



Konstruktion av anordning för att undersöka förslitning av syrebärandepartiklar för kemcyklisk förbränning

Design, utformning och konstruktion av en testanordning inspirerad
av Grace-Davison Jet-Cupmetoden

Ett kandidatarbete inom Energiteknik

Adrian Gunnarsson Simon Lindqvist
Patrik Gyllén Joakim Hedström
Johan Larsson Ramyar Baban

Institutionen för Energi och Miljö
Avdelningen för Energiteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2012
Kandidatarbete ENMX02-12-10

Sammanfattning

Syftet med detta projekt är att designa och konstruera en anordning som kan undersöka mekanisk förslitning av syrebärrpartiklar. Syrebärrpartiklarna används vid kemcyklisk förbränning och djupare kunskap om hur den mekaniska förslitningen sker och i vilken utsträckning saknas i dagsläget.

En litteraturstudie genomfördes för att finna befintliga lösningar från andra håll och den metod som verkade mest lovande var den så kallade Grace-Davison Jet-Cupmetoden. Denna metod ska efterlikna förslitningen som sker i en cyklonseparator och dess fördelar är att det är möjligt att använda sig av små provmängder syrebärrare, 5-10 g, samt att metoden bara kräver halvtimmeslånga körningar för att erhålla användbara resultat. En anordning designades baserad på Jet-Cupmetoden med viss modifiering. Ritningar för de designade delarna togs fram och skickades till Mekpart AB i Mölndal för tillverkning. Övriga komponenter beställdes in från olika företag eller tillverkades på egen hand.

Efter leverans testkördes anordningen med en provmängd på 10 g ilmenit och ett luftflöde av 15 L/min. Förslitningen mättes sedan genom uppvägning av ansamlad damm i ett till anordningen anslutet filter och plottades mot tiden. Partikelförslitningen visade sig snabbt anta ett linjärt förlopp. Då försöket upprepades visade det sig att reproducerbarheten vara god. Dock kunde inte anläggningen köras för ett volymsflöde av 20 L/min då tryckfallet blev högre än beräknat och säkerhetsventilen monterad i befuktninganordningen löste ut.

Abstract

The purpose of this work is to design and construct a device able to measure the mechanical attrition of oxygen carrier particles. Those particles are used in chemical looping combustion and in the present situation there is a lack of knowledge in how the attrition process work and in which extension.

To find already tested solutions trying to answering this problem a literature study was carried out and the best solution found was the so called Grace-Davison Jet-Cup method. This method is supposed to emulate the attrition caused by a cyclone separator and its advantages are that it is possible to use small test amounts, 5-10 g, and a thirty minutes long test will be enough to acquire useable results. An device was designed based on the Jet-Cup method with some slight modifications. Blueprints for the designed parts were developed and sent to Mekpart AB in Mölndal for manufacturing. Remaining components were either ordered from different companies or manufactured by hand.

After delivery the device was tested with an amount of 10 g ilmenite and an airflow of 15 L/min. The attrition-rate was measured by plotting the weight of fines collected against time. The time-dependence of the particle attrition rate adopted a linear appearance after a short time. When the test was repeated the reproducibility was proven to be good. However the device was not able to be tested for a 20 L/min airflow because the pressure drop became higher than calculated and the relief valve mounted in the humidity device opened.

Stort tack till:

Vår handledare, Patrick Moldenhauer

För ditt stora engagemang, för feedbacken på allt vi presterat och inte minst för ditt alltid så goda humör!

Vi vill även passa på att tacka:

Carl Johan Linderholm

Pontus Markström

Magnus Rydén

David Pallarés

Ulf Stenman

Fredrik Lind

Jan Bragee

Erik Sette

Utan er hade inte detta projekt genomförts med den precision som vi idag stolt uppvisar!

Innehåll

1	Inledning	1
2	Syfte	2
3	Uppgift	2
4	Metod	3
4.1	Litteraturstudie	3
4.2	Design	3
4.3	Inköp	4
4.4	Konstruktion	4
4.5	Test av partiklar	4
5	Avgränsningar	4
6	Teori	5
6.1	Kemcyklisk förbränning	5
6.2	Partikelförslitning	5
6.3	Testmetoder	6
6.3.1	Grace-Davison Jet-Cup-förslitningstest	7
6.3.2	Fluidiserad bäddförslitningstest ASTM D5757-95	7
6.3.3	Krossmotståndstest	8
6.4	Befuktning av luft	8
6.5	Fluidisering	8
6.6	Partikelseparation	9
6.7	Cyklon	9
6.8	Gravitationsseparator	9
6.9	Siktning	9
7	Design	10
7.1	Befuktningens anordning	10
7.2	Kopp	12
7.3	Fluidiseringsrör	14
7.4	Gravitationsseparator	15
7.4.1	Undre cylinderkon	18
7.4.2	Övre cylinderkon	18
7.4.3	Topprör	18
7.5	Filter	19
7.6	Ställning	19
7.7	Övriga komponenter	19
7.8	Beräkningar	21
7.8.1	Tryckfall	21
8	Inköp	22
9	Experimentmetodik	23
9.1	Jet-Cuptest	23
9.2	Fluidiserad bäddtest	23

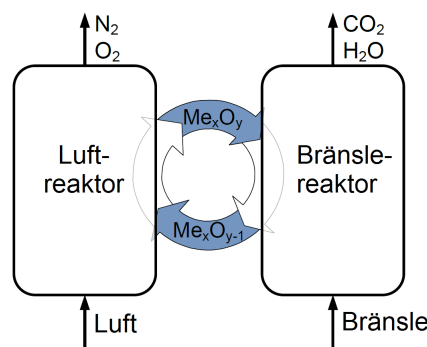
10 Resultat	24
10.1 Testanordning	24
10.2 Testkörningar	25
10.3 Experiment	26
11 Diskussion	32
12 Slutsats	34
Referenser	35
A Gantt-schema, kort leveranstid	37
B Gantt-schema, lång leveranstid	37
C Kravspecifikation	37
D Bestämning av driftparametrar	37
E Säkerhetslista	37
F Befuktning av luft	37
G Ritningar	37
H Beräkningar	37
I Prislista	37

1 Inledning

Den globala uppvärmningen är en av de största miljömässiga utmaningar mänskligheten står inför. För att minska uppvärmningstakten måste utsläpp av klimatpåverkande gaser minimeras. En stor del av de klimatpåverkande gaserna har sitt ursprung i form av punktutsläpp av koldioxid från industrier och kraftverk. Det är därför av största intresse att minska världens koldioxidutsläpp från fossila bränslen och övergå till förnyelsebara energikällor.

Genom att använda koldioxidinfångning (carbon capture and storage) kan kolkraftverkens miljöpåverkan minskas. Denna princip bygger på att koldioxiden avskiljs varefter den kan lagras exempelvis under jord (Erlström et al. 2011) eller på havsbotten (EU Interreg IVA 2012). Då släpps inte koldioxiden ut i atmosfären och kolkraftverket bidrar således ej till ökade nettoutsläpp av växthusgaser. Koldioxidavskiljningen kan genomföras vid olika steg i energiproduktionen, antingen före eller efter förbränningen. Nackdelarna med båda dessa metoder är att mycket av energin som produceras går åt till att avskilja koldioxiden från andra rökgaser (Johnsson 2010).

Det finns även ett alternativ där koldioxiden avskiljs kontinuerligt under drift, så kallad kemcyklisk förbränning (chemical-looping combustion). Med hjälp av kemcyklisk förbränning kan den energikrävande gasseparationen genom förbränning med ren syrgas undvikas. Detta möjliggörs genom användandet av syrebärrpartiklar som oxideras och reduceras i två parallellkopplade fluidiserade bäddar (se figur 1). I den ena bädden oxideras partiklarna med hjälp av luft. Dessa partiklar förs sedan över till den andra bädden där själva förbränningen av bränslet sker. Partiklarna reduceras genom att det inbundna syret reagerar med det kolbaserade bränslet. Detta sker vid höga temperaturer och bildar koldioxid och vatten. Partiklarna cirkuleras sedan tillbaka till den första bädden för att påbörja en ny cykel. Från förbränningsbädden kommer då enbart koldioxid och vatten (vid ideala förlopp) som relativt enkelt kan separeras genom kondensation av vattenångan. Den fluidiserade bädden i bränslereaktorn drivs genom att en viss fraktion av koldioxiden, som fås efter att vattnet har kondenserats bort, recirkuleras.



Figur 1: Principskiss av kemcyklisk förbränning (Moldenhauer et al. 2012)

Syrebärrpartiklarna som används i denna process utsätts för kraftigt slitage vid drift på grund av höga temperaturer, kemisk förslitning genom oxidation och reduktion samt mekanisk nötning. Förslitningen utgör både ett ekonomiskt och tekniskt problem. För att kunna implementera tekniken i storskalig industri måste livslängden för partiklarna öka. Forskning behöver genomföras för att utröna hur nötningprocessen går till och hur den skiljer sig åt mellan olika syrebärrare. I detta projekt skall en testanordning konstrueras där den mekaniska nötningen av syrebärrmaterial går att mäta.

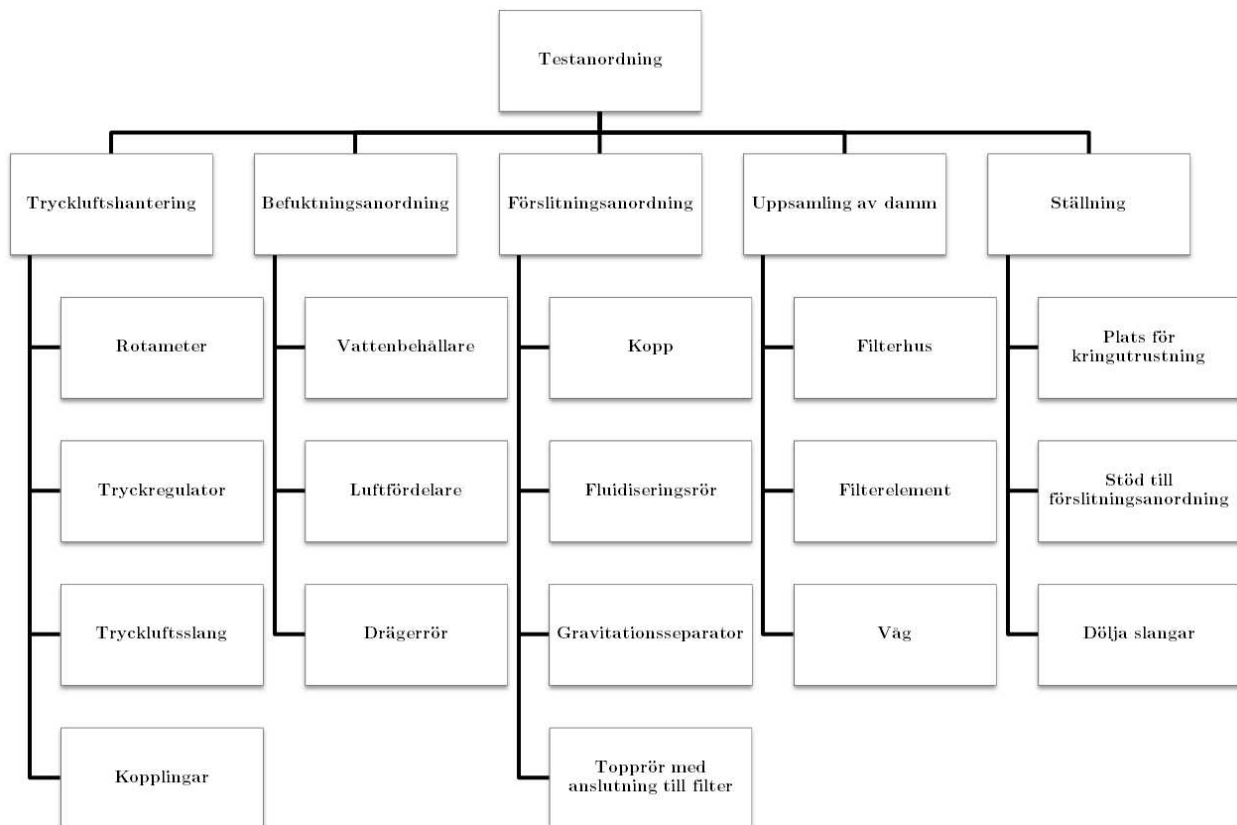
2 Syfte

Vid avslutat projekt har en testanordning för undersökning av förslitning för syrebärrpartiklar konstruerats. Denna ämnar utsätta syrebärrpartiklar för mekanisk nötning som går att korrelera med den förslitning som sker i en storskalig kemcyklisk förbränningsanläggning. Resultat och slutsatser utifrån pilotkörningar av testanordningen presenteras för att verifiera att designen är gångbar. Konstruktionen kommer sedan finnas tillgänglig för fortsatt forskning. Projektet kommer på så sätt bidra till en mer hållbar och effektiv användning av syrebärrpartiklar. Då har ett steg, om än litet, tagits i rätt riktning mot möjligheterna att öppna upp för ett framtida mer hållbart energisystem.

3 Uppgift

En anordning (för specifikation, se figur 2) skall efter litteraturstudie, designfas och tillverkningsfas slutligen konstrueras där mekanisk nötning av syrebärrpartiklar kan undersökas. Vidare kommer experiment utföras med hjälp av anordningen för att kunna besvara och ge klarhet i följande frågor:

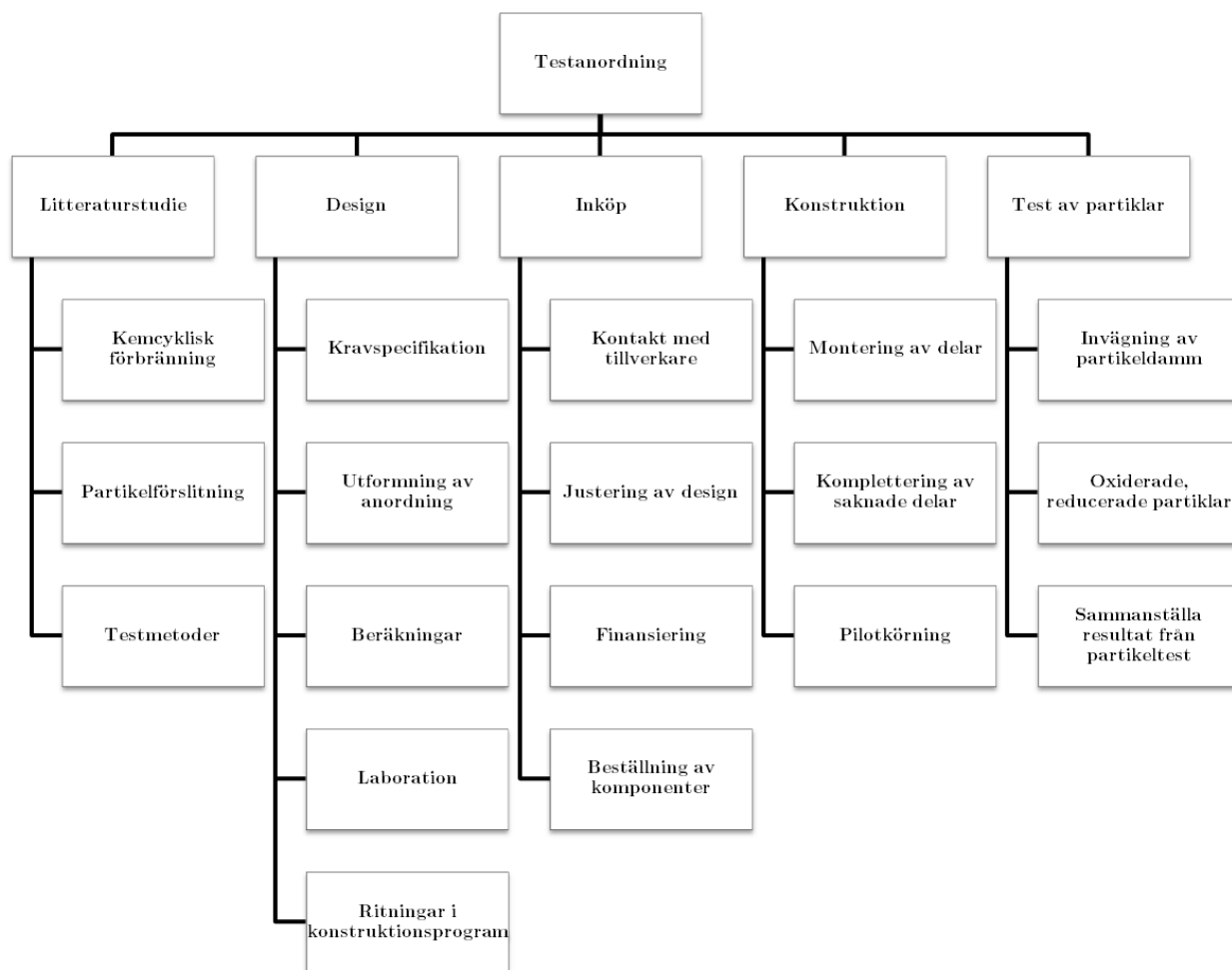
- Går det att anpassa en enkel matematisk funktion till förslitningsförloppet som sker i anordningen?
- Skiljer sig förslitningen mellan olika typer av syrebärrpartiklar?
- Hur utförs ett test av en viss syrebärrpartikel effektivt?



Figur 2: Leveransstrukturen för testanordningen. Den kan delas in i fem huvuddelar som i sin tur består av ett antal komponenter som alla behövs för att testanordningen ska fungera som en helhet.

4 Metod

Arbetet delades upp i fem olika steg; litteraturstudie, design, inköp, konstruktion och test av partiklar (se figur 3). I projektets uppstartsfas gjordes två Gantt-scheman som visar tidsplanen för projektet. Det ena representerar tidsplanen då snabb leverans av anordningen antas medan den andra tar hänsyn till en längre leveranstid, se bilaga A respektive B.



Figur 3: Projektets arbetsstruktur. Den kan delas upp i fem olika steg och varje steg kan i sin tur delas upp i delsteg.

4.1 Litteraturstudie

För att finna en metod för att testa förslitningen av syrebärande partiklarna genomfördes en grundlig litteraturstudie. Målet med denna var att genom förståelse av idag befintliga testmetoder utveckla en ny, bättre metod. Litteraturstudien genomfördes genom informationshämtning ur olika vetenskapliga databaser, e-böcker, böcker, doktorsavhandlingar samt kontakt med personer insatta inom området.

4.2 Design

Litteraturstudien gav riktlinjer för hur tester av partikelförslitning bör utformas för att ge meningsfulla resultat. Utifrån riktlinjerna upprättades en kravspekifikation (se bilaga C) där anordningens nödvändiga funktioner och egenskaper listades. Med hjälp av en morfologisk matris valdes de bästa lösningsförslagen för de önskade funktionerna. För att bestämma

en slutlig design studerades dessa lösningsförslag i detalj genom att utföra beräkningar och i något enstaka fall genom empirisk verifikation.

4.3 Inköp

När designen av testanordningen var fastställd påbörjades arbetet med att köpa in alla komponenter. Produktkataloger och tillverkares hemsidor användes för att finna komponenter som uppfyllde kraven. Ibland fanns inte komponenter med de önskade dimensionerna eller funktionerna och då gjordes kompromisser, men endast till den grad att slutprodukten inte påverkades i någon större utsträckning. Varje leverantör ringdes upp och offerter begärdes, om priset var rimligt beställdes komponenten direkt.

4.4 Konstruktion

Anordningen byggdes enligt utarbetade ritningar och samtliga instruktionsmanualer för komponenterna lästes igenom för att få förståelse kring hur de fungerar. För att tillverka själva anordningen anlätades Mekpart AB, ett företag i Göteborgsregionen med specialkompetens inom metallisk bearbetning som Chalmers tidigare har anlitat. Ställningen till anordningen tillverkades i maskintekniks prototypplabb på Chalmers.

4.5 Test av partiklar

Innan tester på partiklar kunde påbörjas utfördes en säkerhetskontroll av anordningen för att bland annat säkerställa att anordningen klarar trycksättning. Därefter bestämdes de nödvändiga driftparametrarna såsom luftflöde och vattenhöjd hos befuktningsanordningen. Ett dokument hade utarbetats som vägledning till tillvägagångssättet (se bilaga D).

Då driftparametrarna var fastställda kunde partikeltesterna påbörjas. Innan varje test gjordes en genomgång av en säkerhetslista (se bilaga E). De partiklar som undersöktes var färsk ilmenit, använd ilmenit, färsk kopparoxidzirkonium samt oxiderad kopparoxidzirkonium (hädanefter benämnt C2Z).

5 Avgränsningar

Testanordningen ämnar inte undersöka den kemiska förslitning syrebärrpartiklarna utsätts för vid de oxidations- och reduktionsprocesser som förekommer vid drift av en kemcyklisk förbränningsanläggning. Kemcyklisk förbränning och koldioxidavskiljning kommer att nämnas som motivering till projektet, men tekniken kommer inte utredas som sådan. De faktorer som inte direkt misstänks påverka den mekaniska förslitning partiklarna utsätts för kommer ej undersökas. Arbetet begränsas till att färdigställa konstruktionen och göra pilotkörningar samt ett antal testkörningar av olika syrebärrmaterial för att verifiera designen samt åtgärda eventuella brister som upptäcks. Detta för att öppna dörren för fortsatt forskningsarbete.

6 Teori

6.1 Kemcyklisk förbränning

Kemcyklisk förbränning är en teknik inom området CCS (Carbon Capture and Storage). Tekniken använder sig av en fast syrebärare som cirkuleras mellan två parallella bäddar, se figur 1 (Adanez et al. 2012). I den första bädden oxideras syrebäraren av inkommande luft. Den transporteras sedan till den andra bädden via gastäta lås. I denna bädd sker förbränningen och syrebäraren reduceras av bränslet. På så sätt blandas aldrig luften med bränslet och förbränningsgaserna kommer såvida aldrig i kontakt med kvävet. Koldioxiden och vattnet är sedan lätta att separera genom kondensation av vattnet, och koldioxiden kan transporteras till annan förvaring (Adanez et al. 2012).

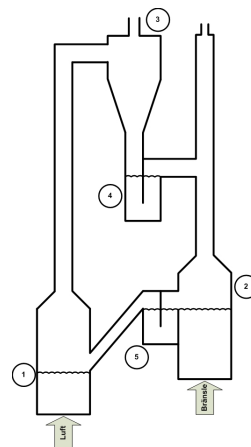
Del 1 i figur 4 är oxidationsbädden. Där oxideras syrebäraren i en fluidiserad bädd. Bädden är cirkulerande vilket innebär att bäddexpansionen är stor och det är på grund av detta som fluidiseringsröret är så pass långt. Del 2 är förbränningskammaren. Där reduceras syrebäraren med hjälp av bränslet. I denna anläggning är även förbränningskammaren en cirkulerande bädd. Detta kan dock skilja sig mellan olika anläggningar. Del 3 är cyklonen, där avskiljs syrebärarpartikelarna från luften genom att utnyttja lufthastighetens beroende av rördiametern. Då lufthastigheten minskar faller partiklarna nedåt medan luften åker uppåt. Del 4 och 5 är gaslås. De är små fluidiserade bäddar som gör att partiklarna kommer bete sig som en fluid. Detta gör att låset kommer att fungera likt ett vanligt vattenlås och gör det alltså möjligt för partiklarna att cirkulera utan att luft kommer in i förbränningskammaren.

6.2 Partikelförslitning

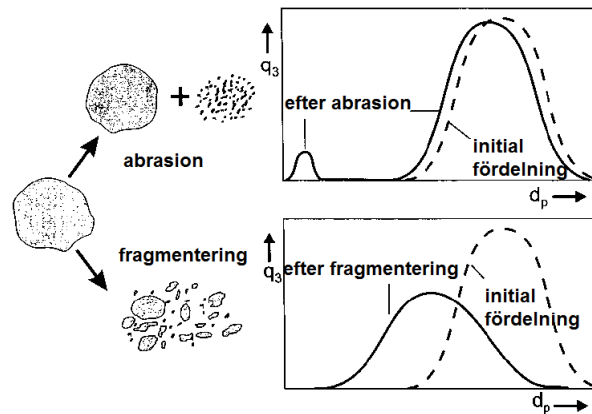
Vid drift av en kemcyklisk förbränningsanläggning utsätts syrebärarmaterialet för mekanisk påfrestning och kemiska förlopp. Dessa mekanismer har en negativ inverkan på materialet och efter varaktig exponering kommer partiklarna nötas ner till damm (se figur 5). Damm bildas huvudsakligen på två sätt; den övre figuren illustrerar hur en färsk partikel får sina ojämnheter nedslitna (fenomenet kallas på engelska *abrasion*) i form av damm, medan själva moderpartikeln i stort sett bibehåller sin ursprungliga storlek. Den nedre figuren illustrerar fragmentering, där partiklar slits ned till mindre partiklar, så att storleksfördelningen förskjuts och antalet partiklar i systemet ökar (Blinichev et al. 1968), (Pell 1990). Damm definieras ofta som partiklar med en diameter mindre än $30\ \mu\text{m}$. I många fall ända ner till $20\ \mu\text{m}$. Partikeldamm utgör ett stort problem då detta tenderar att sätta sig i ojämnheter hos anordningen (springor, skarvar, sprickor etcetera), följer med avgaser ut ur systemet och är svåra att fluidisera då partikelhastigheten kan approximeras som gashastigheten för små partiklar (Das besökt 2012-04-18)

Regleringen av gasflödet hos en fluidiserad bädd baseras bland annat på storleksfördelningen hos de partiklar som skall fluidiseras. Därför är det viktigt att antingen hålla partikelpopulationen tidsinvariant, eller veta exakt hur storleksfördelningen beror av tiden för att kunna reglera processen därefter (Ray et al. 1987). Dock kvarstår problemet att små partiklar både tenderar att fastna i springor och följa med avgaserna ut.

