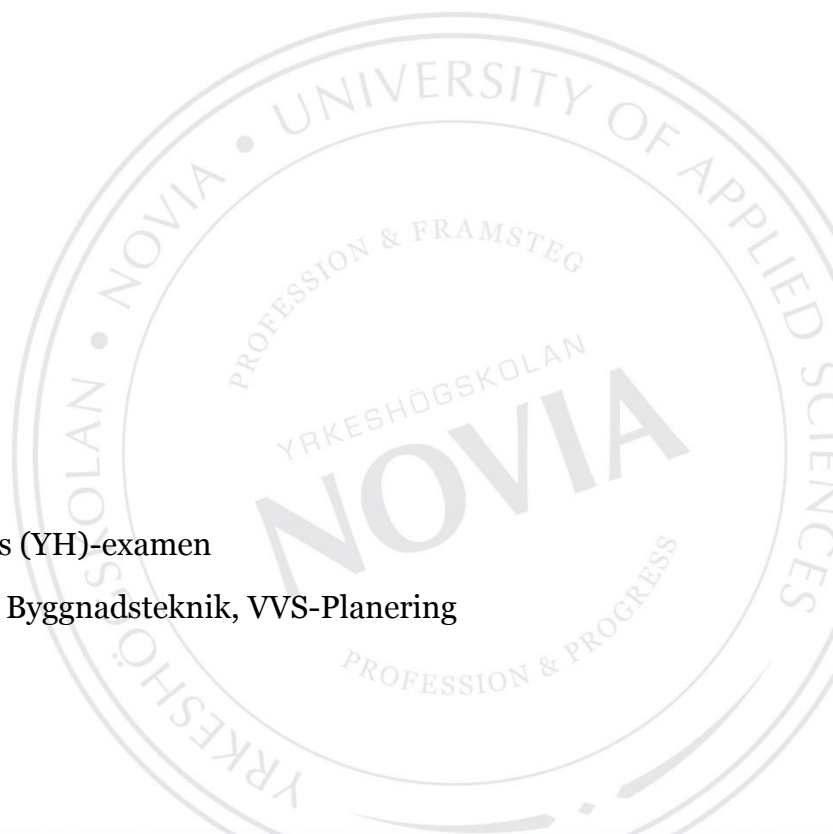




Produktaccelerator

Henry Segerstam

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen
Utbildningsprogrammet för Byggnadsteknik, VVS-Planering
Vasa 2017



EXAMENSARBETE

Författare: Henry Segerstam
Utbildningsprogram och ort: Byggnadsteknik, Vasa
Inriktningsalternativ: VVS-Planering
Handledare: Stefan Pellfolk & Johan Wiklund

Titel: *Produktaccelerator*

Datum 5.3.2017 Sidantal: 63

Abstrakt

Målet i detta projekt är att ta fram en laboratorieutrustning för att snabbt kunna ge användbara värden på tryckfall, kompressibilitet och klassificering, för högviskösa ämnen som skall hanteras i FIBC behållare och tillhörande system. För att snabba upp processen kring valet av utrustning och pumpar. Samt minska antalet fysiska test som måste göras, och underlätta planeringsskedet i nya case. Stor vikt har lagts på att göra utrustningen servicevänlig och att få den att rymmas i befintliga utrymmen. Resultatet är en design som förväntas tillverkas sommaren 2017.

Språk: svenska Nyckelord: accelerator, SolidWorks, utveckling, tryckfall,
pseudo-plastisk, dilatant, laminär, FIBC

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Henry Segerstam
Koulutusohjelma ja paikkakunta: Rakennustekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto: LVI-Suunnittelu
Ohjaajat: Stefan Pellfolk & Johan Wiklund

Nimike: *Tuotekiihdytin*

Päivämäärä: 5.3.2017

Sivumäärä: 63

Tiivistelmä

Projektin tavoitteena oli kehittää laboratorio laite joka nopeasti antaa käytännöllisiä lukemia painehäviöstä, puristuvuuskertoimesta ja luokituksesta, äärimmäisen paksujen aineiden käsittelyyn FIBC säiliössä ja niihin kuuluviissa järjestelmäihin. Tavoitteena oli myös nopeuttaa pumppujen ja välineiden valintaa, ja vähentää fyysisten testien määrä ja helpottaakseen suunnittelua uusien tehtävien suunnittelua. Tärkeää laitteen kehittämisessä on ollut että se on huoltoystävällinen ja sopivuus oleviin tiloihin. Lopputulos on rakenne joka valmistetaan kesällä 2017.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: kiihdytin, SolidWorks, kehitys, painehäviö, pseudoplastinen, dilatantti, laminaarinen, FIBC

BACHELOR'S THESIS

Author: Henry Segerstam
Degree Programme: Building technology, Vasa
Specialization: HVAC-Planning
Supervisor: Stefan Pellfolk & Johan Wiklund

Title: *Product accelerator*

Date: 5.3.2017 Number of pages: 63

Summary

The goal of this project was to develop a laboratory unit to quickly obtain useful measurements on pressure drop, compressibility and classification, for high viscous materials that are to be handled in FIBC containers and surrounding equipment. To speed up the process in choosing the correct equipment and pumps. And to reduce the number of physical tests that have to be performed, and alleviate in the design stage of new cases. Emphasis has been put on serviceability of the unit and to make fit in currently available facilities. The result is a design which is expected to be manufactured during summer 2017.

Language: Swedish Key words: accellerator, SolidWorks, development, pressure drop, pseudo-plastic, dilatant, laminar, FIBC

Innehållsförteckning

1 Inledning.....	1
1.1 Bakgrund och syfte.....	1
1.2 Uppgiften.....	5
1.3 Avgränsning	5
1.4 Företagsbeskrivning	6
1.5 Disposition.....	7
2 Krav och önskemål	8
3 Projekt, administration och delmål.....	9
4 Utrymmet	10
5 Uppbyggnad	11
6 Funktionsbeskrivning	13
6.1 Materialval.....	16
6.1.1 Konstruktionsmaterial.....	16
6.1.2 Tätningsmaterial	19
7 Komponent och utrustningsval	20
7.1 Kopplingar, slangar, ventiler & delar.....	20
7.2 Cylindrar.....	22
7.3 Värme-/kylanläggning	23
7.4 Pneumatikventiler	25
7.5 Testcylinder.....	26
7.6 Tätningar & styrningar	27
8 Konstruktionen	32
9 Applicerbara teorier	37
9.1 Typer av fluider	38
9.1.1 Ideella fluider.....	39
9.1.2 Reella fluider.....	41
9.2 Oswald-de Waele modellen.....	42
9.2 Hagen-Poiseuille.....	46
9.3 Andra teoretiska modeller.....	47
10 Dimensionering.....	49
11 Resultat.....	56
12 Diskussion	58

13 Fortsatt utveckling.....	60
14 Källförteckning.....	62

Figurförteckning

Figur 1 Fluid-Bag Logo Källa: Fluid-Bag

Figur 2 Produktaccelerator principskiss

Figur 3 Snabbkoppling Serie KKA med backventil Källa: SMC

Figur 4 Ventil med pneumatiskt styrdon. Källa: Festo

Figur 5 HRS-A Funktionschema. Källa: SMC

Figur 6 HRS-F kommunikation. Källa: SMC

Figur 7 HRS-F Panel. Källa: SMC

Figur 8 HRS-F Kopplingschema. Källa: SMC

Figur 9 Alumeco cylinderrör dimensioner Källa: Alumeco

Figur 10 Kolvtätningstyper Källa: Hydrosanat

Figur 11 Spaltextrusion Källa: Ludwig-Meister

Figur 12 GD1000K Kolvtätning Källa: Hunger-Dichtungen

Figur 13 SKF Machined Seals Källa: SKF

Figur 14 Fjäderaktiverade läpptätningar Källa: M-Seals

Figur 15 Fjädertyper Källa: AllSealsInc

Figur 16 Pradifa Engineered Seals Källa: Parker

Figur 17 Kolvstyrning Källa: Hunger-Dichtungen

Figur 18 Sammanställning 403277.

Figur 19 Sammanställning 403109.

Figur 20 Sammanställning 403214.

Figur 21 Sammanställning 403267.

Figur 22 Sammanställning 403269.

Figur 23 Shear stress and deformation rate relationship of different fluids. Källa: NPTEL

Figur 24 Shear-modulus Källa: Wikipedia

Figur 25 Flödesprofil mot beteende index n. Källa: University of California at Berkeley

Figur 26 Fanning friction factor. Källa (Nguyen, Q. 2012)

Figur 27 Kritiska värden för Reynolds tal. Källa: Nguyen, Q.

Figur 28 Max tillåtet tryck gentemot väggtjocklek för cylinder profil Källa: Alumeco

Figur 29 FEA-analys av dragbalk.

Figur 30 FEA-Analys av dragbalk

Figur 31 Mitcalc dimensionering av tryckstång mot knäckning.

Figur 32 Trelleborg O-rings kalkylator.

