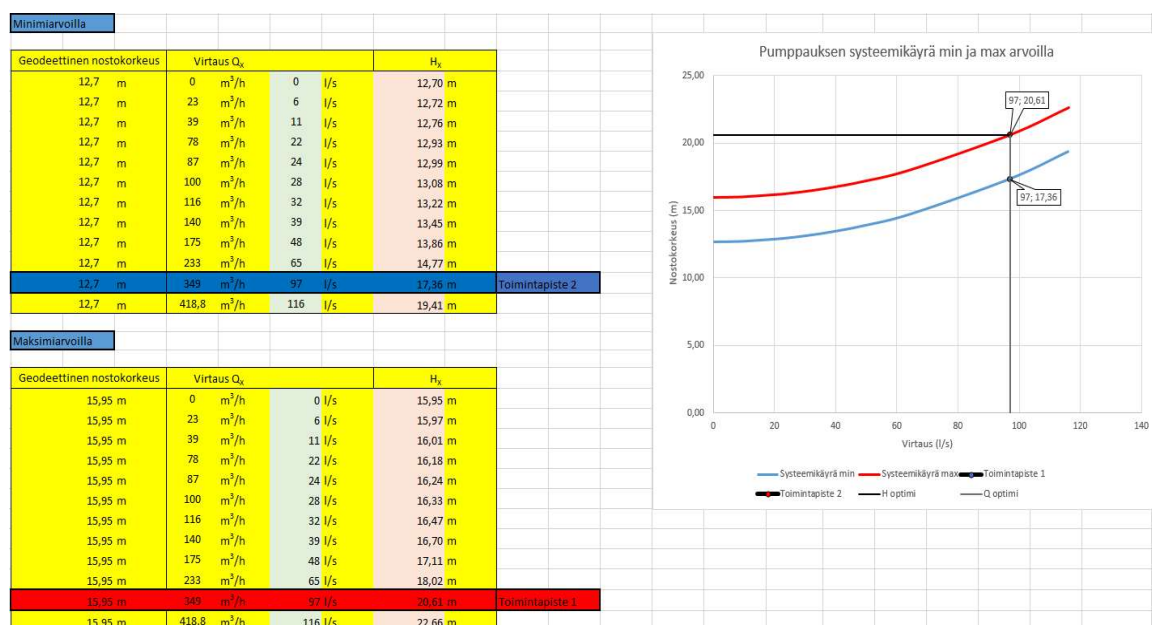
7.2 Mitoitus-välilehti

Mitoitus-välilehdellä tapahtuu kaikki laskentaan liittyvä toiminto. Mitoitus-välilehteä on pyritty selkeyttämään käyttämällä paljon vetovalikoita (esimerkiksi putkikokojen valinnassa) sekä erilaisilla värityksillä (esimerkiksi vihreä väri tarkoittaa manuaalisesti lisättävää arvoa tai vetovalikkoa).

Muutamiin soluihin on lisätty kommentti, jonka avulla käyttäjä pystyy tarkastamaan, miksi tulos on tietynlainen. Näitä soluja ovat esimerkiksi putkenkarheusarvot-solu, jossa kommenttina lukee erilaisten putkimateriaalien karheusarvoja. Soluissa olevat kommentit aktivoituvat näkyviksi, kun käyttäjä asettaa hiiren kursorin solun päälle.

7.3 Käyrät-välilehti

Käyrät-välilehdelle ei tarvitse tehdä toimenpiteitä. Tämä välilehti toimii visuaalisena toimintona, jossa näkee helposti käyriin tulevat arvot sekä itse käyrät. Esimerkiksi pumpujen systeemiäyrät näyttäytyvät kuvan 10 näköisenä.



