

Pekka Takanen

**KUUMIEN POISTOKAASUJEN LÄMMÖNTALTEENOTTO JA
PUHDISTUS**

**Opinnäytetyö
CENTRIA AMMATTIKORKEAKOULU
Tuotantotalouden koulutusohjelma
Huhtikuu 2016**

TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

| | | |
|--|------------------------------|--|
| Yksikkö Ylivieska | Aika Huhtikuu 2016 | Tekijä/tekijät Pekka Takanen |
| Koulutusohjelma Tuotantotalous | | |
| Työn nimi KUUMIEN POISTOKAASUJEN LÄMMÖNTALTEENOTTO JA PUHDISTUS | | |
| Työn ohjaaja Yrjö Muilu | Sivumäärä 28+ 16 | |
| Työelämäohjaaja Yrjö Muilu | | |
| <p>Tämän opinnäytetyön aiheen sain Centria ammattikorkeakoulun Ylivieskan yksiköstä. Opinnäytetyön aiheena oli kuumien poistokaasujen lämmöntalteenotto ja puhdistus.</p> <p>Nykyisin jatkuva energian kallistuminen ja kiristyvät ympäristömääräykset lisäävät tarvetta kehittää laitteistoja, joilla parannettaisiin energiatehokkuutta ja vähennettäisiin ympäristöön kohdistuvia kuormituksia. Tämä kehitystyö nähtiin tarpeelliseksi koska, markkinoilla ei ole juurikaan pieniin prosesseihin soveltuvia laitteita tarjolla, joilla saataisiin kuumista poistokaasuista hukkalämpöä talteen ja samalla kaasut puhdistuisivat.</p> <p>Tavoitteena työssä oli selvittää käytössä olevia märkäpesumenetelmiä, jotka soveltuvat kuumienkaasujen puhdistukseen ja lämmöntalteenottoon, sekä lisäksi laskea protolaitteen valmistuskustannukset.</p> <p>Työ toteutettiin mallintamalla kuumien kaasujen puhdistukseen ja lämmöntalteenottoon soveltuvan laitteen runko ja samalla perehdyttiin tietokoneavusteiseen suunnitteluun. Lisäksi työn yhteydessä tarkasteltiin energiatehokkuutta, lämmöntalteenottoa sekä sivuttiin Pinch-analyysiiä. Lisäksi selvitettiin yleisimmin käytettyjä kuumienkaasujen märkäpesumenetelmiä ja märkäpesuissa käytettävien täytekappaleiden ominaisuuksia. Työn loppuosassa laskettiin protolaitteen valmistuskustannukset.</p> | | |
| Asiasanat 3D-malli, energiatehokkuus, lämmöntalteenotto, täytekappalepesuri, valmistuskustannukset | | |

ABSTRACT

| | | |
|---|---------------------------|----------------------------------|
| Unit Ylivieska | Date April 2016 | Author/s Pekka Takanen |
| Degree programme Industrial Management | | |
| Name of thesis HOT EXHAUST GAS HEAT RECOVERY AND CLEANING | | |
| Instructor Yrjö Muilu | | Pages 28+16 |
| Supervisor Yrjö Muilu | | |
| <p>This thesis was commissioned Centria University of Applied Sciences in Ylivieska unit. The subject of the thesis was the heat recovery and cleaning of hot exhaust gases. Today, the constant increase in energy prices and tightening environmental regulations increase the need to develop equipment that will improve energy efficiency and reduce loads on the environment. This development was seen as necessary because, in the market there is very little for small process equipment available to get the hot exhaust gases from the waste heat recovered from the gases and at the same time to be cleaned.</p> <p>The purpose of the work was to determine the suitability of wet cleaning methods suitable for the cleaning and the recovery of heat from hot gases, and additionally calculate the prototype device manufacturing cost.</p> <p>The work was carried out by modeling the cleaning of hot gases and a suitable heat recovery device body and we also studied computer-aided design. In addition, in connection with the work looked at energy efficiency, heat recovery, as well as Pinch-analysis. Both studied the most commonly used hot gases wet cleaning methods and packed-bed pieces properties. The calculated prototype device manufacturing costs are in the final part.</p> | | |
| Key words 3D-model, energy efficiency, heat recovery, the filler piece scrubber, the manufacturing cost | | |

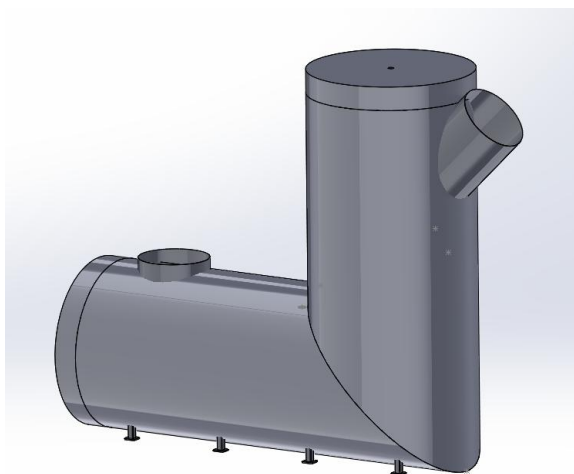
TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYS

| | |
|---|-----------|
| 1 JOHDANTO | 1 |
| 2 TUOTTEEN SUUNNITTELU..... | 2 |
| 3 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU | 4 |
| 3.1 Tietokoneavusteisen suunnittelun historiaa | 5 |
| 3.2 Parametrinen piirremallinnus | 5 |
| 4 ENERGIATEHOKKUUS JA LÄMMÖNTALTEENOTTO..... | 7 |
| 5 PINCH-ANALYYSI | 10 |
| 6 KUUMIEN POISTOKAASUJEN MÄRKÄPESUMENETELMÄT..... | 14 |
| 6.1 Syklonipesuri | 14 |
| 6.2 Venturipesuri..... | 15 |
| 6.3 Levypesuri..... | 16 |
| 6.4 Täytekappalepesuri | 17 |
| 6.4.1 Täytekappaleet | 18 |
| 6.4.2 Täytekappaleiden valinat | 20 |
| 7 PROTOLAITTEEN VALMISTUSKUSTANNUKSET | 22 |
| 7.1 Materiaalivalinnat | 22 |
| 7.2 Tarjouspyyntömenettelyt..... | 23 |
| 8 YHTEENVETO | 26 |
| LÄHTEET..... | 27 |
| LIITTEET | |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on Centria ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyön yhteydessä 3-D mallinnettiin kuumien kaasujen lämmöntalteenottoon ja puhdistukseen soveltuvan täytekappalepesurin runko (KUVIO 1.), jonka piirustukset ovat tämän työn liitteenä. Mallintamiseen tarvittavat lähtötiedot saatiin Centria:n Yrjö Muilulta ja Miika Oksaselta, he olivat tehneet laitteesta periaatepiirroksen muutamalle ruutupaperille, mallinnustyö eteni heiltä saatujen piirroksien ja ohjeiden mukaisesti. 3-D mallia ja valmistuspiirustuksia tarkasteltiin muutamia kertoja mallintamisen edetessä ja tarvittavia muutoksia tehtiin, jotta päästiin haluttuun lopputulokseen. Pesurista ei ole rakennettu protolaitetta, jotenka tämän työn jatkeena olisi luonnollista, että protolaitte rakennettaisiin ja testattaisiin jossakin todellisessa käyttöympäristössä.

Työn teoriaosuuden alussa käsitellään tietokoneavusteista suunnittelua. Energiategokkuutta ja lämmöntalteenottoa käsittelevässä kappaleessa perehdyttiin samalla myös Pinch-analyysiin. Kuumien kaasujen märkäpesumenetelmissä käydään läpi yleisimpiä kuumien kaasujen pesumenetelmiä ja pesureita, lisäksi perehdyttiin pesureissa käytettäviin täytekappaleisiin. Työn loppupuolella selvitettiin pesurin valmistuskustannukset, jotta kustannukset olisivat selvillä mahdollista protolaitteen rakentamista ajatellen.

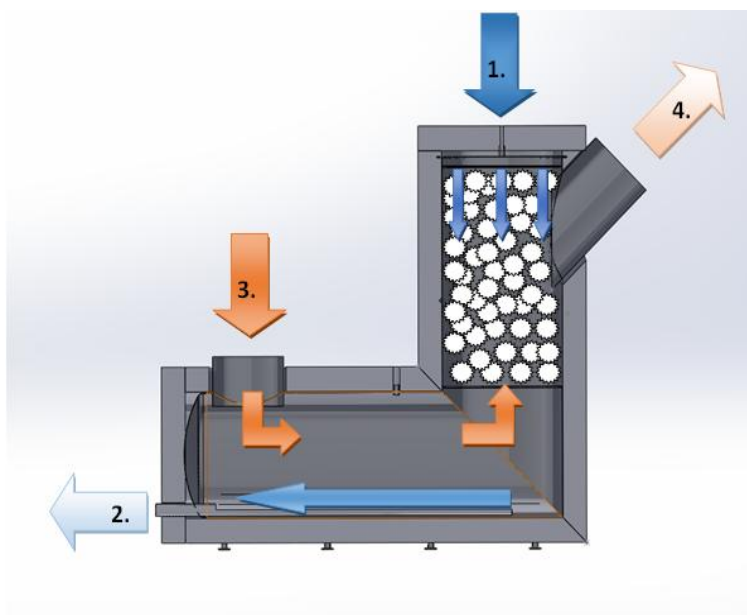


KUVIO 1. 3-D mallinnettu kuumien kaasujen lämmöntalteenotto ja puhdistuslaite.

2 TUOTTEEN SUUNNITTELU

Tuotteen suunnittelu on monimutkainen prosessi, sen on lähdettävä liikkeelle jostain tarpeesta tai ongelmasta. Työssäni tuo tarve tuli minulle Centria:n Miika Oksaselta, joka pyysi mallinnusapua laitteelle. Mutta ennen sitä oli, jonkun tai joittenkin henkilöiden synnyttävä ajatus tuosta laitteesta. Alkujaan Yrjö Muilu oli pohtinut ongelmaa, jossa maalaamon ilmanvaihdon kautta häviää lämpöenergiaa kuumen poistoilman mukana ja tuo kuumapoisto ilma sisältää lisäksi epäpuhtauksia.

Yrjö Muilu ja Miika Oksanen miettivät ratkaisua ongelmaan ja koska täytekalpepesureita käytetään esimerkiksi voimalaitosten savukaasujen puhdistuksessa, niin miksi se ei voisi toimia myös pienemässä mittakaavassa. Joten he ryhtyivät jalostamaan ajatusta ruutupaperille ja lopputuloksen oli muutama A-4 paperillinen piirroksia, joidenka pohjalta laitetta alettiin suunnittelemaan ja mallintamaan.



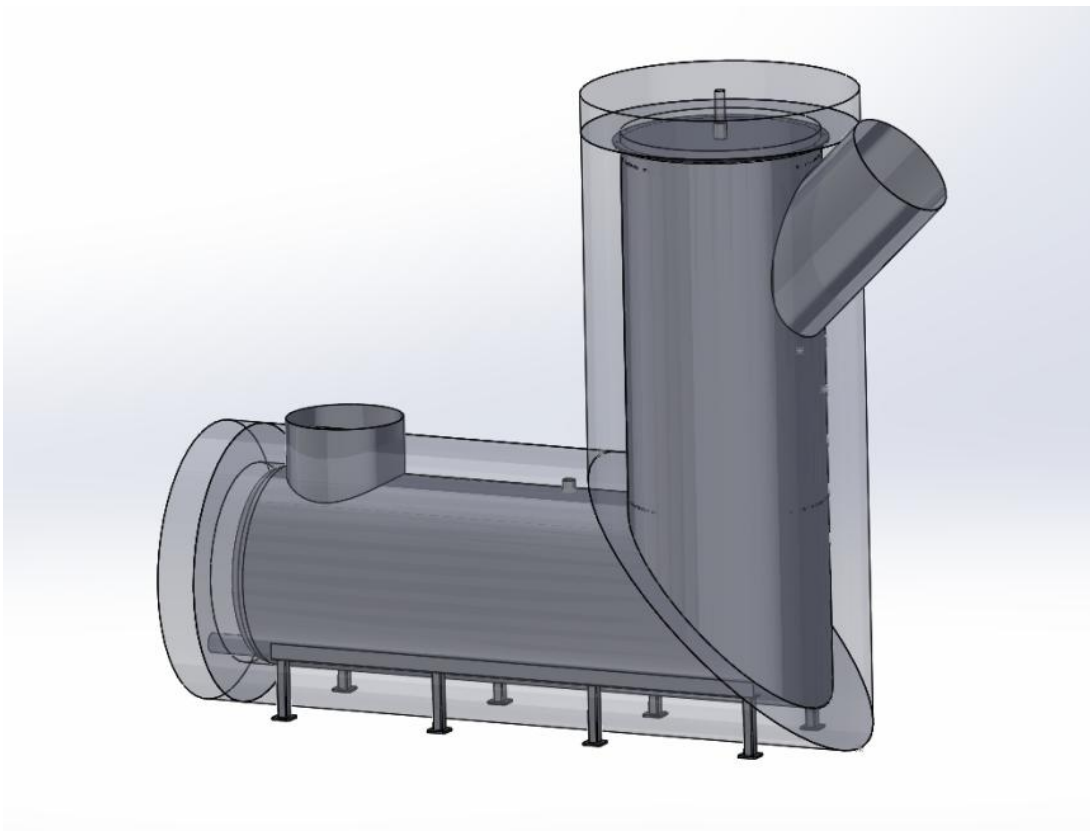
1. Kylmäpesuneste sisään
2. Lämmennyt pesuneste ulos
3. Kuuma kaasu sisään
4. Jäähdyntynyt kaasu ulos

KUVIO 2. Toimintaperiaatekuva laitteesta poikkileikkauksena.

Mallintamiseen käytettiin Centria:lla olevaa SolidWorks 2013 ohjelmistoa. SolidWorks on vuonna 1993 perustetun SolidWorks Corporationin 3D -suunnitteluohjelmisto. SolidWorksilla voi suunnitella

tuotteen osia ja osista voi tehdä kokoonpanoja. Ohjelmistolla voi tuottaa automaattisesti muun muassa osaluettelot, piirustukset, osanumeroinnin ja tilavuuslaskelmat.

Centria:lla olisi ollut myös muita mallinnusohjelmistoja, mutta koska SolidWorks ohjelmisto oli minulle entuudestaan tuttu, oli luontevaa käyttää sitä mallintamiseen. SolidWorks ohjelmistosta oli myös opiskelijalisenssiversio, jonka pystyi lataamaan kotitietokoneelle. Aloitin mallinnustyön koulun tietokoneilla, mutta ladattuani SolidWorks:n kotikoneelle, jatkoin mallintamista kotikoneella. Mallinnetun laitteen osapiirustukset ja hitsauskokoonpanopiirustus löytyvät tämän työn liitteestä 1.



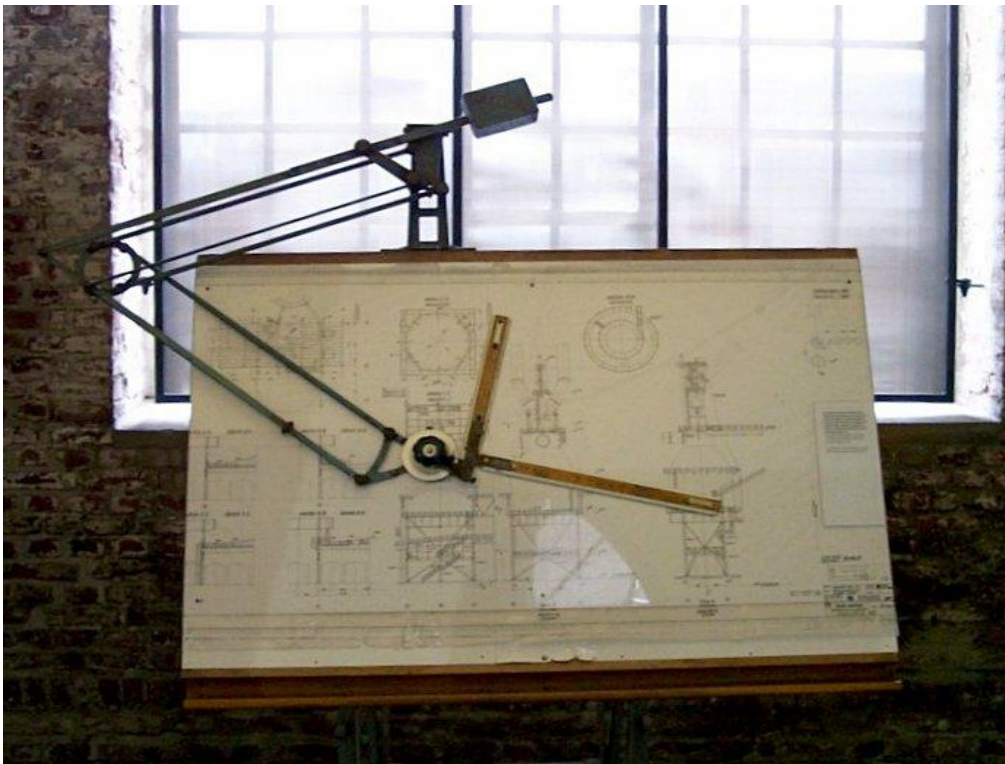
KUVIO 3. 3-D mallinnettu kuumienkaasujen lämmöntalteenotto ja puhdistuslaite.