Figur 33 Pigging system Källa: ResearchGate

Ordförklaring

FAT	<i>eng. Factory Acceptance Test</i> – Fabriks acceptans test
R&D	<i>eng. Research and Development</i> – Forskning och utveckling
FIBC	<i>eng. Flexible Intermediate Bulk Container</i> – Flexibel bulk behållare
IBC	<i>eng. Intermediate Bulk Container</i> – Bulk behållare
Fluid-Bag	Flexibel IBC
FEA	<i>eng. Finite Element Analysis</i>
ADR	<i>fr. Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route</i> – Europeiskt gemensamt regelverk för transport av farligt gods på landsväg.
AISI	American Iron and Steel Institute
CAD	Computer Aided Design
PMMA	Polymetylmetakrylat
PEEK	Polyetereterketon
PTFE	Polytetrafloureten
PE	Polyeten
UHMWPE	Polyeten med ultra hög molekylvikt
POM	Polyoximetylen, Polyacetal <i>Handelsnamn: Delrin, Hostaform, Tenac</i>
PA	Polyamid <i>Handelsnamn: Nylon</i>
NBR	Nitril elastomer
FKM	Fluor elastomer definition enligt ASTM D1418 <i>Handelsnamn: Viton, Tecnoflon</i>
FPM	Fluor elastomer definition enligt ISO 1629
SBR	Styren elastomer
EPDM	Etenpropen elastomer

Nomenklatur

D	= Diameter
R	= Radie
Q	= Volumetriskt flöde
L	= Längd
x	= Sträcka
Δx	= Förflyttning
t	= Tid
m	= Massa
P	= Effekt
Q	= Flöde
q	= Värmekapacitet
c_n	= Specifik värmekapacitet
ΔT	= Temperaturgradient
v	= Medelhastighet
u	= Lokal hastighet
μ	= Dynamisk viskositet
μ_∞	= Dynamisk viskositet vid oändlig skjuvning
μ_0	= Dynamisk viskositet vid noll skjuvning
μ_{eff}	= Effektiv dynamisk viskositet
ν	= Kinematisk viskositet
Re	= Reynolds tal
Δp	= Tryckdifferans
ε	= Töjning

γ	= Förskjutning
E	= Elasticitetsmodul
G	= Skjuvmodul
ν	= Poissons konstant
ρ	= Densitet
σ	= Normalspänning
τ	= Skjuvspänning
τ_0	= Skjuvspänning vid flytgränsen

1 Inledning

Detta examensarbete utförs på min arbetsgivares begäran i samband med uppstarten av Fluid-Bag Labs som kommer att agera som labb för den fortlöpande produktionen, R&D-avdelningen, demo utrymme, produkttester, och FAT-tester för kunder. Detta examensarbete är en liten del i en större helhet som ingår i Projekt 2020 som bl.a. innehåller saker som utveckling av nya produkter, nya produktionsmaskiner, systemlösning-koncept, etablering på nya marknader, m.m. (Fluid-Bag)

1.1 Bakgrund och syfte

Vid Ab Fluid-Bag Oy bedrivs verksamhet som oftast handlar om att ett godtyckligt ämne som skall flyttas från punkt A till B, i de flexibla behållare som företaget tillverkar. Dock så återfinns Fluid-Bags verkliga styrkor främst inom områden var produkterna är mycket säregna, vilket ger diverse huvudbry när dessa ämnen senare skall hanteras. D.v.s. flytten från punkt A till B har gått fint under de senaste 30 åren, men vad som har börjat uppstå är att mer kompletta lösningar eller Turn-Key Solutions eftersöks.

Vilket i praktiken betyder att inte endast förpackningen skall tillverkas utan även systemen omkring denna. Var detta lärdomsprov kommer in är när det gäller bedömningen av dessa ämnen som skall hanteras. I dagsläget görs detta baserat på erfarenhet, kvalificerade intelligenta gissningar, fingerkänsla samt de data man kan lyckas komma över för materialet/ämnet i fråga. Vilket är allt annat än en exakt vetenskap, särskilt när det gäller gränsfall eller exotiska material med bristfälliga data. Fullskaliga testserier måste ofta göras för att verifiera ett koncept i och med att det inte kan verifieras på annat sätt, vilket ödslar pengar och tid.

I.o.m. att ämnena som skall hanteras i många fall klassas som solida material och/eller innehar starkt olinjärt beroende viskositet av både skjuvning, temperatur och tid, blir gissningar allt som oftast mycket svåra att göra. Och fastän erfarenhet införskaffats så sitter den fast bakom pannbenet på ett givet fåtal personer och faller snabbt i glömska. Även fastän kunskap om många nischer finns så kan enkla saker som en luftficka, några grader temperaturskillnad eller ett par viktprocent mer av en substans sluta i katastrof.

Om man vill bryta upp detta i frågor för att måla upp en generell bild, så kunde följande ganska bra representera problematiken.

- **Fråga:** Är ämnet pumpbart?
- **Varför:** Flyter det, går det att suga ut?

- **Fråga:** Finns gasinneslutningar? Är ämnet kompressibelt?
- **Varför:** Gasinneslutningar stannar vissa typer av pumpar lätt som pneumatiska kolvpumpar med liten displacement. Kompressibla ämnen kan ge olustiga skvätt och stänk vid öppna processer och kräva särskilda hanteringssätt.

- **Fråga:** Reell viskositet?
- **Varför:** Viskositetsdata kan många gånger ges men ofta är viskositeten långt missvisande för högviskösa ämnen. Viskositet angiven i ett värde är i praktiken endast tillämbart i lågviskösa områden med vätskor som kan klassas som newtonska fluider. Dimensionering baserat på ett viskositetsvärde på en icke-newtonsk fluid ger ofta extremt grova fel uppskattningar.

- **Fråga:** Vilket flöde kan uppnås med en specifik pump? Hur mycket tryck behövs för att komma x antal meter?
- **Varför:** I många fall kan man få en pumpkurva på en passande pump men räcker den till och vid vilka tryck kommer den att arbeta? Ofta finns även tillgängligt befintliga ledningar eller endast utrymme för en viss dimension, tryckbehovet är därav en dimensionerande faktor i valet av pump.

- **Fråga:** Vilken dimension skall rörledningar & slangar ha? Vad blir tryckfallet i en godtycklig rörledning? Vad blir flödet med given rördiameter och längd?
- **Varför:** Ofta finns längden, flöde eller tryck som givna men vilken dimension tillgodoser dessa parametrar? Tryckfallet behövs för dimensionering av pumpar, rör och slangar. Ofta skall en produkt sättas in i befintliga system, för att undvika onödiga tester så kan en bra teoretisk gissning ersätta många test.

- **Fråga:** Hur dimensionera för att uppnå ett visst minimiflöde/-tryck?
- **Varför:** När det skall byggas nya kompletta system och endast fantasin lägger gränser så skulle detta underlätta och minska överdimensionering och efterkorrigeringar avsevärt.

- **Fråga:** Hur mycket under-/övertryck måste skapas i baggen för att mata en pump med givet flöde?
- **Varför:** Fluid-Baggarna har ett utlopp vilket produkten måste fås igenom, detta svar kan direkt översättas till vilken typ av tömningsutrustning som behövs. Vilket i sin tur betyder att investeringskostnaden snabbt kan ges (0-250 000€) och onödiga tester med fel utrustning undvikas vilket kan förkorta led tiden med månader eller t.o.m. år i vissa fall.

Oftast så finns vissa givna parametrar som skall uppnås, såsom ett tryck vid en förpackningslinje eller ett flöde som behövs i en produktion. Om detta då gäller mintfyllning i karameller eller syntetiskt NLGI 3 fett som snabbast möjligast skall fyllas i servicefordon har dock ingen betydelse, problematiken är densamma.

Utav ovanstående hoppas jag behovet framgår av en apparatur via vilken man kan bedöma och uppskatta med större precision än i dagsläget ämnen av en stor diversitet som kommer att användas på platser runtom planeten i alla världsdelar, från helt sterila farmaceutiska miljöer i Europa till öppna dagbrott i Afrika.

Vad jag själv tampats med är att denna apparatur inte redan finns att köpas? Vilket kanske är en halvsanning med modifikation. Apparatur för flera av ovanstående frågeställningar finns, men ej direkt tillämpbar sådan (minns: spektrumet är mycket brett), det som sist och slutligen behövs i Fluid-Bags fall är en slags testbänk för flöde vid givna tryck och temperaturer med lite kryddor. Att t.ex. införskaffa ett antal olika viskosimetrar, penetrometrar, texturanalysatorer, etc. vore endast en omväg för att komma till samma slutresultat. De data man då skulle få fram är mer renodlade och noggranna, men svårare att applicera till verkligheten iom. att betydligt mer eftertanke måste läggas på modelleringen och passningen mot dessa modeller. De tryckfalls parametrar man får ut i slutändan är dock ej heller "verkliga" utan baseras helt och hållet på mätvärden av olika egenskaper och teoretiska modeller.