Tre huvudkällor till partikelförslitning kan antas förekomma, dessa är cyklonförslitning,



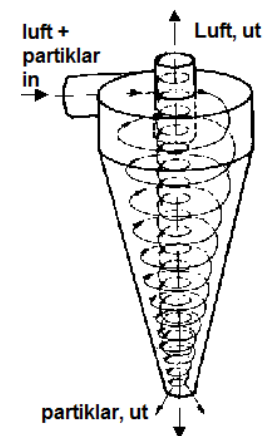
Figur 4: Principskiss över en kemcyklisk förbränningsanläggning



Figur 5: Förslitningsmekanismer och deras påverkan på fördelningen av partikelstorleken, q_3 ger oss tätheten av partiklar med diametern d_p (Yang 2003)

fluidiseringsförslitning (jet-stream attrition) och partikelkollisionsförslitning (abrasive wear). Experiment har visat att partiklar i en fluidiserad bädd slits ned proportionellt mot en invers exponentiell funktion för långa körningar (Ray et al. 1987). Vilket innebär att partiklarna slits ned snabbt till en början, men klingar av i takt med tiden.

Cyklonförslitning I cyklonen slungas partiklarna längs konstruktionens väggar. De kommer in genom ett tangentiellt rör i separatorns topp och skruvar sig ner mot botten. Luf- ten lämnar cyklonen genom ett hål i toppen. Ojämnheter hos partiklarna slits här bort när de skruvas nedåt och antar ett mer sfäriskt utseende. Det bortslipade materialet får formen av ett väldigt fint damm. Detta sker ofta vid uppstarten av en fluidbädd med färsk material och särskilt för spraytorkade syrebärande material (Werther & Reppenhagen 2001).



Figur 6: En cyklonseparator.

Fluidiseringsförslitning Vid fluidisering utsätts partiklarna för höga gasflöden. Kanter slipas bort och fluidiseringen leder även till att det förekommer kollisioner som gör att partiklar klyvs till flera mindre partiklar (Werther & Reppenhagen 2001).

Partikelkollisionsförslitning När partiklar kolliderar sker ett stort utbyte av rörelsemängd vilket resulterar i att de slits ned, här lossnar ofta större fragment från partiklarna (Yang 2003).

6.3 Testmetoder

Tre testmetoder har studerats i detalj och presenteras nedan. Alla tre har sina fördelar respektive nackdelar.

6.3.1 Grace-Davison Jet-Cup-förslitningstest

Grace-Davison Jet-cup attrition test är en metod för att testa förslitning av partiklar (Weeks & Dumbill 1990). Metoden har visat sig bäst simulera förslitningen som uppstår i

cykloner (Cocco et al. 2010). Huvudkomponenten i detta test är en kopp som sitter i botten av en gravitationsseparator. Denna kopp kan vara cylindrisk, vinklad eller konisk och ha ett eller två tangentiella inflöden av luft i botten. Detta inflöde är mycket litet vilket gör att höga lufthastigheter uppnås. Provet, 5-10 g, placeras i koppen och när luftflödet ökas skapas en virvel som drar med partiklarna upp i anordningen (Cocco et al. 2010). Denna virvel liknar mycket den som bildas i en traditionell cyklon (dock i omvänd riktning). Då tvärsnittsarean ökar, minskar lufthastigheten, och de större partiklarna faller tillbaka samtidigt som de mindre dras med upp och fastnar i ett filter. Den experimentella metoden bygger på att anordningen körs i en timme, med ett flöde mellan 10-20 L/min (Zhao et al. 1999). Då filtret vägs både innan och efter erhålls hur stor mängd förslitningsprodukt som bildats och alltså ett mått på hur mycket materialet slitits. Det är önskvärt att snabbt uppnå ett linjärt förslitningsförlopp för att kunna approximera förslitningen med en rät linje och på så sätt kunna förkorta försökstiden.

Det är här av intresse att räkna ut *Davison Index*, DI, se ekvation (1) (Yang 2003).

$$DI = \left[\frac{100 \frac{c}{m_s} + H_f - G}{100 - G} \right] \cdot 100 \quad (1)$$

Davison Index säger hur stor andel av partikelpopulationens massa som utgörs av partiklar med en diameter under 20 μm . Detta görs genom att de partiklar som samlats upp i filtret analyseras.

DI kräver att det går att avgöra vilka partiklar i populationen som utgörs av sådana med en diameter under 20 μm . Att undersöka detta har visat sig vara både tidskrävande och svårt då de metoder som finns ger opålitliga resultat och utrustningen som används är både dyr och avancerad. Detta har lett till ett nytt, mer användarvänligt index har tagits fram, WD(Weeks-Dumbill)-indexet:

$$\text{kumulativ vikt\% damm} = WD \cdot \text{tid}(h) + \text{konst} \quad (2)$$

WD har visat sig korrelera mycket bra med DI och går att bestämma med linjär regression. Olika stora partiklar visar sig följa samma beteende och får samma inbördes ranking som för DI. Då behöver det här alltså inte undersökas hur stor damm-andel som utgörs av partiklar under 20 μm utan bara hur mycket damm totalt sett som ansamlats i filtret över tid.

6.3.2 Fluidiserad bäddförlitningstest ASTM D5757-95

ASTM D5757-95 är en certifierad standard för test av förslitning av partiklar (Conshohocken 2011). Den består av ett rör med en perforerad platta i botten och ovanför detta sitter en gravitationsseparator. På toppen sitter ett smalare rör som leds vidare till ett filter. En provmängd på 50 g läggs i bottenröret och när luftflödet ökas till 10 L/min uppstår det en fluidiserad bädd (Conshohocken 2011). En del partiklar dras med upp i gravitationsseparatorn där de större partiklarna faller tillbaka och de mindre dras med ytterligare och fastnar i filtret. Separatorns koniska form gör att tvärsnittsytan ökar och lufthastigheten minskar därmed så pass mycket att de större partiklarna inte dras med upp. Syftet med denna metod är att ta reda på hur partiklar slitits i en fluidiserad bädd.

Då det är en certifierad metod är det hårda krav på vilka och hur stora komponenter som skall användas och det finns ett färdigt paket att köpa som uppfyller dessa (Conshohocken 2011). Testet körs först i 1 timme, därefter vägs filtret och testet körs i ytterligare 4 timmar.

6.3.3 Krossmotståndstest

Krossmotståndstest (Crush resistance test) är en metod som säger hur stor kraft som krävs för att skapa en fraktur hos en partikel. Med hjälp av denna metod kan en relativ styrka mellan olika material urskiljas (Gupta 2009), (Johansson 2007). Metoden är simpel och ett test tar bara någon minut att genomföra, varför den oftast används för att få en ungefärlig bild av hur tåligt ett visst material är.

6.4 Befuktning av luft

Torr luft, det vill säga luft med lågt eller inget vatteninnehåll, underlättar bildandet av statisk elektricitet. Statisk elektricitet bildas när material gnids mot varandra, då förflyttas elektroner från den ena ytan till den andra och laddningar bildas (Kurtus besökt 2012-04-15). Den statiska elektriciteten medför att mindre partiklar tenderar att sätta sig på systemets väggar. Partiklar riskerar också att agglomerera. Om luft med högre relativ luftfuktighet används istället kommer vattenmolekyler sätta sig på ytorna och motverka bildandet av statisk elektricitet.

Ett sätt att befukta luften är att bubbla den genom en vattenpelare av en viss höjd. Det är möjligt att beräkna höjden på vattenpelaren om ett antal förenklingar görs. Luftbubblorna antas vara helt sfäriska, transporten av vatten antas enbart ske genom diffusion och koncentrationsgradienten i luftbubblan antas vara känd. Med dessa förutsättningar kan tiden som luftbubblan måste befinna sig i vattnet beräknas med hjälp av ett koncentration-tid-diagram (Welty et al. 2008). För att genomföra diagramlösningen beräknas tre parametrar: utförd koncentrationsändring, relativ position och relativ motstånd. Med hjälp av dessa tre parametrar avläses den relativa tiden (x_D). Tiden som krävs kan då beräknas med följande ekvation:

$$t = \frac{x_D r^2}{D_{AB}} \quad (3)$$

För att kunna räkna ut höjden på vattenpelaren måste även hastigheten med vilken bubblan stiger i vattnet vara känd. Efter att bubblan släppts ut i vattnet kommer den snabbt att nå sin konstanta terminalhastighet. Denna kan erhållas genom en kraftbalans över bubblan:

$$F_{\text{Gravitation}} + F_{\text{Dragkraft}} = F_{\text{Lyftkraft}} \quad (4)$$

Uttryck för krafterna tas fram och sätts in i ekvation (4), hastigheten löses ut och följande uttryck erhålles:

$$v = \sqrt{\frac{4dg(\rho_v - \rho_l)}{3C_D\rho_v}} \quad (5)$$

När hastighet och tid är känt erhålls vattenpelarens höjd enkelt då sträckan är produkten av tid och hastighet. För utförligare beräkningsgång se bilaga F.

6.5 Fluidisering

Små fasta partiklar kan under rätt förhållanden fås att uppträda likt en vätska. För att åstadkomma detta placeras partiklarna på en porös eller perforerad platta i ett fluidiseringsrör. Någon form av gas (luft, inert, förbränningsgas) blåses sedan upp genom plattan och partikelbädden. Då tillräckligt hög genomströmningshastighet för gasen uppnås (den minimala fluidiseringshastigheten) kommer bädden börja expandera. Expansionen innebär ett ökat avståndet mellan partiklarna vilka nu kan röra sig i förhållande till varandra. Tack vare denna ökade rörlighet hos partiklarna kan den fluidiserade bäddens egenskaper liknas

vid en vätskas. Detta medför då att ett föremål med högre densitet än den nu fluidiserade bädden sjunker och ett föremål med lägre densitet flyter (Institutionen för kemi- och bioteknik 2011).

6.6 Partikelseparation

För att storskaligt separera partiklar från en gasström används industriellt ofta en cyklon.

6.7 Cyklon

Ett annat sätt att separera partiklar av olika storlek är att använda en gravitationsseparator (se figur 16). En gravitationsseparator kan beskrivas bestå av två konor ovanpå varandra (diffusor och dysa) på ett sådant vis att dess tvärsnittsarea först ökar med höjden för att sedan minska igen. Utvidgningen innebär en större tvärsnittsarea och därmed en lägre hastighet hos det konstanta volymsflödet av luft. En lägre omgivande lufthastighet kring partiklarna resulterar i en mindre verkande dragkraft och tunga partiklar faller därför tillbaka ner i gravitationsseparatorn igen. Lättare partiklar fortsätter istället med luftflödet vidare uppåt i separatorn. De partiklar som når den punkt då gravitationsseparatorn börjat smalna av igen kommer åter befinna sig i en snabbare luftström och följa med hela vägen genom gravitationsseparatorn.

6.8 Gravitationsseparator

Dock fungerar inte cyklonseparationen lika effektivt på dammpartiklar som lyder Stokes lag (väldigt liten diameter, låga Reynolds-tal). Det krävs då att filtreringsteknik tas till, där porstorleken på filtret bestämmer hur stora partiklar som skall fastna. I många fall bestäms filtrergraden av hur stort tryckfall som är gångbart över filtret och hur stora tryck apparaturen är dimensionerade för att klara.

6.9 Siktning

Det går även att sikta för att separera partiklar med avseende på storlek. Vid siktning används fina nät för att separera mindre partiklar från större. Genom att sikta flera gånger med olika stora hål i siktningnäten kan flera storleksintervall erhållas. Detta kan exempelvis användas om en storleksfördelning för ett partikelprov skall göras.

7 Design

En kravspecifikation (se bilaga C) upprättades. Denna användes som stöd för projektet till den valda designen. Med stöd av genomförd litteraturstudie togs möjliga alternativ till en försöksrigg upp och dessa sammanfattas i en morfologisk matris (se tabell 1).

Tabell 1: I den vänstra kolumnen listas de funktioner som måste uppfyllas. Kolumn A, B och C representerar olika alternativ för att uppfylla dessa.

Dellösningar	A	B	C
1 - Separation av partiklar	Cyklon	Gravitationsseparator	-
2 - Uppsamling av damm	Luftfilter	Vattenbad	-
3 - Drivkraft	Fläkt	Kompressor	Tryckluft
4 - Fluidisering	Ja	Nej	-
5 - Befuktning	Vattenbad	Spraya	Vätskefilm
6 - Tömning/Rengöring	Isärskruvbara komponenter	Luft/vatten-genomströmning	Automatisk
7 - Påfyllning/Uppstart	Lucka	Kopp undertill	-

Ur den morfologiska matrisen genererades flera lösningar som tordes vara praktiskt realiserbara. Det stod klart att två lösningar passade projektet bättre än de andra baserat på sin simplicitet samt deras förmåga att uppfylla kravspecifikationen.

1. 1B-2A-3C-4A-5A-6A-7B
2. 1B-2A-3C-4B-5B-6A-7A

Utifrån dessa alternativ beslutades att en Jet-Cup skall konstrueras med utgångspunkt ur befintliga ritningar (Cocco et al. 2010) med viss modifiering. Resultatet var en kombination av lösning 1 och 2 ovan vilket möjliggjorde att nedre delen av Jet-Cupen kunde skruvas av och bli ersatt av ett fluidiseringsrör. Med Jet-Cupen kan både "jet-stream attrition" (Werther & Reppenhagen 2001) samt cyklonförslitning undersökas. Vid körning med fluidiseringsröret kan enbart "jet-stream attrition" undersökas. Den valda lösningen blev därför, med utgångspunkt ur den morfologiska matrisen:

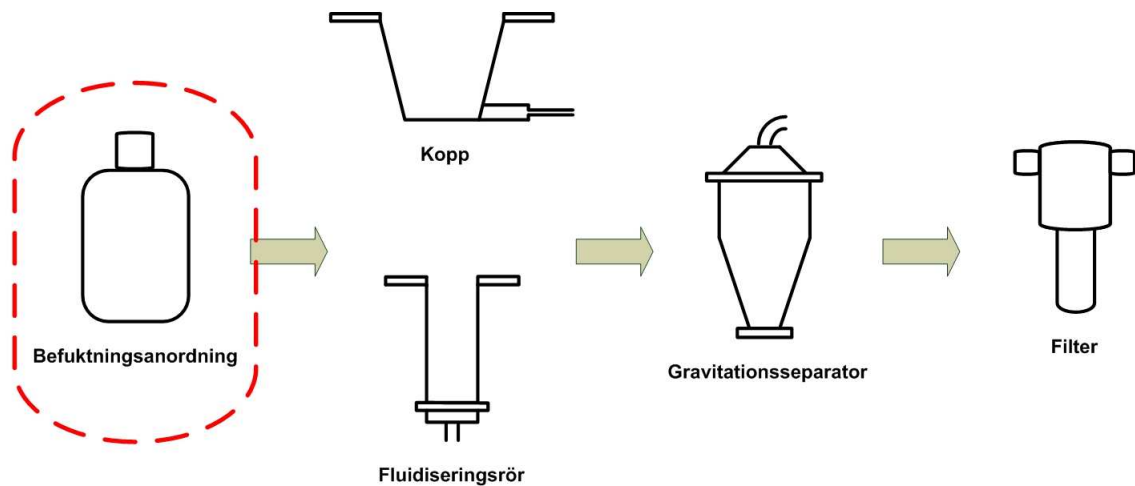
- 1B-2A-3C-4A/B-5A-6A-7B

Det framgår här ur matrisen att anordningen skall gå att köras både med och utan fluidiseringsrör. När inte fluidiseringsröret används ersätts detta med en kopp undertill. Denna design ställde vissa krav på de ingående komponenterna. Designval av samtliga komponenter motiveras och beskrivs nedan. Varje stycke inleds med en topologisk figur över var i processen den beskrivna komponenten placeras.

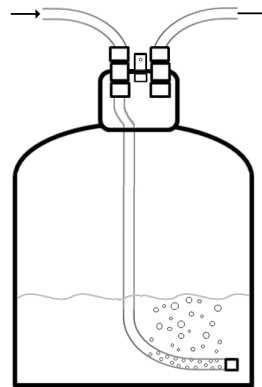
7.1 Befuktningensanordning

Enligt Grace-Davison Jet-cupmetoden måste luften ha en relativ luftfuktighet på 60 % när den kommer in i testanordningen. Genom att dels utföra beräkningar på hur hög vattenpelare som krävs för att befukta luften och dels genomföra experiment med en befintlig befuktningensanordning kunde följande design utformas, se figur 8.

Tryckluft kommer in från vänster genom slangen som kopplats ihop med vattenbehållaren. Luften fortsätter ner i vattenbehållaren genom slangen vars ände, som ligger på



Figur 7: Testanordningens huvudsakliga komponenter där avsnittets aktuella komponent är inringad.

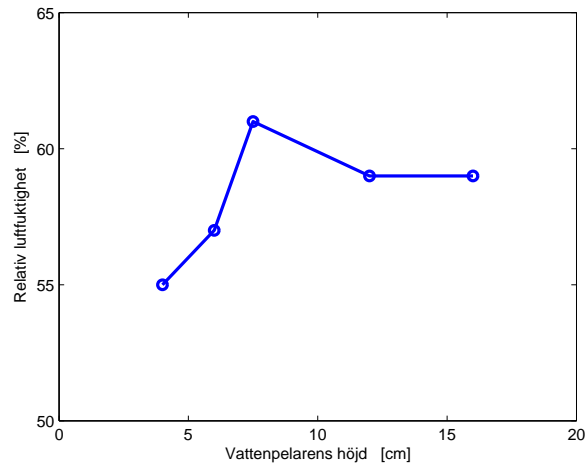


Figur 8: Principskiss av befuktningssystemet.

botten, är perforerad med små hål där luften kan bubbla ut. Luften stiger genom vattnet och absorberar fukt, därefter flödar luften ut ur vattenbehållaren genom en koppling och vidare till resterande delar av testanordningen. Mellan de två kopplingarna monterades en övertrycksventil.

Empirisk verifikation På Institutionen för Energi och Miljö finns en befintlig befuktningssystem som använts i andra forskningsprojekt, denna lånades och en laboration utfördes för att se hur luftfuktigheten varierar med vattenpelarens höjd. Befuktningssystemet kopplades in till tryckluftssystemet och ett luftflöde på 15 L/min bubblades genom vattenpelaren. Detta utfördes för följande höjder på vattenpelaren: 4, 6, 7, 5, 12 respektive 16 cm. För varje höjd mättes den relativa luftfuktigheten, resultatet visas i figur 9. För utförligare beskrivning av laborationen se bilaga F.

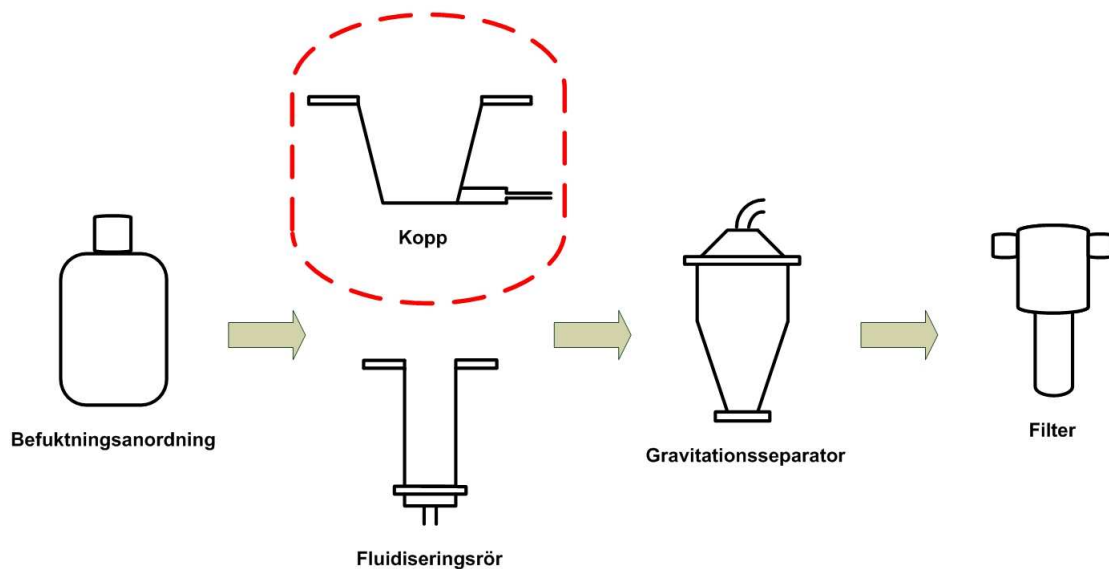
I figur 9 finns ett samband mellan en högre relativ luftfuktighet och ökad höjd, fram till att luftfuktigheten når ungefär 60 %. Det kan finnas två anledningar till avvikelsen som sker därefter. Antingen finns ett tröskelvärde vid 60 % relativ luftfuktighet som gör att ytterligare ökning av fukthalten är svår eller att hygrometern visade ett felaktigt värde. Oavsett anledningen till avvikelsen kunde befuktningssystemet producera luft med en relativ luftfuktighet av 60 % och därför beslutades det att en liknande anordning skulle köpas in. En modifikation gjordes dock eftersom det vid höga luftflöden med en hög vattenpelare kunde ske medryckning av vattenstänk till utluften. För att undvika detta bestämdes det att vattenbehållaren skulle ha en volym på 20 L istället för laborationens vattenbehållare



Figur 9: Grafen beskriver hur vattenpelarens höjd påverkade den relativa luftfuktigheten.

med volymen 10 L.

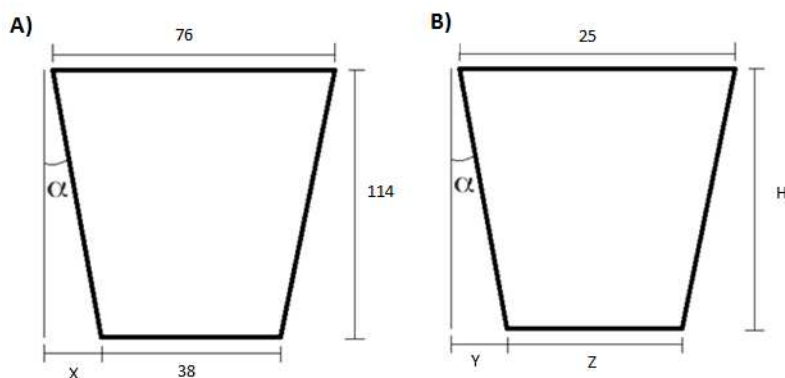
7.2 Kopp



Figur 10: Testanordningens huvudsakliga komponenter där avsnittets aktuella komponent är inringad.

Hela anordningen bygger i stora drag på Jet-Cupmetoden, med undantag för koppen som är modifierad för att passa ställda krav.

Dimensionering av kopp Figur 11A visar måtten som rekommenderas av Cocco et al. (2010). För att koppen skulle passa ihop med gravitationsseparatorn var toppdiametern tvungen att vara densamma som bottendiametern på diffusorn. Därför skalades en befintlig koppdesign ner till dimensionerna som redovisas i beräkningarna nedan.



Figur 11: A) Originalkoppens mått (Cocco et al. 2010). B) Den designade koppens mått.

Beräkningar Eftersom kopian ska behålla samma höjd-bredd-förhållande efter nedskalningen kommer vinkeln α vara oförändrad. För att beräkna α måste X vara känd.

$$X = \frac{(76 - 38)}{2} = 19 \text{ mm} \quad (6)$$

Detta ger följande α :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{19}{114}\right) = 9,4623^\circ \quad (7)$$

Eftersom höjd-bredd-förhållandet ska vara samma efter nedskalningen kan H beräknas ur följande samband:

$$\frac{\text{diameter}}{\text{höjd}} = \frac{76}{114} = \frac{25}{H} \quad (8)$$

Vilket ger $H = 37,5$ mm. Med α kan Y och Z erhållas:

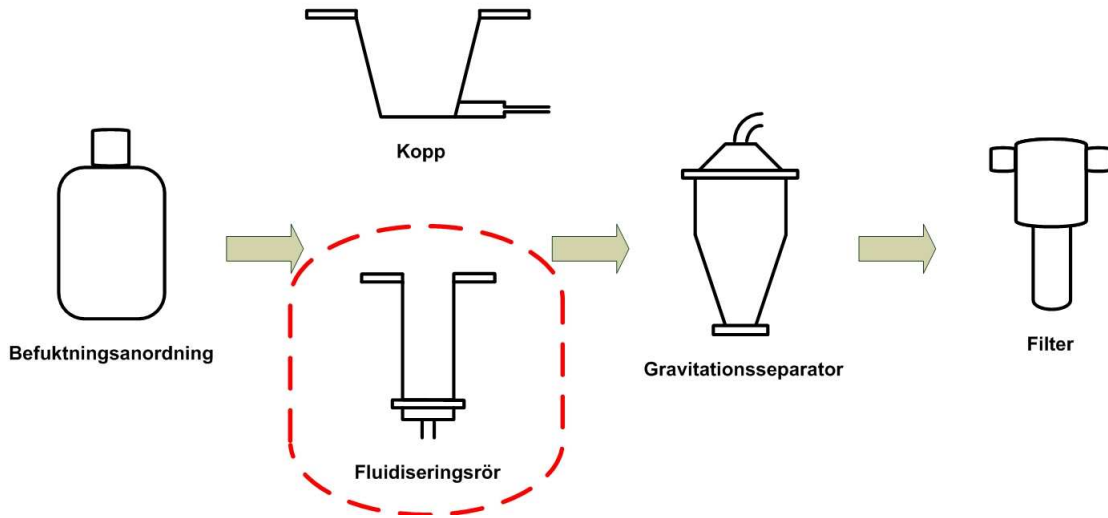
$$Y = H \cdot \tan(\alpha) = 6,25 \text{ mm} \quad (9)$$

$$Z = 25 - 2 \cdot Y = 12,5 \text{ mm} \quad (10)$$

Alla nödvändiga mått i figur 11B var nu kända.