3 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU

Tietokoneavusteinen suunnittelu CAD eli Computer Aided Design on tietokoneen käyttöä apuvälineenä varsinkin insinöörien ja arkkitehtien tekemässä suunnittelutyössä.

Tietokoneavusteinen suunnittelu on syrjäyttänyt käsin piirtämisen miltei kokonaan. Perinteinen kynällä paperille piirtäminen on edelleenkin käytössä silloin, kun luonnostellaan esimerkiksi jotakin tuotetta ja halutaan hahmottaa perusmuotoja ja mittoja tuotteesta. Luonnostelu vaiheeseen on nykyään myös saatavilla ohjelmistoja, joilla voi tietokoneavusteisesti tehdä kohtuullisen nopeasti ja helposti yksinkertaisia 3-D malleja. Yksi luonnosteluun soveltuva ohjelmisto on Googlen SketchUp.

Tuote kannattaa kuitenkin mallintaa 3-D malliksi tietokoneelle tuon käsin tai tietokoneella tehdyn ”skissin” pohjalta jo varhaisessa vaiheessa. Monista eri osista koostuvan tuotteen osamallit kannattaa nimetä loogisesti jo alkuvaiheessa, jotta tuotteen rakenne pysyy selkeänä.



KUVA 1. Käsin piirtämisessä käytettävä piirustuslauta. (Drawingboard 2016.)

3.1 Tietokoneavusteisen suunnittelun historiaa

1970 luvun loppupuolelle asti kokoonpanojen ja osien piirustukset piirrettiin käsin piirustuslaudalla (KUVA 1.). Pääkokoonpanopiirroksot olivat pääsuunnittelijalla ja nuoret insinöörit piirsivät käsin tarvittavia osakuvia, joihin he saivat tarvittavat tiedot vanhemmalta pääsuunnittelijalta. Jos johonkin osaan tuli muutos, oli kaikki piirustukset päivitettävä sen mukaiseksi. Osien ja kokoonpanojen välillä ei ollut mitään yhteyttä, joten kaikki osien päivitykset olivat suunnittelijoiden huolehdittavana.

Tietokoneavusteinen suunnittelu on saanut alkunsa 1980 luvun alkupuolella kehitetyistä ohjelmistoista, toki aiemminkin oli erilaisia alkuvaiheen ohjelmistoja, mutta 1980 luvun alkua voidaan pitää tietokoneavusteisen suunnittelun lähtölaukauksena. (Hietikko 2005, 9-11.) Ensimmäiset tietokoneavusteiset suunnitteluohjelmat olivat oikeastaan kaksiulotteisia tietokoneavusteisia piirustusohjelmia, kuten esimerkiksi AutoCad, jolla piirrettiin tietokoneen avulla tasokuvia. Piirrettävä kappale piirrettiin sen todellisilla mitoilla, joten syntynyttä tasokuvaa voitiin käyttää sellaisenaan CNC-ohjelmointiin, ilman että olisi tarvinnut ottaa mittasuhteita huomioon. Piirtäminen matki hyvin pitkälti käsin piirtämistä, AutoCad:llä piirrettiin eri tasoille esimerkiksi kappaleen muodot, mitoitus ja otsikkotaulu.

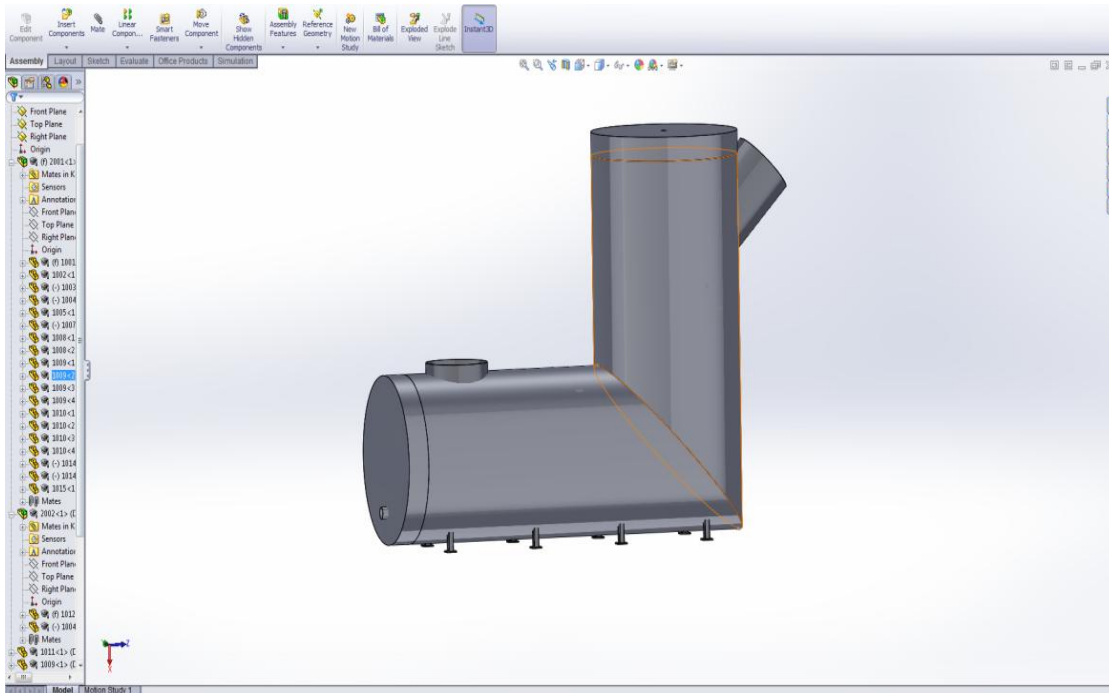
Ensimmäinen oikea kolmiulotteinen suunnittelu ohjelmisto oli CATIA, joka tuli markkinoille 1982. Ja vastaavasti ensimmäisen parametrinen piirremallinnusohjelmisto Pro/ENGINEER tuli markkinoille vuonna 1988. SolidWorks ohjelmiston ensimmäinen versio tuli markkinoille 1995 vuonna, joka oli myös parametrinen piirremallinnusohjelmisto. (Hietikko 2005, 9-11.)

3.2 Parametrinen piirremallinnus

3-D mallinnusohjelmiston parametrisuuden avulla mallinnettuun osaan voidaan tehdä mittamuutoksia milloin tahansa ja tehdyt mittamuutokset päivittyvät automaattisesti kokoonpanoihin ja piirustuksiin. Piirremallinnuksessa 3-D malli rakennetaan erilaisista piirteistä ja nuo piirteet muodostavat niin sanotun piirrepuun. Mallinnuksen alkuvaiheessa ei useinkaan tiedetä muuta kuin osan päämitat ja mitoitus eri kohtiin tarkentuu osan ja tuotteen suunnittelun edetessä.

Osista rakentuu yleensä jokin kokoonpano ja jos kokoonpanon yhteydessä ilmenee osien yhteensopivuusongelma, voidaan mittamuutokset tehdä tarvittaviin osiin ja nuo mittamuutokset päivittyvät automaattisesti kokoonpanoon. Lisäksi osista ja kokoonpanoista tehdyt piirustukset päivittyvät automaattisesti. Ja jos tuotteeseen tulee sen elinkaaren aikana joitakin muutoksia, on nuo muutokset helppo tehdä

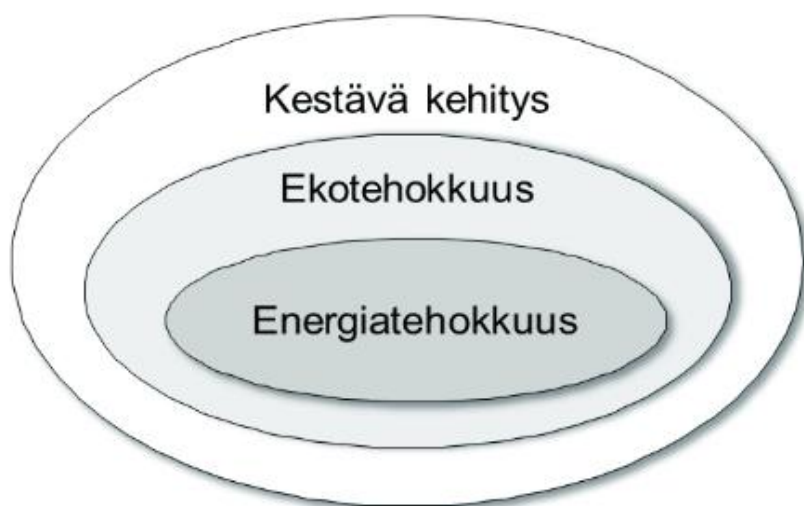
myöhemminkin parametrisuudesta johtuen. Piirteistä muodostuvasta mallinnuksesta on etuja, koska kaikki rakentuu piirrepuuhun ja sitä kautta on helppo päästä käsiksi haluttuihin osioihin. (Hietikko 2005, 15-19.) Alla esimerkki kuva (KUVIO 4.) SolidWorks-ohjelman kokoonpanosta, jossa piirrepuu näkyy käyttöliittymän vasemmassa reunassa.



KUVIO 4. Näkymä kokoonpanosta SolidWorks ohjelmalla.

4 ENERGIATEHOKKUUS JA LÄMMÖNTALTEENOTTO

Energiatehokkuus on energian, tavaran, palvelun, tai tuotoksen ja siihen käytetyn energian välinen suhde. Energiatehokkuuden parannuspotentiaali syntyy nykytilanteen energiankulutuksen ja vertailutilanteen energian kulutuksen välisestä erotuksesta. Energiaa kuluttavia eri sektoreita on esimerkiksi teollisuus, liikenne, yhdyskunnat ja energiatuotanto. Energiaa myös käytetään monissa eri muodoissa sähköinä, lämpönä ja polttoaineena. Energiatehokkuuden mittaaminen tulisi tehdä ensisijaisesti energiayksiköiden avulla, mutta tehokkuuden mittaamiseen ei ole olemassa yleisesti hyväksytyjä mittaustapoja, siksi hiilidioksidi- tai kasvihuonekaasutehokkuutta voidaan käyttää tukevana ja täydentävänä arviointikriteerinä. (Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit 2016)



KUVIO 5. Energiatehokkuuden mittaaminen osana ekotehokkuutta ja kestävä kehitystä. (Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit 2016)

Energiatehokkuuden tärkein tavoite on kasvihuonekaasupäästöjen kustannustehokas vähentäminen optimoimalla koko energiaketju. Energiatehokkuuden parantaminen on asetettu niin kansallisesti, kuin EU-tasolla tulevien vuosien ja vuosikymmenien yhdeksi päätavoitteeksi. Energia tehokkuuden 20 % parantaminen vuoteen 2020 mennessä, on EU:n yhteinen tavoite. Mitä tehokkaammin energiaa käyte-

tään, sitä suurempi osa energiatarpeesta voidaan kattaa uusiutuvilla ja päästöttömillä energian lähteillä. Energiankäytön tehostamisella voitaisiin saavuttaa 50 % globaalista kasvihuonekaasujen päästövähennystavoitteista arvio kansainvälinen energiajärjestö IEA. (Ilmasto-opas 2016.)

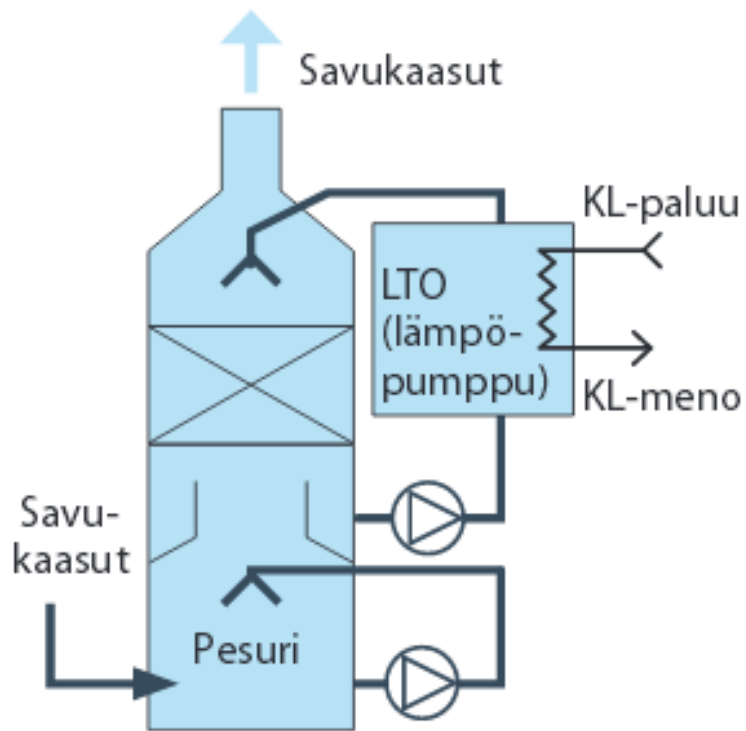
Energiatehokkuuta voidaan parantaa lähes jokaisella yhteiskunnan alalla esimerkiksi teollisuudessa, energian tuotannossa, julkisella sektorilla, maa- ja metsätaloudessa ja kotitalouksissa. Energiatehokkuuden parantamiseen liittyvät investoinnit maksavat itsensä takaisin nopeasti ja niillä on työllisyyttä edistäviä vaikutuksia. Lisäksi investoinnit auttavat uusien teknologioiden kehittymistä ja sitä kautta tulevaisuudessa voidaan saada käyttöön yhä tehokkaampia ja parempia menetelmiä energiatehokkuuden parantamiseen.

Energiatehokkuuden parantaminen tapahtuu minimoimalla prosessin energian kulutus ja energiahäviöt ja lisäksi maksimoimalla lämmöntalteenotto. Teollisessa tuotannossa syntyy usein ylijäämälämpöä, jota voitaisiin hyödyntää nykyistä tehokkaammin, ylijäämälämpö johdetaan toisinaan prosessikaasujen ja jäähdytysvesien mukana ympäristöön. Motivan tekemien tutkimusten mukaan 37 % teollisuuden energian käytöstä karkaa hukkalämpönä ympäristöön, 4 TWh tuosta hukkalämmöstä olisi mahdollista hyödyntää ja sen arvo olisi yli 200 miljoonaa euroa.

Teollisuudessa on paljon hyödynnettävissä olevaa ylijäämälämpöä ja sitä hyödynnetäänkin nykyisin yhä enenevässä määrin. Tyypillisiä kohteita, mistä ylijäämälämpöä otetaan talteen erilaisilla lämmöntalteeotto järjestelmillä, ovat esimerkiksi savukaasut, poistokaasut, jäähdytysvedet ja jätevedet. Lämmöntalteenotosta saatu lämpö voidaan hyödyntää itse prosessiin, joka on tehokkain tapa hyödyntää lämpö, tai johtaa se prosessin ulkopuolelle hyödynnettäväksi. Lämmön hyödyntäminen mahdollisimman lähellä siellä missä se on otettu talteen lyhentää siirtomatkoja ja sitä kautta lämpöhäviöt jäävät mahdollisimman vähäisiksi. Yleisiä lämmöntalteenotosta saatuja lämmönhyödyntämiskohteita ovat esimerkiksi palamisprosessin palamisilman ja korvausilman, tilojen, käyttöveden, ilmastoinnin tuloilman, kaukolämmön paluuveden ja muiden tuotantoprosessien lämmitys, sekä myös raaka-aineen tai polttoaineen kuivaus.

Lämmöntalteenotosta saadut korkealämpöiset lämpövirrat ovat helppo hyödyntää, mutta matalalämpöiset lämpövirrat, jotka ovat esimerkiksi alle 80 °C, ovat hankalia hyödyntää sellaisenaan. Lämpöpumpputekniikat ovat kehittyneet nykyisin ja niillä voidaan nostaa matalalämpöisten virtojen lämpötilaa, jopa 10 °C ylijäämälämpöjä voidaan hyödyntää kannattavasti (KUVIO 6). Lisäksi yhdistämällä eri

tekniikoita ja menetelmiä lämmöntalteenotossa saadaan yhä paremmin ylijäämälämpö talteen ja se voidaan hyödyntää ilman että lämpöä joutuu hukkaan. (Motiva energiatehokas lämmitys 2016.)