I tidigare gränsfall har det vid behov gjorts tester m.hj.a. rör, kolvar och tryckluft för att uppskatta dessa parametrar grovt. Vilket har visat sig fungera förvånansvärt bra trots nästintill löjligt enkelt och billigt uppställda försök. Detta projekt har lätt fyndigt internt namngetts till "*4531 Produktacceleratorn*" i.o.m. dess preliminära uppgift är att fösa diverse produkter fram i rörledningar.

1.2 Uppgiften

Detta lärdomsprov har som syfte att planera en testanläggning för bruk vid laboratoriet i Karvikshallen till bruk för Ab Fluid-Bag Oy som en del av projektet FB Labs som har som målsättning att skapa en fysisk samt kunskapsbaserad verksamhet för koncept-, produkt-, försäljningsutveckling och verifiering.

1.3 Avgränsning

För att detta lärdomsprov skall få en någorlunda god avgränsning till ämnet VVS-Planering kommer följande saker inte att i större grad beaktas i detta arbete:

- Automationsplanering
- El-planering
- Rent byggnadstekniska aspekter
- Datahantering/-insamling

Acceleratorns automations- och elplanering kommer att utföras av resurser inom moderbolaget Solving i samråd med undertecknad. Därav läggs ej särskild vikt på denna del i detta arbete.

Stora renoveringar pågår åtminstone fram till sommaren 2017, anslutningar ändras därför friskt och kommer ej att beaktas överhuvudtaget i detta arbete.

Lagring och behandling av mätdata kommer att göras delvis samtidigt och efter att acceleratoren planerats. Denna del faller delvis utanför det som kan ses som intressant i detta arbete, och behandlas samt diskuteras därför sparsamt.

1.4 Företagsbeskrivning

Företagets rötter har anor till 1970-talet när Fluid-Bag kom till liv inom området livsmedelsbranschen, då specifikt hanteringen av apelsin juice som på den tiden skede i plåt fat. Företaget hette på den tiden Alfa-Bag och hörde till Schauman koncernen.

I samråd med Statens Provningsanstalt i Sverige uppgjordes standarden som än idag gäller FIBC behållare och 1984 var Fluid-Bag officiellt grundat. Trots att företaget vann priset WorldStar award i Tokyo för dess innovativa produkt var produktionen fortfarande manuell och i mycket liten skala.

1987 såldes Schauman koncernen till Kymmene som delvist ägde Fluid-Bag. Eftersom Fluid-Bag inte hörde till Kymmenes fokusområden såldes denna del ut till Solving som än idag äger företaget. En uppsjö av agenturer och distributörer värvades under 90-talet och en portfölj av referenser skapades bland stora namn som: Nestle, Bayer, Shell, GNT, Purbond, Mobil, etc. En ny generation baggar utvecklades i mitten av 90-talet som böt ut föråldrade presspassningar till mer moderna svetsförband.

Under början av 2000-talet söktes nisch områden som hög viskösa applikationer, produkten anpassades även till kraven på marknaden med fler modeller, tätningar, utrustning, m.m. för att nå ut till fler konsumenter. Företaget certifierades inom ISO 14001, 9001 och 22000, dvs. miljö, kvalite och hygien under denna epok. (The History of Fluid-Bag, 2014)



Figur 1 Fluid-Bag Logo Källa: Fluid-Bag

1.5 Disposition

I kapitel 1 ges en inledning, bakgrund, syfte, uppgiften och dess avgränsningar.

I kapitel 2 ges kraven och önskemålen på slutprodukten av detta ingenjörarbete.

I kapitel 3 förklaras projektets struktur, administration, delmål och styrning.

I kapitel 4 återges de möjliga ställen och utrymmen var apparaturen kan placeras.

I kapitel 5 delges apparaturen i grova drag vad den kommer bestå av.

I kapitel 6 förklaras funktionen av apparaturen.

I kapitel 7 går komponenterna och utrustning igenom

I kapitel 8 förklaras konstruktionen av apparaturen.

I kapitel 9 beskrivs applicerbara teorier kring viskösa flöden.

I kapitel 10 går dimensioneringen av apparaturen igenom.

I kapitel 11 uppvisas resultatet.

I kapitel 12 diskuteras ingenjörarbetet i sin helhet och slutsatser som kan dras.

I kapitel 13 ges förslag om fortsatt utveckling.

2 Krav och önskemål

En kravspecifikation har gjorts på basis av de fall som tidigare behandlats. I specifikationen ges varje parameter ett K för Krav eller ett Ö för önskemål.

Punkt	Värde	K/Ö	Kommentar
Temperatur	+5 ... +40°C	K	Skall täcka in mesta möjliga antal användningsområden temperatur mässigt.
Flöde	~3-120L/min	K	Största möjliga spann önskas.
Sampelstorlek	1-10L	K	Normala sampel bör kunna användas
Tryck	<20bar	K	Bör ej beakta högtrycks applikationer
Strömningstyper	Laminärt	K	Bör ej beakta turbulenta applikationer
Viskositeter	<50 000cP	Ö	Bör ej beakta lättflytande applikationer
	50 000 – 5 000 000cP	K	
	>5 000 000cP	Ö	
Typer av ämnen	Newtonska (linjära)	K	
	Dilatanta	K	
	Pseudoplastiska	K	
	Kompressibla fluider	-	
	Tidsberoende icke-newtonska	Ö	
Precision	~10-20%	Ö	Ganska grova toleranser kan ges på utdatats pålitlighet. Så tillvida felmarginalen och källorna är kända.
Tvättning	Skall kunna tvättas med minsta möjliga mänskliga ingripande	K	
Loggning	Datainsamling via LabView	Ö	
Utrymme	7591x5632x2399 (LxBxH)	Ö	Skall helst placeras i bombskyddet (kemilabbet), bör ta minsta möjliga utrymme i anspråk

3 Projekt, administration och delmål

Framtagandet av denna anläggning delas in i mindre steg och sätts i kronologisk ordning för att klargöra i vilken ordning arbetet skall och kan göras.

1. Projekt start
2. Kick-Off
3. Kravspecifikation
4. Funktionsprincip
5. Grovplanering av konstruktionen (mekaniskt)
6. Preliminärt godkännande på konstruktion och princip
7. Planering av kringelement, tvättanläggning, skydd, värme-kyla, etc.
8. Modeller för behandling av data
9. Automationsplanering
10. El-planering
11. Testning
12. Ändringar, korrigeringar och tillägg
13. Verifiering
14. Dokumentation
15. Skolning
16. Projekt avslut

Projektet har en given budget som bör åtföljas, som vid behov revideras om projektet spinner iväg. Som projektets största risker kan några identifieras som t.ex. mätvärdenas tillförlitlighet, dålig precision och stora felkällor. Dock bedöms sannolikheten att lyckas vara tillräckligt stor för att detta projekt skall kunna startas.

Att komplexiteten är stor hos de matematiska modeller som till viss utsträckning kommer att behöva användas är känt och att deras applicerbarhet ej är helt känd skall icke förringas. Dock finns en ljusning i.o.m att en ganska stor erfarenhet finns insamlad med olika ämnen, pumpar, applikationer, etc. som kan jämföras med testade och behandlade mätdata. Samt ett helt lager med prover på produkter från kunder att referens testa vid behov.

4 Utrymmet

Det tillgängliga utrymmet är begränsat till storlek, och önskvärt är att denna anläggning tar minsta möjliga plats i anspråk finns för att ge utrymme för framtida behov. Ett av de bättre alternativen är att placera apparaturen i bombskyddet, ett annat alternativ är en ~10m lång vägg bak i prototypverkstaden.

Vad som därtill bör beaktas är att öppningarna till bombskyddet i vilken denna apparat kan bli placerad har mycket begränsade öppningar genom vilka hela konstruktionen måste kunna föras.

Eftersom bombskyddet omgärdas av massiva (och tjocka) betongväggar samt ståldörrar blir ljudnivån snabbt i irriterande hög, hörselskydd kommer högst troligen att vara ett krav. Att utrymmet annars är slutet är mycket bra med tanke på möjlig kontamination av testplatsen vid haveri, detta skall dock givetvis undvikas i största möjliga utsträckning.