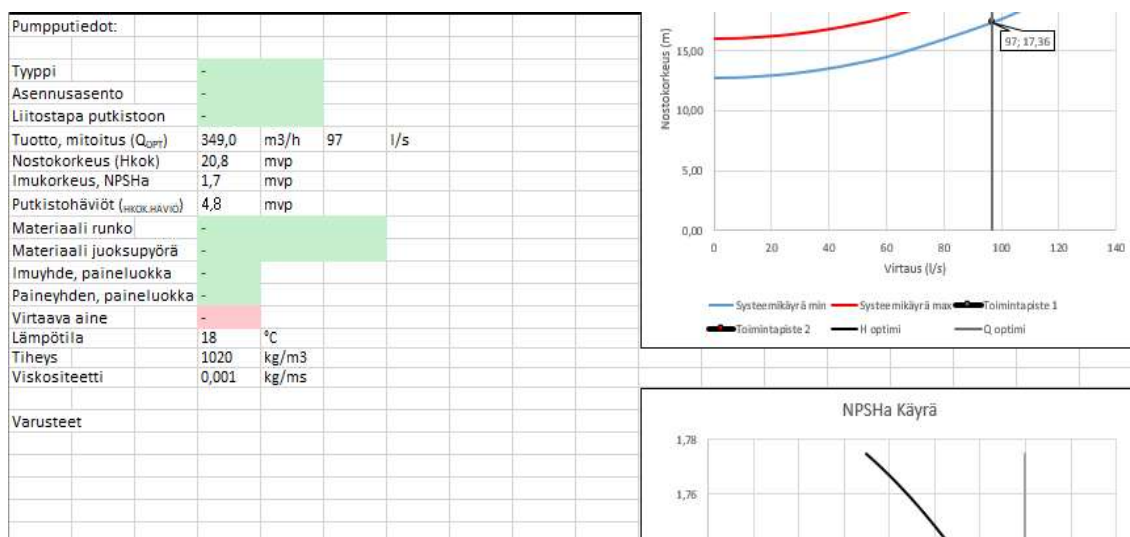
Kuva 10. Systeemiäyrät ja niiden arvot.

Tämä välilehti toimii täysin automaattisesti eli jos mitoitus-välilehdellä muutetaan jotain arvoa, se muuttuu myös tällä välilehdellä oleviin käyriin.

7.4 Datasheet- ja infovälilehdet

Datasheet-välilehdelle tulee suurin osa arvoista automaattisesti, mutta siinä on osa soluista vetovalikkona ja manuaalisesti kirjoitettavana arvona. Tämä on se lopputuote, laitekortti, joka lähetetään pumppukyselyihin.

Kuvassa 11 on osaleikkaus laitekortista. Siinä vihreällä pohjalla olevat alueet tarkoittavat vetovalikkoja ja punaisella pohjalla olevat manuaalisesti täytettäviä soluja. Muilta osin laitekortti on täysin automaattinen. Esimerkiksi pumppujen laitekorttiin kuuluu myös systeemikäyrät minimi- ja maksimi nostokorkeuksilla ja NPSHa-käyrä, jotka myös päivittyvät automaattisesti Excel-työkalun laskentaosiota täytettäessä mitoitusvälilehdellä.



Kuva 11. Osaleikkaus datasheetistä.

Infovälilehdellä on perusohjeet siihen, miten Excel-työkalu toimii. Siinä on myös ilmoitettu viimeisin muokauspäivä, muokkaaja sekä muokkauksen kohde.

Kaikki paitsi tummanvihreällä värillä olevat solut ovat lukittuna, mutta infovälilehdellä löytyy soluihin salasana. Tällä tavoin saadaan karsittua mahdollisia vahinko muutoksia Excel-työkaluissa.

8 Testaus

Molempien Excel-työkalujen osalta suoritettiin testausta, jotta saataisiin varmuus niiden toimivuudesta.

Testaus aloitettiin vertailemalla vanhoja Excel-työkaluja näihin uusiin. Tämän tyyppinen vertailu osoittautui huonoksi, koska vanhoissa Excel-työkaluissa ei ollut laskettu arvoja niin tarkkaan, kuin uusissa lasketaan. Vanhoissa Excel-työkaluissa löytyi myös tässä vaiheessa virheitä, joiden seurauksena tulokset poikkesivat toisistaan.

Vanhojen Excel-työkalujen pohjalta tehty tarkastelu osoittautui epäonnistuneeksi, joten päätettiin testata uusia Excel-työkaluja toimittajien verkkosivuilta löytyvien laskentaohjelmien avulla sekä kirjallisesta aineistosta löytyvien laskuesimerkkien mukaan. Näiden vertailujen tulokset osoittautuivat hyväksi, ja vastaukset olivat samanlaisia molempia käyttäen. Näiden vertailujen perusteella pystyttiin varmasti sanomaan Excel-työkalujen toimivan ja laskukaavojen olevan kunnossa.

Koska Excel-työkalujen toimivuus pystyttiin varmuudella todentamaan, niin FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy ottaa ohjelman käyttöön tulevaisuuden projekteissa.

9 Yhteenveto

Insinöörityönä tehtiin Excel-pohjaisia työkaluja pumpuille ja kompressoreille. Työkaluilla pystyy laskemaan lähtöarvoilla tarpeelliset tiedot. Työkalu siirtää automaattisesti laskennassa saadut oleelliset tulokset laitekortille, mikä lähetetään laitekyselyihin. Kyseisissä työkaluissa yhdistettiin yhteen laitteen mitoituksen laskennallinen osuus ja laitekortti, yhdistämällä tullaan vähentämään projekteissa käytettävää läpimenoaikaa.