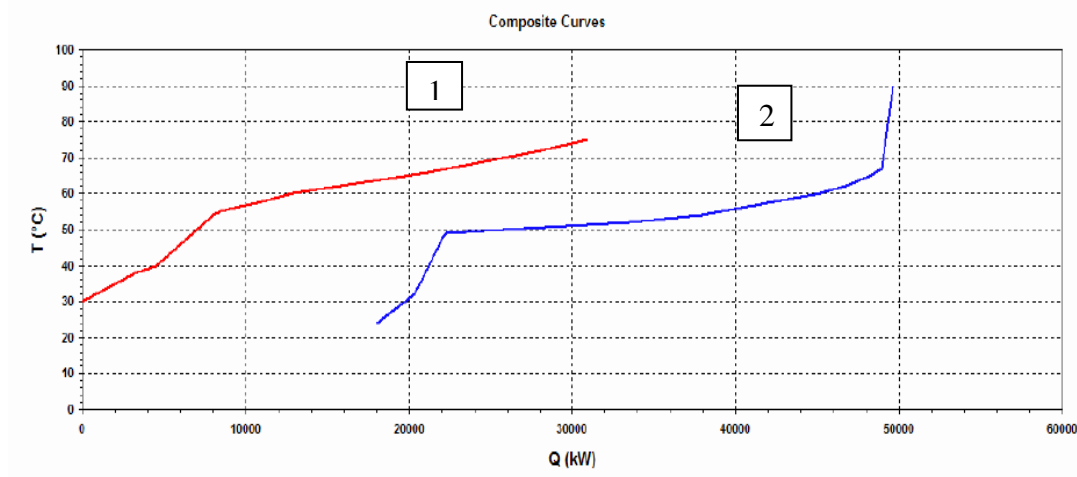


KUVIO 6. Periaatekuva lämpöpumppukytkenästä savukaasupesurissa. (Caligo 2016)

5 PINCH-ANALYYSI

Pinch-analyysi on kehitetty työkaluksi lämmön ja höyryn hyödyntämiseksi mahdollisimman tehokkaasti teollisista prosesseista. Sitä käytetään paljon energiaa käyttävien teollisuuslaitoksien energiatehokkuuden parantamiseksi esimerkiksi kemianteollisuudessa, jalostamoissa, massa- ja paperiteollisuudessa sekä elintarviketeollisuudessa. Jos teollisuuslaitoksessa on paljon lämmitys- ja jäähdytystarpeita päällekkäisillä lämpötilatasoilla ja lisäksi laitoksessa on laaja ja monimutkainen lämmönvaihdinverkko on Pinch-analyysi hyvä työkalu energiatehokkuuden parantamiseen. Analyysin avulla on tarkoitus saada tietoa miten minimoida energian kulutus ja maksimoida lämmön talteenotto. Analyysia varten kerätään tiedot kaikista prosesseista, joita pitää lämmittää tai jäähdyttää ja analysoinnin lopputuloksena saadaan tietoa miten prosesseja ja lämmönvaihdinverkkoja tulisi muuttaa, jotta energiatehokkuus parani. (Motiva pinch-analyysi 2016.)

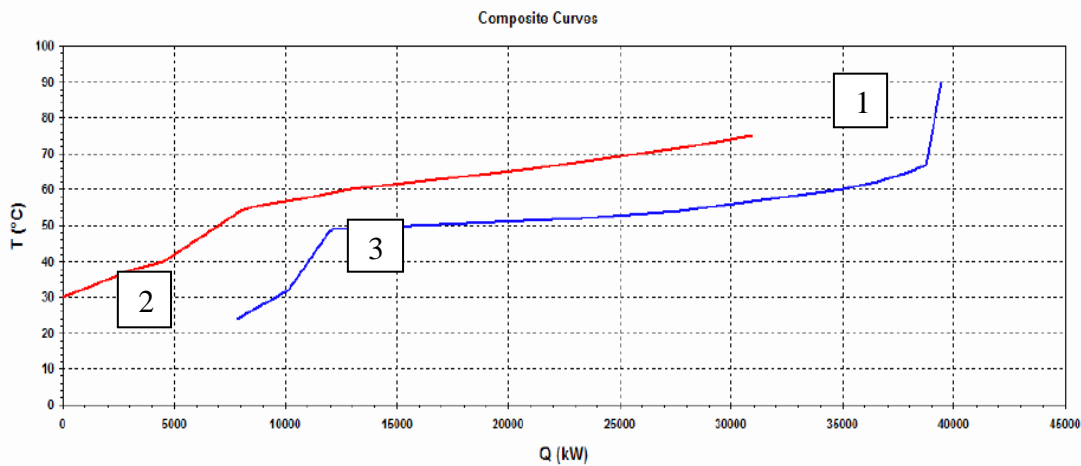
Aluksi analyysissä kerätään tiedot kaikista virroista joita pitää lämmittää (kylmät virrat) ja virroista joita pitää jäähdyttää (kuumat virrat). Molemmista virroista tarvitaan lähtö tietoina alkulämpötila, tavoitelämpötila ja tarvittava teho tai lämpökapasiteettivirta. Tiedoista koostetaan kaksi summakäyrää, joista saadaan selville kumulatiivinen lämpöteho eri lämpötilatasoilla, kuumista virroista muodostuu kuumavirtakäyrä (käyrä 1. KUVIO 7.) ja kylmistä virroista kylmävirtakäyrä (käyrä 2. KUVIO 7.).



KUVIO 7. Prosessin kuuma- ja kylmävirtakäyrät. (Motiva pinch-analyysi 2016)

Alkutietojen perusteella syntyneistä käyristä kuvion 7 mukaisesti huomataan, että kuumavirtakäyrän ja kylmävirtakäyrän väliin jää tyhjä alue. Seuraavaksi määritellään minimi lämpötilaero käyrille, joka samalla kertoo prosessin sisäisen lämmön talteenoton tason. Mitä pienempi lämpötilaero on, sitä ener-

giatehokkaampi prosessi on, mutta samalla myös lämmöntalteenottolaitteiden investointikustannukset nousevat ja kannattavuus heikkenee. Kuviossa 8 on esimerkki jossa prosessin kylmävirtakäyrää siirretty niin, että pienimpänä lämpötilaerona $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Motiva pinch-analyysi 2016.)



KUVIO 8. Sama prosessi käyttäen pienimpänä mahdollisena lämpötilaerona $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Motiva pinch-analyysi 2016)

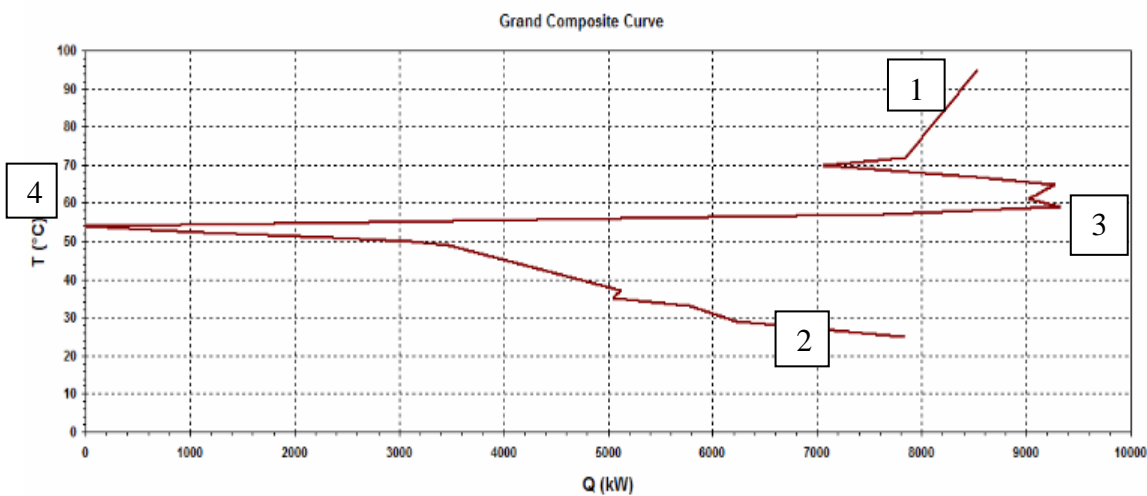
Pinch-analyysin avulla saaduista käyristä voidaan lukea neljä tärkeää asiaa, prosessin suurin mahdollinen sisäinen lämmöntalteenotto, prosessin tarvitsema ulkopuolinen lämmitysteho, prosessin tarvitsema ulkopuolinen jäähdytysteho, ja pinch-lämpötila. Niissä kohdissa missä kuumavirtakäyrä ja kylmävirtakäyrä ovat päällekkäin, on prosessin sisäinen lämmöntalteenotto mahdollista, voidaan siis lämpöä siirtää jäähdytyksestä lämmitykseen ja tällä tavalla kattaa lämmitys ja jäähdytys tarve yhtä aikaisesti. Prosessin tarvitsema ulkopuolinen lämmitystarve on kylmävirtakäyrän se osa, jonka se ylittää kuumavirtakäyrän oikealle puolelle (kohta 1. KUVIO 8.). Toisin sanottuna prosessissa on olemassa lämmitystarve, mutta jäähdytys tarvetta ei ole mistä lämpöä voitaisiin siirtää. Prosessin tarvitsema ulkopuolinen jäähdytystarve on kuumavirtakäyrän se osa, jonka se ylittää kylmävirtakäyrän vasemmalle puolelle (kohta 2. KUVIO 8.).

Toisin sanoen prosessissa on olemassa jäähdytystarve, mutta lämmitystarvetta ei ole mihin lämpöä voitaisiin siirtää.

Pinch-lämpötila on se lämpötila missä kylmä- ja kuumavirtakäyrät ovat lähimpänä toisiaan, esimerkki kuviossa 8 pinch-lämpötila (kohta 3. KUVIO 8.) on noin $58\text{ }^{\circ}\text{C}$. Prosessi jakautuu kahteen osaan Pinch-lämpötilan kohdalta niin että, prosessissa on lämmön tarve Pinch-lämpötilan yläpuolella ja vas-

taavasti jäädytyksen tarve Pinch-lämpötilan alapuolella. Jotta prosessi toimisi mahdollisimman vähäisellä ulkopuolisella energialla, ei yläpuolella kannata jäädyttää ulkoa tulevalla energialla, vaan hyödyntää prosessin omia kylmiävirtoja jäädytykseen ja vastaavasti alapuolella ei kannata lämmittää ulkoa tulevalla energialla, vaan hyödyntää prosessin omia kuumiavirtoja lämmitykseen. Lämpöä ei kannata myöskään siirtää Pinch-lämpötilan puolelta toiselle, koska lämmitystarve kasvaa yläpuolella siirretyllä energian määrällä ja vastaavasti alapuolella jäädytystarve kasvaa siirretyllä energian määrällä.

Kuuma- ja kylmävirtakäyristä voidaan tehdä myös niiden yhdistelmäkäyrä (KUVIO 9.). Yhdistelmäkäyrän aluksi lämpötila-asteikot on muunnettava yhteismalliseksi, jotta yhdistelmäkäyrästä saadaan yhtenäinen. Yhteismalliseksi muuntaminen tehdään kylmienvirtojen lämpötilaa nostamalla sen verran mitä käyrien välinen minimi lämpötilaeron puolikas on ja vastaavasti kuumienvirtojen lämpötilaa lasketaan sen verran mitä käyrien välinen minimi lämpötilaeron puolikas on. Kuviossa 8 olleiden kuuma- ja kylmävirtakäyrien yhdistelmäkäyrä on esitetty kuviossa 9, jossa on minimilämpötilaerona käytetty 10 °C.



KUVIO 9. (Motiva pinch-analyysi 2016)

Yhdistelmäkäyrältä nähdään millä lämpötilatasoilla prosessissa on ylijäämälämpöä ja millä tasoilla liian vähän, sekä tieto lämpötiloista millä ulkopuolinen lämpö pitää tuoda prosessiin ja ylijäämälämpö poistaa sieltä. Niissä kohdissa missä käyrä nousee vasemmalta oikealle, on kylmiä virtoja enemmän kuin kuumia, eli nettotuloksena on lämmöntarve tällä lämpötilatasolla. Ja vastaavasti, kun käyrä laskee vasemmalta oikealle, on prosessissa enemmän kuumia kuin kylmiä virtoja, eli prosessissa on nettojäädytystarve.

Niissä kohdissa missä käyrä nousee eikä sen yläpuolella ole enää jäähdytystarvetta, voidaan nähdä prosessin tarvitsema ulkopuolinen lämmöntarve (kohta 1. KUVIO 9.).

Niissä kohdissa missä käyrä laskee eikä sen alapuolella ole enää lämmitystarvetta, voidaan nähdä prosessin tarvitsema ulkopuolinen jäähdytystarve (kohta 2. KUVIO 9.).

Kohdissa missä käyrä tekee niin sanotun nenän, eli laskevan käyrän alapuolella on nouseva käyrä, voidaan lämpöä siirtää prosessin sisällä lämmöntalteenotolla. Yksi tällainen nenä löytyy esimerkki käyrästä 9 kodasta 3. Yhdistelmäkäyrältä nähdään myös tarvittavien ulkopuolisten lämmitysten ja jäähdytysten lämpötilatasot. Lisäksi yhdistelmäkäyrästä nähdään Pinch-lämpötila joka on siinä kohtaa, missä käyrä koskettaa Y-akselia (kohta 4. KUVIO 9.). (Motiva pinch-analyysi 2016.)

Tässä opinnäytetyössä ei pureuduta Pinch-anlyysin tekemiseen, vaan se voisi hyvin olla jatkossa tehtävien opinnäytetöiden aiheena ja tästä syystä sitä oli tarpeen hiukan sivuta.

6 KUUMIEN POISTOKAASUJEN MÄRKÄPESUMENETELMÄT

Kuumia poistokaasuja puhdistetaan ja hukkalämpöä otetaan talteen erilaisilla märkäpesureilla. Aikaisemmin pesureita käytettiin lähinnä epäpuhtauksien poistamiseen kaasuista, mutta hukkaan menevän lämpöenergian talteenotto on nykyään tullut yhä tärkeämmäksi. Teollisuuden suurista prosesseista syntyvistä kuumista kaasuista otetaan hukkalämpöä talteen ja samalle kaasuja puhdistetaan. Tuo lämmöntalteenotto ja puhdistus on keskittynyt suuren kokoluokan prosesseihin kuten voimalaitosten savukaasut, terästehtaiden kuumat poistokaasut, paperi- ja kemiantehtaiden prosessikaasut jne. Pienemmät prosessit kuten yksittäiset maalaamot, leipomot, hitsaamot jne. johtavat useimmiten kuumat poistokaasut suodattimien kautta tai sellaisenaan ulos kiinteistöstä. (Promaintlehti 2015)

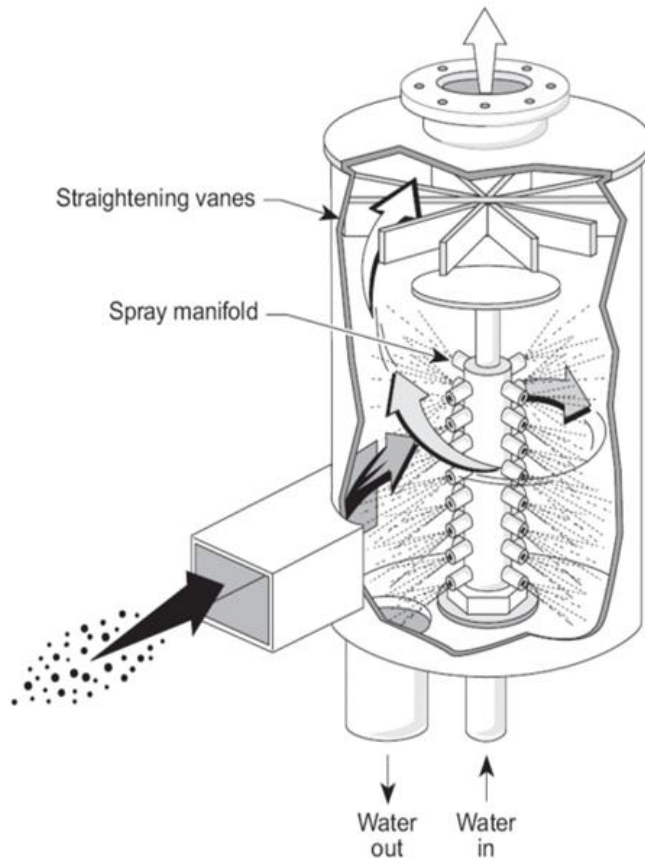
Märkäpesurissa likainen kuuma kaasu ja pesuneste joutuvat kontaktiin keskenään. Kaasussa olevat hiukkaset kiinnittyvät pesunesteeseen ja samalla kuuma kaasu luovuttaa lämpöenergiaa pesunesteeseen. Märkäpesureiden toimintaperiaate perustuu puhdistettavan kaasun ja pesunesteen mahdollisimman hyvään kosketukseen keskenään. Pesuneste ruiskutetaan 0,1-1,0 mm pisaroina puhdistettavan kuumankaasun sekaan jolloin kaasussa olevat hiukkaset ja nestepisarat joutuvat törmäykseen keskenään. Pesurin erotusaste paranee mitä pienempiä nestepisarot ovat ja mitä suurempi nopeusero on puhdistettavalla kaasulla ja nestepisaroiilla. Hiukkasten kiinnittyminen nestepisaroihin perustuu niiden keskinäisiin törmäyksiin, suoraan pidätykseen ja diffuusion. (Flagan ym. 1988, 154-155)

Yleisimmin pesunesteenä pesureissa käytetään vettä, koska sitä on saatavilla lähes joka paikassa ja sen lämmönsitomiskyky on suhteellisen hyvä. Muutamia yleisesti käytössä olevia kaasujen märkäpesureita on sykloni-, venturi-, tätekappale- ja levy-pesurit. Tämän työn yhteydessä mallinnetun pesurin toiminta perustuu tätekappaleiden läpi ylhäältä alaspäin virtaavaan vesisuihkuun ja kuumien kaasujen alhaalta ylöspäin suuntautuvaan ilman virtaukseen, eli se kuuluu tätekappalepesurikategoriaan.