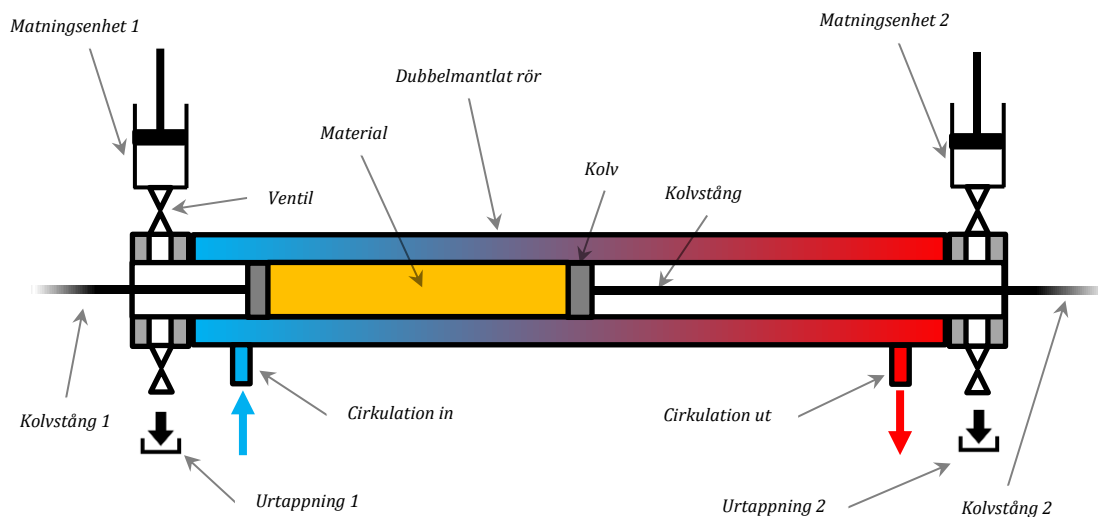
För att övrig verksamhet i utrymmet skall kunna fortgå kommer delar som orsakar risker att behöva skyddas, täckas in, säkras eller dyligt för att uppfylla kraven på en säker arbetsplats. Annan laboratorieutrustning samt kemikalieförråd kan komma att finnas inom samma väggar vilket även bör ges hänsyn till.

5 Uppbyggnad

Produktacceleratoren kommer nedbryten i elementära delar vara bestående av:

- En cylinder med en rörlig kolv i vardera änden som kan flyttas linjärt.
- Absolut positionsmätning av vardera kolv.
- Styrningar och tätningar mellan testcylinder och kolvar.
- Fyllningsapparat i vilken man sätter i behövlig mängd material som sedan för in materialet i acceleratoren.
- Dubbelmantlad testcylinder för att man samtidigt skall kunna värma eller kyla mediet till önskad temperatur.
- Kyl-/värmeanläggning för att tillgodose dessa behov.
- Temperaturgivare på cirkulationsmediet.
- Dubbelverkande pneumatiska styrdon direkt kopplade till kolvarna.
- Lastceller i infästningen.
- Tryck-proportional styrda ventiler för reglering av rörelse och kraft.
- Tryckgivare på pneumatiska styrdonen.
- Pneumatiskt styrda ventiler för påfyllning och tömning.
- Tryckgivare på matningsapparaturen.
- Styrsystem med logg och data behandlingsmöjligheter.

En princip skiss återges nedan för enklare framtida referens, som nomenklatur kan ges att alla index med nummer ett även kan kallas vänster och alla index två kan kallas höger, för att minska på upprepningar och möjlig förvirring hos läsaren.



Figur 2 Produktaccelerator principskiss

6 Funktionsbeskrivning

Produktacceleratoren kommer att arbeta på det sätt att den så direkt som möjligt mäter tryckfallet vid ett flöde som åstadkommes av ett givet tryck som ger en viss kraft i en given rörstorlek för ett godtyckligt medie vid en specifik temperatur. Som enkelt kan ses blir problemet snabbt mångdimensionellt, d.v.s. flertalet saker inverkar på ett och samma värde. Vilket kommer att vara en av begränsningarna för hur apparaturen används och tillämpas. De material som testas bör även vara lösliga i ett medie som är kompatibelt med acceleratoren för tvätt.

Användaren matar in ett produktprov i matningsenhet 1 till behövlig nivå och sätter ihop matningsmekanismen. Själva inmatningen sker när användaren ger kommandot för laddning. Vilket kör kolvarna till lämpligt läge under given matningsport varefter ventilen under laddningsbehållaren öppnas. Därefter trycks pneumatiskt med en kolv materialet in i produktacceleratoren. Till cylindrarna som driver acceleratoren finns kopplat vajer positionsgivare som används till att se om laddningen slutförts, dvs. om tillräcklig mängd material laddats. Har laddningen kunnat slutföras (höger kolv flyttats tillräckligt långt för att volymen på provet skall kunna accepteras) så stängs ventilen under laddningsmekanismen och meddelande om acceptabel laddning ges. Laddningen skall utföras under given tid annars slår en varning upp om att laddning ej kunnat utföras inom utsatt tid och laddningen avbryts. Detta fungerar samtidigt som säkerhet om ett för högvisköst material laddats i varvid detta ej kommer att kunna testas. Är materialet för trögflytande kommer antingen det ej alls kunna laddas pga. inloppskanalens ringa storlek eller apparaturen slår i felläge iom att tidsfristen för laddning förlöpt utan att materialet kunnat laddas.

När materialet laddats in i testcylindern görs först test för kompressibilitet var bägge kolvar trycksätts vilket utövar en given kraft på materialet. Kolvarnas förflyttning monitoras via de inbyggda linjärgivarna. Värdena av linjärgivarna och kraftcellerna (eller trycket) som använts vid testet ger tillräckliga parametrar för att ge ett numeriskt värde för kompressibiliteten hos ämnet i fråga i enheten [1/MPa]. Eftersom trycken är låga kommer kompressibiliteten högst troligen att bete sig snarast linjärt enligt boyle´s lag vilket betyder att detta värde kan ges som ett enda värde inom detta intervall istället för att ges som en funktion av trycket vilket är dess egentliga oidealiserade natur.

Skall testerna utföras vid annan temperatur än rumstemperatur så förs materialet centrerat mellan kolvarna till mitten av testcylindern. Och inväntar att korrekt temperatur uppnåtts innan vidare tester utförs. Under kylning/uppvärmning så monitoreras cirkulationsmediets temperatur och inte materialets temperatur. En timer ställs in på att hålla materialet på önskad temperatur en specifik tid innan vidare testning utförs så att en någorlunda minimal temperaturgradient hos materialet kan gissas ha uppnåtts. Till hjälp för detta övervakas hela tiden kolvarnas position på vilka en kraft kommer att uppstå pga. värmeutvidgningen hos materialet. Är kompressibiliteten hos materialet "stor" kommer detta ej att övervakas pga. att friktionen i tätningar kommer göra detta mätvärde obefintligt eller obrukbart. Är dock kompressibiliteten under givna gränsvärden och temperaturskillnaden tillräcklig så kommer detta att övervakas.

Efter att kompressibilitetstesten utförts så påbörjas testerna som berör tryckfall. För att bygga ett lämpligt testspektrum ökas ena av cylindrarnas tryck sakta med den andra frisläppt tills minimihastighet hos kolvarna uppnåtts, den nedre gränsen sätts in som justerbar parameter i programmet. Detta för att dra en nedre gräns i testspektrumet, under vilken stick-slip effekter och mätosäkerheter får för stort inflytande över mätningen för att producera användbara resultat. Användaren ges alternativet att välja att testa ett spektrum eller single-point, var single-point tester är ämnade för starkt skjuvberoende material som ej kan ge trovärdiga resultat över ett flertal tester. Väljs single-point får användaren välja ett tryck mellan max systemtryck minus säkerhetsfaktor eller ett testspektrum. Testspektrumet byggs upp av tillgängligt tryck i valt antal delar (t.ex. 3 till 30). Med max tillgängligt systemtryck minus säkerhetsfaktor som övre gräns och den tidigare satta nedre gränsen. Varje tryck i spektrumet körs sedan en i taget ett valt antal gånger (rekommenderat minimi 10 av statistiska skäl) för att få tillräckliga mätdata över kolvarnas hastighet vid varje tryck, börjandes vid max. Trender analyseras med en linjär funktionsanpassning inom varje mätserie som sjunkande eller stigande tryckfall vilket i sin tur kan översättas till en deskriptiv egenskap hos materialet som linjär, dilatant eller pseudoplastisk.

När testen som skall göras slutförts startar automatiskt en tömningscykel var materialet töms ur acceleratoren med att kolvarna körs till vänster ändläge. Vid ändläget så öppnas tömningsventilen och materialet trycks ut ur acceleratoren i ett öppet kärl för destruktion, slutförvaring eller deponi.

Efter slutförd testning och tömning startar en tvättsekvens för att rengöra apparaturen. Kolvarna körs tillbaka till vänster ändläge och matningsventilen öppnas. Användaren uppmanas att ladda tvättmediet som önskas användas. Efter att användaren kvitterat att tvättmediet är laddat så öppnas matningsventilen. Tvättmediet trycks in i acceleratoren på samma vis likt materialet som tidigare testades. Efter slutförd laddning av tvättmediet så startar en cykel av tvättning som kör kolvarna fram och tillbaka ett justerbart antal gånger. När inställt antal repetitioner uppnåtts, töms enhet likt den normalt gör efter slutförd testserie. Dock så töms det använda tvättmediet i högersida för att separera ren produkt och kontaminerat tvättmedel. Acceleratoren torrkörs några gånger för att kontrollera att "friktionsprofilen" ej har ändrats utgående från utångsläget. Avviker denna så ges meddelande om att tvättprogrammet bör köras om för att få rengjort apparaturen ordentligt. Efter att andra tvättcykeln gjorts om så torrkörs acceleratoren igen för att se om "friktionsprofilen" uppnått acceptans kriteriet. Om allt är ok så stannar acceleratoren i detta läge och meddelar att laddningsbehållarna skall demonteras och tvättas manuellt. Om friktionen fortfarande är för hög eller avviker avsevärt från grundtillståndet ges felmeddelande att acceleratoren måste demonteras för att granskas visuellt. Felkällor kan vara dålig tvättning, utslitna tätningar, uppnötta kolvar eller cylinderrör.