Insinöörityön aloitusta vaikeutti vanhojen FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy:n käyttämien Excel-työkalujen laskennan sekavuus ja se ettei niissä tiennyt tarkalleen minkälaisia kaavoja oli käytetty. Joitain virheitä niistä löytyi mm. NPSHa:n kaavoissa. Niistä oli kuitenkin hyvä ottaa mallia ulkoasua varten, jotta näitä Excel-työkaluja käyttäville ei tulisi suurta muutosta Excelin käyttöliittymään.

Laskentapainotteisuuden takia insinööriyössä on esillä lukuisia kaavoja. Nämä kaikki kaavat ovat yleisessä käytössä olevia kaavoja. Ne ovat tarkistettu muutamista lähteistä, jotta pystytään varmistamaan niiden oikeellisuus.

Tarvittavat materiaalit, koulutukset ja työkalut insinööriyön toteutumiseen tulivat FCG Suunnittelu ja Tekniikan Oy:n puolelta, joten työtä oli helppo lähteä tekemään. Haasteelliseksi kuitenkin osoittautui Excel-ohjelman käyttö, erityisesti monien solujen linkitys toisiinsa, ja myös joidenkin kaavojen kirjoittaminen Excel-ohjelmaan tuotti vaikeuksia niiden monimutkaisuuden ja linkitysten takia.

Näistä kahdesta Excel-työkalusta tuli selkeitä ja yksinkertaisia käyttöä. Niissä tarvitsee vain muutamia soluihin manuaalisesti kirjoittaa arvoja saadakseen laskut suoritettua sekä kaikki tarvittava tieto siirtyy automaattisesti datasheet-välilehdelle, jolla myös tarvitsee vain manuaalisesti kirjoittaa muutamaan soluun. Datasheet-välilehti on rajattu niin, että sen on helppo tulostaa PDF-muotoon ja lähettää kyselyt sitä kautta helpoiten toimittajille.

Lähteet

- 1 FCG Oy. 2019. Yhtiöiden tiedot. Verkkoaineisto. <<https://wintra.fcg.fi/konserni-tutuksi/yhtioiden-tiedot>>. Luettu 07.03.2019.
- 2 Grundfos. 2004. Pump handbook. Denmark, Djerringbro: Grundfos management A/S.
- 3 OEMPanels. VFD Variable Frequency Drive and Centrifugal Pump. Newport News, VA, USA. Verkkoaineisto <<http://www.oempanels.com/vfd-variable-frequency-drive-and-centrifugal-pump>>. Luettu 16.04.2019.
- 4 Hitsatut painelaiteteräsputket, Tekniset toimitusehdot, osa 7: Ruostumattomat teräkset. 2015. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
- 5 Kepponen, Janne. Myyntipäällikkö. KSB Oy. Helsinki. Kokous 07.02.2019.
- 6 KSB. Blokki – pumppujen uusi sukupolvi. Verkkoaineisto <<https://www.ksb.com/ksb-fi/Uutiset/Uutistiedotteet/etabloc-sukupolvi/67334/>>. Luettu 16.204.2019.
- 7 Valtanen, Esko. 2016. Tekniikan taulukkirja. Hyvinkää: Genesis-Kirjat Oy.
- 8 Suonio, Timo. 2004. Putkiston virtaustekninen mitoitus. Turku: AEL.
- 9 Inkinen, Pentti & Tuohi, Jukka. 2008. Momentti 1 Insinöörifysiikka. Keuruu: kustannusosakeyhtiö Otava.
- 10 KSB. 2005. Selecting Centrifugal Pumps. Germany, Frankenthal: KSB Aktiengesellschaft.
- 11 Keskipäli, Jaakko. 2017. Keravan jätevesipumppaamoiden saneerausohjelmien määrittäminen. Kerava: HAMK.
- 12 Bergius. O. 1978. Pumpputekniikka, nesteiden pumppaus. Helsinki: Insinööritieto Oy.
- 13 Neuros. Core technology. Verkkoaineisto. <<http://ushaneuros.com/core-technology/>>. Luettu 16.04.2019.
- 14 Poikonen, Petri. Suunnittelupäällikkö, FCG Suunnittelu ja Tekniikka Oy. Helsinki. Skype-palaveri. 01.03.2019.

- 15 Kivioja, Seppo. 1993. Konetekniikka 898. Helsinki: Hakapaino Oy
- 16 Atlas Copco. 2015. Compressed air manual. Belgium, Wilrijk: Atlas Copco Air-power NV.
- 17 Mills, David, 2004, Pneumatic Conveying Design Guide. Burlington, MA, USA: Department of Trade and Industry.