6.1 Syklonipesuri

Syklonipesuri hyödyntää keskipakoisvoimaa saattamalla puhdistettavan kaasun pyörivään liikkeeseen. Keskipakoisvoima ja hitausvoimat aiheuttavat sen, että hiukkaset ajautuvat virtauksen vaikutuksesta syklonin ulkoreunalle ja hiukkaset törmäävät syklonin seinämiin. Vesisuihku huuhtelee hiukkaset seinämiltä syklonin alaosaan, josta likainen pesuneste voidaan johtaa edelleen keräilysäiliöön saostumaan. Puhdistunut kaasu poistuu syklonin keskeltä ylhäältä, kuten kuviosta 10 nähdään. Syklonipesuri

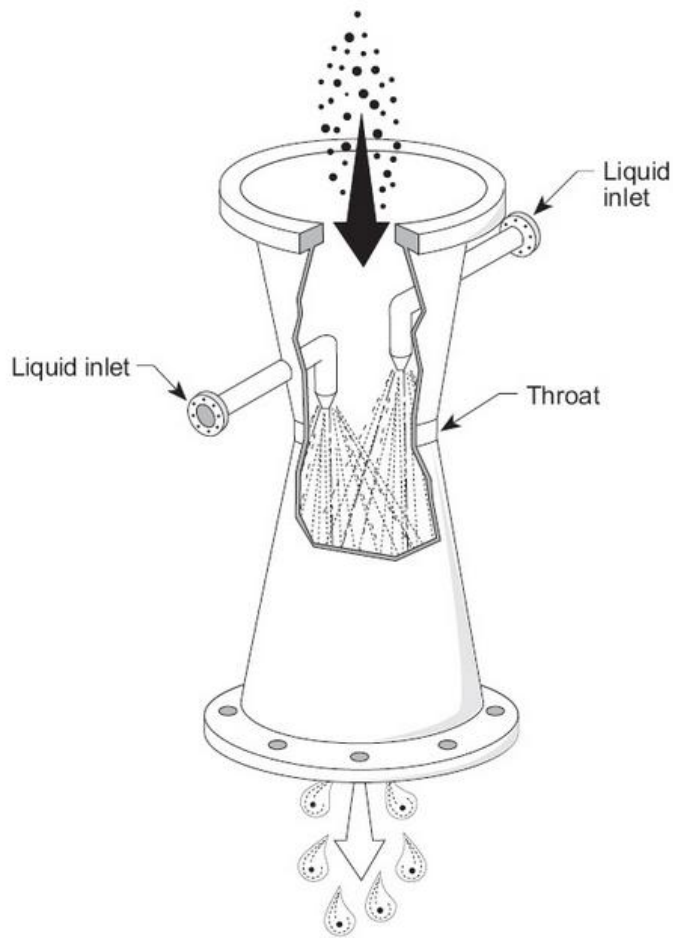
vaatii tehokkaan pumpun pesunesteen pumppaukseen, koska pesunesteen virtauksen avulla pesurin sisällä olevat pesusuuttimet saatetaan pyörivään liikkeeseen. (VTT 2016.)



KUVIO 10. Sykloni pesuri. (Cyclonic spray scrubber 2016)

6.2 Venturipesuri

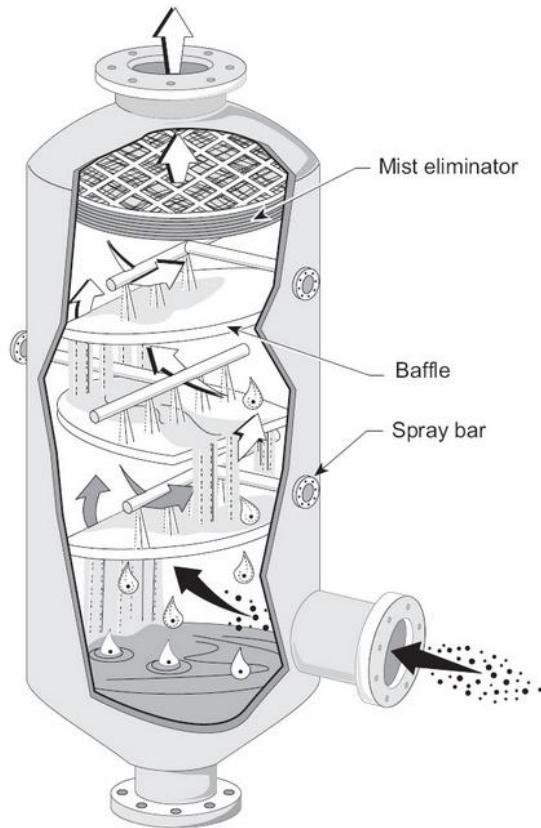
Venturipesurissa suurinopeuksinen puhdistettava kaasuvirta hajottaa nestepisararat pienikokoisiksi venturiputkessa, kaasunvirtaus venturiputkessa on tyypillisesti 30-120 m/s. Venturipesurissa ei välttämättä tarvitse olla nesteelle hajoitussuuttimia, koska suurinopeuksinen kaasuvirtaus hajottaa nesteen tehokkaasti. Venturipesurin rakenne on yksinkertainen, koska siinä ei ole liikkuvia tai pyöriviä osia niin kuin on syklonipesurissa. Vaikka itse pesurin rakenne on yksinkertainen, vaatii se rinnalleen tehokkaan puhaltimen, jotta kaasunvirtausta saadaan kiihdytettyä riittävästi nestepisaroiden hajottamiseksi venturiputkessa. (Venturi scrubber 2016.)



KUVIO 11. Venturi pesuri. (Venturi scrubber 2016)

6.3 Levypesuri

Levypesurin toimintaperiaate on samankaltainen kuin täytekappalespesurin toiminta. Levypesurissa täytekappaleet on korvattu muovisilla tai metallisilla riitetyillä levyillä. Levyissä on pieniä reikiä joiden läpi puhdistettava kaasu virtaa, kaasunvirtaus sekoittuu pesunesteeseen turbulentsin virtauksen johdosta. Pesunestettä syötetään pesurin yläosasta sellaisella virtausnopeudella, jotta tasot tulivat sopivasti pesunesteen virtaamiseksi pesurin läpi ylhäältä alaspäin. Levypesureita käytetään kaasujen puhdistukseen kohteissa joissa kaasujen virtausnopeudet ovat pieniä ja myös, jos puhdistusprosessit eivät ole jatkuvatoimisia. Kuvio 12 käy ilmi levypesurin toiminta yksinkertaistettuna. (Baffle spray scrubber 2016.)



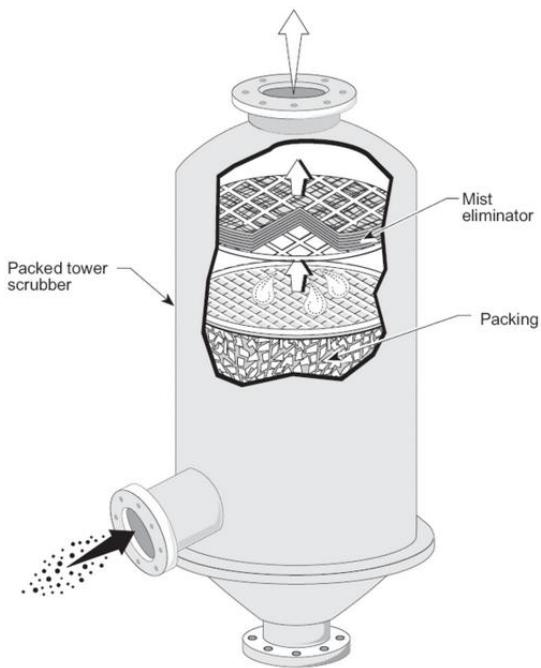
KUVIO 12. Levypesuri. (Baffle spray scrubber 2016)

6.4 Täytekappalepesuri

Täytekappalepesurissa puhdistettava kaasu ja pesuneste virtaavat täytekappalekolonnin läpi, samalla kaasu puhdistuu ja luovuttaa lämpöenergiaa nesteeseen. Pesurin tehokkuuden kannalta on tärkeää, että pesuneste saadaan virtaamaan tasaisesti koko täytekappale kolonnin pinta-alaltaan, tällä tavalla pesunesteen ja kaasun kosketus saadaan toisiinsa mahdollisimman suureksi. Täytekappalepesurit voidaan jakaa toimintaperiaatteen mukaan myötävirtauspesureihin ja vastavirtauspesureihin. Myötävirtauspesurissa puhdistettava kaasu ja puhdistava neste kulkevat samaan suuntaan. Vastavirtauspesurissa kaasu ja neste kulkevat vastakkaisiin suuntiin, kuten kuviossa 13 olevassa pesurissa. (Pihkala 2005,106.)

Tässä työssä mallinnetun pesurin toiminta perustui juuri tuohon vastavirtaustekniikkaan.

Vastavirtauspesurin hyötysuhde on parempi kuin myötävirtauspesurin, koska kuumen kaasun ja kylmän nesteen virtaus suunnat ovat vastakkaiset. Vastavirtauspesuriin alaosaan tuleva kuumakaasu ja pesurin läpi mennyt lämmennyt pesuneste kohtaavat pesurin alaosassa. Vastaavasti pesurin yläosasta poistuva jäähtynyt kaasu ja pesuriin tuleva kylmä pesuneste kohtaavat pesurin yläosassa.



KUVIO 13. Täytekappalepesuri. (Packed bed scrubber 2016)

Pesurin sisällä on täytekappaleita, joidenka tarkoitus on lisätä kontaktipinta-alaa nesteen ja puhdistettavan kaasun välille. Täytekappaleet voivat olla sijoiteltu pesuriin kahdella eri tavalla, joko säännöllisesti tai epäsäännöllisesti. Täytekappaleiden muoto, koko ja materiaali voivat vaihdella käyttötarpeen mukaan. (Packed bed scrubber 2016.)

6.4.1 Täytekappaleet

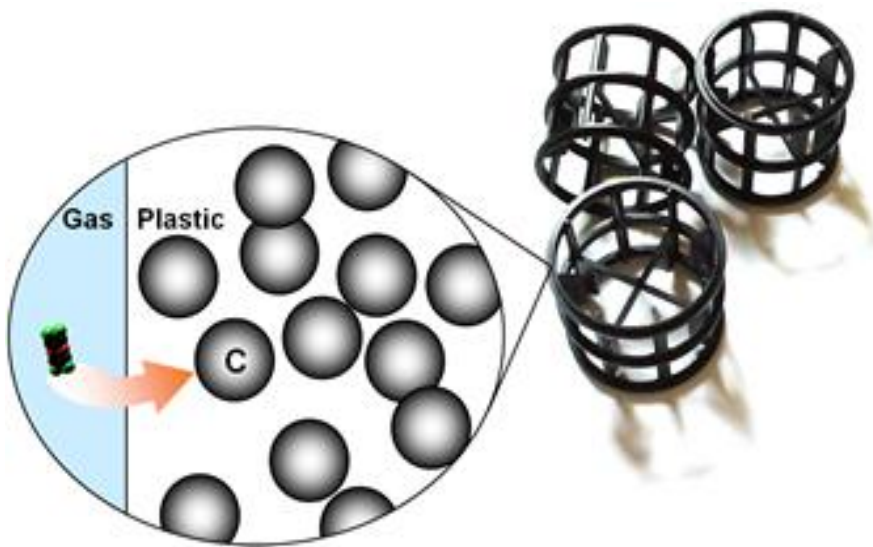
Täytekappaleiden tarkoituksena on saada pesuriin suuri lämmön ja hiukkasten siirtyminen puhdistettavasta kaasusta pesunesteeseen. Täytekappaleiden tulisi olla muodoltaan ja kooltaan sellaisia, että pesurin sisäpinta-ala tulisi mahdollisimman suureksi, ilman että pesurin tilavuus pienentyisi merkittävästi. Myös täytekappaleiden pakkaustapa vaikuttaa pesurin tehokkuuteen. Täytekappaleet voidaan pakata pesukolonneihin kahdella eri tavalla: säännöllisesti tai epäsäännöllisesti. Säännöllisesti pakatussa pesurissa täytekappaleet on aseteltu tiettyyn asentoon. Säännöllisesti pakatun pesurin kaasun ja nesteen virtauskapasiteetti on parempi kuin epäsäännöllisesti pakatun pesurin, koska kaasun ja nesteen virtaukset kanavoituvat. Epäsäännöllisesti pakatussa pesurissa täytekappaleita ei aseteta mitenkään tietyllä tavalla, vaan ne esimerkiksi kaadetaan pesuriin satunnaiseen järjestykseen. Epäsäännöllisesti pakatun pesurin hiukkasten sidontakyky on parempi kuin säännöllisesti pakatun, koska kanavoitumista ei synny niin paljon kuin säännöllisesti pakatussa pesurissa. (Gronmark 2016.)

Täytekappaleiden valmistusmateriaalina käytetään erilaisia keraamisia, metallisia ja muovisia materiaaleja, metalliset ja muoviset materiaalit ovat käytetyimpiä nykyisin. Keraamisilla täytekappaleilla on huono iskunkestävyys, mutta ne kestävät korkeita lämpötiloja ja kestävät kohteissa, joissa on korroosivaikutuksia. Metallisilla täytekappaleilla on hyvä iskunkestävyys ja ne ovat suosittuja, huonona puolen on niiden suhteellisen korkea hinta. Muovisten täytekappaleiden käyttö on yleistynyt, koska ne ovat edullisia, huonona puolelta voidaan pitää niiden heikkoa lujuutta. Jotta pesuri toimisi tehokkaasti ja taloudellisesti on täytekappaleelle olemassa optimaalinen koko, joka on noin kahdeksasosa täytekappalekolonnin halkaisijasta. (Gronmark 2016.) Täytekappaleita on muodoltaan monenlaisia, kuvassa 2 on erimuotoisia ja erilaisista materiaaleista valmistettuja täytekappaleita.



KUVA 2. RVT Process Equipment GmbH valmistamia erilaisia täytekappaleita.
(RTVPE 2016)

Täytekappaleiden valmistusmateriaalit kehittyvät jatkuvasti ja yksi mielenkiintoinen materiaali on aktiivihiiltä sisältävä muovi. Ruotsalainen Götaverken Miljö Ab on kehittänyt uudenlaisen materiaalin, joka on aktiivihiiltä sisältävä polypropeenimuovi. Muoviin on sekoitettu aktiivihiiltä ja aktiivihiili pystyy sitomaan itseensä mm. dioksiini-yhdisteitä. Dioksiini-yhdisteiden molekyylit kiinnittyvät muovin sisällä oleviin hiilipartikkeleihin ja eivät irtoa hiilipartikkelista tavanomaisten prosessivaihteluiden aikana. Materiaali pystyy sitomaan runsaasti dioksiini-yhdisteitä ja se voidaan hävittää käytön jälkeen polttamalla. (Adiox 2016.)



KUVIO 14. Aktiivihiiltä sisältäviä täytekappaleita. (Adiox 2016)

6.4.2 Täytekappaleiden valinnat

Täytekappaleen täsmällistä valintaa oli hankala tehdä etukäteen, koska pesurin tarkkaa käyttökohdetta ei ollut etukäteen tiedossa. Täytekappaleiden hintoja selvittäessäni sain tietää että, joillakin toimittajilla on käytössään laskentaohjelmia optimaalisen materiaalin, muodon ja koon määrittämiseen täytekappaleille. Laskentaohjelmat tarvitsevat muutamia perustietoja kuten puhdistettavan kaasun virtausmäärän, alkulämpötilan ja loppulämpötila tavoitteen. Lisäksi pitää tietää mitä epäpuhtauksia puhdistettava kaasu sisältää ja kuinka puhtaaksi kaasua tavoitellaan puhdistettavaksi. Myös pesunesteen virtausmäärän, tulolämpötilan ja loppulämpötilan tavoite on oltava tiedossa. Täytekappaleen valinta on kompromissi haluttujen ominaisuuksien suhteen, halutaanko painottaa, painehäviön ja likaantumisherkkyuden minimointia vai tehokkuuden ja kapasiteetin maksimointia.

Täytekappalemateriaaleiksi valittiin täytekappalettoimittajan kanssa käytyjen keskustelujen perusteella kolme vaihtoehtoa, keraamiset, metalliset ja muoviset täytekappaleet (KUVA 3.). Keraamiset täytekappaleet soveltuvat, jos puhdistettavassa kaasussa on erittäin aggressiivisia ainesosia esimerkiksi rikkihappoa. Metalliset täytekappaleet ovat hyviä silloin kun kaasun lämpötila nousee yli 100 °C ja vastaavasti muoviset, jos lämpötila jää selkeästi alle 100 °C. Metallisten täytekappaleiden materiaaliksi valittiin haponkestävä teräs ja muovisten polypropeenimuovi. Täytekappaleen kooksi valittiin noin 50 millimetriä halkaisijaltaan oleva sylinterimäinen täytekappale.