6.1 Materialval

I om att acceleratorn inte kommer att vara kontinuerligt i bruk och därav ej heller i kontakt med för den "ohälsosamma" material kontinuerligt kan kompatibilitetskravet bantas en aning om detta bedöms vara nödvändigt eller fördelaktigt.

6.1.1 Konstruktionsmaterial

Eftersom ett brett spektrum av material kommer att testas är det önskvärt att material i direkt kontakt med mediet i fråga klarar av det. Vad som i huvudsak kommer att vara i kontakt med materialet är själva huset eller röret på materialanalysatorn genom vilket mediet förs och kolvarna som föser materialet. Flertalet kandidater finns såsom: Legerade stål, PTFE, PEEK, PMMA, Borosilikatglas, m.m.

PMMA och Borosilikatglas har sina fördelar med att vara transparenta vilket är en god egenskap för översikt av processen. Som också skulle göra det mycket enkelt att se om t.ex. tvättning bör göras eller om den gjorts tillräckligt effektivt eller om material fortfarande sitter fast på interna komponenter.

Påfrestningen pga. det interna trycket kommer att vara kännbart inom det intervall acceleratorn kommer att arbeta, och av givna orsaker kommer detta att åstadkomma drag- och membranspänningar i de inneslutande delarna. Vilket är ogynnsamt med tanke på sprickbildning och dynamisk utmattning, därav borde sköra material undvikas. Glasrör har även relativt vida toleranser vilket gör det mycket svårt att designa en effektiv tätning med lägsta möjliga friktion vid användningen av glasrör, därmed kan de uteslutas.

Polymermaterial såsom PEEK och PTFE, har väldigt god kemisk resistens och är mycket högpresterande material i gruppen polymerer. Dock är de inte hållfasthetsmässigt jämförbara med stål och utesluts därför som homogena rörmaterial. Dock kan t.ex. en liner eller coating av dessa vara ett mycket bra val om detta är applicerbart. Interna detaljer i kontakt med mediet som kolvarna, ventiler, etc. har dock mer fördelaktig geometri eller kan ges utrymme för sådan, därför kan fördelaktigt dessa material väljas på de områdena.

Legerade stålrör som finns i ett gott utbud med relativt snäva toleranser och god ytfinish. Mycket av detta eftersom de ofta används som processrör inom kemi-, livsmedels- och läkemedelsindustrin. Kvaliteterna som borde väljas är syrafast eller bättre, översatt till en beteckning betyder detta AISI 316 (EN 1.4401) eller bättre. Andra goda alternativ vore AISI 316L (EN 1.4404/1.4432) eller titanstabiliserade rostfria stål som AISI 316TI (EN 1.4571). Exotiska material som Inconel och Hastelloy är givetvis ännu bättre material men blir näst intill omöjliga att få tag på och skulle kosta en mindre förmögenhet. Det problematiska kommer att vara raketten, rundhets och diameter toleransen på dessa rör, trots att toleranserna annars är god blir det lätt problematiskt att köra en kolv i detta iom att toleranserna som dessa tillverkas med inte är ämnade för detta ändamål.

Aluminium cylinderrör å sin sida är ämnade för att användas precis i det ändamålet att föra en en kolv genom, de har även ofta pga. sin utformning bättre möjligheter att anslutas till annat utan att behöva svetsas (eller bearbetas). Dessa profiler är mycket lättillgängliga och finns i kaplängder upp till 3000mm. Deras nackdel är då å sin sida är den kemiska kompatibiliteten som ej är särskilt märkvärdig. Alla starka syror kommer att behöva uteslutas iom att dessa kommer att reagera våldsamt med materialet, vilket för sig inte är ett hinder eftersom dessa både är UN klassade produkter och flytande vilket gör att de inte kommer att tillämpas. Dock finns även andra hinder som dels reagerar eller nöter vådligt snabbt på aluminum profilerna. Testning av starkt oxiderande ämnen bör göras med varsamhet, iom att aluminum ej har mer skydd mot oxidation än den anodisering de genomgått som resulterar i ett tiotal μm tjockt oxidskikt. Detta skikt kan snabbt nötas bort om materialen är nötande vilket frilägger rent aluminum som då i sin tur saknar skydd mot fortsatt oxidation. Dock så kan det ses som en fördel att använda en enkel (och billig) standardartikel kapad till rätt längd och använda den som slit och släng.

Summering:

- Testcylindern och matningscylindern borde göras av aluminum cylinderprofiler för att vara enkelt utbytbar och erhålla hög tolerans.
- Kolvarna borde göras av PTFE eller alternativt någon högkvalitativ rostfri legering (1.4571, 1.4404, 1.4432, etc) med gliddelar av PTFE. För att uppnå hög hållfasthet och tolerans, samt acceptabelt låg friktion och kemisk resistens.
- Matningsmekanismen borde göras någon högkvalitativ rostfri legering.
- Dubbelmantlingen kunde göras av PMMA var påfrestningarna är låga för att enkelt se eventuella läckage eller luftfickor som finns i dubbelmanteln. PMMA's dåliga värmeledningsförmåga här är även till direkt fördel.

6.1.2 Tätningsmaterial

Tätningar kommer att vara en av de mest utsatt komponenterna på denna maskin. De kommer ständigt att utsättas för dynamiska belastningar, kemiska påfrestningar och temperaturförändringar. Denna punkt kan dock relativt enkelt lösas iom. att denna maskins huvudsyfte är att testa material för applikationer i Fluid-Bag. Baggarna som tillverkas kan konfigureras med ett antal olika tätningar (vilket direkt plockar bort många alternativ som annars borde beaktas) för att passa specifika ändamål och produkter. Standard på val av tätningsmaterial här är: NBR, EPDM och FKM. Andra kuriositeter finns som USP godkända material för farmaceutiska applikationer och diverse specialare, men i huvudsak eftersträvas att hållas innanför dessa ramar.

Detta betyder i princip lätt förenklat att ett material som klarar allt dessa 3 material klarar egenskapsmässigt kumulativt kan användas som tätningsmaterial i acceleratoren eller att tätningarna kan bytas ut mellan dessa 3 alternativ. Drar man ytterligare en liten förenkling och begränsar användningen av vissa ämnen så kunde FKM vara ett gott alternativ. Trots att den kemiska resistansen många gånger för medier som innehåller acetoner, aminer och aldehyder är bättre hos EPDM än hos FKM, har det ringa betydelse iom att baggarna som tillverkas inte är godkända för transport av flytande farligt gods (UN-klassat gods, i folkmun ADR) inom vilken kategori många av dessa ämnen faller vilket ger en praktisk betydelse. Många gånger var EPDM är bättre än FKM kemiskt, får ämnet ändå inte hanteras i denna typ av behållare och bör därför inte heller bedömmas eller behandlas. EPDM borde undvikas pga. dess tendens att svälla i vätskor med lågtryck, som t.ex. oljor och fetter.

Utav ovanstående orsaker kan konstateras att tätningar gärna får väljas av sådan typ att olika materialval finns och om så ej är fallet borde FKM användas. Eller PTFE iom att dess kemiska resistens till stor del omsluter den kemiska resistensen av NBR, EPDM och FKM sammansatt.

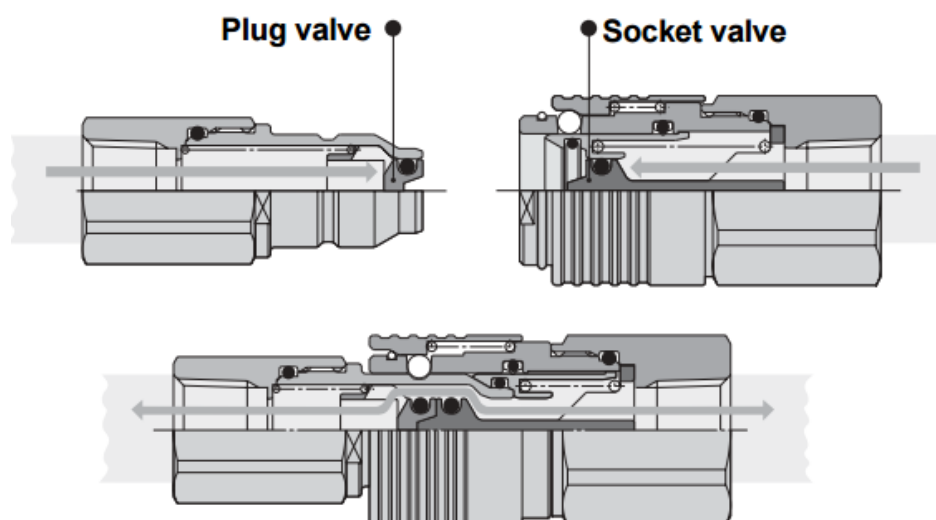
7 Komponent och utrustningsval

7.1 Kopplingar, slangar, ventiler & delar

På pneumatiksidan väljs kopplingar så långt som möjligt av one-touch natur för enkel montering (KQ2) . För vätskesidans som kommer att vara utsatt för lite mer korrosionsbelastning väljs one-touch kopplingar i syrafast (KQG2).