Detta är den viktigaste delen och därför ställs även högst krav på måtten för denna komponent. Både kopian och flänsen svarvades, sedan sammanfogades dessa genom svetsning. Ett hål borrades där ett kapillär rör placerades, hålet placerades tangentiellt med konens mantelyta och botten.

7.3 Fluidiseringsrör



Figur 12: Testanordningens huvudsakliga komponenter där avsnittets aktuella komponent är inringad.

Ett alternativ till att köra testanordningen med partiklarna placerade i en kopp är att placera dem i ett fluidiseringsrör. Partiklarna får då vila på en perforerad platta vilken är täckt med ett fint nät. Viktigt vid designen av detta rör är att det är tillräckligt högt för att bädden skall kunna fluidiseras samt att antalet hål och storleken på dessa i plattan är rätt. Ritningar har tagits fram för fluidröret (se bilaga G)

Beräkningar Enligt Kunii & Levenspiel (1991) kan en fluidiseringshastighet och en medryckningshastighet (terminalhastighet) för en fluidiserad bädd beräknas. Dessa är önskvärda att genomföra för att kontrollera att hela bädden är fluidiserad vid det givna flödet samt för att kontrollera att tillräckligt stora partiklar rycks med upp ur bädden. För att beräkna den minimala fluidiseringshastigheten, u_{mf} , för en given partikeldiameter används följande ekvation:

$$u_{mf} = \frac{d_{Partikel}^2 \cdot (\rho_{Partikel} - \rho_{Luft}) \cdot g \cdot \varepsilon_{mf}^3 \cdot \Phi^2}{150 \cdot \mu_{Luft} \cdot (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (11)$$

Genom att bryta ut partikeldiametern, $d_{Partikel}$, ur ekvation (11) kan det för ett givet flöde beräknas vilken partikelstorlek som kommer fluidiseras. Om denna beräknade partikelstorlek är större än de största partiklarna i provet kommer hela bädden att fluidiseras. Små partiklar kommer inte bara dras med av luftflödet utan till och med dras upp ur bädden. För att beräkna vilken terminalhastighet, u_t , som krävs för att rycka med en partikel av en viss storlek, $d_{Partikel}$, används följande ekvation (Kunii & Levenspiel 1991):

$$u_t = \left(\frac{18 \cdot \left(\frac{g \cdot d_{Partikel}^3 \cdot \rho_{Luft} \cdot \Delta\rho}{\mu_{Luft}^2} \right)^{\frac{1}{6}} + 2,335 - 1,744 \cdot \Phi}{\left(\frac{g \cdot d_{Partikel}^3 \cdot \rho_{Luft} \cdot \Delta\rho}{\mu_{Luft}^2} \right)^{\frac{1}{9}}} \right)^{-1} \left(\frac{\rho_{Luft}}{\mu_{Luft} \cdot \Delta\rho \cdot g} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (12)$$

För härledning av ekvation (12) se bilaga H. Ett volymsflödeflöde av 20 L/min visade sig vara tillräckligt stort för att uppnå önskad fluidisering och medryckning (se bilaga H).

För att en god fluidisering skall erhållas är det önskvärt att ha ett högt tryckfall över den perforerade plattan i förhållande till tryckfallet över bädden. Detta för att undvika *sluggning*. Med det önskvärda tryckfallet känt kan antalet nödvändiga hål i plattan beräknas (Kunii & Levenspiel 1991). Detta beräknas:

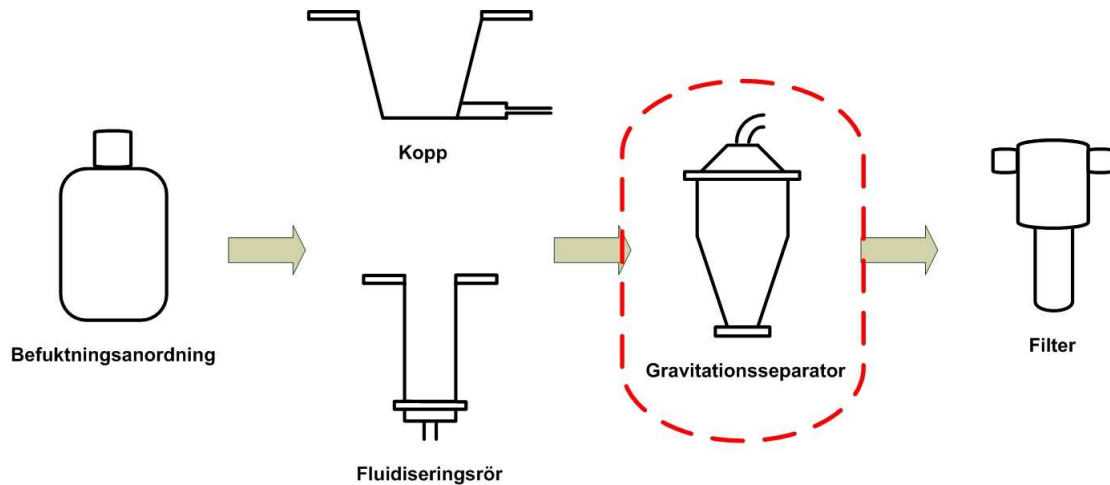
$$N_{\text{Hål}} = \frac{4 \cdot v_{\text{Luft}}}{\pi \cdot d_{\text{Hål}}^2 \cdot (C_d(Re) \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P_d}{\rho_{\text{Luft}}}\right)^{\frac{1}{2}})} \quad (13)$$

För att bestämma en lämplig höjd på själva fluidiseringsröret måste bäddens höjd när den är fluidiserad tas fram. Vanligtvis expanderar bädden med 15-20 % då den fluidiseras (Kunii & Levenspiel 1991). Den fluidiserade bäddhöjden uppskattas enligt:

$$h_{\text{mf}} = 1,2 \cdot h_{\text{Stilla bädd}} \quad (14)$$

Teoretiskt borde det inte vara nödvändigt att ha ett längre fluidiseringsrör än den fluidiserade bäddhöjden. Röret görs dock ändå längre eftersom detta inte har någon påverkan på resultatet. De partiklar som rycks med ur bädden kommer ryckas med hela vägen. Med de små provmängder som skall köras i anordningen visade det sig att ett fluidiseringsrör med en höjd av 10 cm och en bottenplatta med 16 hål av 1 mm i diameter räckte. För mått och beräkningar se bilaga G respektive H.

7.4 Gravitationsseparator



Figur 13: Testanordningens huvudsakliga komponenter där avsnittets aktuella komponent är inringad.

För att separera partiklarna med avseende på storlek används en gravitationsseparator. Partiklarna dras med av luftflödet upp ur koppen/fluidiseringsröret och upp i gravitationsseparatorn. Större partiklar faller tillbaka ner och de mindre dammpartiklarna, dras med av luftflödet ut och vidare till filtret. Gravitationsseparatorn ingår som en komponent vid Grace-Davison Jet-Cupmetoden t och samtliga mått är hämtade från tidigare konstruktioner och försök (Zhao et al. 1999).

Beräkningar Det är önskvärt att kunna räkna på hur stora partiklar som kommer att lämna testanordningen eftersom det är dessa som kommer vägas in som förslitningsprodukt. Genom enklare beräkningar kan en kraftbalans sättas upp för en partikel som svävar i luft. Kraftbalansen utgörs av partikelns tyngdkraft, en verkande lyftkraft och en dragkraft från

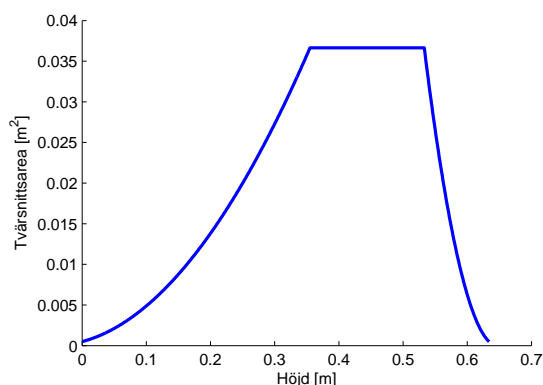
det omgivande luftflödet. Då partikeln inte kommer att befinna sig i jämvikt kommer den att accelerera upp eller ner i anordningen. Den totala kraftbalansen blir således:

$$m_{\text{Partikel}} \cdot a_{\text{Partikel}} = F_{\text{Gravitation}} - F_{\text{Lyftkraft}} - F_{\text{Dragkraft}} \quad (15)$$

För små partiklar kan dragkraften, $F_{\text{Dragkraft}}$, beräknas genom att använda Stokes lag (Das besökt 2012-04-18):

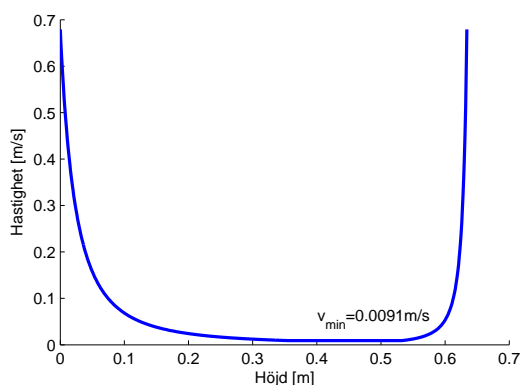
$$F_{\text{Dragkraft}} = 6 \cdot \pi \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot r_{\text{Partikel}} \cdot v_{\text{Relativ}} \quad (16)$$

Eftersom gravitationsseparatorn är konisk kommer luftflödets hastighet avta i den nedre delen för att sedan öka igen i den övre delen. Då volymsflödet kommer att vara konstant genom hela anordningen kan en funktion för att beskriva hur lufthastigheten beror av höjden tas fram. För att göra detta krävs det dock att det först finns en funktion som beskriver hur tvärsnittsarean beror av höjden, vilken visualiseras i figur 14. Se bilaga H för hur denna funktion tas fram.



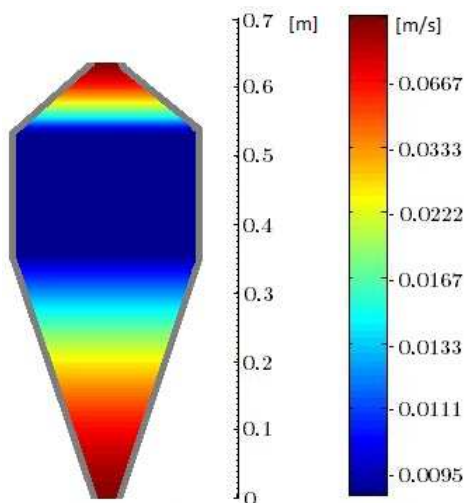
Figur 14: Tvärsnittsareans höjdberoende. Vid en låg höjd är tvärsnittsarean liten, för att sedan öka i mitten och återigen avta vid toppen av gravitationsseparatorn.

Då luftflödet och nu hur tvärsnittsarean varierar med höjden är känt kan luftflödeshastighetens höjdberoende tas fram. Hur hastigheten ändras med höjden i gravitationsseparatorn kan ses i figur 15 och 16.



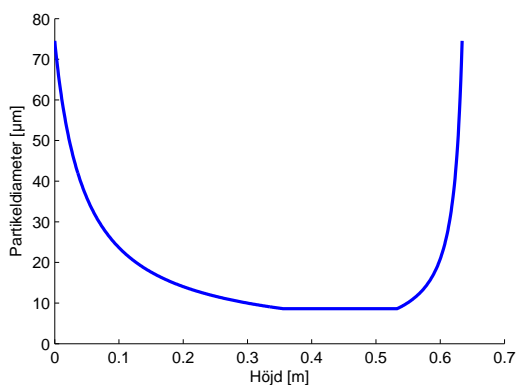
Figur 15: Luftthastighetens höjdberoende för ett luftflöde av 20 L/min. Vid botten och toppen av gravitationsseparatorn kommer lufthastigheten att vara som störst.

För att kunna beräkna dragkraften i ekvation (16) är det dock inte lufthastigheten som är nödvändig utan den relativa hastigheten mellan luftflödet och partikelns hastighet. Enligt figur 15 ändras lufthastigheten med höjden och således den relativa hastigheten. Detta



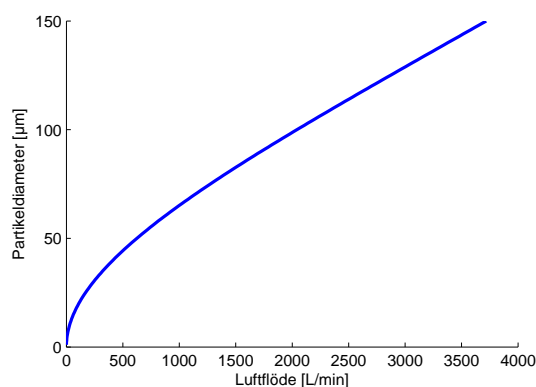
Figur 16: Gravitationsseparatorns utseende med hastighetsprofil för ett volymsflöde av 20 L/min, där den avtagande hastigheten representeras av en färgskala från rött till blått.

resulterar i en förändrad dragkraft på partikeln och därmed kommer partikelns acceleration variera med höjden. En partikel i gravitationsseparatorn kommer att transporteras upp och ned på grund av den varierande lufthastigheten dock efter en tids oscillerande kommer den stabilisera sig på en viss höjd. Vid vilken höjd en viss partikeldiameter kommer att stabilisera sig kan ses i figur 17. För vidare beräkningar och diskussion kring hur partikeln kommer att transporteras i gravitationsseparatorn se bilaga H.



Figur 17: Stabiliseringshöjd för viss partikeldiameter för ett flöde av 20 L/min. Tunga partiklar kommer stabilisera sig nära botten eller toppen av gravitationsseparatorn då lufthastigheten är som störst här.

Det kan vara önskvärt att veta vilket luftflöde som krävs för att en partikel med en viss storlek skall transporteras ut ur gravitationsseparatorn. Detta görs genom att beräkna vilken hastighet som krävs för att partikeln skall sväva vid gravitationsseparatorns vidaste del. Hur stort luftflödet måste vara för en viss partikeldiameter kan ses i figur (18).



Figur 18: Luftflöde som krävs för medryckning av viss partikelstorlek genom hela anordningen. Ju större partikel, desto större luftflöde krävs.

7.4.1 Undre cylinderkon

Denna komponent är den undre delen av gravitationsseparatorn och den i sin tur delades upp i två delar, den undre av dessa svarvades ut från ett solit stycke och sedan borrhades gängor till flänsen från koppen. Den övre delen av cylinderkonen strålades varpå den bockades och totalt sett erhöles 68 kanter, vilket gjorde vinklarna relativt små ($5,29^\circ$). Flänsen svarvades och sedan sammanfogades alla delar med svets. För mått, se bilaga G.

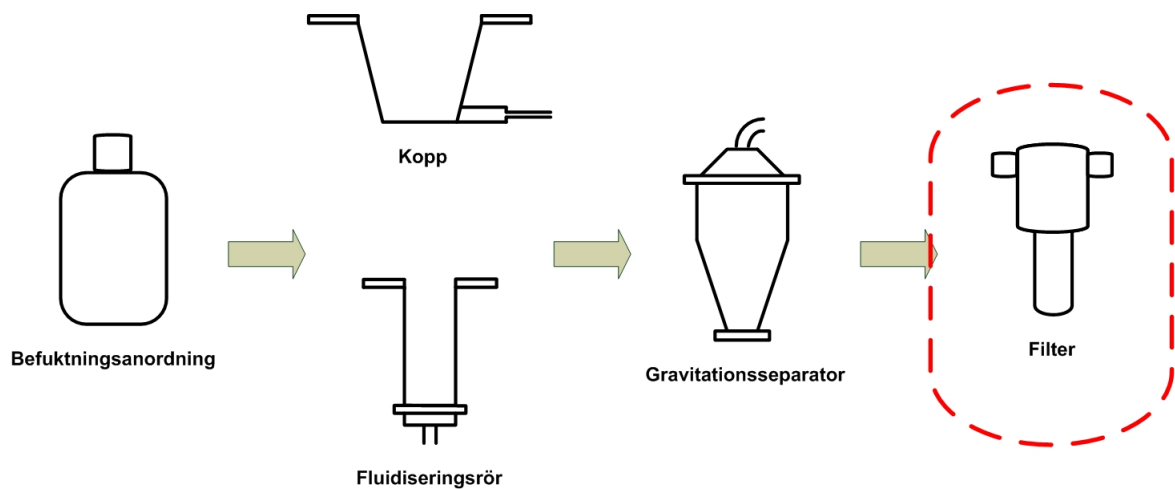
7.4.2 Övre cylinderkon

Denna komponent är den övre delen av gravitationsseparatorn vilken också i sin tur delades upp i två delar, den cylindriska biten av komponenten valsades från en plåt och delen ovanför denna svarvades ut ur ett solit stycke, efter detta borrhades gängor till flänsen på topp-delen. Flänsen svarvades och sedan sammanfogades alla delar med svets. För mått, se bilaga G.

7.4.3 Topprör

Den översta delen på anordningen tillverkades av två delar; ett rör och en fläns, dessa sammanfogades genom svetsning. Flänsen svarvades och röret bockades för att sedan avslutas med gängor av standardmått. För mått, se bilaga G.

7.5 Filter



Figur 19: Testanordningens huvudsakliga komponenter där avsnittets aktuella komponent är inringad.

Syftet med filtret är att samla upp allt damm som bildas förslitningsanordningen (kopp och gravitationsseparator). Filtret kopplas till anordningens utlopp och samlar upp allt partikeldamm större än en viss bestämd diameter. Filtret består av ett filterhus och ett filterelement av engångstyp eller ett sintrat element som enkelt går att rengöra emellan körningar. Filterhuset är genomskinligt för att det enkelt skall gå att observera hur mycket damm som bildas under drift. Filtret går att koppla till röret ut från anordningen utan att större skarvar bildas där damm kan ansamlas. Filtret dimensionerades med god marginal för att klara större flöden. Tryckfallet över filtret önskades hållas litet varför det finns olika finheter på filterelementet beroende på hur mycket damm som förväntas ansamlas under ett experiment. De filterelement som införskaffats är av ett nylonmaterial med porstorlekar 0,01 respektive 1 μm . Det har också köpts in ett större filterhus där ett filterelement med en sintrad filterinsats med pordiametern 5 μm kan monteras.

7.6 Ställning

Ställningen är direkt dimensionerad efter förslitningsanordningen och kringutrustning till denna. Ställningen tillverkades av fyrkantsrör och en plåtplatta där kringutrustningen placerades. Alla delarna sammafogades sedan med svets. Även fötter av gummi och plast monterades vilket gjorde anordningen stabilare. För ritningar se bilaga G

7.7 Övriga komponenter

Tryckregulator Luften i tryckluftssystemet som användes har ett tryck på 7 bar. Det var önskvärt att låta anordningen arbeta vid atmosfärstryck varför en regulator behövdes för att sänka trycket. Regulatorn kunde dessutom stänga trycket helt vilket innebar att den fungerade som "shut-off" ventil istället för huvudbrytaren till tryckluftsnätet.

Säkerhetsventil I befuktninganordningen finns en säkerhetsventil installerad för att undvika att ett övertryck byggs upp under körning. Övertrycksskyddet förhindrar att trycket byggs upp till farliga nivåer som skulle kunna leda till skador på tryckluftsslangen eller vattenbehållaren. Säkerhetsventilen utlöses då övertrycket i anordningen överstiger

0,5 bar. Detta tryck valdes för att anordningar som överstiger detta tryck omfattas av Arbetskyddsstyrelsens föreskrifter om tryckbärande anordningar (AFS 1994:4 1999), vilket innebär att om högre övertrycksventil beställdes skulle hela anordningen behöva tryckcertifieras.

Kopplingar För att sammanfoga alla komponenter krävdes att gastäta kopplingar användes. Slangklämmor uteslöts då dessa i vissa fall kan läcka, istället användes kopplingar från Swagelok. Många olika kopplingar användes för att koppla ihop de olika komponenterna, nedan följer en översiktlig beskrivning av de olika kopplingarnas funktion. Vid de kopplingar som anslutits till en slang fördes en stödhylsa in i slangens ände.

- Tryckregulatorn anslöts med hjälp av kopplingar till tryckluftsslangen. Identiska kopplingar användes till tryckregulatorns in- och utflöde.
- I locket på vattenbehållaren behövdes två kopplingar, en för in- och en för utflödet. Dessa speciella kopplingar kan skruvas isär i två delar som sedan ansluts från varsin sida av locket med en packning på varje sida.
- På vattenbehållarens botten ligger inflödesslangen som perforerades med små hål. Slangens ände slöts med en ändmutter.
- Rotametern kopplades ihop med tryckluftsslangen. Slangen har olika diameter före respektive efter rotametern varför olika sorters kopplingar användes här.
- Efter rotametern monterades en T-koppling som behövdes när luftfuktigheten mäts med hjälp av ett *Drägerrör*.
- Tryckluftsslangen som går från T-kopplingen anslöts till inblåsröret som sitter på koppen med en koppling.
- Filtret anslöts med hjälp av en koppling till det gängade toppröret från gravitationsseparatorens topp.

Rotameter Enligt Jet-Cupmetoden skall ett luftflöde mellan 10-20 L/min användas. För att mäta luftflödet behövs därför en rotameter. En rotameter med kapacitet på 5-50 L/min har antagits ha tillräcklig kapacitet för att nå upp till ställda krav med god marginal.

Drägerrör För att mäta den relativa luftfuktigheten används Drägerrör. Drägerröret ansluts till en pump och ett luftprov tas ur T-kopplingen. Drägerrören mäter den absoluta luftfuktigheten, som kan räknas om till relativ luftfuktighet.

Kapillär Inblåsröret till koppen har en innerdiameter på 1,5 mm.

Tryckluftsslang och anslutning För att kunna använda det befintliga tryckluftssystemet som fanns tillgängligt behövde en koppling som passade införskaffas. Därför används en Cejn-nippel av hontyp.

Efter befuktningens anordningen behövdes en tryckluftsslang med en mindre diameter för att möjliggöra att övergången till kapillären skulle kunna ske med en Swagelok-koppling. Slangen som användes hade en innerdiameter på 4 mm och ytterdiameter på 6 mm.

Packningar För att säkerställa att läckage i anordningen ej förekommer har det i samråd med Specma Seals AB tagits fram lämpliga packningar av typen Dixo 4000 som är en nitrilgummibunden aramidfiberplatta. Specma Seals AB har med egna beräkningsprogram och given data tagit fram lämpliga dimensioner på packningarna till de aktuella ytorna. Eftersom endast två typer av flänsar förekommer i anordning medförde detta också att två typer av packningar togs fram.

7.8 Beräkningar

7.8.1 Tryckfall

Tryckfall sker över samtliga komponenter i testanordningen. Vid befuktningsdunken kommer tryckfallet att vara direkt proportionellt till vattenpelarens höjd. I samtliga slangar och rör uppkommer ett tryckfall på grund av just rörströmning och i övergångarna mellan komponenterna. Tryckfall kommer även uppkomma då luften skall flöda genom partikelbädden och filtret. Det totala tryckfallet genom hela testanordningen har uppskattats till 0,34 bar. För beräkningar se bilaga H.