KUVA 3. Kuvia valituista täytekappaleista vasemmalta oikealle, muoviset, metalliset ja keraamiset täytekappaleet. (RTVPE 2016)

7 PROTOLAITTEEN VALMISTUSKUSTANNUKSET

Valmistuskustannukset nähtiin tarpeelliseksi selvittää, koska mallinnetusta pesurista ei ole rakennettu protolaitetta. Kustannukset jaettiin riittävän pieniin osiin, koska jatkossa mahdollisesti rakennettava protolaitte voi olla mittasuhteeltaan eri kuin mallinnettu laite. Tällä tavoin on mahdollista tehdä kohtuullisen helposti kustannusarvio vaikkapa kooltaan puolta pienemmälle protolaitteelle. Valmistuskustannukset syntyvät materiaaleista ja työvoimakustannuksista. Materiaalikustannuksista suurimman osan muodostaa runko-osan levy materiaalit ja vastaavasti työvoimakustannuksia syntyy eniten runko-osan kokoonpanohitsauksista.

Taulukkoihin 1. ja 2. on koostettu jokaisen kombinaation valmistuskustannukset, jotta nähdään yksinkertaisemmin ja selkeämmin kustannuserot eri kombinaatioilla.

Valmistuskustannuksissa ei otettu huomioon pesunesteen lämmönvaihtimen ja sen putkitusten kustannuksia. Eikä myöskään puhdistettavan kaasun mahdollisesti tarvitsemaa siirtopuhaltimen ja putkistojen kustannuksia. Olisi hankaa tehdä kustannuslaskelmia edellä mainituista asioista, koska protolaitteen käyttökohde vaikuttaa laitevalintoihin ja sitä kautta syntyviin kustannuksiin.

7.1 Materiaalivalinnat

Runko-osan materiaaliksi valittiin kaksi vaihtoehtoa, ruostumaton teräs EN1.4301 (AISI304) ja haponkestävä teräs EN1.4404 (AISI316), koska etukäteen ei voida tietää pesurin tarkkaa käyttökohdetta on hyvä olla molemmat vaihtoehdot laskelmissa. Ruostumaton teräs EN1.4301 soveltuu moniin käyttökohteisiin ja on edullisempi vaihtoehto kuin haponkestävä teräs EN1.4404. Haponkestävä teräs kestää vastaavasti paremmin vaativissakin olosuhteissa. Haponkestävää terästä käytettäessä on hitsausaumojen lisäaineena käytettävä haponkestävää lisäainelankaa, joka myös nostaa valmistuskustannuksia. Molempien runko-osan ja täytekappaleiden materiaali valinnoista saadaan aikaan kuusi erilaista kombinaatiota.

Lisäksi täytekappalepesuri on eristettävä ja suojapellitettävä, jotta hukkalämpö ei haihdu pesurin rungon kautta ympäröivään ilmaan. Eristeeksi valittiin 200 mm kivivilla ja pellitykseen 0,6 mm värivalmis pelti. Kaikkien kuuden kombinaation eristykseen ja suojapellitukseen soveltuu samat eriste ja peltimateriaalit.

7.2 Tarjouspyyntömenettelyt

Valmistuskustannuksien laskemista varten oli selvitettävä materiaalien ja työvoimakustannusten hinnat, jotka selvitettiin sähköposteilla ja puhelinsoitoilla. Laserleikattavien osien hinta euroa/kilogramma kolmelle eri ainevahvuudelle 4 mm, 6 mm ja 10 mm ja kahdelle eri materiaalille, hinta sisälsi ohjelmoinnin, laserleikkauksen ja materiaalin. Täysikokoisista 4 mm ainevahvuudeltaan olevista levyarkeista, jotka olivat kooltaan 1500 mm x 300 mm, saatiin euroa/kilogramma hinta kahdelle eri materiaalille. Mankeloitavista osista mankelointi työn hinta euroa/neliömetri 4 mm materiaalille. Valmiiksi muovatuista säiliönpäädyistä saatiin euroa/kappale hinta kahdelle eri materiaalille. Putkipalkeille euroa/metri hinta kahdelle eri materiaalille, euroa/metri hinta sisälsi myös sahauksen määrämittaan. Hitsattavista putkiyhteistä hinnat euroa/kappale molemmille materiaaleille. Hitsauksista MIG- ja TIG-hitsauksen hinta euroa/metri, joka sisälsi hitsaustyön, hitsauslisäaineet, hitsaussuojakaasun ja hitsisaumojen peittauksen molemmille materiaalivalinnoille. Lisäksi eristys ja pellitystyölle kysyttiin yksikköhinta euroa/neliömetri, joka sisälsi 200 mm vahvuisen kivivillan, valmiiksi maalatun 0,5 mm ainevahvuisen pintapellin, tarvittavat asennustarvikkeet ja asennustyön pellille sekä villalle. Materiaalihankinnoista syntyviä kuljetuskustannuksia ei ole huomioitu laskelmissa ja kaikki hinnat ovat arvo-lisäverottomia hintoja.

TAULUKKO 1. Protolaitteen kokonaiskustannukset ruostumattomastateräksestä valmistettuna ja kolmella erilaisella täytekappale vaihtoehdolla varustettuna.

| Protolaitteen kokonaiskustannukset ruostumattomasta teräksestä valmistettuna EN1.4301(AiSi 304) | | |
|--|-------------|---|
| Laserleikatut levyt | 4745 | € |
| Täydet levyarkit | 784 | € |
| Mankelointityö | 360 | € |
| Säiliön päädyt | 310 | € |
| Putkipalkit ja kulmateräks | 117,5 | € |
| Hitsattavat putkiyhteet | 24,6 | € |
| MIG- ja TIG-kokoonpanohitsaukset | 486 | € |
| Pellitys ja eristys sekä pientarvikkeet | 682,5 | € |
| Keraamiset täytekappaleet | 1250 | € |
| Metalliset täytekappaleet | 1625 | € |
| Muoviset täytekappaleet | 438 | € |
| Yhteensä hinnat: | | |
| Keraamisilla täytekappaleilla varustettuna | 8760 | € |
| | | € |
| Metalliset täytekappaleilla varustettuna | 9135 | € |
| | | € |
| Muovisilla täytekappaleilla varustettuna | 7947 | € |

TAULUKKO 2. Protolaitteen kokonaiskustannukset haponkestävästä teräksestä valmistettuna ja kolmella erilaisella täytekappale vaihtoehdolla varustettuna.

| Protolaitteen kokonaiskustannukset Haponkestävästä teräksestä valmistettuna EN1.4404 (AiSi 316) | | |
|--|--------------|---|
| Laserleikatut levyt | 6077 | € |
| Täydet levyarkit | 1064 | € |
| Mankelointityö | 360 | € |
| Säiliön päädyt | 365 | € |
| Putkipalkit ja kulmateräket | 152,7 | € |
| Hitsattavat putkiyhteet | 33,6 | € |
| MIG- ja TIG-kokoonpanohitsaukset | 604 | € |
| Pellitys ja eristys sekä pientarvikkeet | 682,5 | € |
| Keraamiset täytekappaleet | 1250 | € |
| Metalliset täytekappaleet | 1625 | € |
| Muoviset täytekappaleet | 438 | € |
| Yhteensä hinnat: | | |
| Keraamisilla täytekappaleilla varustettuna | 10589 | € |
| | | € |
| Metalliset täytekappaleilla varustettuna | 10964 | € |
| | | € |
| Muovisilla täytekappaleilla varustettuna | 9776 | € |

8 YHTEENVETO

Työn päätavoitteena oli saada selville millaisia kuumien kaasujen märkäpesumenetelmiä on käytössä ja selvittää protolaitteen valmistuskustannukset, jotta jatkossa mahdollisesti rakennettavan protolaitteen valmistuskustannukset olisivat tiedossa riippumatta siitä minkä kokoinen rakennettava laite tulisi olemaan. Edullisimman ja kalleimman vaihtoehdon välille hintaeroksi muodostui noin 3000 euroa, kuten taulukoista 1 ja 2 voidaan nähdä. Vaikka protolaitte rakennettaisiin puolet pienempänä kuin mallinnettu laite, olisi sen valmistuskustannukset silti useita tuhansia euroja. Protolaitteen rakentamiseen olisi hyvä saada jokin yhteistyöyrittäjä, tai jokin muu taho kattamaan valmistuskustannuksia ja sitä kautta laitetta päästäisiin testaamaan todellisessa käyttöympäristössä.

Työn aihe oli mielenkiintoine ja haastava, koska en ole aikaisemmin perehtynyt juurikaan savukaasupesureihin. Työn edetessä opin ymmärtämään erilaisten märkäpesureiden toimintaa ja niiden rakenteellisia eroavaisuuksia, sekä täytekappaleiden ominaisuuksien merkityksellisyyden täytekappalepesurin toiminnan kannalta. Energiatohokkuuteen ja Pinch-analyysiin perehtyessäni tulini huomaamaan kuinka tärkeää olisi saada toimivia ja kohtuullisen hintaisia laitteistoja ja ratkaisuja kuumien kaasujen puhdistukseen ja lämmöntalteenottoon. Mallinnetulle laiteelle voisi jo nyt olla kaupallista käyttöä, koska energiatohokkuuden parantaminen ja päästömääräyksien yhä tiukentuminen asettavat lisävaatimuksia kohteille, joissa kuumia poistokaasuja syntyy.

LÄHTEET

Adiox 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.gmab.se/dioxin-removal/adiox/>. Luettu 15.2.2016

Baffle spray scrubber. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Baffle_spray_scrubber. Luettu 3.2.2016

Caligo 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.caligoindustria.com/lehdisto/Caligo_Savukaasupesuri.pdf. Luettu 1.2.2016

Cyclonic spray scrapper. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Cyclonic_spray_scrubber. Luettu 14.2.2016

Drawingboard 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Drawing_board. Luettu 3.3.2016

Energiatehokkuuden mittarit ja potentiaalit 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: http://lib.tkk.fi/TIEDE_TEKNOLOGIA/2012/isbn9789526045047.pdf. Luettu 10.4.2016

Flagan, Richard C. & Seinfeld, John. 1988. Fundamentals of air polluting engineering. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

Gronmark 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: http://rvtpe.com/wp-content/uploads/2013/06/RVT_TowerPackings_130528.pdf. Luettu 3.3.2016

Hietikko, E. 2005. Tietokoneavusteinen suunnittelu. Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

Ilmasto-opas. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/hillinta/-/artikkeli/75ef09a7-01a2-489a-862e-0dce463a8e1c>. Luettu 4.4.2016.

Motiva energiatehokas lämmitys. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/7812/Energiatehokas_Lammitys_LTO_KOULUTUSAINEISTO.pdf. Luettu 4.4.2016

Motiva pinch-analyysi. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.motiva.fi/pinch-analyysi>.
Luettu 6.4.2016.

Packed bed scrubber. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: https://en.wiki2.org/wiki/Wet_scrubber.
Luettu 3.2.2016

Pihkala, J. 2005. Prosessiteknikan yksikköprosessit. Helsinki: Hakapaino Oy.

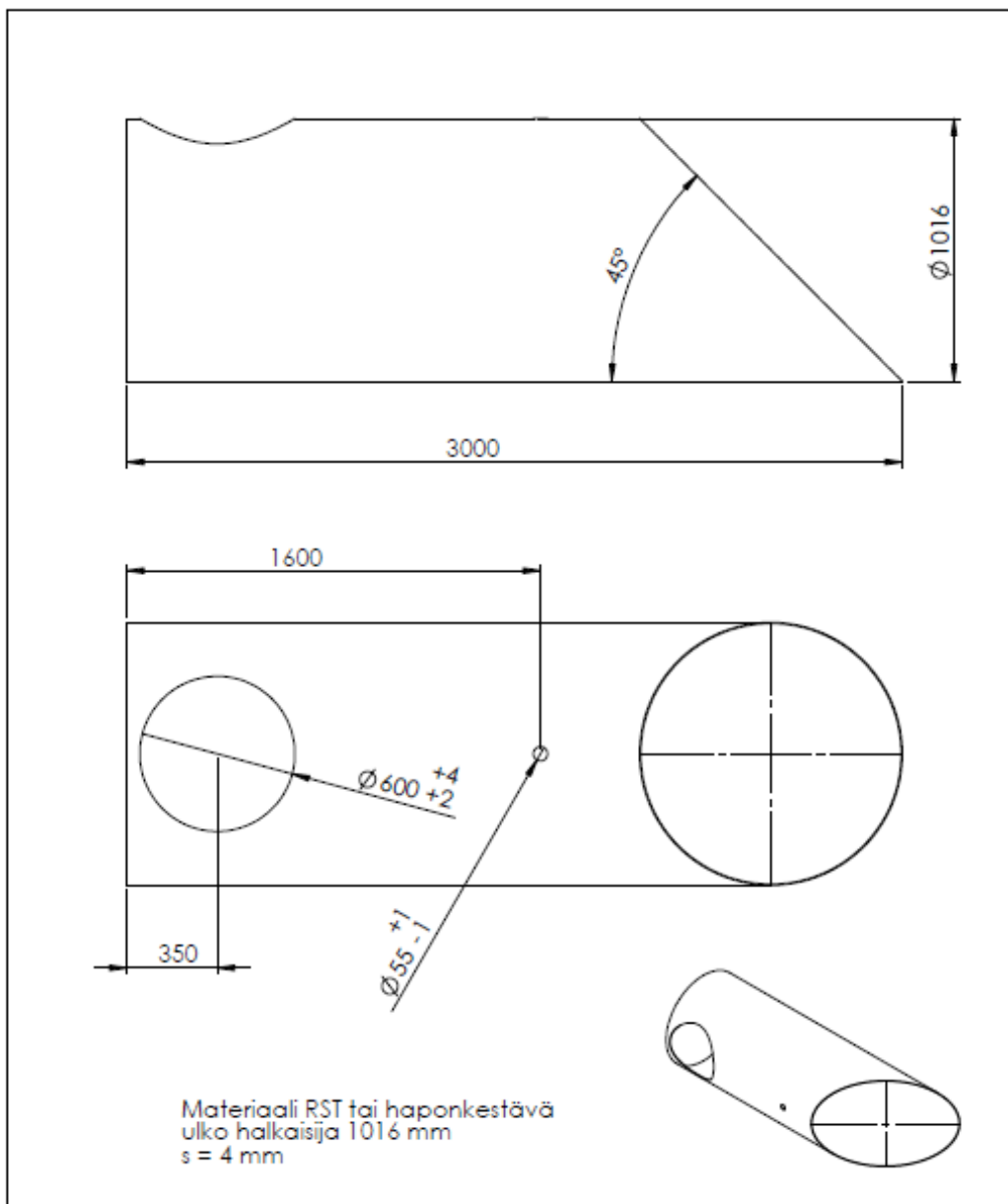
Promaintlehti. 2015. Www dokumentti. Saatavissa: <http://www.promaintlehti.fi/Tuotantotehokkuuden-kehittaminen/Savukaasupesuri-parantaa-lampoyhtion-kannattavuutta>. Luettu 20.11.2015.

RTVPE 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://gronmark.fi/fi/tuotteet/t%C3%A4ytekappaleet>.
Luettu 18.2.2016

Venturi scrubber. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: https://en.wikipedia.org/wiki/Venturi_scrubber.
Luettu 3.2.2016

VTT. 2016. Www-dokumentti. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/t2300.pdf>. Luettu 2.1.2016.