De rördelar som används på vätskekretsen är nästan uteslutande gjorda i syrafast stål. Slangar som kommer att användas för pneumatik kommer att vara i PA av denna enkla anledningen att det är standard och duger inom de tryck och temperaturområden som valt att beaktas. I vätskekretsen används slangar av FEP (snarlikt PTFE) för att tåla temperaturen och för att erhålla bättre kemisk resistens mot den glykolblandning som kommer att köras i kretsen.

Vätskekretsen förses med snabbkopplingar KKA4P-02M och KKA4S-04F för att man enklare skall kunna koppla loss denna och ta ut testcylinder med dubbelmantling och gavlar i ett stycke för service. Snabbkopplingar väljs av sådan typ som har backventiler i bägge delar och är av beständigt material. Iom. att en innesluten volym i dubbelmantlingen låses in bakom backventiler finns risk med att tryck kan uppstå i denna. Yttre höljet på dubbelmantlingen är dock så pass mjuk att den tar upp små variationer i övertyck och backventilerna släpper in luft om motsatt scenario skulle uppstå. Instruktioner borde göras om att koppla ihop värme/-kylkretsen igen efter man demonterat testcylindern med dubbelmantling och gavlar om dessa skall lämnas stående en längre tid.



Figur 3 Snabbkoppling Serie KKA med backventil Källa: SMC

Som ventiler till matningsenheten och urtappningen väljs en DN20 ventil med pneumatiskt styrdon samt sensor. Dimensionen DN20 är ej optimal men större rymms ej att få inklämt. Ventil + styrdon specsas till VZBA-3/4"-GG-63-T-22-F0304-V4V4T-PP30-R-90. Tillhörande sensor specsas till SRBC-CA3-YR90-N-1-N-C2P20. Gärna skulle man i detta fall använt styrdon med fjäderretur så man kan garantera att ventilerna hålls stängd om något skulle hända. Dock så växer styrdonet om fjäderretur väljs, vilket i sin tur leder till att en mindre ventil måste väljas, därför accepteras detta men hålls i åtanke.



Figur 4 Ventil med pneumatiskt styrdon. Källa: Festo

7.2 Cylindrar

En av de mest bekymmersamma komponenterna att specsa är cylindrarna iom att man gärna skulle vilja ha:

- Låg friktion
- Stor diameter ~100mm
- Slaglängd 2000mm (utan knäckrisk)
- Analog absolut linjärgivare inbyggd
- Broms

Denna komponent är mycket kritisk iom att det är mycket svårt att få tag på något liknande om inte vissa kompromisser görs, som t.ex: längd, broms, inkremental istället för absolut. Tillverkarspecifika bussystem som kräver specifikt en viss typ av kommunikationsutrustning för att kunna samspela är inget val iom att en uppkoppling mot LabView önskas och därmed bör dessa undvikas.

Cylindrarna specsades först till 6PF3P100RL2000, vilka tyvärr enligt katalog ej går att fås i längder över 500mm. Dock avtalas detta skillt (mot mycket betydande merkostnad) att de kan tillverkas på begäran. Varför specifikt denna cylinder valdes är att den har inbyggd absolut linjär avläsning med tillräckligt hög precision samt broms i ett och samma paket.

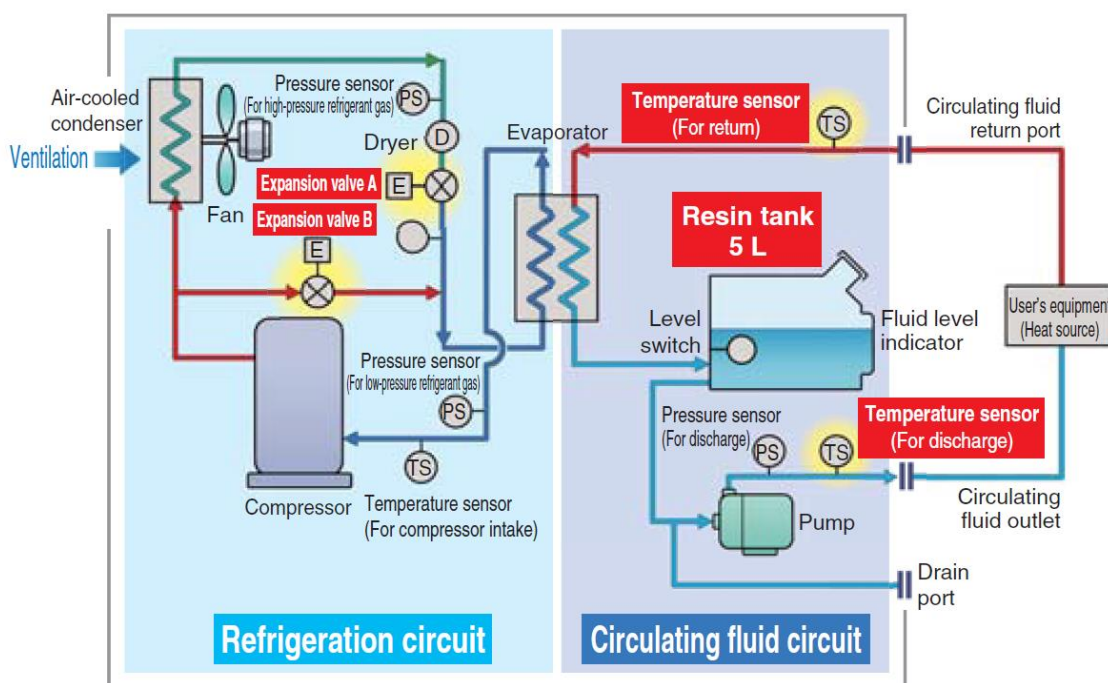
Prislappen och problematiken för tillverkaren att bygga denna längd på cylinder med linjärgivare visar sig i liten serie inte vara ett alternativ, precisionen sjunker på denna typ av linjärgivare med längden, vilket inte är till fördel.

Därför backas på kravet med inbyggd linjärgivare på cylindrarna och broms. Linjärgivaren görs istället externt med analoga absoluta vajergivare och bromsens funktion byggs bort via programmering och mekanik. Valet av cylindrar landar därmed på: CP96SDB80-2000C.

7.3 Värme-/kylanläggning

Specsas odramatiskt till en HRS024-AF-20 vilket är en el-driven kompressor kyl-/värmehet med inbyggd pump, tank och temperaturstyrning. Denna ger en kyleffekt om 2,4kW och en värmeeffekt på 650W. Särskilt värmeeffekten är låg men godtas eftersom ett hopp uppåt i storlek medför betydlig merkostnad. Möjligheten att vid behov tillsätta separat värme element finns, så visar sig effekten vara för låg så kan det alltid göras. Värme/-kylheten har ett spann på inställd temperatur mellan 5-40°C. Vilket kan ses som rimligt. Enheten har inbyggd kontrollpanel och PID styrning för att kunna hålla inställd temperatur inom mycket små marginaler.