8 Inköp

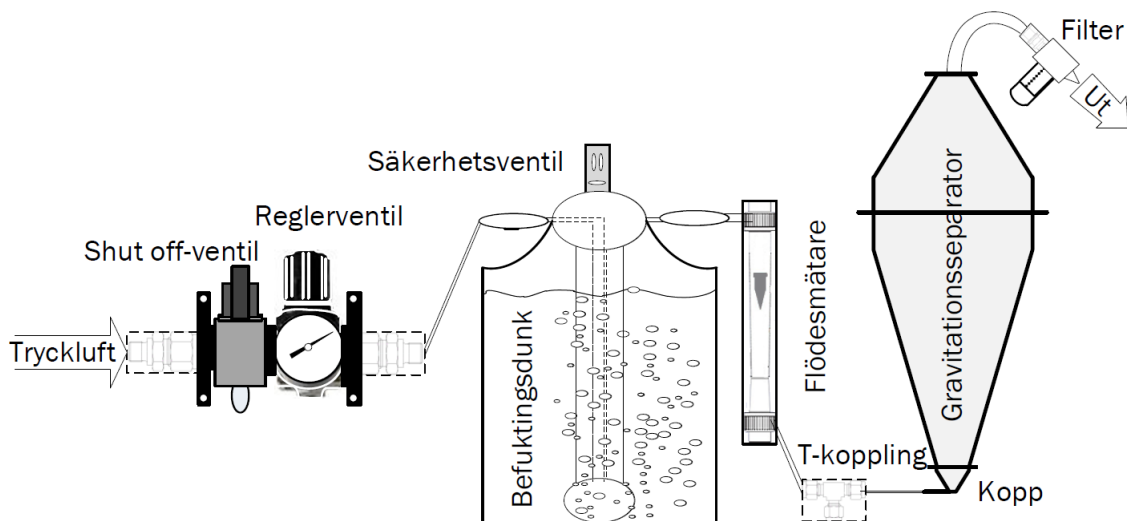
I tabell 2 redovisas samtliga komponenter som köpts in till anordningen. För en mer detaljerad lista med artikelnummer, priser och bilder se bilaga I.

Tabell 2: Presenterar vilka komponenter som beställdes samt vilken leverantör som valdes.

Komponent	Leverantör
Tryckluftsslang	Acandia
Slang, Nippel	Ahlsell
Säkerhetsventil	Barby+Kühner
Tryckregulator	Bosch-Rexroth
Fötter till Ställning	Eugen Wiberger AB
Ställning	Chalmers Prototypplabb
Drägerrör	Dräger
Befuktningssystem	Fisher Scientific
Rotameter	KompAuto
Förslitningsanordning	Mekpart AB
Filter	Parker Hannifin Corporation
Kapillär	Scantec Lab
Packningar	Specma Seals AB
Kopplingar	Swagelok

9 Experimentmetodik

Då testanordningen skulle användas praktiskt behövde metodiken klargöras både för Jet-Cuptest (se figur 20) och för fluidiserad bädd-test (samma princip som figur 20 fast med ett fluidiseringsrör istället för kopp nertill). Beskrivningen av metodiken under avsnitt 9.1 och 9.2 är angivna i *presens* för att bli enklare att följa.



Figur 20: Luftens väg genom testanordningen för ett Jet-Cuptest. Byts koppen ut mot ett fluidiseringsrör kan istället ett fluidiserat bäddförlitningstest utföras på partiklarna.

9.1 Jet-Cuptest

Provet vägs upp, ca 10 g, och placeras i den avskruvade koppen som sedan fästes till anordningen. Vattenmängden i befuktningssystemet kontrolleras och filtret vägs innan det skruvas fast. Tryckluften från tryckluftssystemet vrids på maximalt och därefter öppnas tryckregulatorn försiktigt tills 15 L/min avläses av från rotametern, då startas tidtagningen. En kontroll görs att luften som lämnar befuktningssystemet håller en relativ luftfuktighet på 60 %, att inga vattendroppar dras med och att anordningen ej läcker. Därefter mäts det i filtret uppsamlade dammet var 5:e minut. Efter en timmes körning stängs flödet och testet kan ses som avslutat. Om förlitningen inte har uppnått ett linjärt förlopp ännu förlängs testtiden. Filtret och anordningen rengörs noga inför nästa test.

9.2 Fluidiserad bäddtest

Provet vägs upp, ca 10 g, och placeras i det avskruvade bottenröret. Därefter skruvas röret fast på anordningen. Vattenmängden i befuktningssystemet kontrolleras och filtret vägs innan det skruvas fast. Tryckluften från tryckluftssystemet vrids på maximalt och därefter läses flödet av till 15 L/min på rotametern, då startas tidtagningen. En kontroll görs att inget vatten dras med upp från befuktningssystemet och att anordningen ej läcker. Efter en timmas körning stängs flödet av och filtret vägs. Filtret skruvas på och samma flöde ställs in för att köra i ytterligare 4 timmar. Efter detta vägs filtret ytterligare en gång. Filtrets ursprungliga vikt dras av från de senare mätningarna för att få fram hur mycket damm som fastnat. Filtret och anordningen rengörs noga inför nästa test.

10 Resultat

10.1 Testanordning

Leveransen av testanordningen blev försenad med cirka fyra veckor. Förseningen berodde dels på att diskussionen som fördes med leverantören angående anordningens design tog längre tid än väntat, samt att leverantören inte kunde hålla den utlovade leveranstiden på grund av stor arbetsbörda. När anordningen påstods vara klar inspekterades delarna och det konstaterades att koppen var felaktigt tillverkad. Kapillären som sitter fastsvetsad i direkt anknäring med koppen var för lång vilket leder till ett alldeles för högt tryckfall. Även den övre konen av gravitationsseparatorn ansågs väga för mycket då stora stålpartier ej svarvats bort och genom en förfrågan lämnades även denna kvar för modifikation. När anordningen slutligen levererades upptäcktes ytterligare ett tillverkningsfel. Kapillären var inte monterad längst ned i botten på koppen vilket kan leda till stagnanta zoner. På grund av tidsbrist åtgärdades inte detta utan det valdes att montera ihop förslitningsanordningen, se figur 21 och 22.

Den färdiga förslitningsanordningen skiljer sig på ytterligare en punkt från ritningarna. Den nedre delen av gravitationsseparatorn kunde inte tillverkas exakt som önskat på grund av tillverkningstekniska skäl. Den strålades istället för att valsas vilket innebär att den knäcktes 68 gånger. Detta medförde att konen inte blev helt slät och kan möjligen ha påverkat hur luften beter sig inne i gravitationsseparatorn. Exakt hur luften uppför sig är dock svårt att avgöra utan närmare analys. Det visade sig dock att de flesta partiklarna stannade i koppen snarare än att sätta sig i ojämnheter på väggarna.



Figur 21: Bild 1: hela testanordningen färdigmonterad. Förstorade bilder på säkerhetsventil, filter och instrumentplatta; bild 2, 3 respektive 4.



Figur 22: Koppen där kapillären syns till vänster.

10.2 Testkörningar

Det första som gjordes var att läckagetesta anordningen (Se figur 20 för flödesschema över luftens väg genom anordningen). Detta genomfördes med hjälp av diskmedel löst i vatten vilket sprayades i samtliga kopplingar. Där det bildades luftbubblor drogs kopplingarna åt hårdare, packningar lades in och vissa gängor tätades med gängtejp.

Vidare genomfördes en säkerhetskontroll vilken inleddes genom att tryckregulatorn stängdes och rotametern öppnades. Därefter öppnades tryckluften från det centrala tryckluftssystemet. Rotametern visade ingen flödesändring vilket betydde att tryckregulatorn fungerade. Därefter öppnades tryckregulatorn försiktigt tills ett övertryck i anordningen bildades. Vid ett övertryck på 0,5 bar öppnades säkerhetsventilen. Säkerhetskontrollen kunde nu avslutas och ses som godkänd.

För att vara medveten om vad som händer med anordningen då den hanteras vårdslöst utan användning av säkerhetslistan, genomfördes ett "worst case scenario". Detta genomfördes även för att säkerställa att säkerhetsventilen klarade det maximala flödet som gick att uppnå från tryckluftsnätet. Rotametern stängdes och tryckregulatorn öppnades maximalt vilket ledde till att säkerhetsventilen löste ut på grund av övertrycket. Inget tydde på att det byggdes upp ett tryck i anordningen varför "worst case scenario"-testet kunde ses som avslutat med godkänt resultat.

Luftfuktigheten kontrollerades med hjälp av Drägerrör. Dessa är smala glasrör fyllda med ett ämne som ändrar färg då de kommer i kontakt med vatten. Rören kopplades in till anordningen via T-kopplingen och luft sögs in med hjälp av en speciell pump. Den absoluta luftfuktigheten avläses sedan på en skala på röret där färgändringen slutar och denna räknas sedan om till relativ luftfuktighet. Efter ett antal testkörningar konstaterades det att en vattenhöjd på cirka 260 mm gav en önskvärd relativ luftfuktighet på 60 %.

Första körningen med partiklar kördes med överdelen av gravitationsseparatorn avplockad. Detta för att se hur partiklarna betedde sig i förslitningsanordningen och för att enkelt kunna verifiera att damm bildades och tog sig ur anordningen. Flödet i koppen visade sig anta ett pulserande förlopp vilket gjorde att partiklarna slungades upp och ner. De höll sig dock helt inom den nedre delen av separatorn. Det iaktogs också att ett väldigt fint damm sakta steg upp ur anordningen vilket var önskvärt. Genom att sätta en 45 micro m i separatorn fastställdes att dammpartiklarna var mindre än så.

Vid en av testkörningarna stängdes rotametern före tryckregulatorn. När väl tryckregulatorn stängdes bildades ett övertryck i befuktningdunken vilket resulterade i att vatten sögs tillbaka i systemet och sprutades ut via tryckregulatorn.

Det maximala luftflödet som gick att uppnå var 18 L/min. Detta på grund av för höga tryckfall i kapillärröret in till koppen vilket orsakade att säkerhetsventilen löste ut. Vid

designen av testanordningen var det önskvärt att kunna köra tester med ett flöde upp till 20 L/min, detta var nu inte möjligt på grund av ovan nämnda orsak och ett flöde på 15 L/min användes. Efter en längre tids körning ökade tryckfallet ytterligare på grund av att filtret fylldes med partiklar. Detta gjorde att det maximala flödet minskade till ca 13 L/min. Genom att rengöra filtret var det möjligt att öka flödes hastigheten igen.

Då anordningen demonterades efter en körning (experimenten presenteras nedan under avsnitt 10.3) upptäcktes det att partiklar hade ansamlats på väggarna i nedre delen av gravitationsseparatorn. Mängden partiklar varierade beroende på vilken syrebärare som testades och de syrebärare som hade en snabbare förslitningsprocess genererade en större ansamling av partiklar både i filtret och i separatorn. Det noterades även en ansamling av partiklar vid skarven mellan koppen och gravitationsseparatorn, varför en ny kopp utan skarv hade varit fördelaktigt.

10.3 Experiment

Första körningen gjordes med pulver av ilmenit (FeTiO_3). Den önskade storleksordningen (125-180 μm) siktades fram. Koppen laddades med 10 g av provmängden varpå anordningen startades. Flödet ställdes in till 15 L/min och en vattenpelare på 0,225 m användes för att befukta luften. Var 5:e minut under 60 minuter stängdes luftflödet och det i filtret ansamlade dammet vägdes. Mätdata från testet presenteras i figur 24.



Figur 23: Färska ilmenitpartiklar. Notera storleksordningen och att detta är partiklar som ännu inte nötts ner. Bulkdensiteten är $2,50 \text{ g/cm}^3$, partikeldiameter mellan 125-180 μm

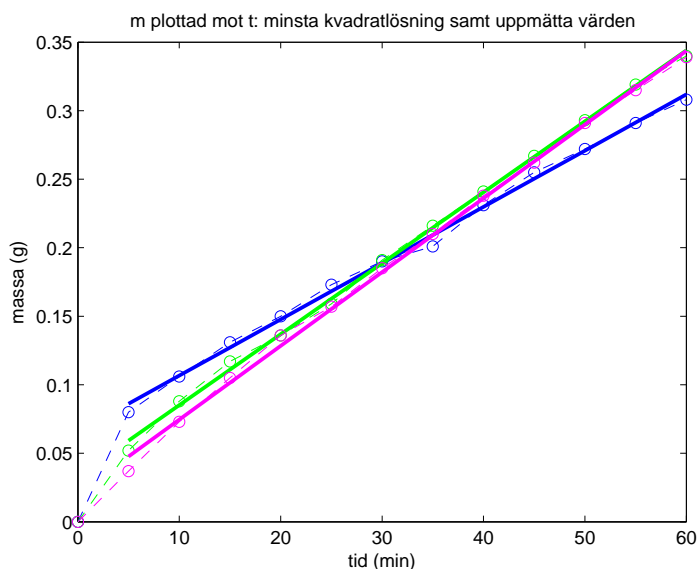
Massan som samlades i filtret tycktes följa ett linjärt samband varför det hela anpassades med en rät linje på formen $m = a \cdot t + b$ med hjälp av minsta kvadratmetoden, där massan anges i gram och tiden i minuter. Experimentet upprepades ytterligare två gånger och resultaten för alla tre körningar presenteras i figure 24. De räta linjerna har lutningarna 0,0041, 0,0052 samt 0,0054 g/min.

Ett medelvärde av dessa tre resultat togs fram (se ekvation 17). Det kvadratiska medelvärdet blev 0,0032. Lutningen har enheten g/min, och konstanten anges i gram. Ju lägre lutning desto slittåligare material. Ett lägre värde på konstanten innebär att mindre damm ansamlas i början av experimentet.

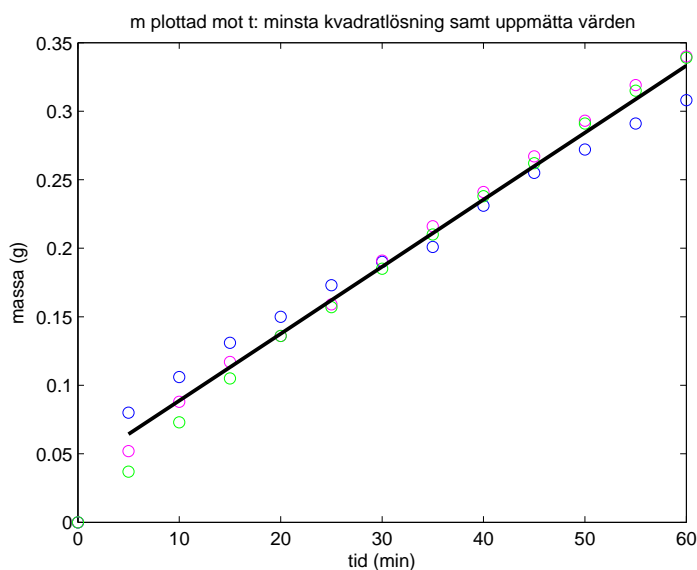
$$m = 0,0049 \cdot t + 0,0398 \quad (17)$$

För att beräkna WD-indexet skalas lutningen om från g/min till enheten kumulativ vikt % damm/h (se ekvation 18 för definition), med insatt värde $m_{tot} = 10,037$ (medelmassan av färsk ilmenit för de tre experimenten), vilket ger oss

$$WD = 0,0049 \cdot \frac{1}{m_{tot} \cdot 0,0167} \cdot 100\% = 2,9234 \approx 2,92\%/h \quad (18)$$



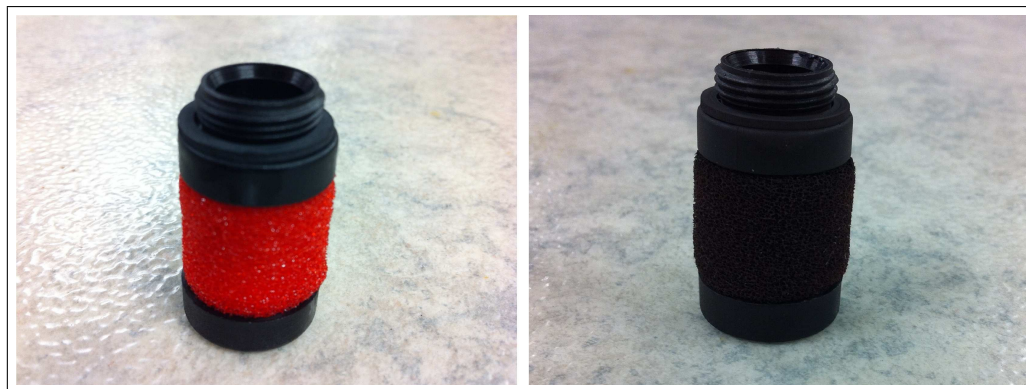
Figur 24: Den uppsamlade massan damm i filtret under tre 60 minuters körningar där provet byttes ut mellan varje körning och invägning av filtratmängden gjordes var 5:e minut. Notera det icke-linjära förloppet vid början vilket gör att den räta linjen som anpassas för uppmätta värden efter 5 minuter inte går genom origo.



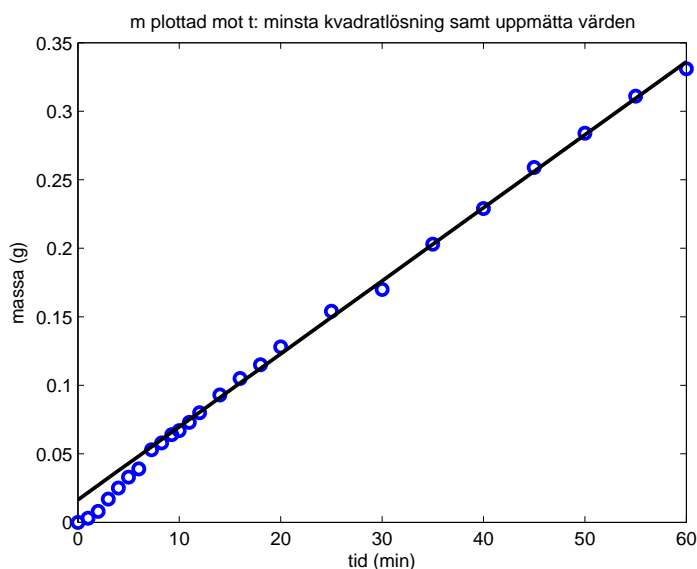
Figur 25: Medelvärde av samtliga tre körningar, den linjärt anpassade linjen är den som uppges i ekvation 17.

Genom att sikta proverna innan och efter körning kunde det kontrolleras om någon förändring av storleksfördelningen skett. I figur 27 visas resultatet efter siktning av tre prover.

Ett test gjordes också för att undersöka hur dammet byggs upp i början av en körning, innan förslitningsprocessen antar ett linjärt skede. Detta visas i figur 28. Det linjära förloppet fick inte samma utseende som i tidigare försök, dock bör noteras att experimentet inte heller utfördes på samma sätt.

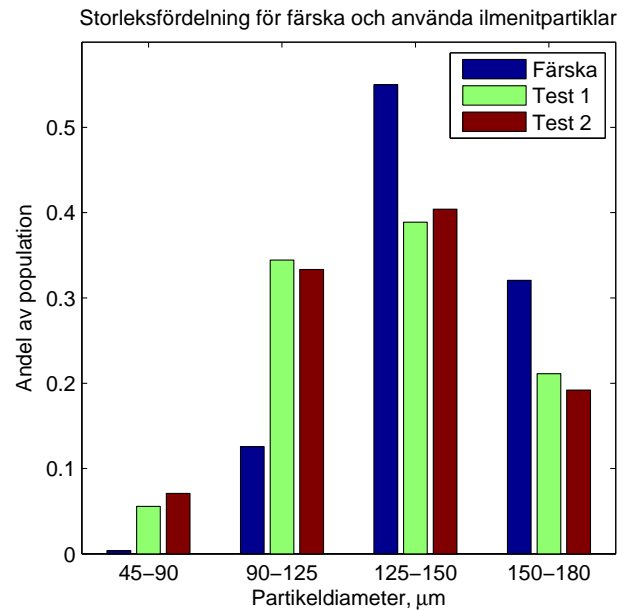


Figur 26: Filterinsatsen med en porstorlek på $0,01\ \mu\text{m}$, till vänster ses filterinsatsen när den är ny (innan körning) och till höger hur filterinsatsen ser ut efter 60 minuters körning. Ilmenitdammet har satt sig både i och utanpå porerna vilket gör att det inte längre går att se att filterinsatsen en gång var röd.

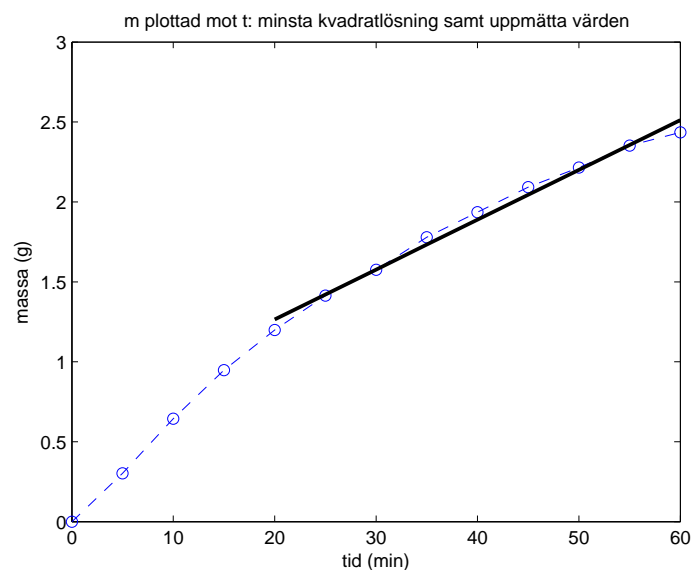


Figur 28: Testkörning med ilmenit där luftflödet stängdes av varje minut och filtratmängden vägdes in under de första 12 minuterna, varannan minut nästkommande 8 minuter, sedan var 5:e minut tills en timma hade passerat.

Vidare testades oxiderad ilmenit som hade använts i en 300W CLC-anläggning. Testet utfördes enligt metoden som beskrivs under avsnitt 9.1. Resultatet presenteras i figur 30. Linjär förslitning inträffade här efter drygt 20 minuter efter start. Det satte sig också lite mer än 2 gram damm på väggarna i gravitationsseparatorn. WD-indexet beräknades här till 18,66.



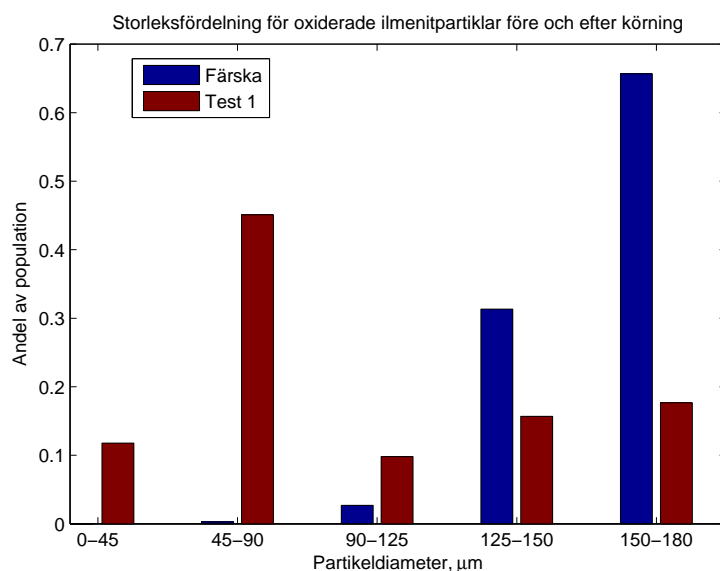
Figur 27: Storleksfördelningen hos ilmenit som inte körts i testanordningen och efter två separata körningar där koppen laddades med färsk ilmenit inför varje experiment. Detta är siktningar från det som samlades upp i koppen och alltså inte medräknat den andel damm som fastnat i filtret och på väggarna i separatorn.



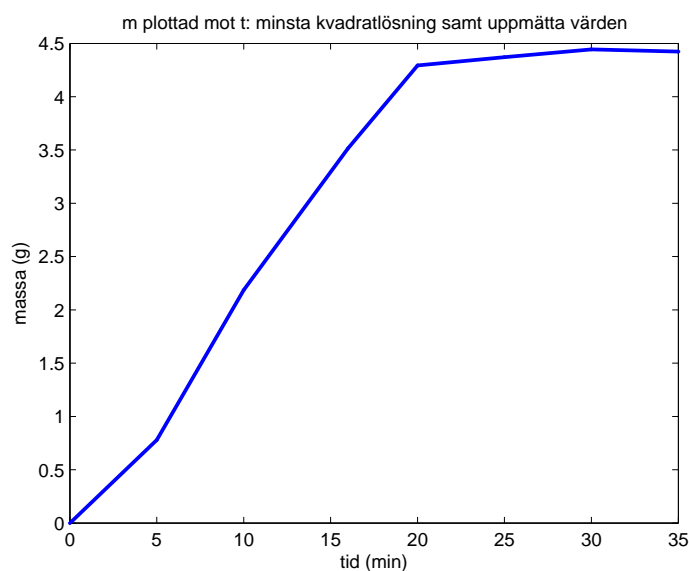
Figur 30: Testkörning med använd ilmenit som bestod av oxiderade partiklar, där luftflödet stängdes av var 5:e minut varpå filtratmängden vägdes in.

Vidare testades färsk, oxiderade C2Z-partiklar (20% CuO, 80% ZrO₂), 10 g med luftflödet 15 L/min. Bulkdensiteten var 1,70 g/cm³. Resultatet redovisas i figur 31. Förslitningsprocessen här gick snabbt och tycks vara linjär redan från start. Efter 30 minuter hade halva provmängden fångats upp av filtret. WD-indexet för en körning beräknades här till 99,26.

För använd, oxiderad C2Z gavs följande resultat, där det efter 35 minuter inte samlades upp någonting i filtret. Nästintill allt material hade pulveriserats och satt sig antingen i filtret eller på väggarna i gravitationsserparatorn. WD-indexet beräknades ej här då det inte gick att anpassa en linjär funktion efter förslitningsförloppet.