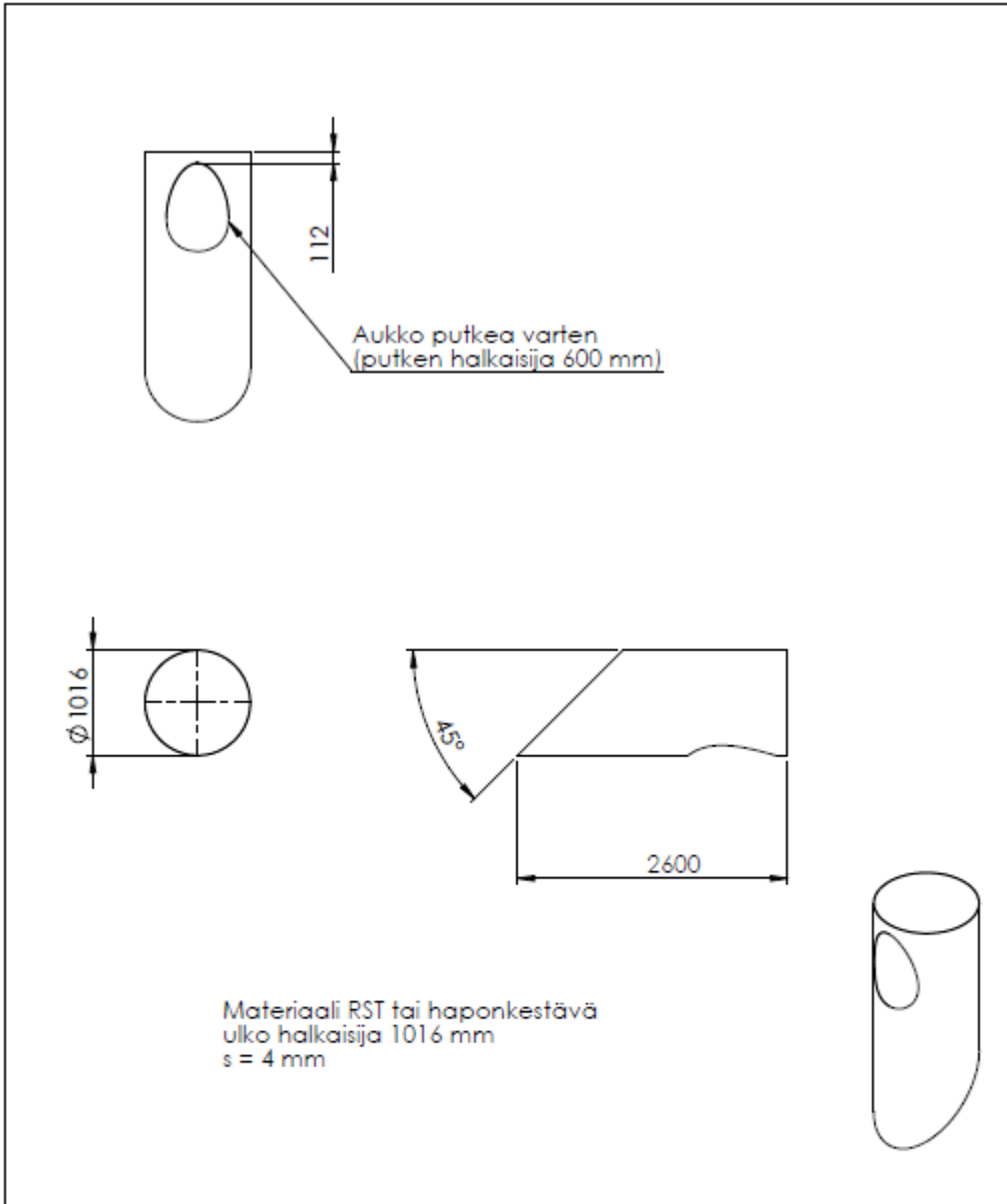
LIITE 1/1



Materiaali RST tai haponkestävä
ulko halkaisija 1016 mm
s = 4 mm

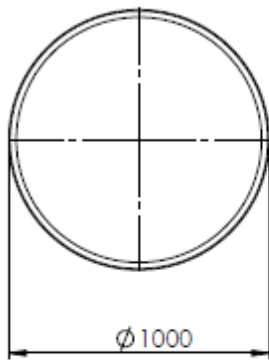
| | | | | | | | | | |
|--|--|-----------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| DRAWN | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | | | |
| CHKD | | | | | | | | | |
| APPVD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| QA | | | | MATERIAL: | | DWG NO. | | A4 | |
| SolidWorks Student License | | WEIGHT: | | SCALE:1:50 | | 1001 | | SHEET 1 OF 1 | |
| Academic Use Only | | | | | | | | | |

LIITE 1/2



| | | | | | | | | | |
|--|--|-----------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|----------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| DRAWN | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | | | |
| CHECKED | | | | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| QA | | | | MATERIAL: | | DWG NO. 1002 | | A4 | |
| SolidWorks Student License | | WEIGHT: | | SCALE: 1:50 | | SHEET 1 OF 1 | | | |
| Academic Use Only | | | | | | | | | |

LIITE 1/3

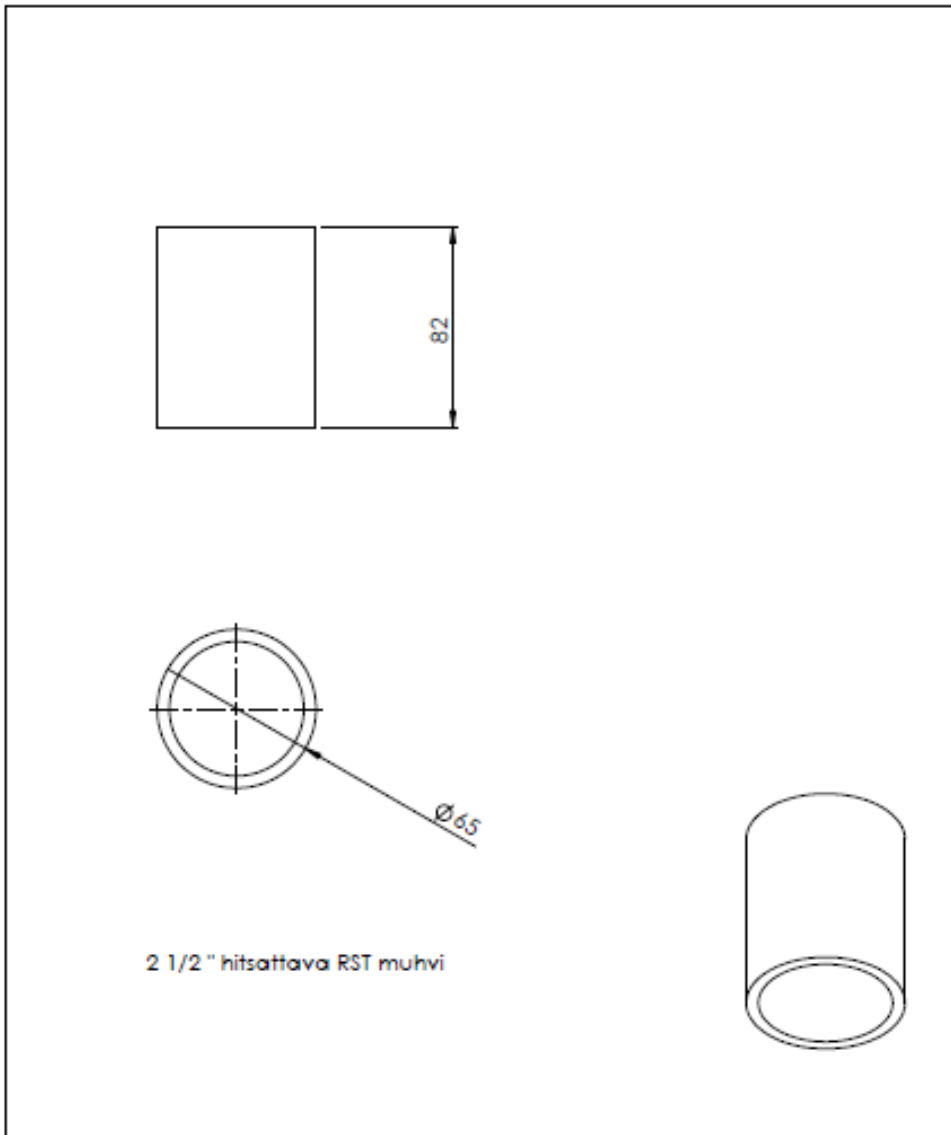


Pääty osa esim. Saarijärven päätytuotteelta
RST KUPERA PÄÄTY SS 895
 ulkohalkaisija 1000 mm s = 3 mm



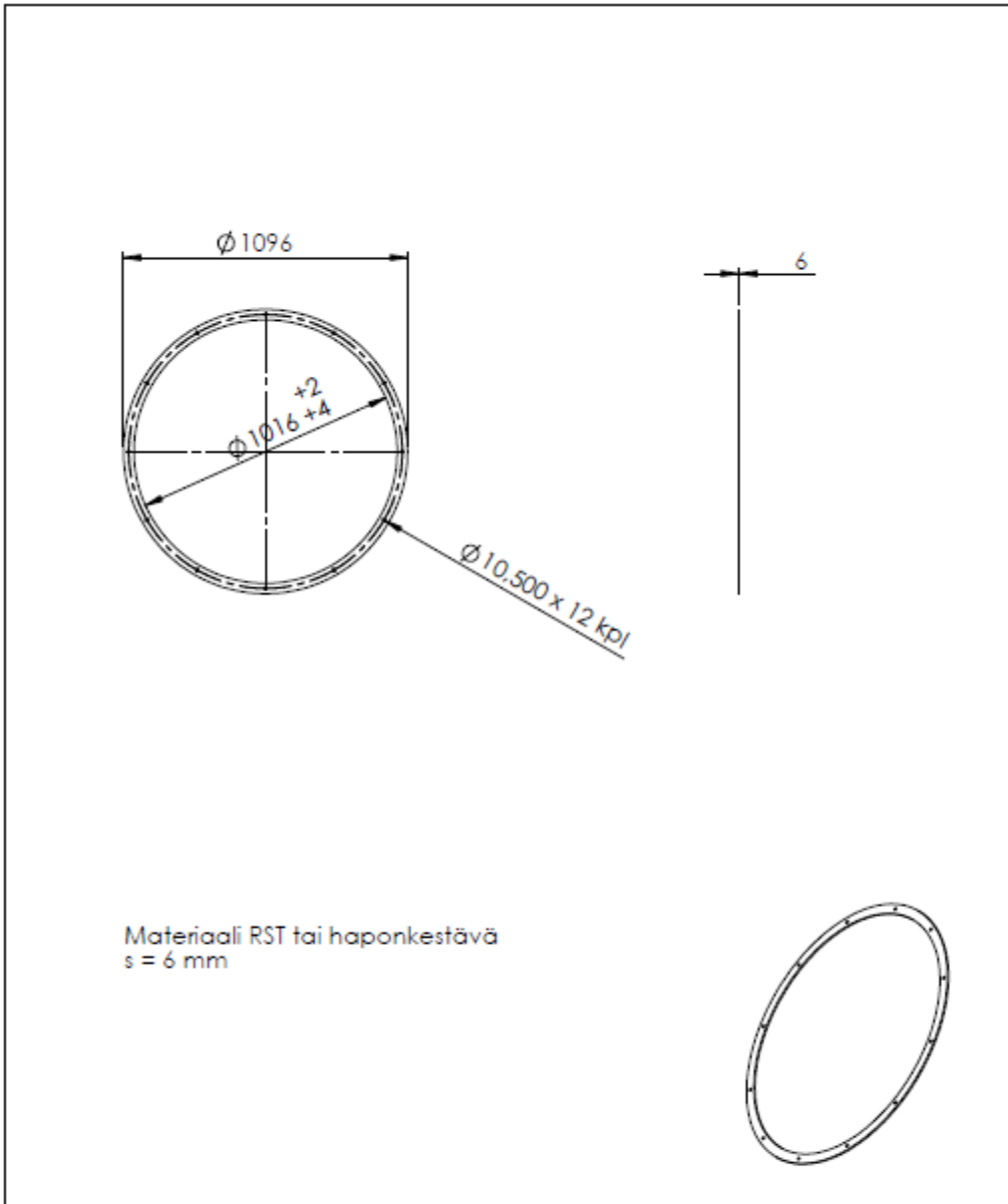
| | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|-----------------------------------|-----------|----------------------|--------------|----------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DIBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | | | | | | | | |
| | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: | | | |
| DRAWN | | | | | | | | | |
| CHECKED | | | | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| Q.A. | | | | | MATERIAL: | DWG NO. 1003 | | A4 | |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | | | WEIGHT: | SCALE:1:20 | SHEET 1 OF 1 | | |

LIITE 1/4

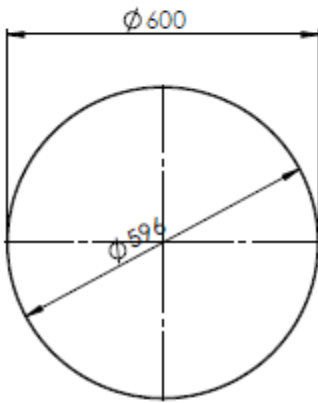


| | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|---------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| UNAS OLEVIKSA SPICRIGI DIMENSIONID ARV IN HELIKSIRIGI | | FINISH | | DIEK AND BREAT DAMP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: TOURNAISSI: LINEAR: ANGULAR: | | | | | | | | | |
| | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE | | | |
| DRAWN | | | | | | | | | |
| CHECKED | | | | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| CLA | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. 1004 | |
| SolidWorks Student License | | | | | | | | A4 | |
| Academic Use Only | | WEIGHT: | | SCALE: 1:1 | | | | SHEET 1 OF 1 | |

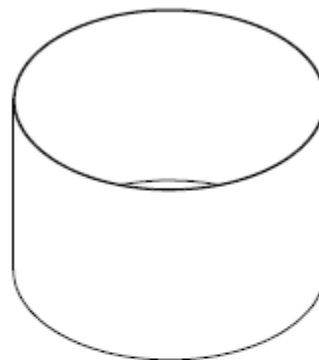
LIITE 1/5



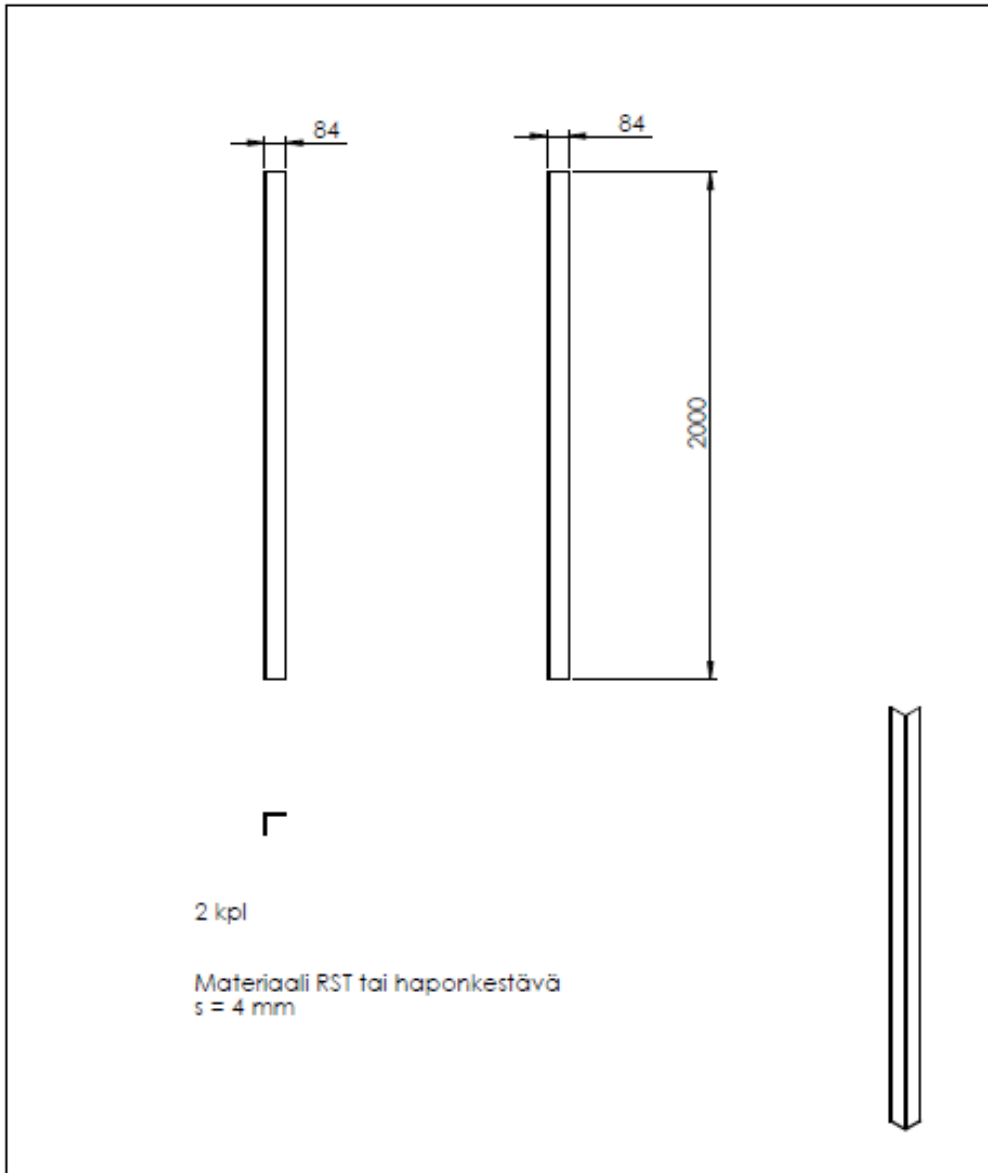
| | | | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|-------------|--|-----------------------------------|--|----------------------|------|----------|----|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | TOLERANCES: | | LINEAR: | | ANGULAR: | | TITLE: | |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE | | | | | | | | |
| CHKD. | | | | | | | | | | | |
| APPVD. | | | | | | | | | | | |
| MFG. | | | | | | | | | | | |
| Q.A. | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. | 1005 | | A4 |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | | WEIGHT: | | SCALE:1:20 | | SHEET 1 OF 1 | | | |