■ Air-cooled HRS□-A-□

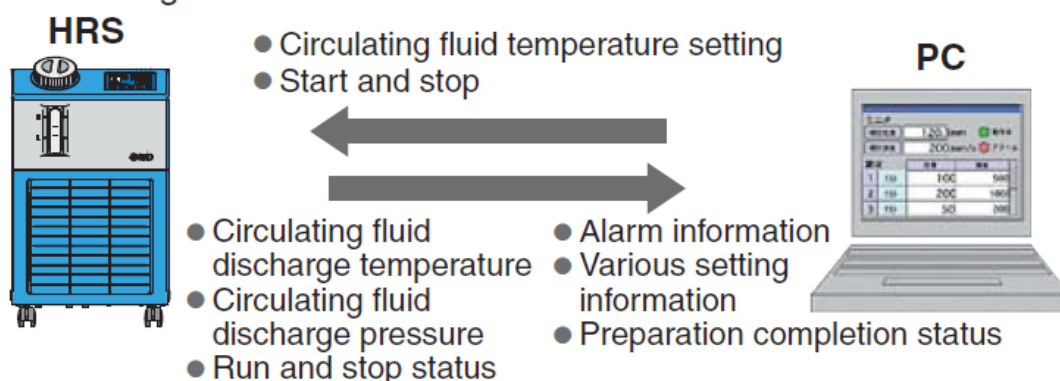


Figur 5 HRS-A Funktionschema. Källa: SMC

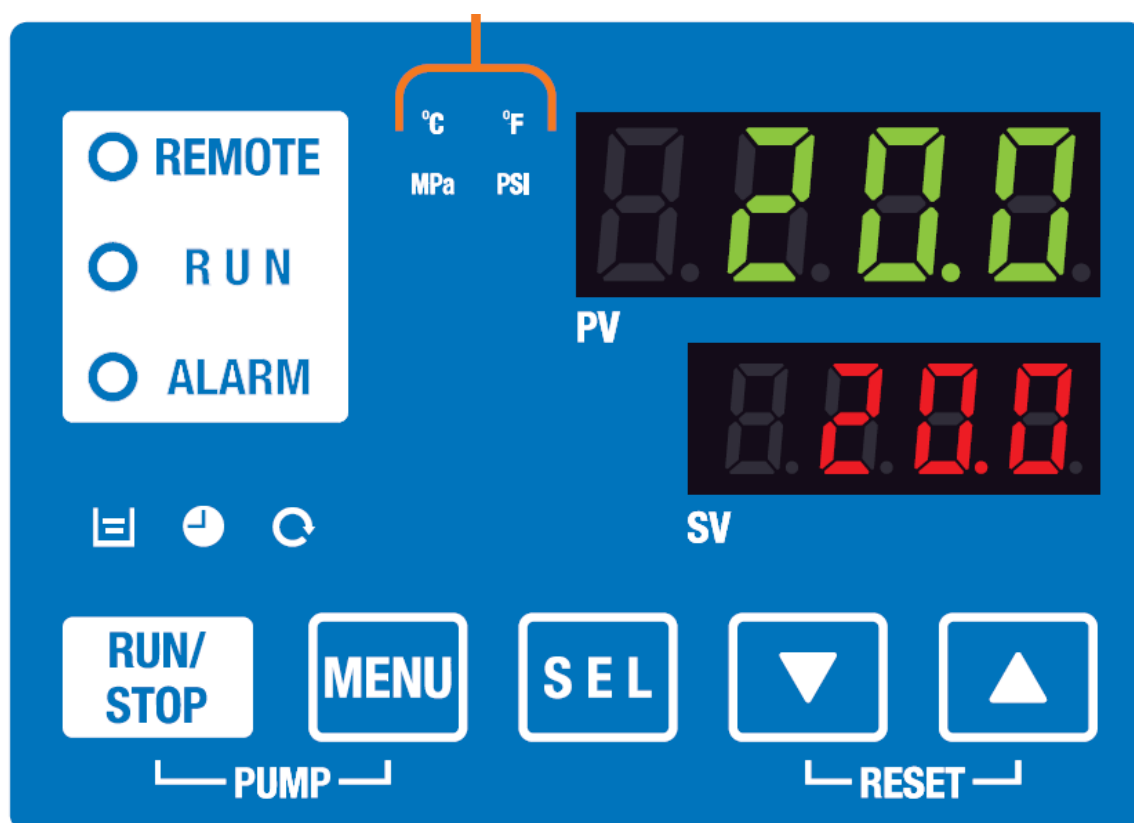
Extern kommunikation kan göras via seriakabel eller I/O portar. Via serial kommunikation fås mer valmöjligheter att starta, stopp, ställa in och monitorera externt, vilket önskas i detta fall. Serialkommunikation är enda möjligheten om en tvåvägs kommunikation önskas på mer än start och stopp för specifikt denna enhet.

Ex. 1 Remote signal I/O through serial communication

The remote operation is enabled (to start and stop) through serial communication.

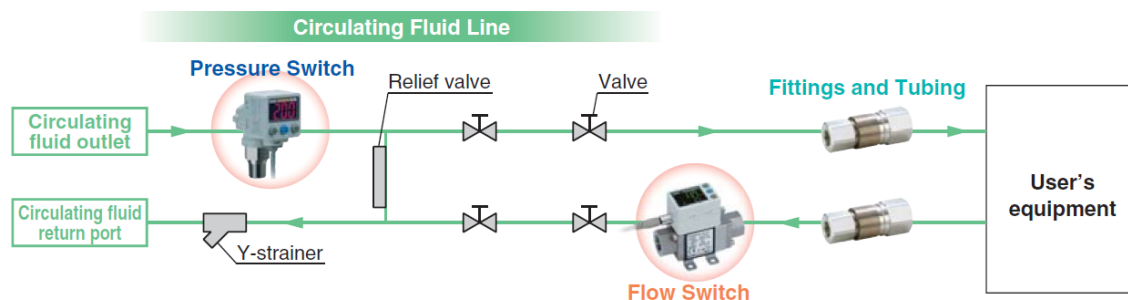


Figur 6 HRS-F kommunikation. Källa: SMC



Figur 7 HRS-F Panel. Källa: SMC

Inkopplingen av värme/-kylenheten görs i enlighet med rekommendationerna med filter, förbigång, trycksensor och flödesmätare. Ventilerna kan skippas i detta fall eftersom sträckorna är så pass korta att de inte fyller någon som helst funktion. Trycksensorn uppfyller inte särskilt mycket i denna krets men med den på plats har man iaf ett sätt att monitorera mottrycket i systemet. Dvs. stockas filtret så är det enkelt att se att tryckfallet över kretsen ökat.



Figur 8 HRS-F Kopplingschema. Källa: SMC

7.4 Pneumatikventiler

Tryck-proportional styrningen specas till ITV3050-31F4CN + EVS7-8-FHG-D-3MA04F (5/2 riktningsventil), vilket är överdimensionerat men tänkt för att även kunna ackommodera högre än tilltänkta kolv hastigheter. Riktningsventilens enda funktion är att bespara en tryck-proportional ventil per cylinder.

För att visuellt direkt kunna övervaka tryck på givna ställen så används displayen PSE304-B som kan ta emot flera kanaler samtidigt.

7.5 Testcylinder

Som råmaterial för testcylindern väljs en aluminium cylinderprofil i EN AW-6060 T6. Cylinderröret finns som hyllvara i 3 meters stänger för kapning. Profilen har en utformning som medger att man gängar de 4 hålen i bägge ändar av profilen och skruvar gavlarna rakt mot profilen, tätning av en icke cirkulär profil bedöms dock bli svårt och därav väljs en helrund profil.

Profilen är hårdanodiserad med ett skickt om 25µm och erhåller en ythårdhet om 450HV vilket kan jämföras med hårdheten hos ett låglegerat nitrerat stål som brukar landa i intervallet 300-500HV. Ytfinheten på profilen i cylinderloppet är under Ra = 1µm vilket gör att de flesta typer av tätningar torde vara användbara.

Cylinderloppet har en tolerans på Ø50 H11 vilket betyder att det kan variera mellan Ø50,00mm och Ø50,16mm, vilket i sin tur är en bredare tolerans än vad som egentligen vore önskvärt för de flesta tätningar. Helst skulle en toleransgrad omkring IT6 – 8 vara önskvärt men detta är dock inte längre någon ”metervara”. Den stora toleransgraden kommer att ge större kast i friktion mellan kolv och cylinder iom att den kommer att knipa olika mycket över cylinderns längd, men godtas av praktiska skäl. (AluMeco)

Alumiini sylinteriputket - EN AW-6060 T6

Valmistuspituus 3050 mm
EN 573-3, EN 755-1, 755-2

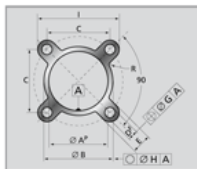


Nimellismitta mm	Ulkohalkaisija x seinämävahvuus mm	kg/m	Nimellismitta mm	Ulkohalkaisija x seinämävahvuus mm	kg/m
12	16 x 2.0	0.24	80	85 x 2.5	1.75
16	20 x 2.0	0.31		86 x 3.0	2.12
20	25 x 2.5	0.48		87 x 3.5	2.48
25	28 x 1.5	0.34		88 x 4.0	2.85
	30 x 2.5	0.58	85	89 x 2.0	1.48
32	36 x 2.0	0.58	100	105 x 2.50	2.17
	38 x 3.0	0.89		106 x 3.00	2.65
35	40 x 2.5	0.80	100	107 x 3.50	3.07
40	44 x 2.0	0.71		108 x 4.00	3.55
	45 x 2.5	0.90	110	116 x 3.00	2.88
	46 x 3.0	1.09	125	132 x 3.50	4.85
50	54 x 2.0	0.88		133 x 4.00	4.38
	55 x 2.5	1.11	150	160 x 5.00	6.60
	56 x 3.0	1.35	160	167 x 3.50	4.85
58	63 x 2.5	1.28		170 x 5.00	7.00
63	68 x 2.5	1.39	200	210 x 5.00	8.69
	69 x 3.0	1.68	250	262 x 6.00	13.03
70	75 x 2.5	1.54	300	312 x 6.00	15.60
	76 x 3.0	1.86	320	336 x 8.00	22.26

Alumiini Profilli Sylinteri Putket EN AW-6060 T6

Valmistuspituudet 3000 mm EN 573-3, 755-1, 755-2
Metriselle kierteitykselle

A (mm)	P	B (mm)	C (mm)	D (mm)	F (mm)	E (mm)	G (mm)	H (mm)	I (mm)
32.0	H 11	36.0	32.5	5.35	±0.15	10.0	0.5	0.3	42.5
40.0	H 11	45.0	38.0	5.35	±0.15	10.0	0.5	0.5	48.0
50.0	H 11	55.0	46.5	6.65	±0.15	12.0	0.4	0.3	58.5
63.0	H 11	68.0	56.5	6.65	±0.15	12.0	0.4	0.3	70.0
80.0	H 12	86.0	72.0	8.75	±0.15	14.0	0.4	0.4	86.0
100.0	H 12	106.0	89.0	8.75	±0.15	15.0	0.5	0.3	107.0
125.0	H 12	132.0	110.0	10.50	±0.15	17.0	0.5	0.4	133.0