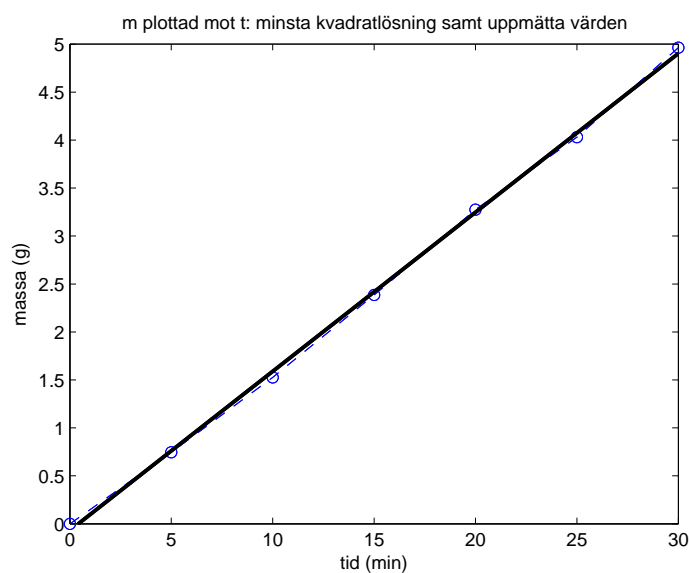


Figur 29: Storleksfördelningen hos oxiderad ilmenit som inte har körts i testanordningen och det som fanns kvar i koppen efter en körning. En förändring hos fördelningen av partikelstorleken syns tydligt där andel stora partiklar har minskat och andelen små har ökat.



Figur 32: Testkörning med oxiderad, använd C2Z, där luftflödet stängdes av var 5:e minut varpå filtratmängden vägdes in. Kurvan planar ut på grund av att koppen kördes tom. Ingen linjär funktion anpassades efter förslitningen.

Vid rengöringen efter testet av C2Z upptäcktes en urgröpning i sidan av koppen (se figur 33) mitt emot inflödet. Luftstrålen som färdas genom kapillären har en hastighet av cirka 140 m/s och de partiklar som fångas upp av denna luftstråle har slungats in i väggen vilket har resulterat i detta hål.



Figur 31: Testkörning med C2Z som bestod av färska, oxiderade partiklar, där luftflödet stängdes av var 5:e minut varpå filtratmängden vägdes in.



Figur 33: Koppen med hålet som bildats till vänster (inringat), tvärs över det tangentiella inflödet. Notera också att inblåset från kapillären inte ligger direkt an mot botten av koppen som önskades.

11 Diskussion

Vid testkörningarna med syrebärrpartiklar i anordningen erhöles snabbt ett linjärt utseende för hur förslitningen beror av körtiden vilket kan ses i bland annat figur 25 under avsnitt 10.3. Då förslitningen snabbt övergår till att bete sig linjärt gör det möjligt att köra korta tester och ändå erhålla samma resultat som för långa testkörningar. Inga tester längre än en timme utfördes då förslitningen visade sig vara mycket linjär under hela körningen och uppvisade ingen tendens att ändra sig. I figur 28 har fler mätningar gjorts i början av testkörningen och det syns att förslitningshastigheten är högre här än i slutet av testet. En förklaring till detta skulle kunna vara att partiklarna i det färiska provet har många ojämnheter som slits bort snabbt och ger partiklarna en mer sfärisk form. De mer sfäriska partiklarna slits sedan inte lika häftigt som de icke-sfäriska, se avsnitt 6.2.

Allt eftersom förslitning sker på partiklarna kommer de att minska i storlek och således kommer storleksförändringen att ändras. Detta kan bekräftas genom att studera figur 27 och 29.

Luftfuktigheten kontrollerades med Drägerrör. Nackdelen med dessa är att de har en låg noggrannhet, $\pm 20\%$, och att de endast går att använda en gång. Trots att luftfuktigheten i systemet inte är den viktigaste parametern att ta hänsyn till, är den ändå intressant att studera för att åstadkomma bästa resultat. Drägerrören skulle kunna bytas ut mot en digital hygrometer för att kunna erhålla kontinuerliga och mer exakta värden.

Ansamlingen av partiklar som visade sig ske i den nedre delen av gravitationsseparatorn och i skarven vid koppen kan ha en betydande effekt på resultatet. Vägning av dessa partiklar visade att det inte var en försumbar mängd jämfört med de som fastnat i filtret och på grund kan ej detta damm försummas helt vid beräkningarna, dock har detta gjorts då antagandet gjordes att allt detta damm fastnade i början av körningarna. Huruvida detta antagande är korrekt har ej verifierats. Detta problem beror förmodligen inte på statisk elektricitet eftersom partiklarna då hade fördelat sig jämt över hela insidan, för framtida projekt bör problemet lösas. En troligare förklaring är att partiklarna fastnar på grund av friktionen mot väggen när de glider ner mot koppen.

Vid designen av testanordningen var det önskvärt att kunna köra tester med ett flöde upp till 20 L/min. Detta var dock inte möjligt vilket konstaterades under en testkörning som nämns under avsnitt 10.2. En möjlig åtgärd är att byta ut säkerhetsventilen mot en annan som löser ut vid ett högre tryck. För att få göra detta krävs dock god teknisk praxis och att vissa riktlinjer följs, se avsnitt 7.7. Ingen information om vilket övertryck befuktningssdunken klarar angavs heller av leverantören. Om dunken hade varit tryckcertifierad hade det förenklats för en eventuell tryckökning i systemet. Något tidsutrymme att byta ut säkerhetsventilen och trycktesta hela anordningen fanns dock ej, men en ny övertrycksventil på 1 bar har beställts. Alternativt skulle diametern hos kapillären i koppen kunna utvidgas eftersom tryckfallet här är stort. Detta alternativ kräver dock en omkonstruktion av koppen. Om en ny dunk köptes in skulle det kontrollerats om denna var tryckcertifierad först.

Vid felaktig stängning av anordningen strömmade vatten tillbaka genom tryckregulatorn. Detta problem kan lösas relativt enkelt genom montering av en backventil vid inflödet till befuktningssdunken som förhindrar flöde bakåt i anordningen. En effekt som skulle kunna uppstå om problemet inte åtgärdas är att tryckregulatorn går sönder, då den är gjord för luft och inte vatten.

Hålet som upptäcktes i koppen kommer mest sannolikt vid ytterligare körningar att utvidgas ännu mer och tillslut kommer hålet gå igenom kanten på koppen. Den nuvarande koppen kan därför inte användas vid ytterligare tester utan måste ersättas eller lagas. Det

bästa alternativet är att konstruera en ny kopp i ett annat material, exempelvis ett hårdare stål, som har större motståndskraft mot mekanisk nötning.

WD-indexen som beräknades för färsk ilmenit kan antas stämma då inget hål i koppen observerades när koppen rengjordes efter dessa körningar. Dock ger den använda ilmeniten ett WD-index på 18,66, vilket kan vara för högt (dock hade ju dessa partiklar använts i en testreaktor). C2Z fick ett väldigt högt index, 99,2601, här bör definitivt hålet i koppen ha uppstått. Det gjordes heller aldrig några upprepningar av varken försöket med oxiderad ilmenit eller med C2Z då det efter ett lyckat ilmenit-test fokuserades på att testa så många olika sorters partiklar som möjligt för att bättre kunna besvara frågeställningen.

Leveransen av testanordningen blev försenad vilket resulterade i att den tid som var planerad till försök och experiment blev avsevärt kortare. Detta påverkade i sin tur resultatmängden då färre experimentell data erhöles vilket gav en större osäkerhet i slutsatserna om partikelförslitning. Det fanns heller inte utrymme i tidsplanen att tillverka något fluidrör. Dock finns ritningar och beräkningar framtagna i detalj för fluidröret och dess komponenter vilket gör det möjligt att i framtida projekt utforska denna möjlighet.

Projektet startade med en stor litteraturstudie för att finna olika lösningar att testa och mäta partikelförslitning på. Detta var nödvändigt för att finna den lösningsmetod som ansågs bäst och anses inte kunnat genomföras annorlunda. Samtliga ritningar av de olika komponenterna skickades in samtidigt för tillverkning. En effektivisering hade möjligen kunna vara att skicka in en ritning i taget, allt eftersom de var klara. Nackdelen med detta skulle dock vara att inga ändringar skulle kunna genomföras av de ritningar som skickats till tillverkaren. För att ha förhindrat den snabba nedslitningen av koppen skulle större krav på materialvalet av denna ha ställts.

12 Slutsats

Relativt snabbt i testkörningen bekräftas att anordningen fungerar som önskat och att förslitningsprocessen som pågår i anordningen snabbt uppnår ett linjärt beteende. De testkörningar som genomfördes påvisade att de oxiderade/ använda partiklarna nöts ner betydligt snabbare än de färska partiklarna. De testmetoder som tagits fram visade sig vara effektiva och enkla att genomföra. WD-indexet för ilmenit blev 2,92, vilket är baserat på tre testkörningar. Om koppen repareras finns en fungerade konstruktion tillgänglig som exempelvis kan undersöka förslitningen av de syrebärrpartiklarna som används för kemcyklisk förbränning.

Referenser

- Adanez, J., Abad, A., Garcia-Labiano, F., Gayan, P. & de Diego, L. F. (2012), 'Progress in Chemical-Looping Combustion and Reforming technologies', *Progress in Energy and Combustion Science* **38**(2), 215–282.
- AFS 1994:4 (1999), *Tryckbärande Anordningar*, Stockholm, Arbetskyddsstyrelsen.
- Blinichev, V., Streltsov, V. & Lebedeva, E. (1968), 'An investigation of the size reduction of granular materials during their processing in fluidized beds', *Int Chem Eng* **8**(4) pp. 615–618.
- Cocco, R., Arrington, Y., Hays, R., Findlay, J., Karri, S. & Knowlton, T. (2010), 'Jet cup attrition testing', *Powder Technology* **200**(3), 224–233.
- Conshohocken, W. (2011), 'Standard Test Method for Determination of Attrition and Abrasion of Powdered Catalysts by Air Jets 1', *October* **00**(September 1995), 1–4.
- Das, D. (besökt 2012-04-18), 'Stokes's law'.
URL: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/567002/Stokess-law>
- Erlström, M., Fredriksson, D., Juhojuntt, N. & Sivhed, Ulf, W. L. (2011), 'Sveriges Geologiska Undersökning - Lagring av koldioxid i berggrunden'.
- EU Interreg IVA (2012), 'Carbon capture and storage in the skagerrak/kattegat region', *Final Report February 2012* .
- Gupta, A. K. (2009), 'Effect of particle size and confining pressure on breakage and strength parameters of rockfill materials', *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* **14**.
- Institutionen för kemi- och bioteknik (2011), *Laboration 3 - Fluidisation*, Separations- och apparatteknik.
- Johansson, M. (2007), 'Screening of oxygen-carrier particles based on iron-, manganese-, copper- and nickel oxides for use in chemical-looping technologies', *Chalmers University of Technology* .
- Johnsson, F. (2010), 'För- och nackdelar med olika CCS-tekniker', *Ny Teknik* .
URL: <http://www.nyteknik.se/nyheter/energimiljo/energi/article3047505.ece>
- Kunii, D. & Levenspiel, O. (1991), *Fluidization Engineering*, 2nd edn, Butterworth-Heinemann, Boston.
- Kurtus, R. (besökt 2012-04-15), 'Basic of Static Electricity'.
URL: <http://www.school-for-champions.com/science/static.htm>
- Moldenhauer, P., Rydén, M. & Lyngfelt, A. (2012), 'Testing of minerals and industrial by-products as oxygen carriers for chemical-looping combustion in a circulating fluidized-bed 300 W laboratory reactor'.
- Pell, M. (1990), *Gas fluidization*, Elsevier, Amsterdam.
- Ray, Y., Jiang, T.-s. & Wen, C. (1987), 'Particle attrition phenomena in a fluidized bed', *Powder technology* **49**(3), 193–206.

- Weeks, S. A. & Dumbill, P. (1990), ‘Method speeds fcc catalyst attrition resistance determinations’, *Oil and Gas Journal Apr 16* pp. 38–40.
- Welty, J., Wicks, C., Wilson, R. & Rorrer, G. (2008), *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 5th edn, John Wiley Sons, Inc., Hoboken.
- Werther, J. & Reppenhagen, J. (2001), ‘Catalyst Attrition in Fluidized-Bed Systems’, *AIChE Journal* **45**(9), 2001–2010.
- Yang, W.-C. (2003), *Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems*, Marcel Dekker AG.
- Zhao, R., Goodwin, J. G. & Oukaci, R. (1999), ‘Attrition assessment for slurry bubble column reactor catalysts’, *Applied Catalysis A: General* **189**(1), 99–116.

Bifogade bilagor

- A Gantt-schema, kort leveranstid
- B Gantt-schema, lång leveranstid
- C Kravspecifikation
- D Bestämning av driftparametrar
- E Säkerhetslista
- F Befuktning av luft
- G Ritningar
- H Beräkningar
- I Prislista

Bilaga C

Kravspecifikation

Kravspecifikation

1. Storlek	Krav	Verifikation
1.1 Storlek	Skall få plats i verkstad	Mätning
1.2 Vikt	50 kg	Vägning
2. Experiment		
2.1 Körning för ett experiment [tid]	1h	Tidtagning
3. Användarvänlighet		
3.1 Tömning	Enkel tömning	Test
3.2 Rengöring	Enkel rengöring	Test
4. Kapacitet		
4.1 Flöde	15 L/min	Beräkning och rotameter
4.2 Provmängd	Under 15 g	Vägning
5. Material		
5.1 Miljö	Ej toxiska komponenter	Kvalitetskontroll
5.2 Korrosion	Ej korrodera	Materialkunskaper, erfarenheter
5.3 Hållfasthet	Lång livslängd, hårdare än syrebärrpartiklar	Materialkunskaper, erfarenheter
5.4 Temperaturtålighet	Rumstemperatur	Materialkunskaper, erfarenheter
6. Ekonomi		
6.1 Projektkostnad	Enligt institution	Beräkning
7. Kvantitet		
7.1 Antal	1 styck	
8. Tillverkning		
8.1 Anläggning	Går att tillverka	Konsultation med handledare
9. Säkerhet		
9.1 Stabilitet	Ej förflyttning under drift	Mätning
9.2 Damm	Ej avge dammpartiklar	Okulär besiktning
10. Förslitningsmetoder		
10.1 Cyklon	Realiserbart	Okulär besiktning
10.2 Fluidiserad bädd	Realiserbart	Okulär besiktning
10.3 kollision mellan partiklar	Realiserbart	Okulär besiktning
11. Tidsschema		
11.1 Färdig testanläggning	Enligt deadlines	

Bilaga D

Bestämning av driftparametrar

Tillvägagångssätt för att bestämma nödvändiga driftparametrar

1. Fyll befuktningsbehållaren så att vattennivån blir 15 cm. Säkerställ att rotametern står på maximalt flöde det vill säga 50 l/min och ställ in tryckregulatorn så den sänker totaltrycket till 1,4 bar. Starta tryckluften och testa ifall säkerhetsventilen utlöses genom att sakta minska luftflödet med hjälp av rotametern till flödet är 5 l/min. Ifall säkerhetsventilen utlöses notera då flödet och upprepa sedan samma procedur då totaltrycket är 1,3 bar. Om säkerhetsventilen även här utlöses, testa 1,2 bar eller 1,1 bar. Avbryt ytterligare försök om säkerhetsventilen utlöstes vid 1,0 bar vid ett flöde högre än 5 l/min.
2. Ställ in tryckregulatorn på det högsta trycket som tillåts enligt punkt 1 och säkerställ att rotametern är inställd på maximalt flöde. Starta tryckluften och använd rotametern för att minska luftflödet till 20 l/min. Öppna T-kopplingen och mät den relativa luftfuktigheten med ett drägerrör. Om den ligger inom intervallet 50-70% gå vidare till punkt 3 annars måste höjden av vattenpelaren i befuktningsbehållaren justeras tills önskat intervall nås. Dock bör maximalt två drägerrör användas till detta eftersom de resterande kommer behövas för finjustering senare, se punkt 4.
3. Ladda jetcupen med 7,5 g av syrebärrpartiklar av en billig sort som finns i stora kvantiteter. Ställ in tryckregulatorn på det högsta trycket som tillåts enligt punkt 1 och ställ in rotametern på ett flöde av 10 l/min. Starta tryckluften och kör testanläggningen i en timme. Mät därefter hur stor andel av provet som hamnat i filtret. Jämför detta med litteraturvärden för att se om det är endast fines som hamnat i filtret eller om det har skett medryckning av större partiklar. Upprepa proceduren med ett nytt prov av syrebärrare vid ett flöde av 15, 20 och 25 l/min.
4. För trycket enligt punkt 1 och det högsta flödet där endast fines ansamlas i filtret ska höjden på vattenpelaren i befuktningsbehållaren bestämmas noggrannare. Kör anläggningen och mät den relativa luftfuktigheten. Om den relativa luftfuktigheten ligger inom intervallet 55 till 65% gå vidare till punkt 5 annars ska höjden på vattenpelaren justeras och den relativa luftfuktigheten mätas igen.
5. Om vattenpelaren justerades mer än 10 cm i punkt 4 så bör punkt 1 göras om för att se om det får en märkbar påverkan på trycket i anordningen.
6. Använd tryck enligt punkt 1 och det högsta flödet där endast fines ansamlas i filtret. Gör tre nya tester där massan av provet är 5, 7,5 respektive 10 g. Jämför de tre testerna och försök avgöra vilket av testerna som bäst beskriver förslitningen.
7. Använd den bästa provmängden och gör ett nytt test där förslitningens tidsberoende undersöks. Väg filterinsatsen och starta därefter anläggningen som ska köras vid tryck enligt punkt 1 och flöde enligt punkt 3. Vid följande tidpunkter stängs tryckluften av och provtagning sker: 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480 min. Vid provtagningen skruvas filterinsatsen loss för att vägas, vikten av de uppsamlade finesen erhålls genom att subtrahera filterinsatsens startvikt. Genom att göra detta är det möjligt att bedöma om förslitningens processen är linjär eller inte. Det bör även vara möjligt att bestämma en optimal körningstid.

Bilaga E

Säkerhetslista

Kandidatgrupp

Säkerhetslista för anordning att undersöka syrebärrpartiklar vid kemcyklisk förbränning

Granskat av

Godkänt av

Säkerhetslista för anordning vid undersökning av förslitning av syrebärrpartiklar vid start och stopp

SÄKERHETSLISTA FÖR START				
Del i anordning	öppen/stängd	Position	Anmärkning	Åtgärdat av, Sign
Flödesmätare	Stängd	1		
Justerventil på tryckreg	Öppen	2		
Shut off på tryckreg	Öppen	3		
Centralluft	Öppnas	4	Öppnas försiktigt tills säkerhetsventill löser ut. Om den ej löses ut avbryt och kontrollera säkerhetsventil.	
Centralluft	Stängs	4		
Flödesmätare	Öppnas	1		
Justerventil	Stängs	2		
Centralluft	Öppnas	4		

Justerventil	Öppnas	2	Öppnas till önskat flöde erhålls	
ANLÄGGNING REDO FÖR KÖRNING				
SÄKERHETSLISTA FÖR STOPP				
Del i anordning	öppen/stängd	Position	Anmärkning	Åtgärdat av, Sign
Centralluft	Stängs	4	Vänta 30 s tills anläggning är trycklös	
Shut off på tryckreg	Stängs	3		
Justerventil på tryckreg	Stängs	2		
Flödesmätare	Stängs	1		
ANLÄGGNING STOPPAD				



1. Flödesmätare
2. Justerventil på tryckreg
3. Shut off på tryckreg
4. Centralluft
5. Säkerhetsventil
6. Filter
7. Swagelok T-koppling
8. Plast flaska

Bilaga F

Befuktning av luft

Befuktning av luft

*Undersökande laboration om hur en befuktningsanordnings
kapacitet varierar med vattenpelarens höjd*

Ramyar Baban Adrian Gunnarsson

Patrik Gyllén Joakim Hedström

Johan Larsson Simon Lindqvist

2012-02-24

Bilaga till kandidatarbete: ENMX02-12-10

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Institutionen för Energi och Miljö
Göteborg, Sverige, 2012

Sammanfattning

Syftet med laborationen är att testa hur vattenpelarens höjd i en befuktningensanordning påverkar den utgående luftens relativa luftfuktighet. Genom att göra det kan slutsatser dras om huruvida en liknande anordning kan användas till kandidatarbetets huvudmål; att testa förslitning på syrebärrpartiklar i kemcyklisk förbränning. Olika höjder på vattenpelaren testades och den relativa luftfuktigheten uppmättes. Resultatet visade ett samband att mellan högre vattenpelare och ökad relativ luftfuktighet, dock verkade det finnas ett tröskelvärde på 60% relativ luftfuktighet. När luften nått 60% relativ luftfuktighet verkade inte en högre vattenpelare ge ökad relativ luftfuktighet. Behovet för kandidatarbetets testanordning är ett luftflöde med en relativ luftfuktighet på 60% vilket laborationens testuppställning kunde producera. Därför kan en liknande anordning införskaffas och användas i det fortsatta arbetet med projektet.

Innehåll

1 Syfte	1
2 Teori	1
3 Material och metod	2
4 Resultat	2
5 Diskussion	4
A Beräkning av vattenpelarens höjd	5
Referenser	7

1 Syfte

Syftet med laborationen är att testa en befintlig befuktningsapparat och genom detta erhålla kunskap om hur olika parametrar påverkar den utgående luftens relativa luftfuktighet. Dessutom skall slutsatser dras om huruvida en liknande befuktningsapparat kan användas för att befukta luftflödet in till kandidatarbetets testanordning för förslitning av syrebärrpartiklar.

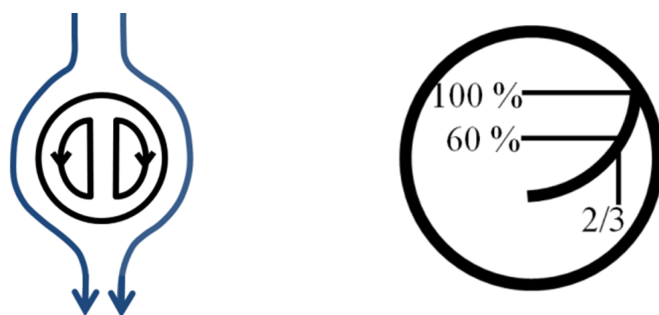
2 Teori

Ett mått för att beskriva vatteninnehållet i luft är relativ luftfuktighet, vilket anges i procent och är andelen av vattenånga i luften jämfört med den maximala andelen vattenånga då luften är mättad. Genom att bubbla torr luft genom en vattenpelare kan man öka dess relativa luftfuktighet.

Anledningen till att man vill öka den relativa luftfuktigheten är att statisk elektricitet lättare bildas om luften är torr. Statisk elektricitet bildas när material gnids mot varandra, då förflyttas elektroner från den ena ytan till den andra och laddningar bildas (Kurtus 2009). Den statiska elektriciteten medför att många av de mindre partiklarna i testanordningen fastnar på väggarna istället för att samlas upp av filtret. Om luft med högre relativ luftfuktighet används istället så kommer vattenmolekyler sätta sig på ytorna och motverka bildandet av statisk elektricitet. Luften som erhålls från tryckluftsystemet är helt torr, därav kommer behovet att befukta luften innan den sprutas in i testanordningen.

För att beräkna en ungefärlig höjd på vattenpelaren som krävs för att få en viss relativ fuktighet måste åtskilliga förenklingar och antaganden göras (för beräkningar se bilaga A):

- Luftbubblorna är helt sfäriska och har en konstant diameter på 1 cm genom hela vattenpelaren.
- Luften i bubblorna står stilla vilket medför att vattenmolekylerna endast transporteras genom diffusion och ej genom den egentliga konvektionen som sker (se figur 1).
- Om endast diffusion gäller kommer bubblan ha en koncentrationsgradient inom sig. Antar därför att tillräcklig mängd vatten för att få 60% relativ luftfuktighet har transporterats in i bubblan då det är 60% relativ luftfuktighet vid två tredjedelar av bubblans radie mätt inifrån (se figur 1).
- Temperaturen är 15°C.



Figur 1: Bilden till vänster visar hur strömningen ser ut i verkligheten. Detta tas ej hänsyn till utan beräkningarna baseras på diffusion med antagen koncentrationsgradient som visas i bilden till höger.

Med hjälp av dessa antaganden kan tiden räknas ut som bubblan måste vara i vattnet för att den önskade relativa luftfuktigheten på 60% skall uppnås. Detta görs med hjälp av ett "koncentrations-tids diagram" (Welty et al. 2008). Sedan beräknas bubblans terminalhastighet i vattnet med hjälp av en kraftbalans där hänsyn tas till gravitationen, lyftkraften samt formmotstånd. När hastighet och tid är kända kan höjden på vattenpelaren enkelt beräknas.