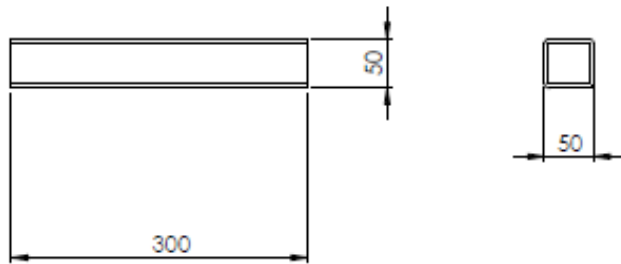
Materiaali RST tai haponkestävä
s = 2 mm



| | | | | | | | | | |
|--|-----------|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|----------|----------|----|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| NAME | SIGNATURE | DATE | | | | TITLE: | | | |
| DRAWN | | | | | | | | | |
| CHECKED | | | | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | | | | |
| DESIGNED | | | | | | | | | |
| DATE | | | | | | MATERIAL: | DWG. NO. | 1007 | A4 |
| SolidWorks Student License | | WEIGHT: | | SCALE:1:1 | | SHEET 1 OF 1 | | | |
| Academic Use Only | | | | | | | | | |

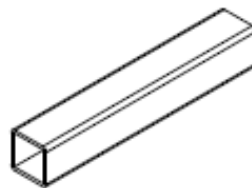


| | | | | | | |
|---|-----------|---------|-----------------------------------|-------------|----------------------|----------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | FINISH: | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: | |
| DRAWN | | | | | | |
| CHECKED | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | |
| MRG | | | | | | |
| Q.A. | | | MATERIAL: | DWG. NO. | 1008 | A4 |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | WEGE: | SCALE: 1:30 | SHEET 1 OF 1 | |

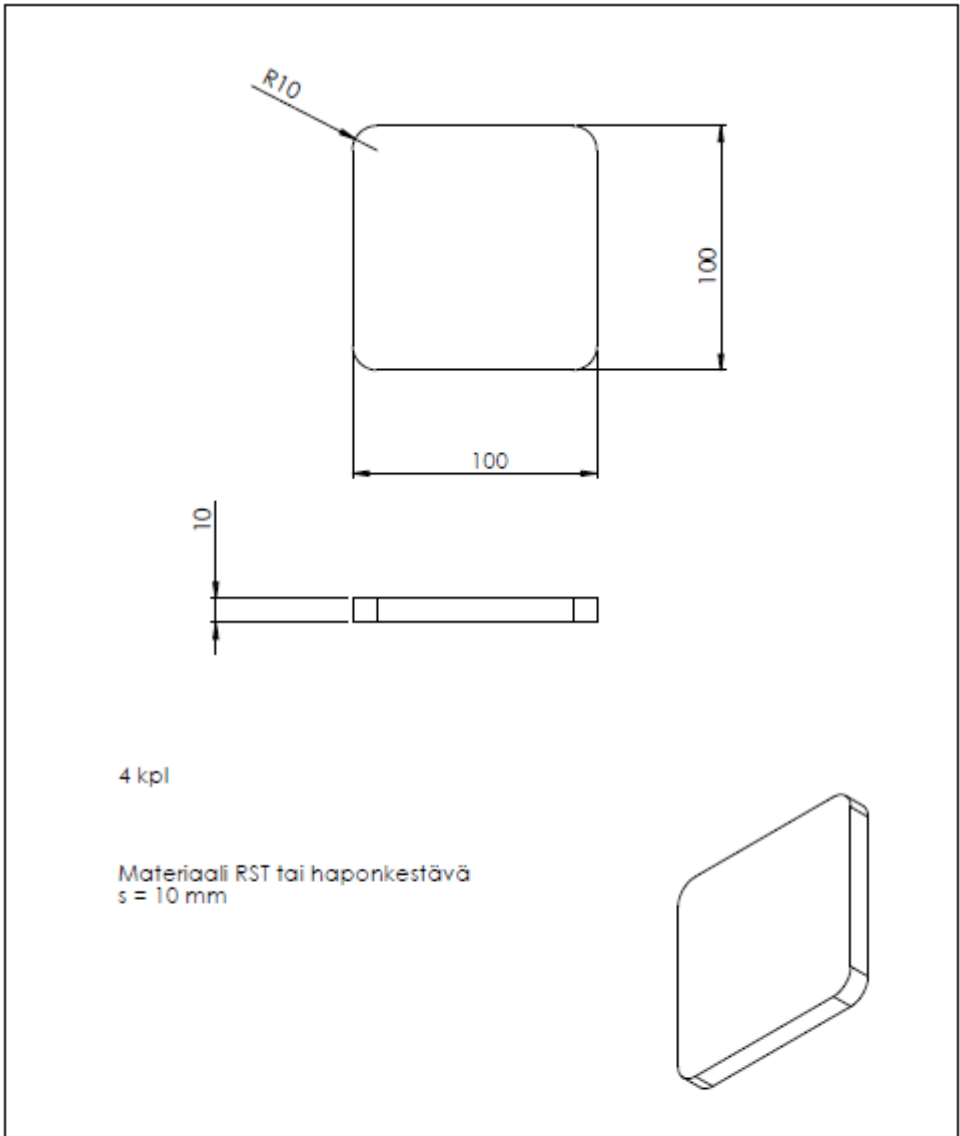


4 kpl

Materiaali RST tai haponkestävä
s = 4 mm



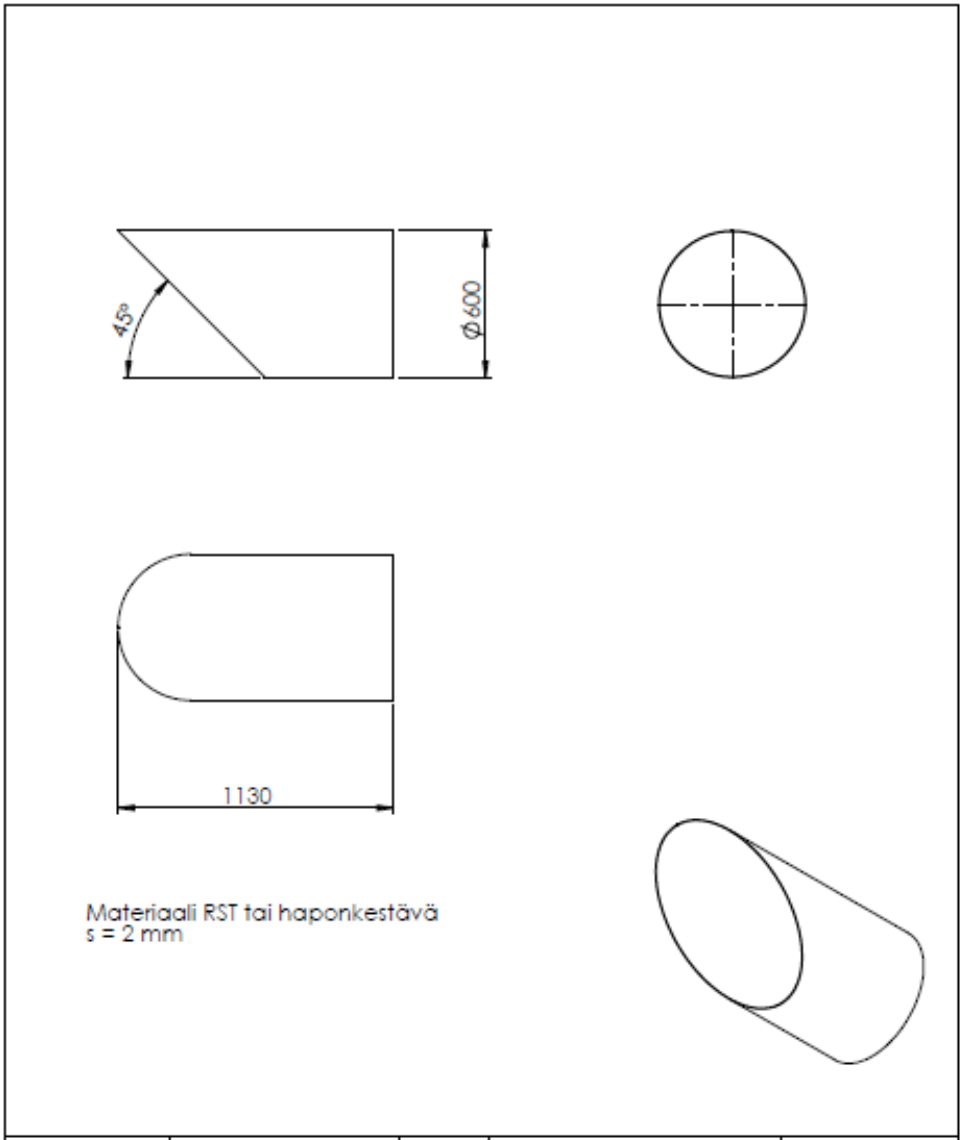
| | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|-----------------------------------|-----------|----------------------|------|----------|--------------|
| DIMENSIONS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR | | | | | | | | | |
| ANGULAR | | | | | | | | | |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: | | | |
| CHKD | | | | | | | | | |
| APPVD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| QLA | | | | | MATERIAL: | DWG. NO. | 1009 | A4 | |
| SolidWorks Student License | | | | | | | | | |
| Academic Use Only | | | | | ISSUE: | SCALE:1:2 | | | SHEET 1 OF 1 |



4 kpl

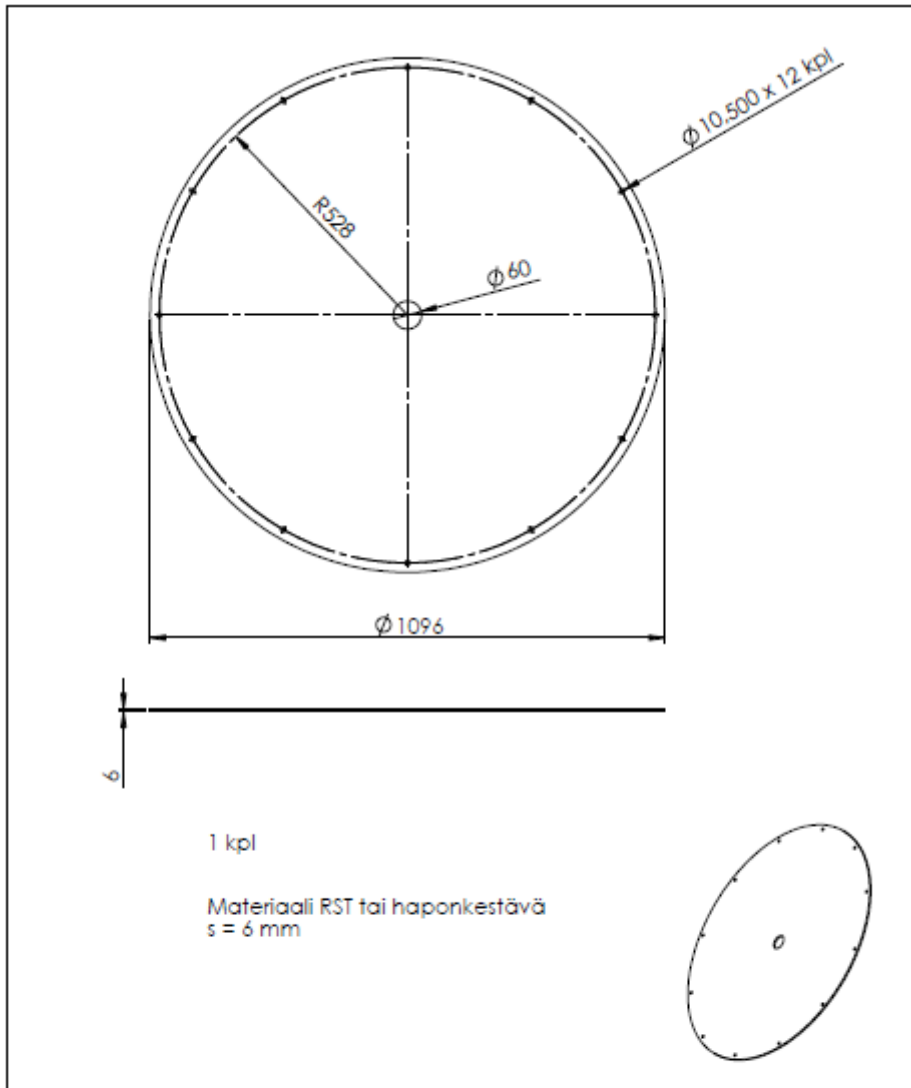
Materiaali RST tai haponkestävä
s = 10 mm

| | | | | | | | | | |
|--|------|-----------|------|-----------------------------------|-----------|----------------------|--------------|----------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH: | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| DRAWN | NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE: | | | |
| CHK'D | | | | | | | | | |
| APP'VD | | | | | | | | | |
| MG | | | | | | | | | |
| G.A | | | | | MATERIAL: | DWG NO. | 1010 | A4 | |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | | | WGHT: | SCALE: 1:1 | SHEET 1 OF 1 | | |

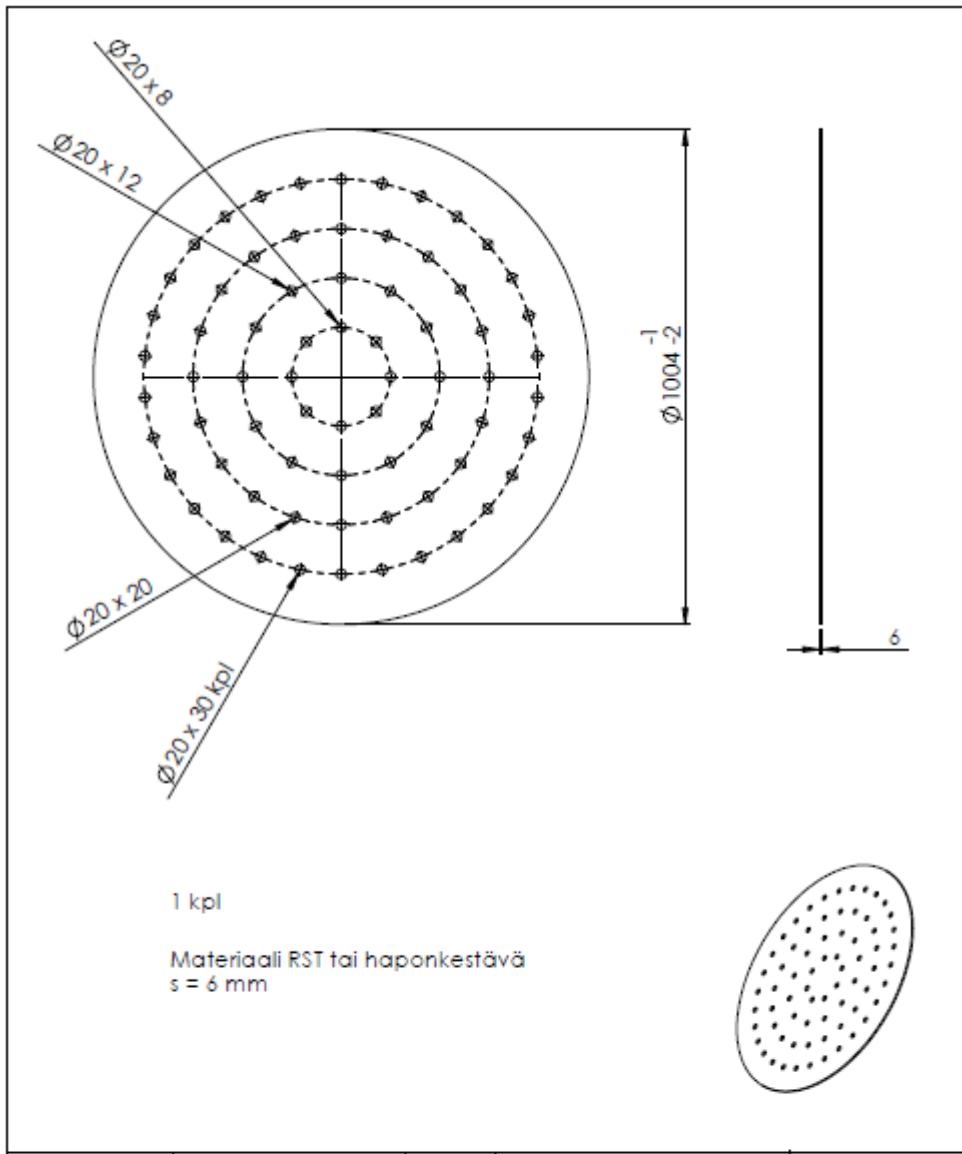


Materiaali RST tai haponkestävä
s = 2 mm

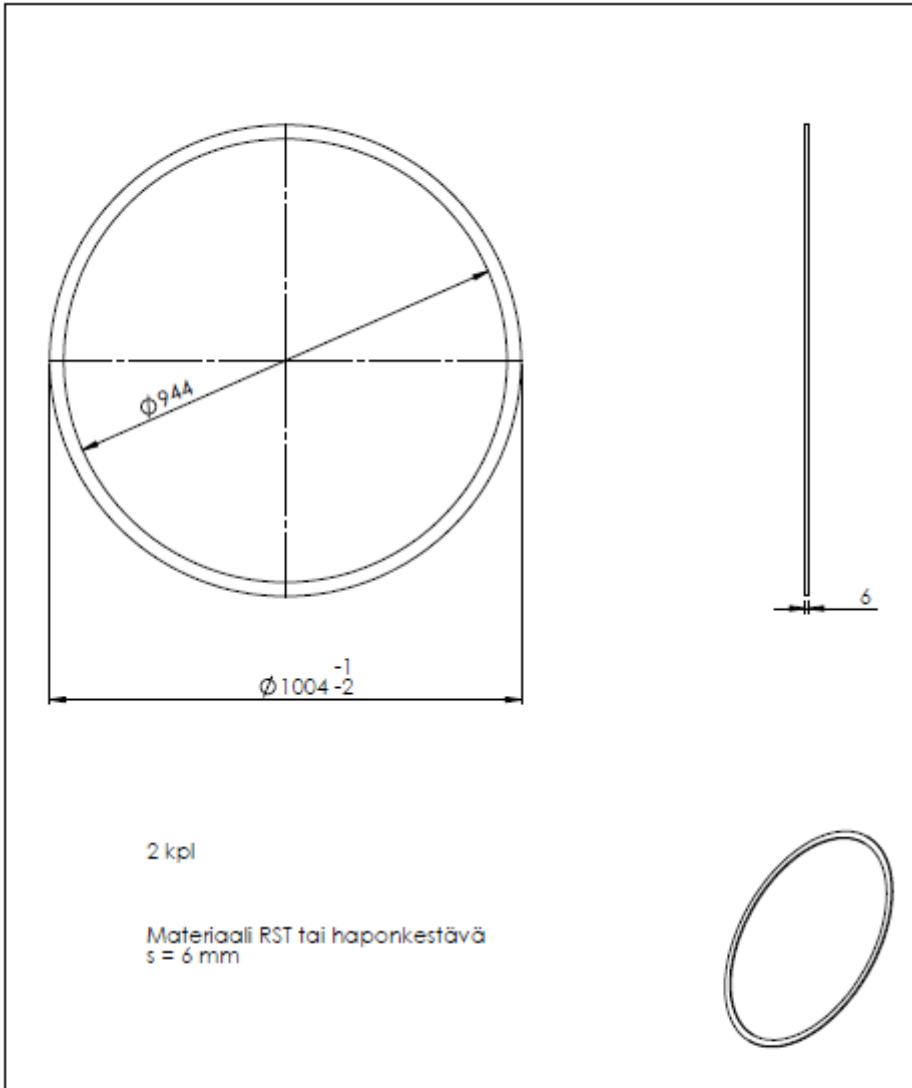
| | | | | | | | | | |
|--|-----------|--------|--|-----------------------------------|--|----------------------|-------------|--------------|----|
| DIMENSIONS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR | | | | | | | | | |
| ANGULAR | | | | | | | | | |
| NAME | SIGNATURE | DATE | | | | TITLE: | | | |
| DRN | | | | | | | | | |
| CHKD | | | | | | | | | |
| APPVD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| Q.A. | | | | | | MATERIAL: | DWG NO. | 1011 | A4 |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | | | | WEIGHT: | SCALE: 1:20 | SHEET 1 OF 1 | |



| | | | | | | |
|--|-----------|--------|-----------------------------------|-----------|----------------------|----------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR ANGULAR | | FINISH | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| NAME | SIGNATURE | DATE | TITLE | | | |
| DRWN | | | | | | |
| CHKD | | | | | | |
| APPVD | | | | | | |
| MFG | | | | | | |
| Q.A. | | | MATERIAL: | DWG NO. | 1012 | A4 |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | WEIGHT | SCALE:1:1 | SHEET 1 OF 1 | |



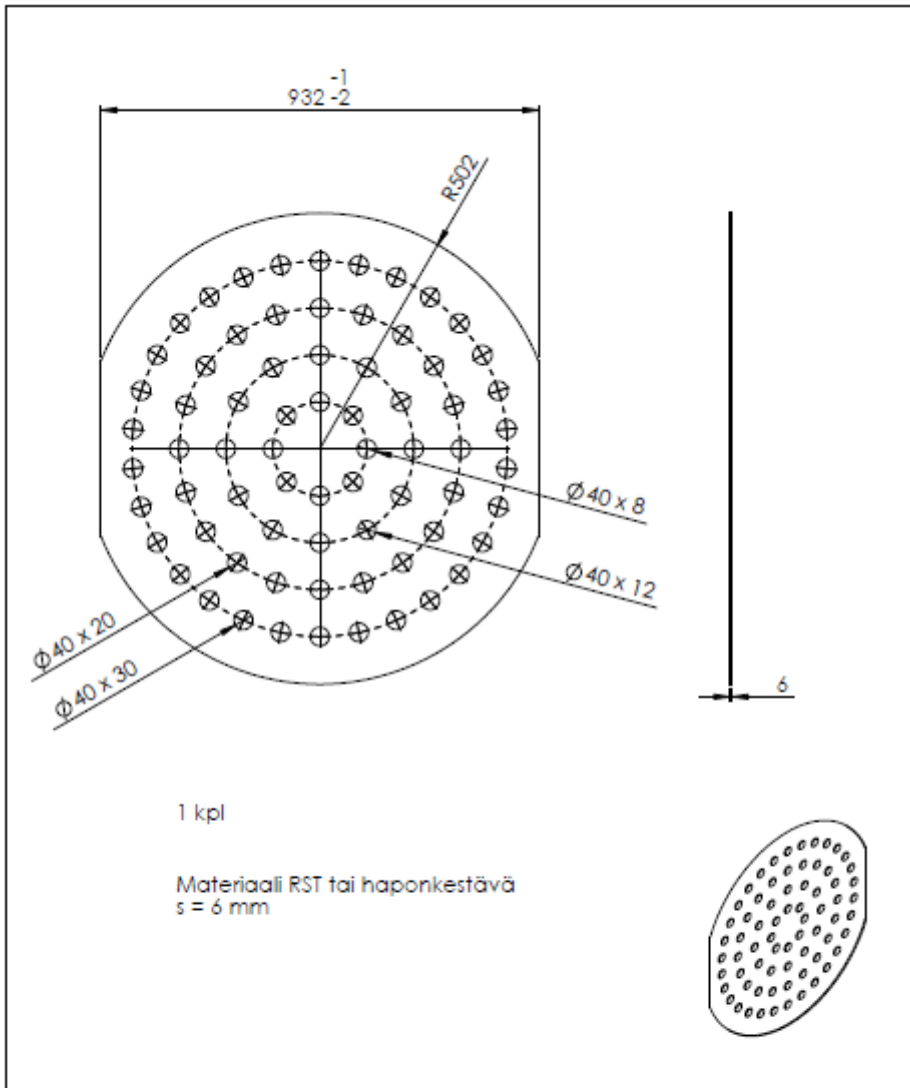
| | | | | | | | | | |
|--|--|-----------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR: | | | | | | | | | |
| ANGULAR: | | | | | | | | | |
| NAME | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE | | | |
| DRAWN | | | | | | | | | |
| CHECKED | | | | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| Q.A. | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. 1013 | |
| SolidWorks Student License | | | | | | | | A4 | |
| Academic Use Only | | WEIGHT: | | SCALE:1:10 | | SHEET 1 OF 1 | | | |



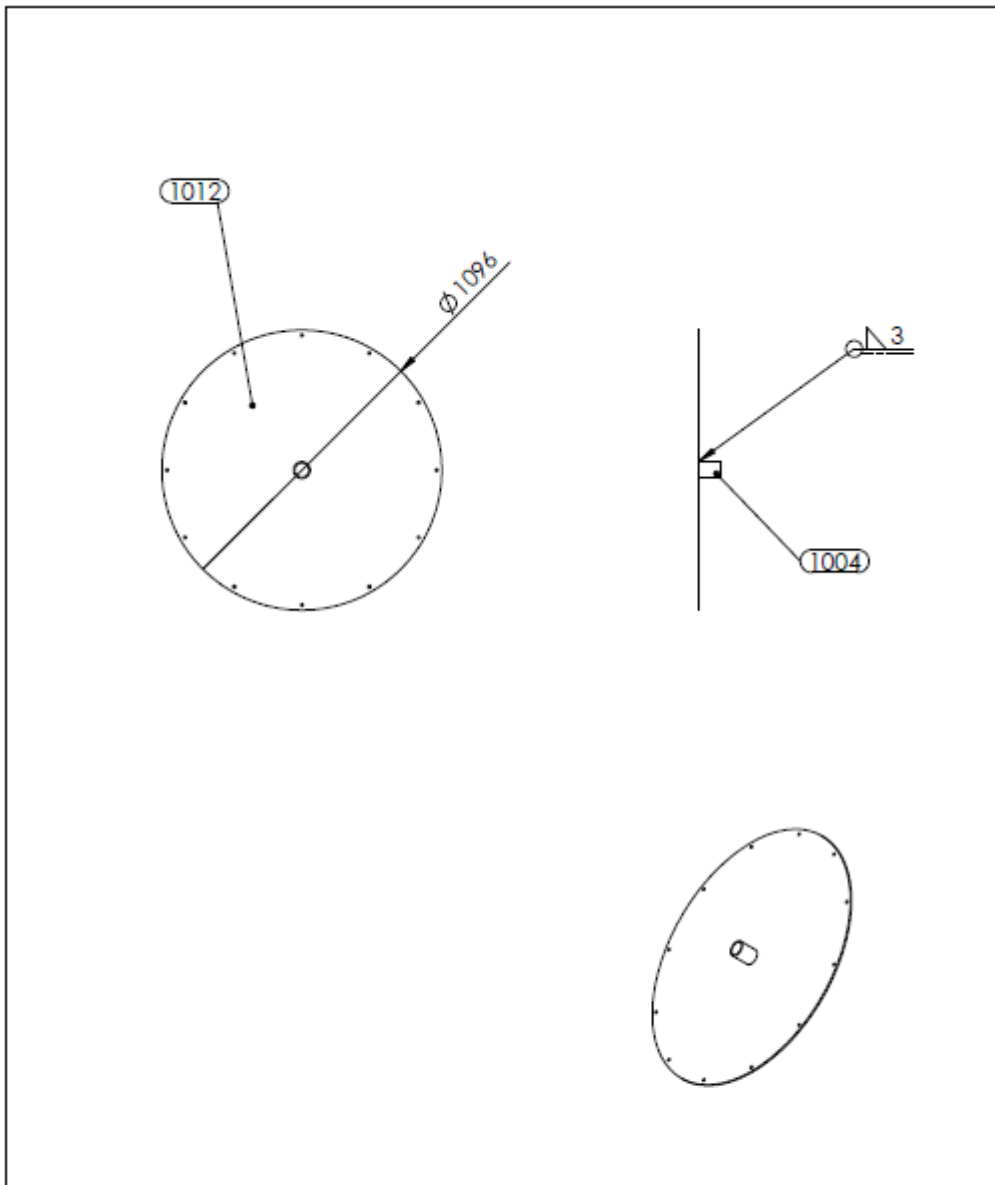
2 kpl

Materiaali RST tai haponkestävä
s = 6 mm

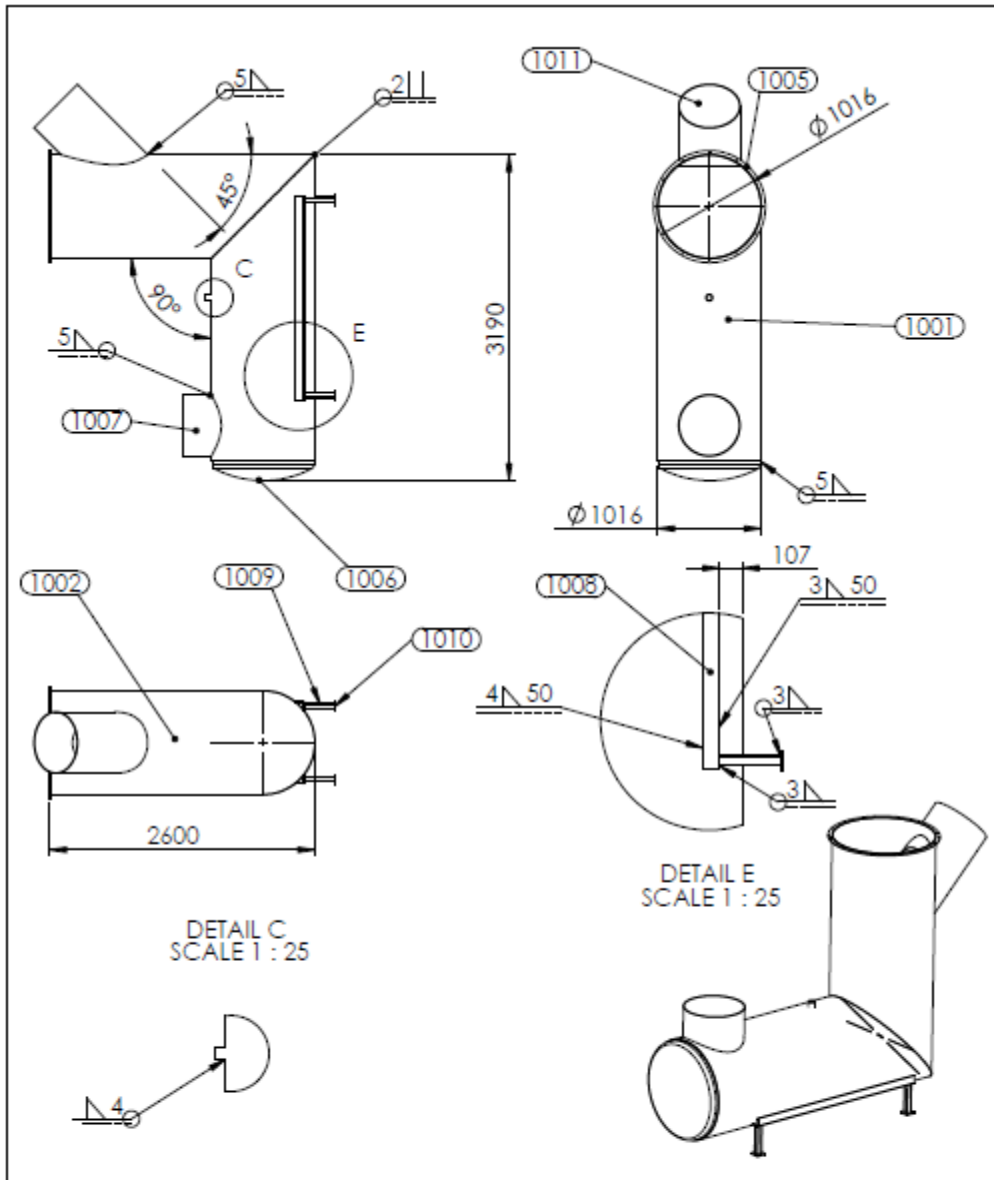
| | | | | | | | | | |
|--|-----------|---------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|--------------|--|
| DIMENSIONS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS | | FINISH | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| SURFACE FINISH | | | | | | | | | |
| TOLERANCES: | | | | | | | | | |
| LINEAR | | | | | | | | | |
| ANGULAR | | | | | | | | | |
| NAME | SIGNATURE | DATE | | | | TITLE: | | | |
| DRWNR | | | | | | | | | |
| CHKD | | | | | | | | | |
| APPVD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| CLA | | | | | | MATERIAL: | | DWG NO. 1014 | |
| <input type="checkbox"/> SolidWorks Student License | | | | | | | | A4 | |
| <input type="checkbox"/> Academic Use Only | | WEIGHT: | | SCALE: 1:10 | | SHEET 1 OF 1 | | | |



| | | | | | | |
|--|-----------|--------|-----------------------------------|------------|----------------------|----------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH TOLERANCES: LINEAR ANGULAR | | FINISH | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| NAME | SIGNATURE | DATE | | | TITLE | |
| DESIGN | | | | | | |
| CHECK | | | | | | |
| APPROV | | | | | | |
| MFG | | | | | | |
| Q.A. | | | MATERIAL: | DWG NO. | 1015 | A4 |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | WEIGHT: | SCALE:1:10 | SHEET 1 OF 1 | |



| | | | | | | | | | |
|---|--|-----------|--|-----------------------------------|--|----------------------|--|----------|--|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | FINISH: | | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | | DO NOT SCALE DRAWING | | REVISION | |
| DRAWN | | SIGNATURE | | DATE | | TITLE: | | | |
| CHK'D | | | | | | | | | |
| APP'VD | | | | | | | | | |
| MFG | | | | | | | | | |
| G.A. | | | | MATERIAL: | | DWG NO. 2002 | | A4 | |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | WDR: | | SCALE: 1:30 | | SHEET 1 OF 1 | | | |



| | | | | | |
|---|-----------|---------|-----------------------------------|----------------------|--------------|
| UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR: | | FINISH: | DEBUR AND BREAK SHARP EDGES | DO NOT SCALE DRAWING | REVISION |
| NAME | SIGNATURE | DATE | | TITLE | |
| DESIGN | | | | | |
| CHK'D | | | | | |
| APP'VD | | | | | |
| MFG | | | | | |
| G.A. | | | MATERIAL: | DWG NO. | A4 |
| SolidWorks Student License Academic Use Only | | | WGTG: | SCALE:1:50 | SHEET 1 OF 1 |

2001