3 Material och metod

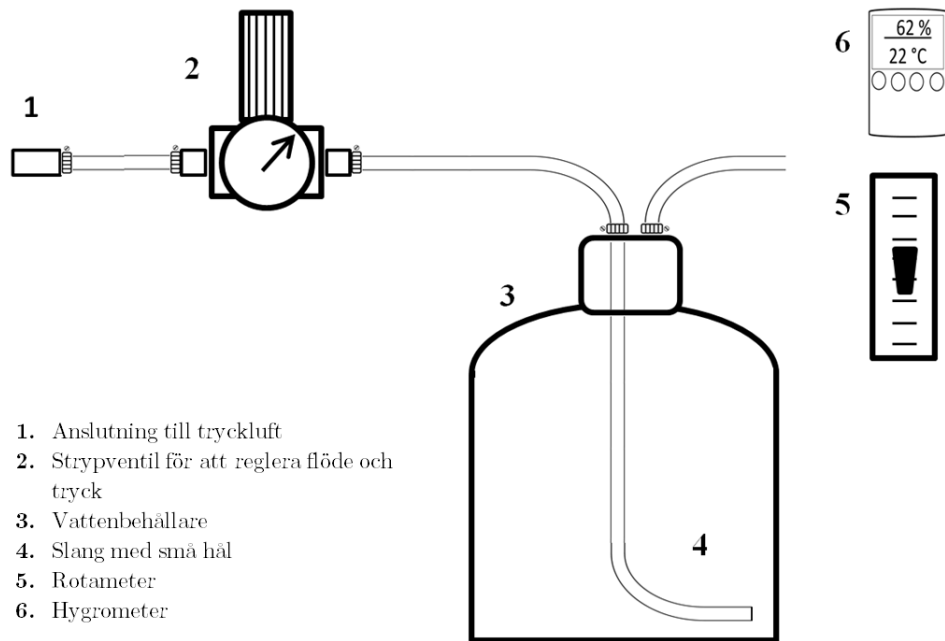
Försökupställningen som användes illustreras i figur 2. Testanordningen kopplas in till tryckluftsystemet och luften som erhålls går vidare till en strypventil som sänker trycket på luften och reglerar flödet. Luften bubblas sedan genom en vattenpelare i vattenbehållaren. Därefter går luften ut antingen till en rotameter för att bestämma flödet eller till en hygrometer för att bestämma luftfuktigheten.

Vatten fyll på i vattenbehållaren så att vattenpelaren blir 4, 6, 7,5, 12 eller 16 cm hög. För varje höjd utförs sedan följande procedur. Rotametern ansluts till utblåset och tryckluften vrids på. Sedan justeras flödet till 15 l/min med hjälp av strypventilen. Rotametern kopplas loss och hygrometern ansluts. Efter två minuter då värdet på hygrometern stabiliserats noteras den relativa luftfuktigheten. Mellan varje test nollställs hygrometern genom att blåsa torr tryckluft på den.

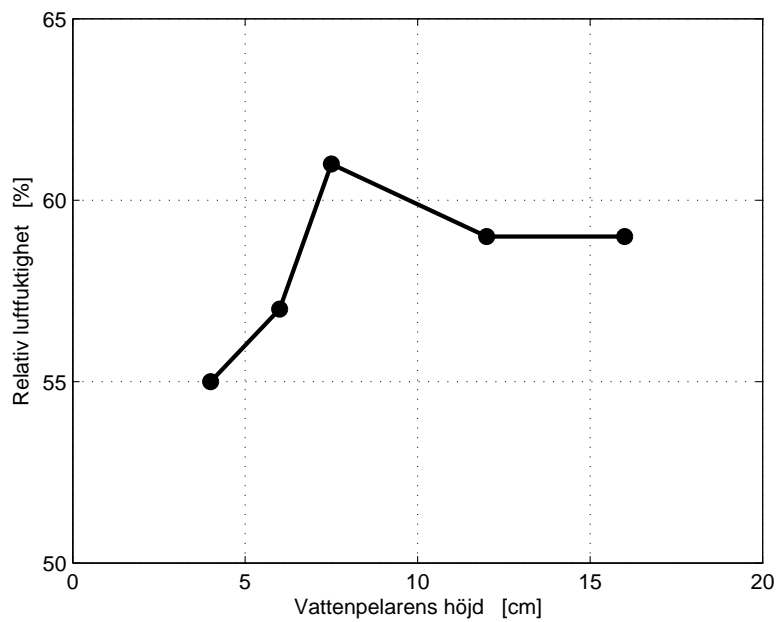
4 Resultat

Beräkningarna som gjordes innan experimentet för att uppskatta vattenpelarens höjd resulterade i en höjd på 7,5 cm.

I figur 3 nedan visas resultatet från experimentet i form av ett diagram, som beskriver utluftens relativa luftfuktighet som en funktion av vattenpelarens höjd.



Figur 2: Schematisk bild över försökupställningen med dess olika komponenter.



Figur 3: Diagrammet beskriver hur vattenpelarens höjd påverkade den relativa luftfuktigheten.

5 Diskussion

En högre vattenpelare borde resultera i en högre relativ luftfuktighet. Detta påstående stämmer för låga höjder som kan observeras i figur 3 men när den relativa luftfuktigheten når cirka 60% verkar ytterligare ökning av höjden inte leda till högre relativ luftfuktighet. Orsaken till detta resultat kan bero på att hygrometern har en osäkerhet på $\pm 5\%$. En annan möjlighet är att det finns ett tröskelvärde runt 60% relativ luftfuktighet där det sedan blir mycket svårare att tillföra vatten till luften.

Oavsett hur dessa mekanismer fungerar exakt så kan man dra slutsatsen att denna testanordning uppfyller kravet på att kunna befukta luften till en relativ luftfuktighet på 60%. Därför kan arbetet med att beställa in delar för att bygga en identisk befuktningsanordning påbörjas.

A Beräkning av vattenpelarens höjd

Vid gränsskiktet mellan luft och vatten är vattnets partialtryck lika med mättnadstrycket för vatten det vill säga den relativa luftfuktigheten är 100%. För att lösa uppgiften med hjälp av "koncentrations-tids diagram" måste koncentrationen av vattenångan i luften beräknas vid både 60% och 100% relativ luftfuktighet. Värden på vatteninnehåll och densitet hämtas därför ur Mollierdiagram. Dessa används för att beräkna koncentration vid ytan (C_{AS}) och koncentrationen vid två tredjedelar av radien (C_A). Koncentrationen av vatten från början (C_{A0}) är noll eftersom helt torr luft användes.

Koncentration vid ytan ($\phi=100\%$):

$$C_{AS} = \text{Vatteninnehåll} \left[\frac{\text{kg vatten}}{\text{kg torr luft}} \right] \cdot \text{Densitet torr luft} \left[\frac{\text{kg torr luft}}{\text{m}^3 \text{ fuktig luft}} \right] \\ = 0,0107 \cdot 1,201 = 0,01285 \text{ kg/m}^3 \quad (1)$$

Koncentration vid två tredjedelar av radien ($\phi=60\%$):

$$C_A = \text{Vatteninnehåll} \left[\frac{\text{kg vatten}}{\text{kg torr luft}} \right] \cdot \text{Densitet torr luft} \left[\frac{\text{kg torr luft}}{\text{m}^3 \text{ fuktig luft}} \right] \\ = 0,0063 \cdot 1,215 = 0,00765 \text{ kg/m}^3 \quad (2)$$

Koncentrationerna används för att räkna ut den utförda koncentrationsändringen som definieras nedan (Welty et al. 2008):

$$Y = \frac{C_{AS} - C_A}{C_{AS} - C_{A0}} = \frac{0,01285 - 0,00765}{0,01285 - 0} = 0,40467 \quad (3)$$

Den relativa positionen måste också beräknas och den är en funktion av avståndet från mittpunkten (x) och den karaktäristiska längden (x_1) som i vårt fall är radien.

$$n = \frac{x}{x_1} = \frac{\frac{2}{3}r}{r} = \frac{2}{3} \quad (4)$$

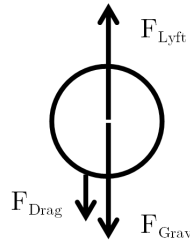
Den tredje och sista parametern som behövs är det relativa motståndet. Där D_{AB} är diffusionskoefficienten och k_c är den konvektiva massöverföringskoefficienten.

$$m = \frac{D_{AB}t}{x_1^2} \approx 0 \text{ (I processer där diffusion styr transporten)} \quad (5)$$

Med hjälp av dessa tre parametrar kan den relativa tiden (X_D) utläsas ur koncentrations-tidsdiagrammet (Welty et al. 2008). Denna används för att räkna ut tiden som bubblan måste vara i vattnet med ekvationen nedan:

$$t = \frac{X_D x_1^2}{D_{AB}} = \frac{0,125 \cdot 0,005^2}{2,37 \cdot 10^{-5}} = 0,1319 \text{ s} \quad (6)$$

För att kunna räkna ut höjden på vattenpelaren måste även hastigheten med vilken bubblan stiger i vattnet vara känd. Efter att bubblan släppts ut i vattnet kommer den snabbt att nå sin konstanta terminalhastighet. Denna kan erhållas genom en kraftbalans över bubblan.



Figur 4: Figuren visar vilka krafter som verkar på bubblan och dess riktningar. Dragkraften och gravitationskraften verkar nedåt och lyftkraften uppåt.

$$F_G + F_D = F_L \quad (7)$$

$$F_G = mg = \frac{\pi}{6} \rho_l d^3 g \quad (8)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_v v^2 = \frac{\pi}{8} C_D d^2 \rho_v v^2 \quad (9)$$

$$F_L = \rho_v V_p g = \frac{\pi}{6} \rho_v d^3 g \quad (10)$$

I ekvation (7) substituera krafterna med ekvation (8), (9) respektive (10) och lös ut hastigheten. Resultatet blir följande uttryck:

$$v = \sqrt{\frac{4dg(\rho_v - \rho_l)}{3C_D\rho_v}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001 \cdot 9,82 \cdot (998,95 - 1,22)}{3 \cdot 0,4 \cdot 998,95}} = 0,5718 \text{ m/s} \quad (11)$$

Kontrollera gissat värde på C_D genom att beräkna Reynoldstalet.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} = \frac{998,95 \cdot 0,5718 \cdot 0,01}{1187 \cdot 10^{-6}} = 4812 \quad (12)$$

Detta Reynoldstal ger ett C_D på 0,4 för en sfär (Welty et al. 2008), alltså var gissningen tillräckligt bra. När tiden som bubblan måste vara i vattnet och dess hastighet är kända kan höjden på vattenpelaren enkelt beräknas genom:

$$s = vt = 0,5718 \cdot 0,1319 = 0,0754 \text{ m} \quad (13)$$

Svar: höjden blir 7,5 cm!

Referenser

Kurtus, R. (2009), 'Basic of Static Electricity'.

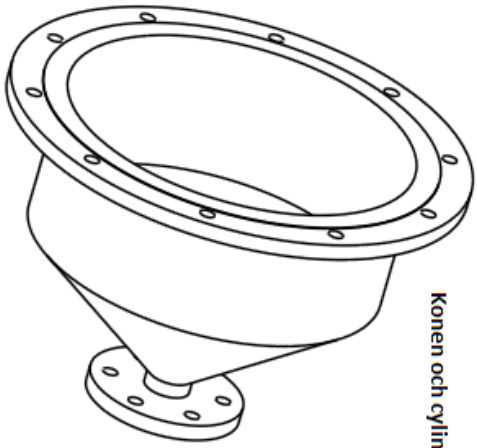
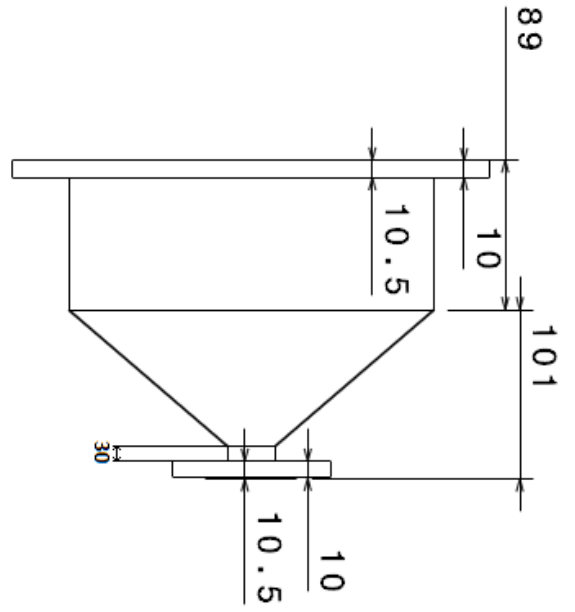
URL: <http://www.school-for-champions.com/science/static.htm>

Welty, J., Wicks, C., Wilson, R. & Rorrer, G. (2008), *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 5th edn, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

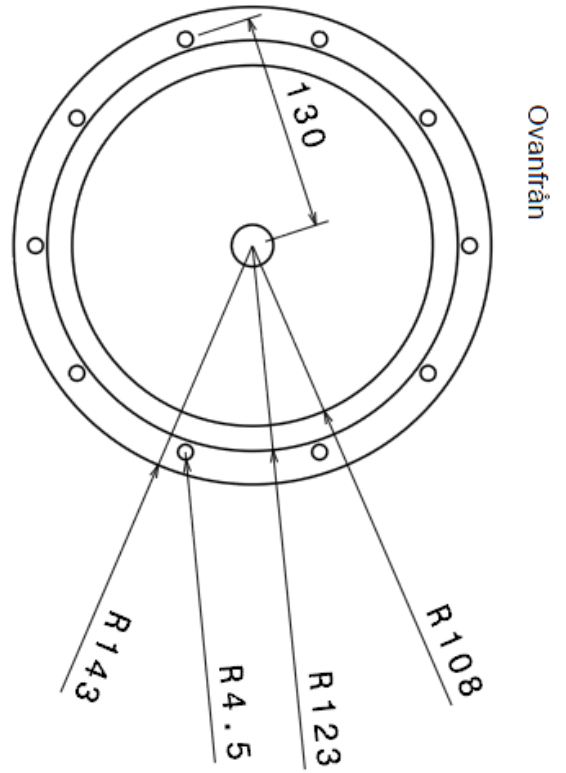
Bilaga G

Ritningar

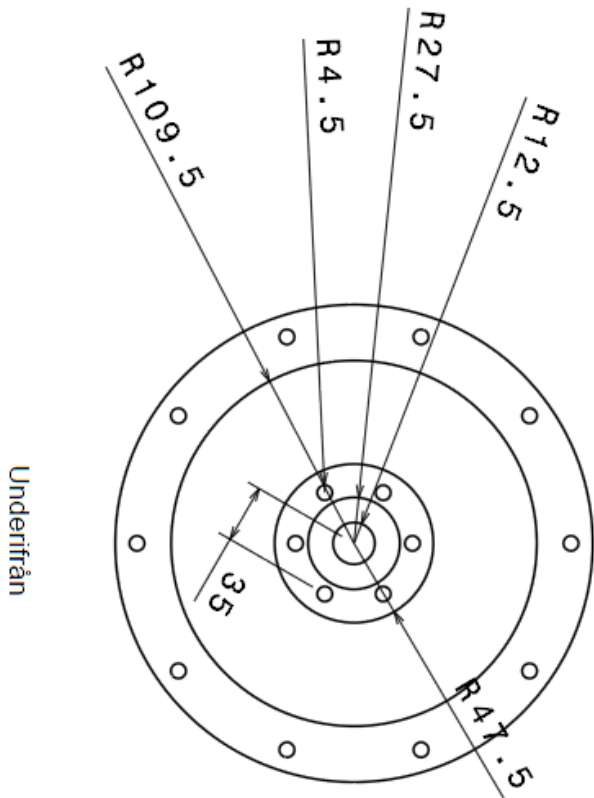
Cylinderkon övre



Konen och cylinderna har en tjocklek=1.5

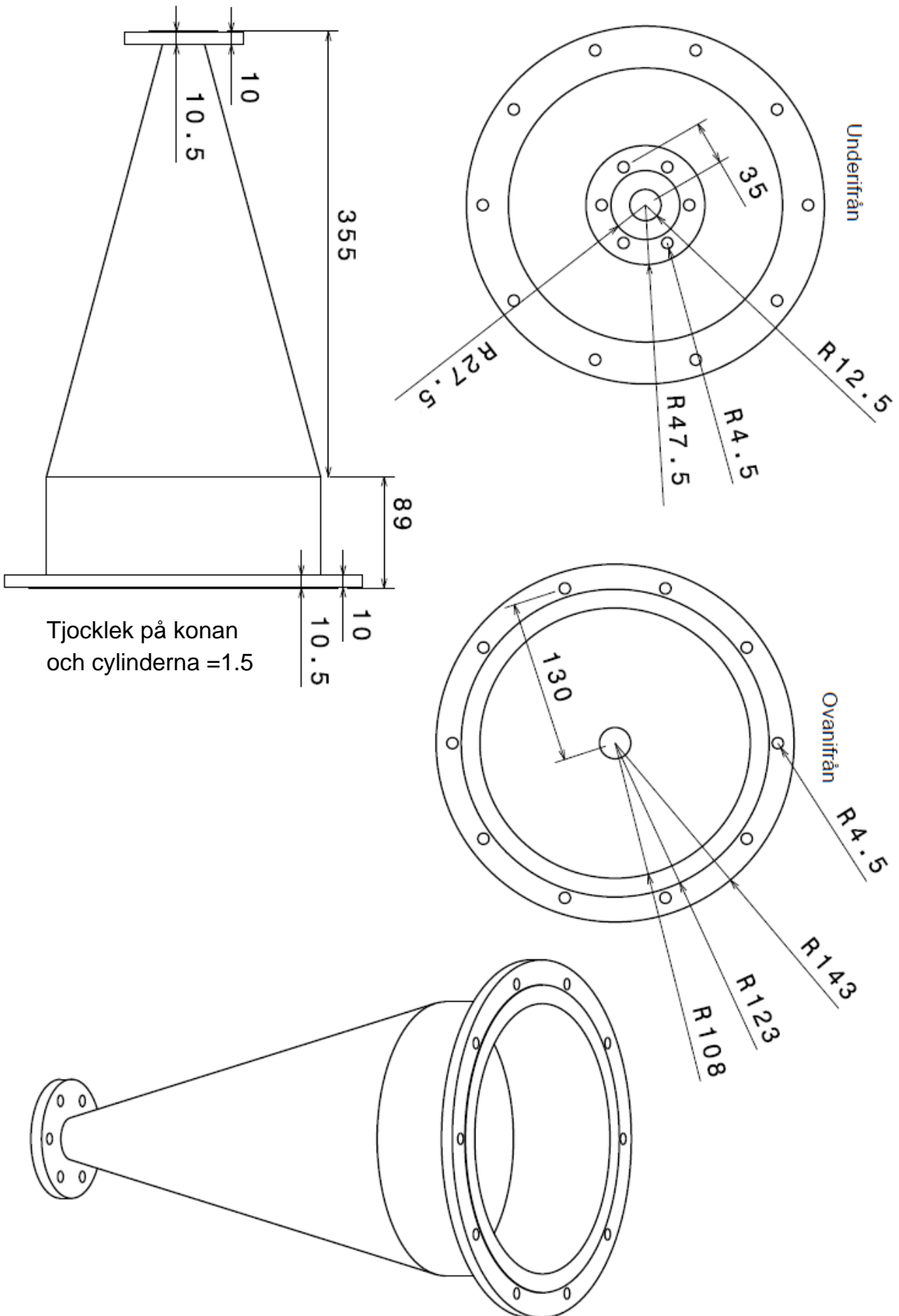


Ovanifrån

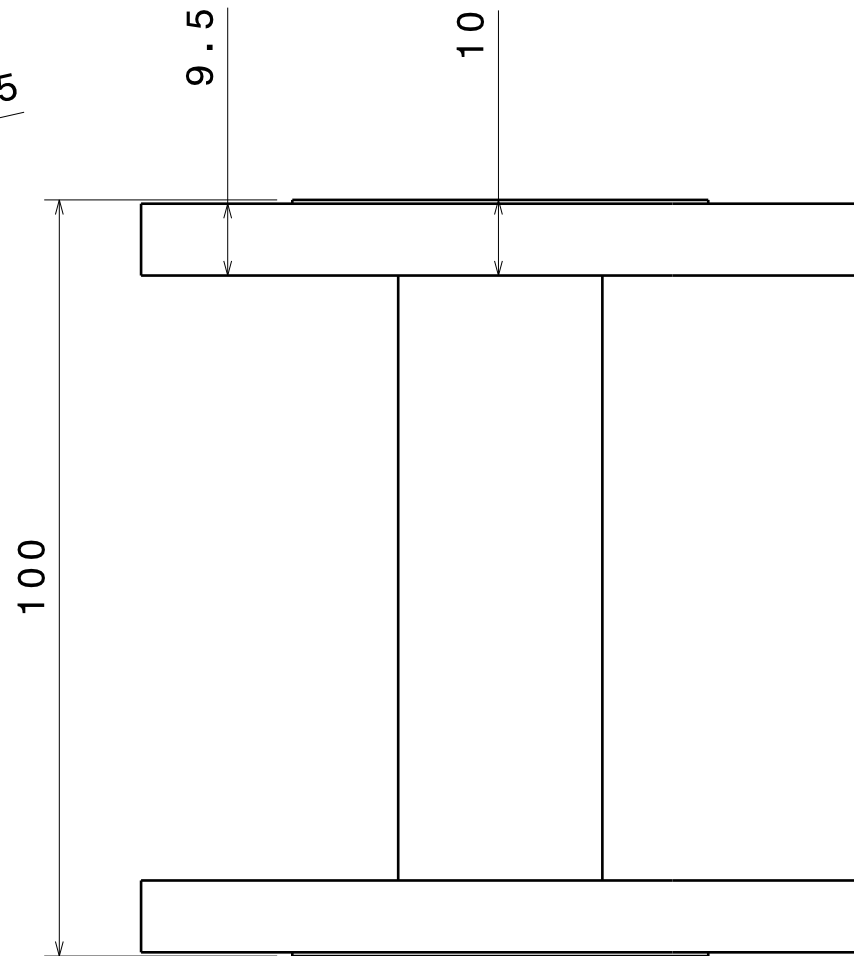
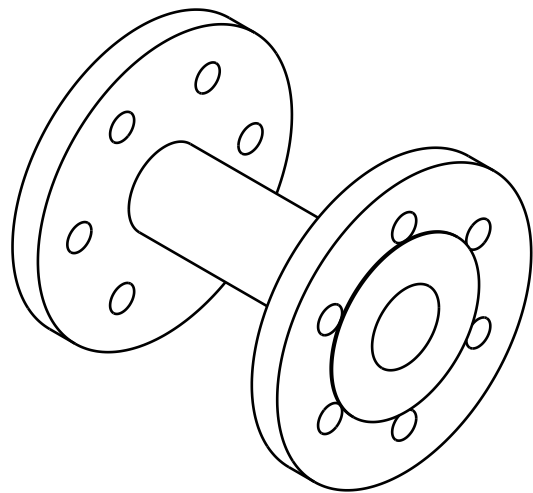
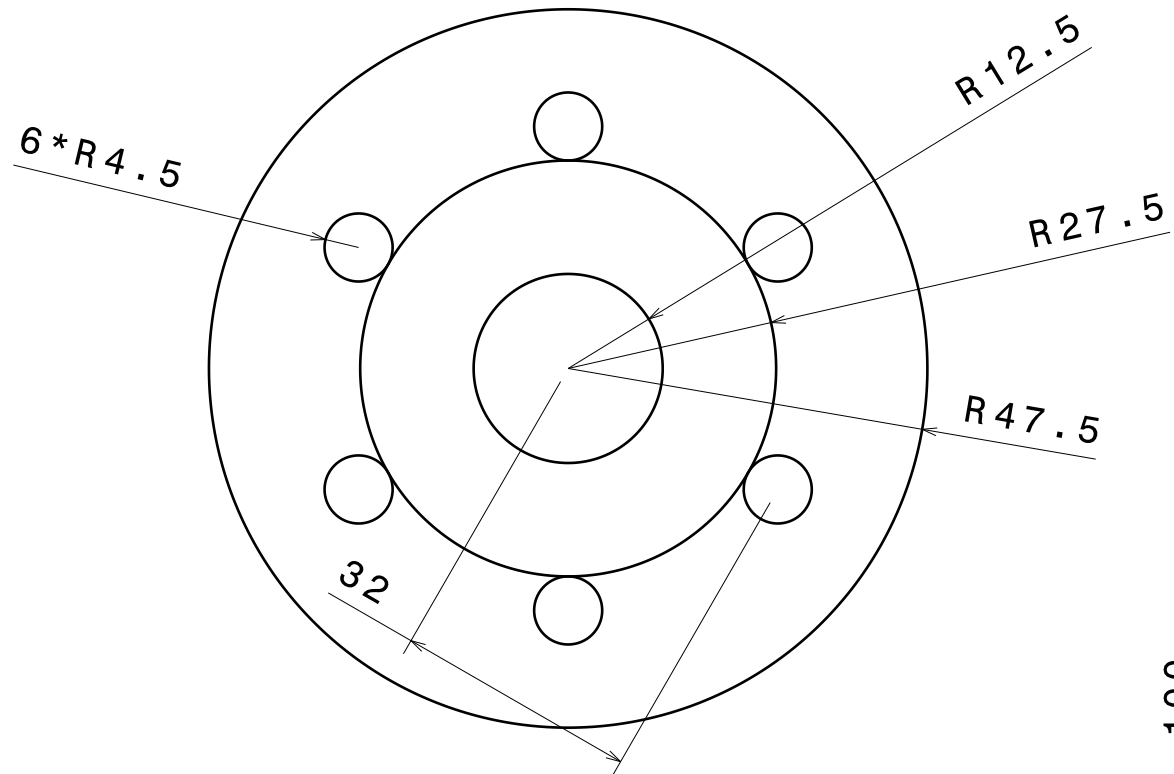


Underifrån

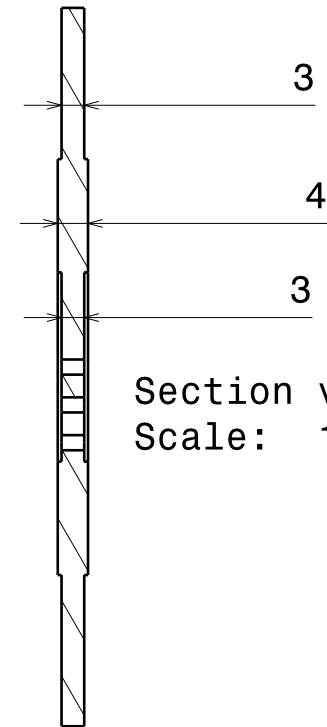
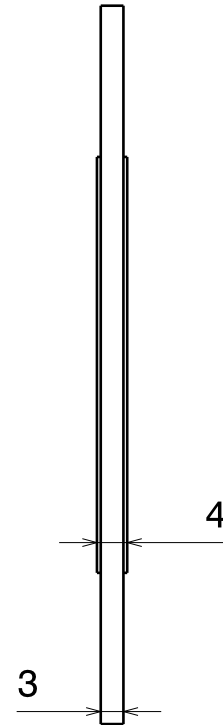
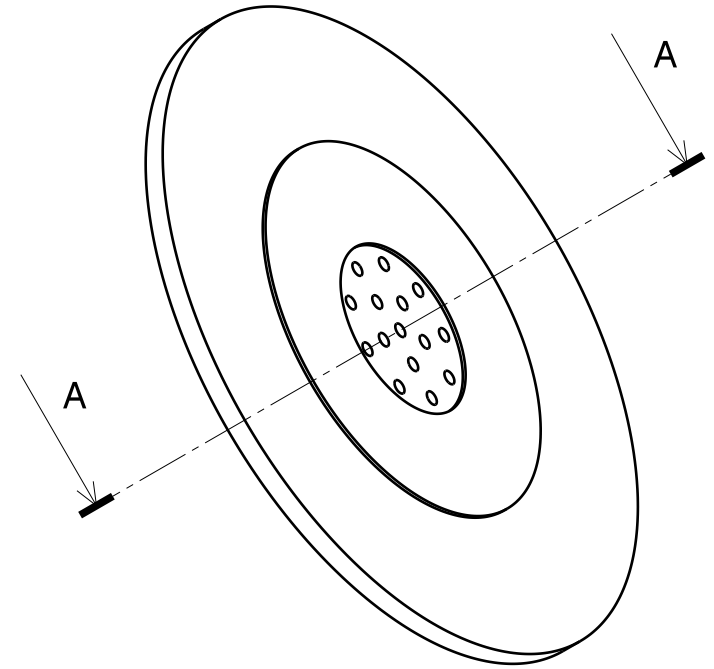
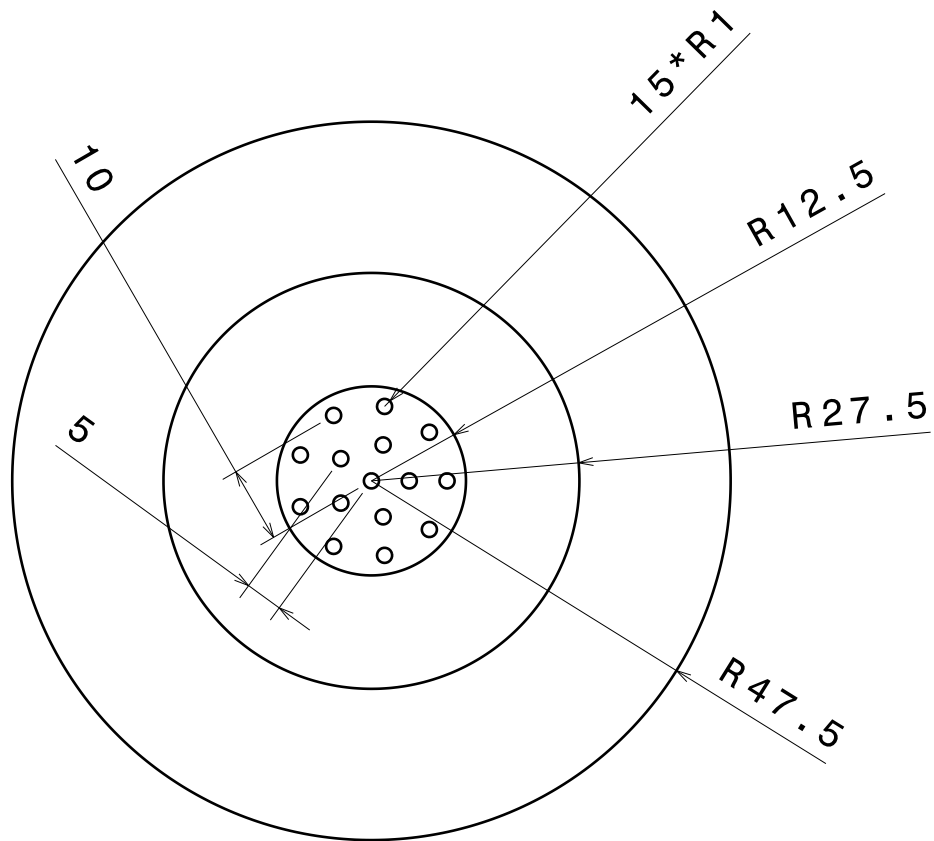
Cylinderkon undre



Fluidiserande bädd

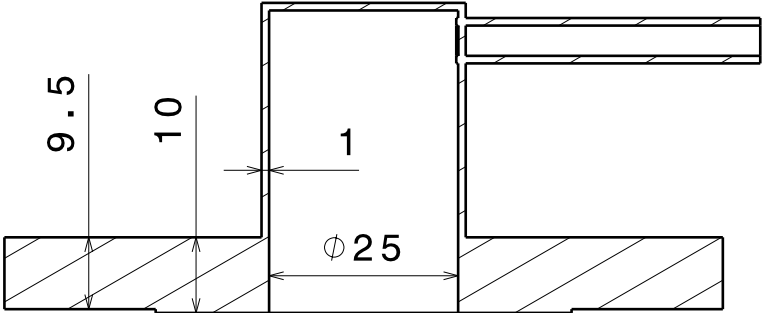
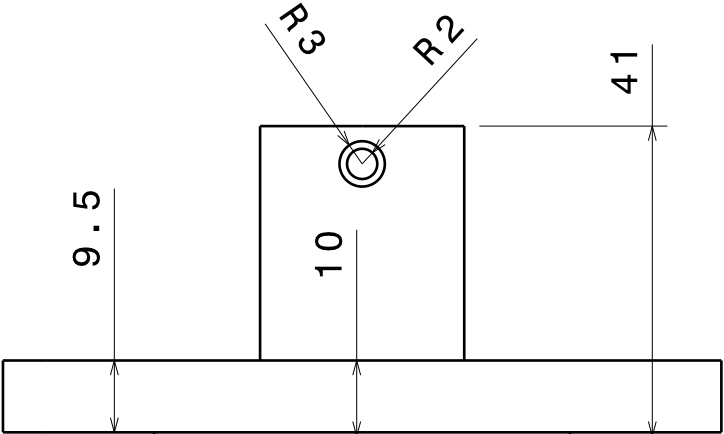


Fluidiseringsplatta

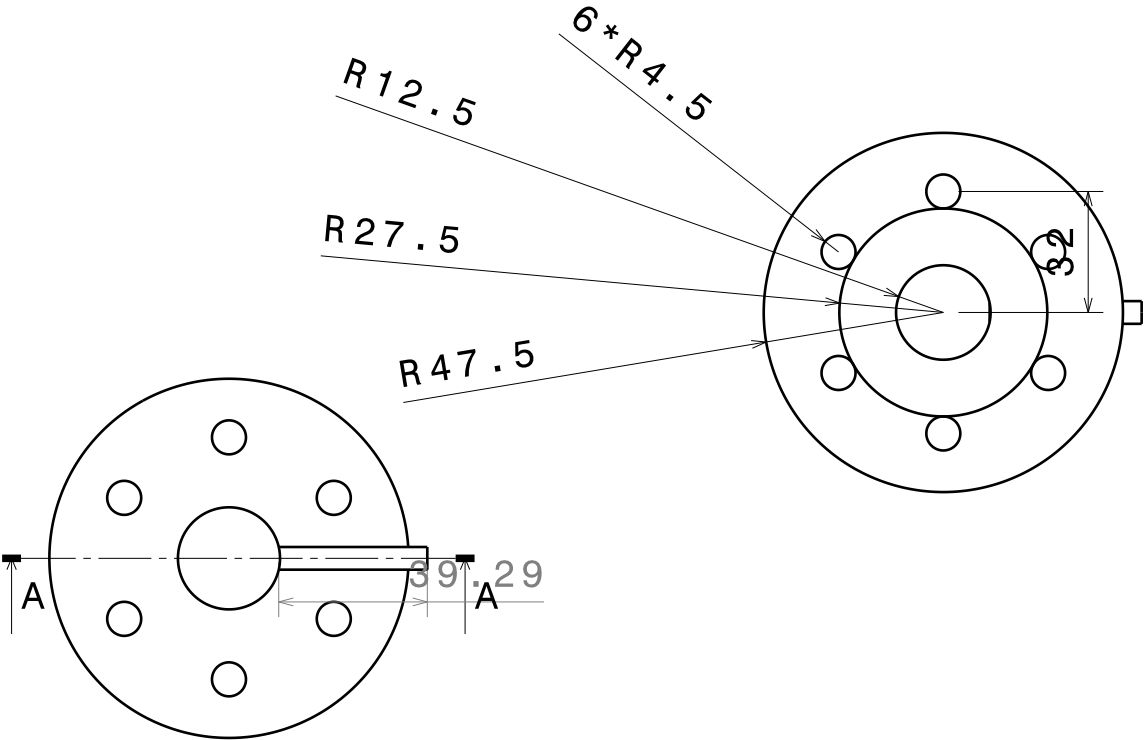
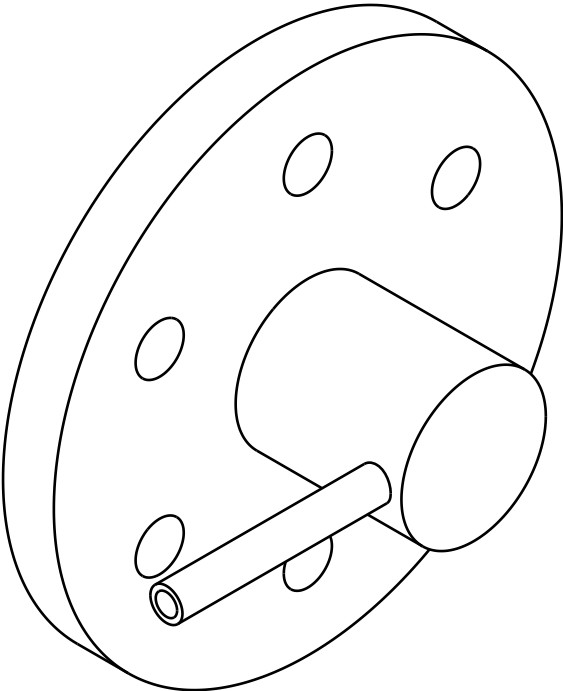


Section view A-A
Scale: 1:1

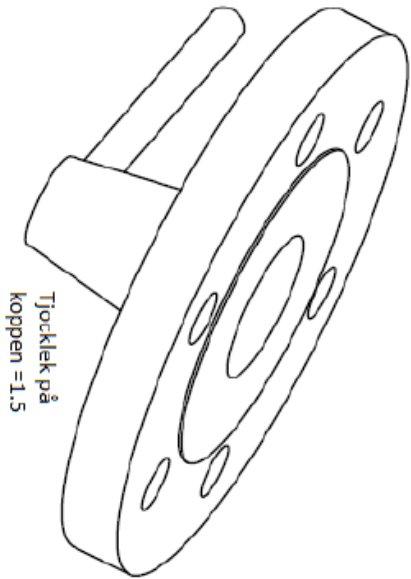
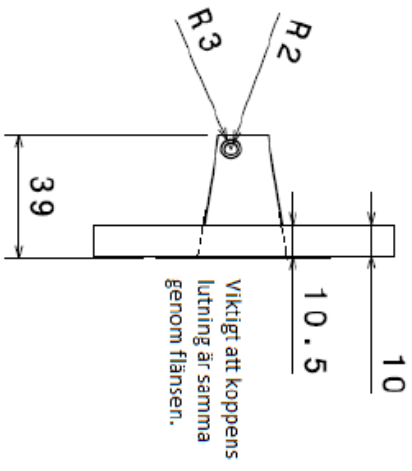
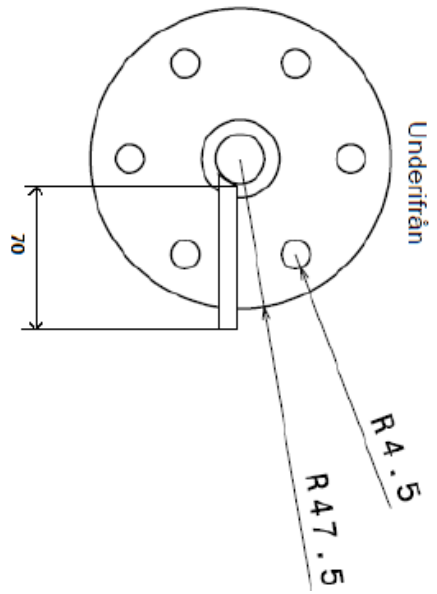
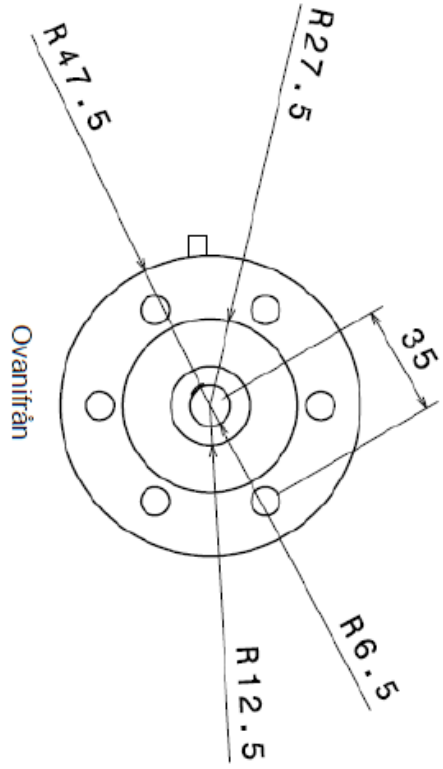
Fluidkopp



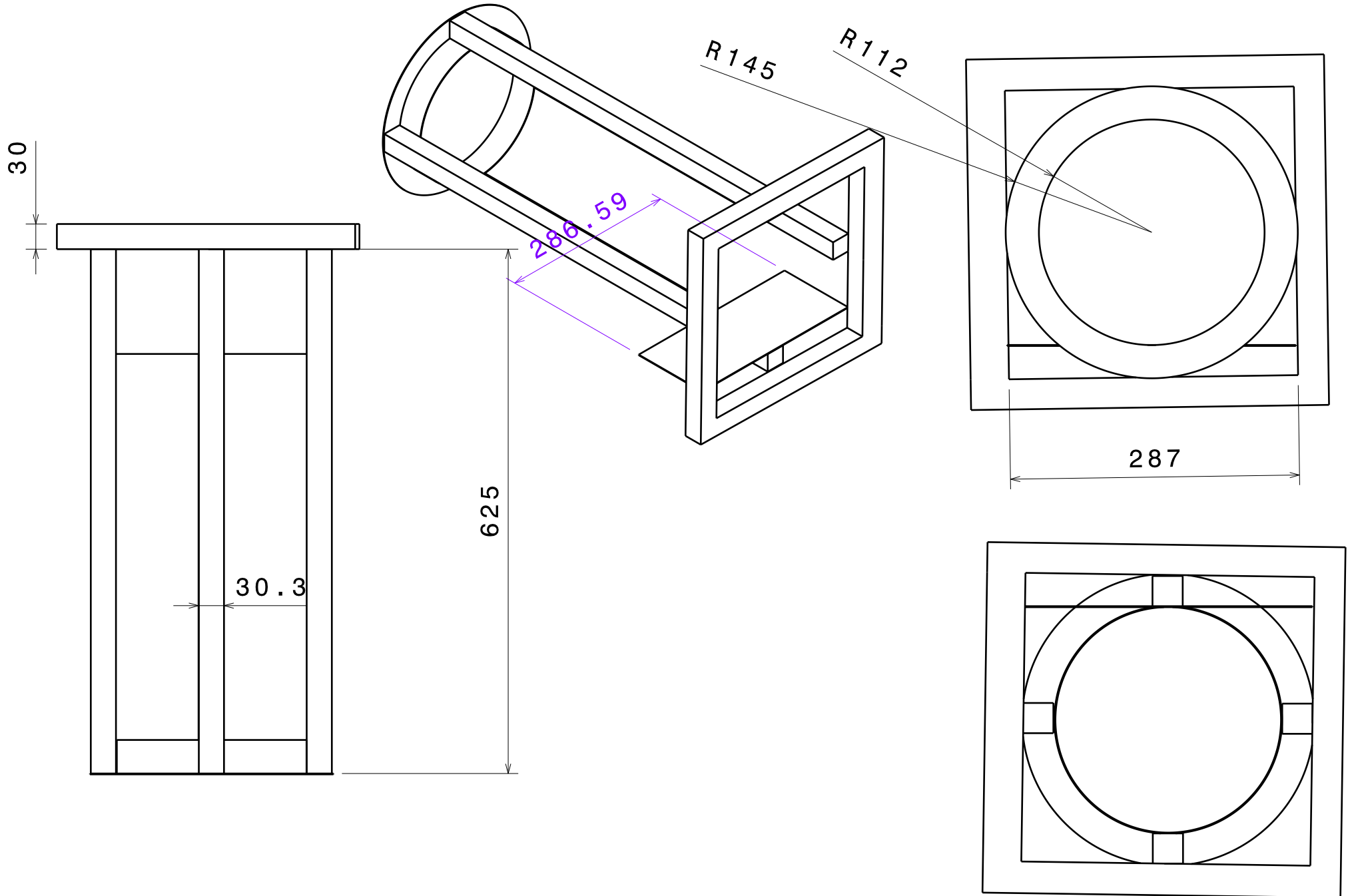
Section view A-A
Scale: 1:1



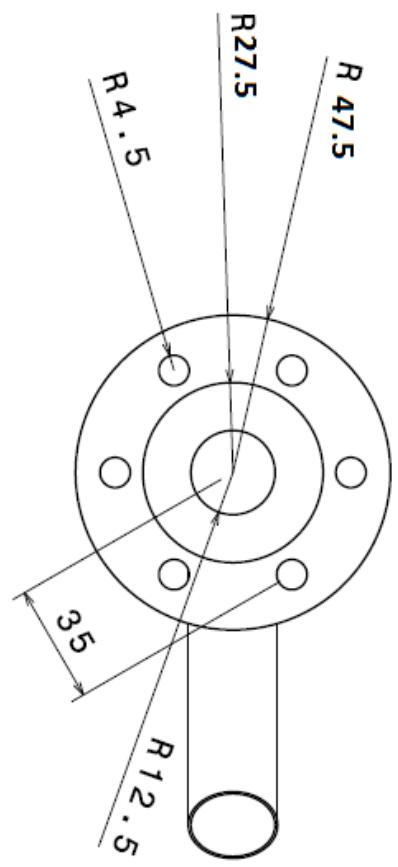
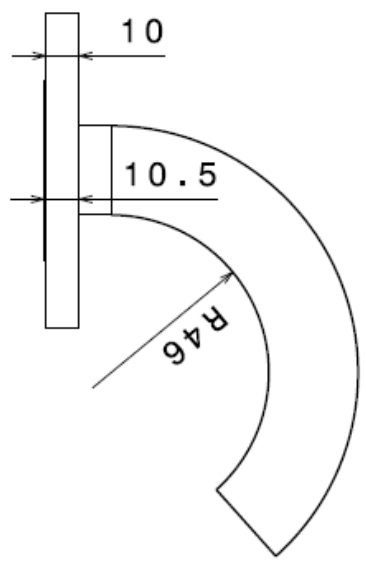
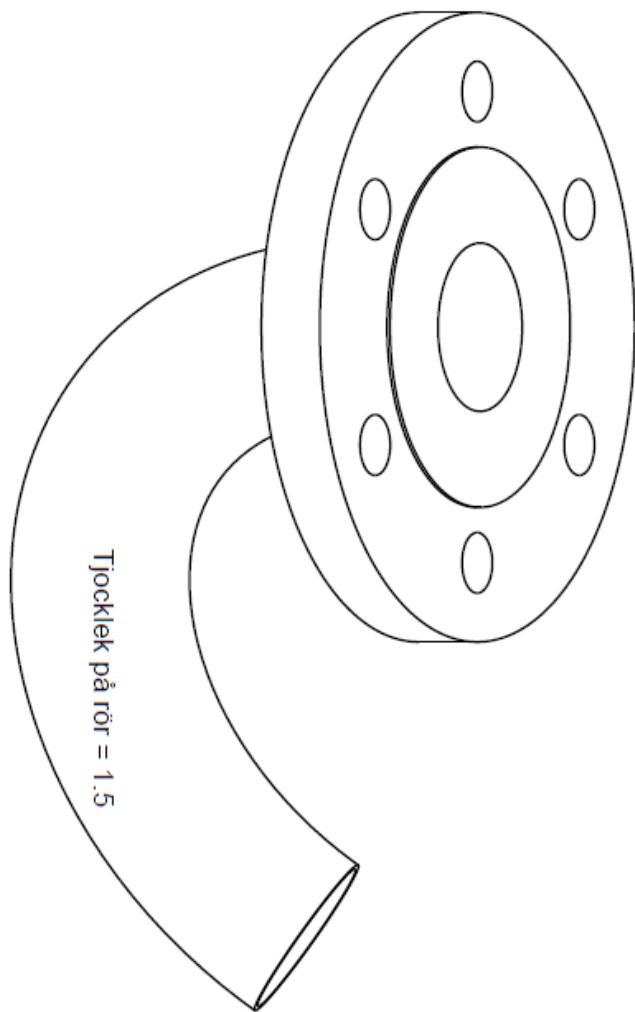
Kopp



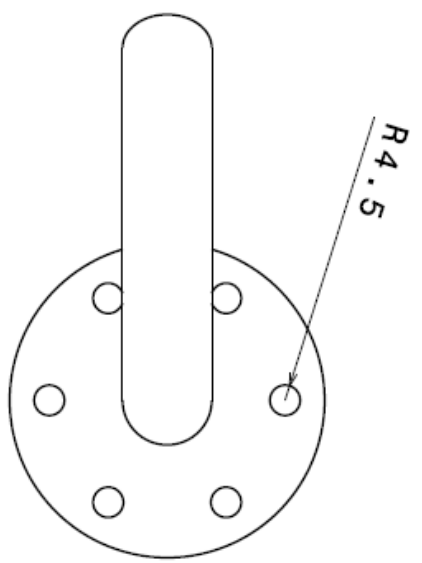
Ställning



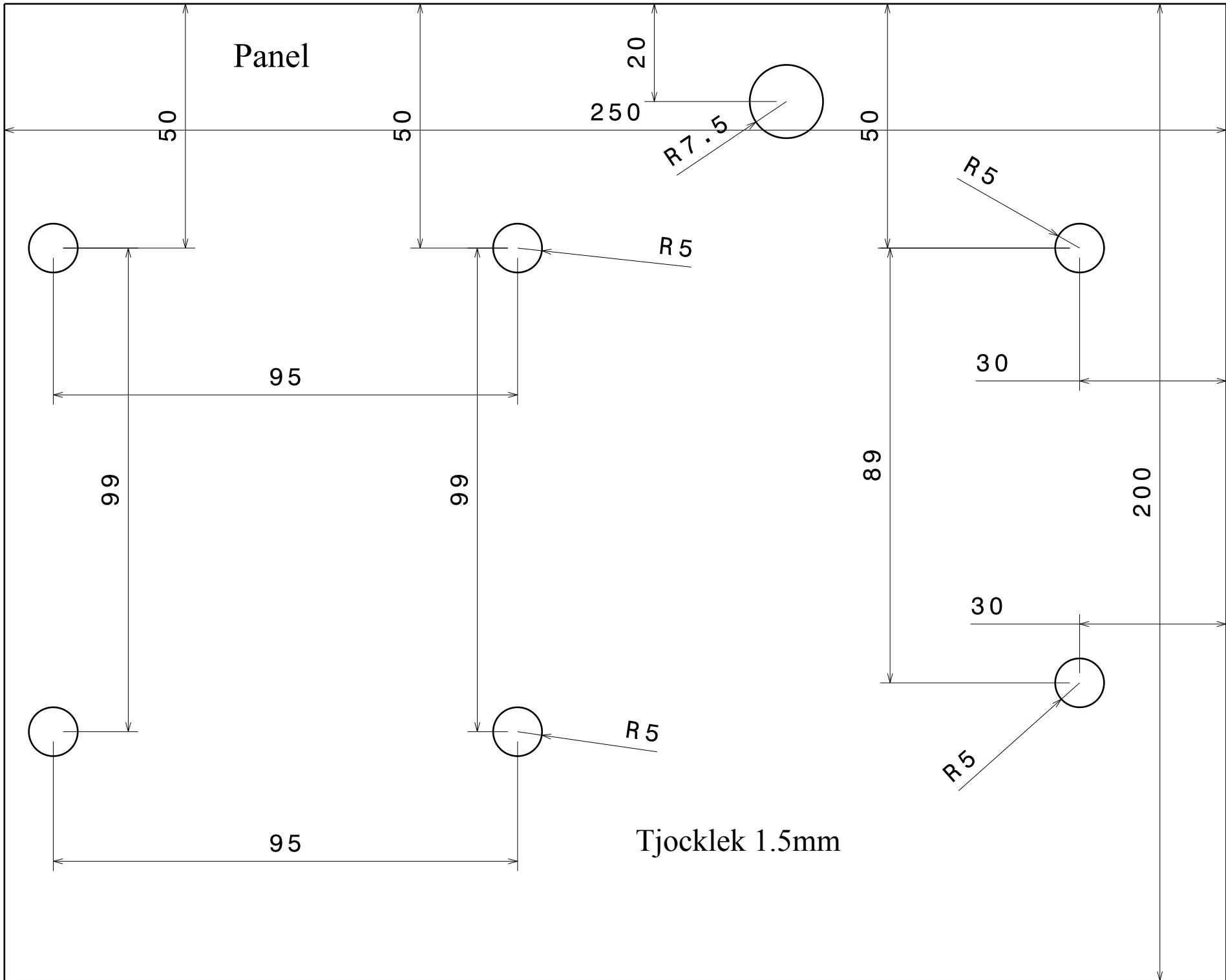
Topp



Underifrån



Ovanifrån



Bilaga H

Beräkningar

1 Beräkningar

1.1 Fluidiseringsrör

För att beräkna vilket flöde som krävs för att fluidisera en viss partikelbädd används följande ekvation (Kunii & Levenspiel 1991):

$$u_{mf} = \frac{d_{\text{Partikel}}^2 \cdot (\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot g \cdot \varepsilon_{mf}^3 \cdot \Phi^2}{150 \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot (1 - \varepsilon_{mf})} \quad (1)$$

Där ε_{mf} är bäddporositeten vid fluidisering och Φ sfärisiteten hos partiklarna. Index mf står för *minsta fluidisering*, det vill säga minimumkravet för fluidisering. För att vara säker på att fluidisering skall ske i röret är det trots beräkningar önskvärt att lufthastigheten genom fluidiseringsröret skall vara cirka tio gånger så hög som u_{mf} . För en känd partikeldiameter ger ekvation (1) vetskap om vilket luftflöde som krävs för att erhålla fluidisering av bädden.

Partiklar kommer inte bara att fluidiseras utan även ryckas med upp ur bädden. Terminalhastigheten för en viss partikelstorlek beräknas enligt:

$$u_{\text{Terminal}} = u^* \cdot \left(\frac{\rho_{\text{Luft}}}{\mu_{\text{Luft}} \cdot (\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot g} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (2)$$

där

$$u^* = \left(\frac{18}{d_s^2} + \frac{2.335 - 1.744 \cdot \Phi}{\sqrt{d_s}} \right)^{-1}, \quad 0.5 < \Phi < 1.0 \quad (3)$$

$$d_s = \left(\frac{g \cdot d_{\text{Partikel}}^3 \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot (\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Luft}})}{\mu_{\text{Luft}}^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

Att utifrån ett givet flöde beräkna vilken partikelstorlek som fluidiseras respektive dras med upp ur bädden beräknas genom att bryta ut d_{Partikel} ur ekvation (1) respektive (4),(3) och (2). För att erhålla en god fluidisering utan så kallade "slugs" är ett krav att tryckfallet över den perforerade plattan skall vara tillräckligt stort. Det kan antas att tryckfallet över plattan ska vara tre gånger så stort som tryckfallet över bädden (Kunii & Levenspiel 1991). Tryckfallet över bädden beräknas enligt:

$$\Delta P_{\text{Bädd}} = (1 - \varepsilon_{mf}) \cdot (\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Luft}}) \cdot g \cdot h_{mf} \quad (5)$$

Där den fluidiserade bäddhöjden, h_{mf} , antas vara den stillastående bäddens höjd med en expansion av 20% (Kunii & Levenspiel 1991). Tryckfallet över plattan blir således:

$$\Delta P_{\text{Platta}} = 3 \cdot \Delta P_{\text{Bädd}} \quad (6)$$

Med detta krav på tryckfallet över plattan kan antalet hål och av vilken storlek som krävs beräknas. Detta görs enligt (Kunii & Levenspiel 1991):

$$N_{\text{Hål}} = \frac{4 \cdot u_0}{\pi \cdot d_{\text{Hål}}^2 \cdot u_{\text{my}}} \quad (7)$$

Där

$$u_{\text{my}} = C_d \cdot \left(\frac{2 \cdot \Delta P_{\text{Platta}}}{\rho_{\text{Luft}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

C_d är ett tabellvärde som erhålls genom att först ta reda på Reynoldstalet.

$$Re_{\text{Luft}} = \frac{d_{\text{Rör}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot u_0}{\mu_{\text{Luft}}} \quad (9)$$

Där u_0 är lufthastigheten ovanför bädden och kan alltså sättas till minsta fluidiseringshastigheten u_{mf} för att precis uppnå fluidisering.

Med ett flöde av 20 L/min för en bädd av sfäriska partiklar med bulkdensitet av 2.6 g/cm^3 och partikeldiameter av $150 \mu\text{m}$ med en bäddporositet av 0.40 kommer $u_0 > 10 \cdot u_{\text{mf}}$. För en provvikt av 15 g och en håldiameter av 1 mm kommer totalt 16 hål vara nödvändigt. Gällande för ett fluidiseringsrör med innerdiametern 25 mm.

1.2 Gravitationsseparator

För att räkna på gravitationsseparatorn har några antaganden och förenklingar gjorts. Dessa är att

- luftflödet antas vara lika stort i alla punkter av ett tvärsnitt vid samma höjd.
- partiklarna är så små att Stokes lag kan användas för dragkraften.
- inga verkande väggeffekter.

De verkande krafterna på en fallande/stigande partikel är:

$$m_{\text{Partikel}} \cdot a_{\text{Partikel}} = F_{\text{Gravitation}} - F_{\text{Lyftkraft}} - F_{\text{Dragkraft}} \quad (10)$$

där:

$$F_{\text{Gravitation}} = m_{\text{Partikel}} \cdot g \quad (11)$$

$$F_{\text{Lyftkraft}} = V_{\text{Partikel}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot g \quad (12)$$

$$F_{\text{Dragkraft}} = 6 \cdot \pi \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot r_{\text{Partikel}} \cdot v_{\text{Relativ}} \quad (13)$$

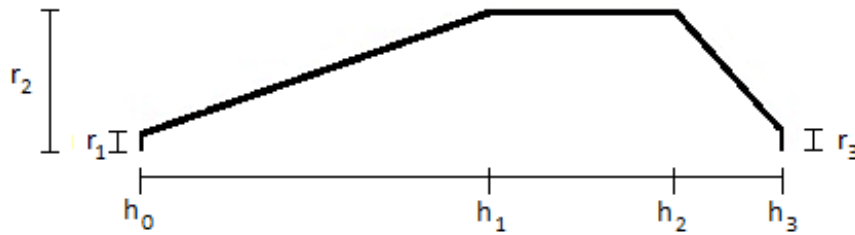
För att lösa kraftbalansen i ekvation (10) krävs det att den relativa hastigheten mellan partikeln och luftenflödet är känd. Det vill säga:

$$v_{\text{Relativ}} = v_{\text{Luft}} - v_{\text{Partikel}} \quad (14)$$

Lufthastigheten, v_{Luft} , kommer bero av höjden av gravitationsseparatorn eftersom dess tvärsnittsarea ändras med höjden och hastigheten beräknas enligt:

$$v_{\text{Luft}} = \frac{q_{\text{Luft}}}{A_{\text{Tvärsnitt}}} \quad (15)$$

För att ta fram hur hastigheten beror av höjden i gravitationsseparatorn behövs först en funktion som beskriver hur tvärsnittsarean beror av höjden. För att hitta denna funktion används geometriska samband. För gravitationsseparatorn utseende se figur 1.



Figur 1: "Liggande" gravitationsseparator

Med tanke på gravitationsseparatorns utseende delas den upp i tre delar. Första delen är en med höjden växande kon, andra delen är en cylinder med konstant radie och tredje delen är en med höjden avtagande kon. Tvärsnittsarean är alltså genom hela gravitationsseparatorn en cirkel och beräknas således:

$$A_{\text{Tvärsnitt}}(h) = \pi \cdot r(h)^2 \quad (16)$$

För första delen:

$$r(h) = \tan a \cdot (h - h_0) + r_1 \quad (17)$$

$$a = \arctan \frac{r_2 - r_1}{h_1 - h_0} \quad (18)$$

$$r(h) = \frac{r_1 - r_2}{h_1 - h_0} \cdot (h - h_0) + r_1 \quad (19)$$

$$A_{\text{Tvärsnitt}}(h) = \pi \cdot \left(\frac{r_2 - r_1}{h_1 - h_0} \cdot (h - h_0) + r_1 \right)^2 \quad (20)$$

För andra delen:

$$A_{\text{Tvärsnitt}}(h) = \pi \cdot r_2^2 \quad (21)$$

För tredje delen:

$$r(h) = \tan b \cdot (h_3 - h) + r_3 \quad (22)$$

$$b = \arctan \frac{r_2 - r_3}{h_3 - h_2} \quad (23)$$

$$A_{\text{Tvärsnitt}}(h) = \pi \cdot \left(\frac{r_2 - r_3}{h_3 - h_2} \cdot (h_3 - h) + r_3 \right)^2 \quad (24)$$

Hur lufthastigheten ändras med höjden av anläggningen kan nu tas fram enligt ekvation (15). Låter $h_0 = 0$:

$$v_{\text{Luft}}(h) = \begin{cases} q \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{r_2 - r_1}{h_1} \cdot h + r_1 \right)^2 \right]^{-1} & 0 < h < h_2 \\ q \cdot [\pi \cdot r_2^2]^{-1} & h_1 < h < h_2 \\ q \cdot \left[\pi \cdot \left(\frac{r_2 - r_3}{h_3 - h_2} \cdot (h_3 - h) + r_3 \right)^2 \right]^{-1} & h_2 < h < h_3 \end{cases} \quad (25)$$

För att lösa ekvation (14) krävs partikelhastigheten. Partikelhastigheten kommer variera med höjden av gravitationsseparatorn eftersom partikeln enligt ekvation (10) accelererar då den inte befinner sig i jämviktsläge. Partikelhastigheten kan beräknas enligt:

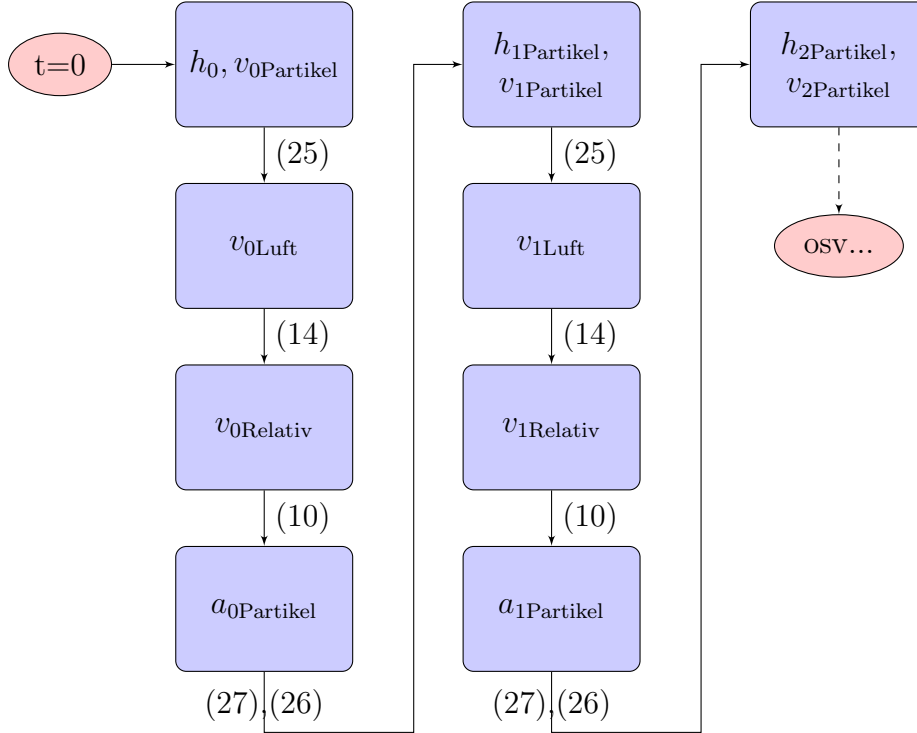
$$v_{\text{Partikel}}(t + \Delta t) = v_{\text{Partikel}}(t) + a_{\text{Partikel}} \cdot \Delta t \quad (26)$$

Partikelhastigheten kan alltså enligt ekvation (26) beräknas fram om dess hastighet ett tidssteg, Δt , tillbaka är känd. Partikeln antas befinna sig i vila vid start, det vill säga $v_{\text{Partikel}}(t = 0) = 0$. Genom att börja räkna från start kan alltså partikelhastigheten beräknas.

För att lösa ekvation (14) krävs även att lufthastigheten är känd. Lufthastigheten beräknas med (25) men för det krävs att höjden h är känd. Vid vilken höjd partikeln befinner sig beräknas enligt:

$$h_{\text{Partikel}}(t + \Delta t) = h_{\text{Partikel}}(t) + v_{\text{Partikel}} \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_{\text{Partikel}} \cdot (\Delta t)^2 \quad (27)$$

Kvar att ta fram för att kunna lösa ekvation (14) är accelerationen som verkar på partikeln, a_{Partikel} . Denna beräknas fram med ekvation (10). Detta kan verka problematiskt att lösa men då begynnelsevillkoret att partikeln är i vila innan $t=0$ gör systemet lösbart. Se flödesschema för lösningsgång.



Vid de antagna förhållandena ovan kommer partiklarna efter en tid att stabilisera sig på, eller oscillera kring, en viss höjd i gravitationsseparatorn. För att beräkna vilken partikelstorlek som stabiliserar sig vid vilken höjd sätts vänsterledet i ekvation (10) till noll. Den relativa hastigheten kommer att vara lika stor som lufthastigheten eftersom partikeln står stilla. Kraftbalansen blir således:

$$m_{\text{Partikel}} \cdot g - V_{\text{Partikel}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot g - 6 \cdot \pi \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot r_{\text{Partikel}} \cdot v_{\text{Luft}} = 0 \quad (28)$$

Genom att bryta ut v_{Luft} ur ekvation (28) kan stabiliseringshöjden för en viss partikelradie erhållas med (25).

$$v_{\text{Luft}} = \frac{m_{\text{Partikel}} \cdot g - V_{\text{Partikel}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot r_{\text{Partikel}}} \quad (29)$$

För en sfärisk partikel gäller att:

$$V_{\text{Partikel}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{Partikel}}^3 \quad (30)$$

och

$$m_{\text{Partikel}} = V_{\text{Partikel}} \cdot \rho_{\text{Partikel}} \quad (31)$$

(30) och (31) sätts in i (29) och följande erhålls:

$$v_{\text{Luft}} = \frac{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{Partikel}}^3 \cdot \rho_{\text{Partikel}} \cdot g - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{\text{Partikel}}^3 \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot g}{6 \cdot \pi \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot r_{\text{Partikel}}} \quad (32)$$

vilket förenklas till:

$$v_{\text{Luft}} = \frac{2 \cdot r_{\text{Partikel}}^2 \cdot g \cdot (\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Luft}})}{9 \cdot \mu_{\text{Luft}}} \quad (33)$$

Genom att istället bryta ut partikelradien, r_{Partikel} , ur ekvation (33) och låta v_{Luft} vara lufthastigheten vid gravitationsseparatorns vidaste del kan den partikelradie som stabiliseras där beräknas. Denna ekvation, (34), är intressant eftersom de partiklar med mindre radie än denna kommer att dras med av luftflödet genom hela gravitationsseparatorn. Detta eftersom hastigheten hos luftflödet är som lägst här.

$$r_{\text{Partikel, max}} = \sqrt{\frac{9 \cdot \mu_{\text{Luft}} \cdot v_{\text{Luft, min}}}{2 \cdot g \cdot (\rho_{\text{Partikel}} - \rho_{\text{Luft}})}} \quad (34)$$

Ekvation (34) kan således användas för att studera vilka partiklar som bör ryckas med om luftflödet ändras och ekvation (33) för vilket luftflöde som krävs för att skicka ut en viss partikelstorlek. För ett flöde av 20 L/min och för en partikeldensitet av 4,1 g/cm³ beräknas $r_{\text{Partikel, max}}$ till endast en storlek av 4,3 μm. Detta är dock för det idela fallet och ett troligare fall är att lufthastigheten inte är lika stor i alla punkter vid en viss höjd. Det tangentiella inflödet av luften till koppen kan mycket möjligt ge upphov till en snabbare luftströmning längs med gravitationsseparatorns väggar och därmed kunna dra med större partiklar ut än beräknat.

1.3 Tryckfall

I hela anläggningen kommer tryckfall att äga rum. Tryckfall över bädden har redan beräknats för den fluidiserade bädden då fluidiseringsröret används i ekvation (5). I befuktningsanläggningen kommer tryckfallet bero på höjden av den vattenpelare som luften skall bubbla igenom. Detta tryckfall beräknas enligt:

$$\Delta P_{\text{Befuktning}} = \rho_{\text{Vatten}} \cdot g \cdot h_{\text{Vattenpelare}} \quad (35)$$

Tryckfallet är alltså direkt proportionellt mot vattenpelarens höjd. För ett vattenpelarhöjd av 250 mm blir tryckfallet 0,025 bar.

Tryckförluster kommer även att ske i samtliga rör. För att beräkna tryckfallet i ett glatt rör används följande ekvation (Welty et. al 2008):

$$\Delta P_{\text{Rör}} = \frac{2 \cdot f_f \cdot L_{\text{Rör}} \cdot v_{\text{Luft}}^2 \cdot \rho_{\text{Luft}}}{d_{\text{Rör}}} \quad (36)$$

Där f_f löses ut med iteration ur:

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = 4.0 \cdot \log_{10} \left(Re \sqrt{f_f} \right) - 0.40 \quad (37)$$

Hastigheten beräknas enligt:

$$v = \frac{q}{A_{\text{Tvärsnitt}}} = \frac{4 \cdot q}{\pi \cdot d_{\text{Rör}}^2} \quad (38)$$

Nu kan följande uttryck erhållas:

$$\Delta P_{\text{Rör}} = \frac{32 \cdot f_f \cdot L_{\text{Rör}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot q^2}{\pi^2 \cdot d_{\text{Rör}}^5} \quad (39)$$

Tryckförlusten i rör är alltså proportionell mot $L \cdot d^{-5}$. För att minska tryckförlusterna bör alltså längden på röret kortas ner eller öka diametern hos röret. Det största tryckfallet kommer att ske över kapillärröret in till koppen som endast har en rördiameter av 1,5 mm. Samtliga rör och slangar ger vid ett flöde av 20 L/min upphov till ett tryckfall av 0,157 bar.

Tryckförluster i övergångar mellan olika rördiametrar och kopplingar beräknas enligt (Welty et. al 2008):

$$\Delta P_{\text{Kopplingar}} = \frac{K \cdot v_{\text{Luft}}^2 \cdot \rho_{\text{Luft}}}{2} \quad (40)$$

Den totala tryckförlusten i kopplingar är för ett flöde av 20 L/min och de rördiametrar som är i anordningen 0,095 bar.

Tryckfallet över filtret erhålls från diagramavläsning ur teknisk informaiton om filtret och avlästes till 0,080 bar (se Parker produktkatalog).

Tryckfallet i bädden beräknas med ekvation (5) till 0,004 bar. Det totala tryckfallet över hela anordningen summeras till 0,361 bar för det ideala fallet.

Bilaga I

Prislista

ALLA DELAR OCH PRISER



Cejn Nippel för koppling mellan tryckluftsslang och det centrala tryckluftssystemet.

Ahlsell 130789 1 st 44,36 SEK



Tryckluftsslang för koppling mellan det centrala tryckluftssystemet till tryckluftregulator, mellan regulatorn och plastflaska och mellan plastflaska till rotameter.

Ahlsell 25 m 712 SEK



Swagelok koppling för koppling mellan tryckluftregulator tryckluftsslagen.

Swagelok SS-12M0-1-4RS 2 st 389,94 SEK



Tryckluftregulator för justering av lufttryck.

Rexroth R480310582 1 st 609,85 SEK



Swagelok koppling för koppling mellan tryckluftsslang – plastflaska – tryckluftsslang.

Swagelok SS-12M0-61 2 st 653,78 SEK



Plastflaska för befuktning av luften som går in i anordningen.

Fischer Sci. 1130-5474 1 st 1005 SEK



Ändmutter för tryckluftsslang i plastflaskan.

Swagelok SS-12M0-C 1 st 107,67 SEK



Swagelok 8 mm koppling för koppling mellan tryckluftsslang och rotametern.

Swagelok SS-12M0-1-2 1 st 166,84 SEK



Rotameter för justering av luftflöde som går in i anordningen.

Kompauto KRF-4244-N0 1 st 2305 SEK



Swagelok 4 mm koppling för koppling mellan tryckluftsslang och rotametern.

Swagelok SS-6M0-1-2 1 st 64,99 SEK



4 mm Tryckluftsslang för koppling mellan Swagelok 4 mm kopplingen och Swagelok T - koppling.

Acandia 6/4 PTFE 5 m 20 SEK



Swagelok T – koppling för koppling mellan tryckluftsslang och rotametern.

Swagelok SS-6M0-3 1 st 215,34 SEK



Swagelok Plugg till T – koppling.

Swagelok SS-6M0-P 1 st 52,38 SEK



Swagelok koppling koppling till kopp.

Swagelok SS-6M0-6 1 st 105,73 SEK



Swagelok 4 mm koppling koppling till kappillär.

Swagelok SS-6M0-6-2 1 st 110,58 SEK



Swagelok koppling för omkoppling från kapillär till kopp.

Swagelok SS-6M0-6-2BT 1 st 194,97 SEK



Swagelok koppling som stödhylsa för slang.

Swagelok SS-12M5-8M 8 st 294,88 SEK



Drägerorr för bestämning av relativ fuktighet i systemet.

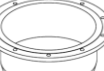
Dräger 10 st 794 SEK



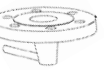
Överdel för Jet-Cup anordningen.



Cylinder kon övre för Jet-Cup anordningen.



Cylinder kon undre för Jet-Cup anordningen.



Kopp för Jet-Cup anordningen.



M8.8 Skruvar för Jet-Cupen för att sätta samman anordningen.

22 st



Planbricka M8 för Jet-Cupen för att sätta samman anordningen.

20 st



M8.8 Muttrar för Jet-Cupen för att sätta samman anordningen.

10 st

Mekpart AB 15000 SEK



Swagelok koppling koppling mellan Jet-Cups övre del och filtern.

Swagelok SS-810-7-8 1 st 221,16 SEK



Kapillärrör för koppling mellan två olika Swagelok kopplingar.

Scantec Lab T1060 3 st 336,00 SEK



Swagelok koppling koppling till filtret.

Swagelok SS-811-PC 1 st 118,34 SEK



Swagelok koppling koppling till filtret.

Swagelok SS-810-1-4RS 1 st 194,97 SEK



Ledad fot till ställningen för anordningen.

Wiberger WN345.1 4 st 94,00 SEK



Gänginsats för fyrkantrör till ställningen.

Eugen-Wiberger AB GIFR E 4 st 23,20 SEK



12,5 mm Packning för tätning mellan koppen och undre cylinder kon samt mellan övre cylinder kon och överdelen av Jet-Cupen.

Specmaseals 2715420 20 st 80 SEK



108 mm Packning för tätning mellan undre cylinder kon och övre cylinder kon av Jet-Cupen.

Specmaseals 2715419 10 st 450 SEK



Filter samt 0,01 µm, 1 µm och 5 µm nylon sintrat och 2 st filterhus för infångning av damm från partiklar.

Parker Hannifin Corporation 2960 SEK



Säkerhetsventil

Barby+ kuhner 1 st 1031 SEK



Totalt för alla delar 28356 SEK