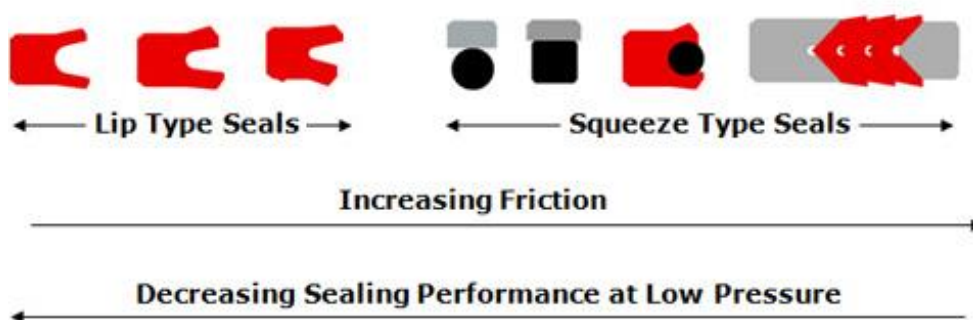


Figur 9 Alumecco cylinderrör dimensioner. Källa: Alumecco

7.6 Tätningar & styrningar

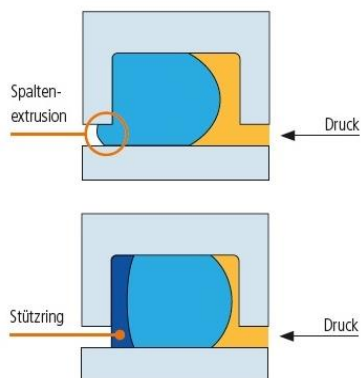
De statiska tätningar som kommer att användas kommer uteslutande att vara O-ringar. Av dem som kan komma i kontakt med testmaterialet väljs uteslutande i FKM för kompatibilitet. De O-ringar som tätar dubbelmantlingen kan väljas i NBR eftersom ingen risk för kontakt med annat än värme/-kylkretsens medie föreligger.

För kolv­tätningarna som kommer ta mest stryk i denna apparatur finns flera alternativ, dock har alla sina för och nackdelar. Klämtyper av kolv­tätningar klarar galant de tryck som acceleratorn producerar, dock så är de känsliga att köra torra, har relativt hög friktion och ej lämpade för osmörjande material eller material med fast eller nötande partiklar. De O-rings aktiverade tätningarna ger bra tätningen men hög friktion även fast man väljer gliddelar i t.ex. PTFE + brons i om den relativt stora förspänning de åstadkommer.

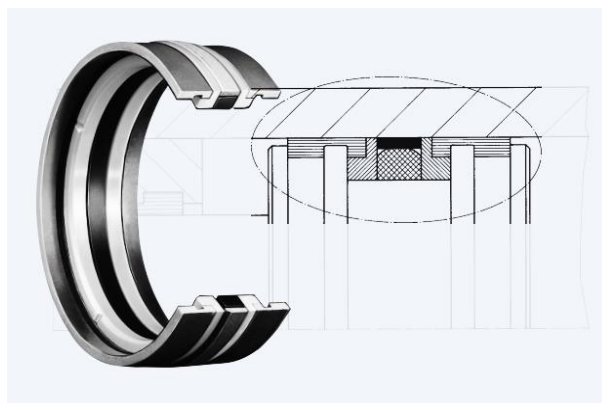


Figur 10 Kolv­tätningstyper Källa: Hydrosanat

Vanliga enkla och billiga O-ringar går att använda i dynamiska applikationer, dock är ej nötande eller abrasiva partiklar önskvärt eftersom dessa sliter ut tätningen snabbt. Toleranserna som krävs är även mycket snäva och uppnår man ej dessa blir risken för spaltextrusion stor. Användning av stödringar är näst intill ett krav om glesa toleranser och höga tryck används.



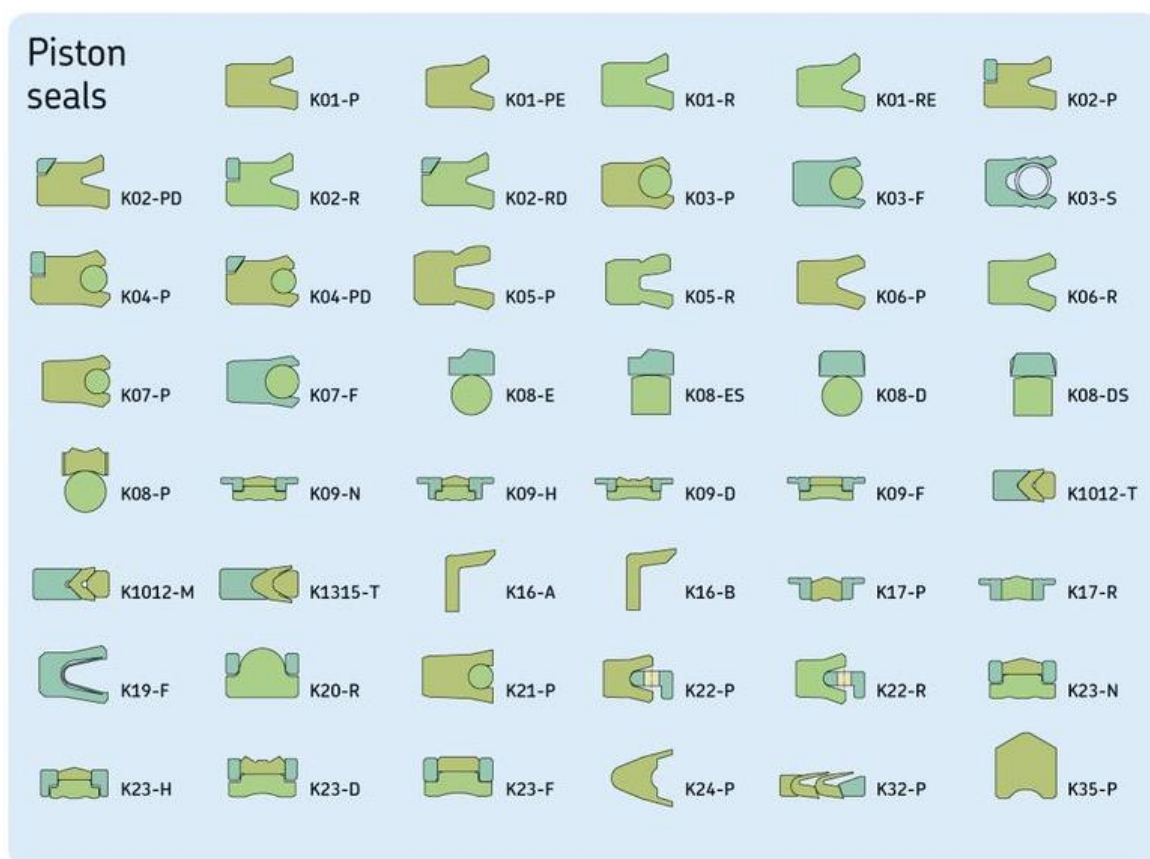
Figur 11 Spaltextrusion
Källa: Ludwig-Meister



Figur 12 GD1000K Kolv­tätning Källa: Hunger-Dichtungen

Läpptätningar som erhåller lägre friktion än o-rings och klämtätningar, tätar även de med att materialet i dem blir komprimerat vid montering som förspänner dessa så de kan åstadkomma en effektiv tätning vid låga tryck. Dock lätt retfullt är tillverkningsmetoden oftast maskinell bearbetning (svarvade). Vid bearbetning används speciella knivverktyg, en begränsning med bearbetade tätningar är att materialet inte kan vara för mjukt, de flesta leverantörerna har en oskriven undre gräns på ca 80°shore A. Den höga hårdheten ger mindre svikt i tätningarna och kräver i sin tur noggrannare toleranser.

Skall mjukare material användas finns inga garantier och geometrin spelar stor roll, en metod som ibland används är att frysa elastomeren med flytande kväve och bearbeta den snabbt, denna procedur är dock inget att rekommendera. Bearbetade läpptätningar görs ofta i olika kvaliteter av PUR som har bra beständighet mot slitage och nötning.



Figur 13 SKF Machined Seals Källa: SKF

I slutändan om man söker en tätning som kan ta upp så stora toleranser som möjligt och erhåller minsta möjliga friktion hamnar man på fjäderaktiverade läpptätningar. Denna typ av tätning innehåller sällan elastomerer som byggmaterial utan oftast har de ett mer plastiskt ursprung t.ex. PTFE i olika former eller UHMW-PE. (M-Seals)



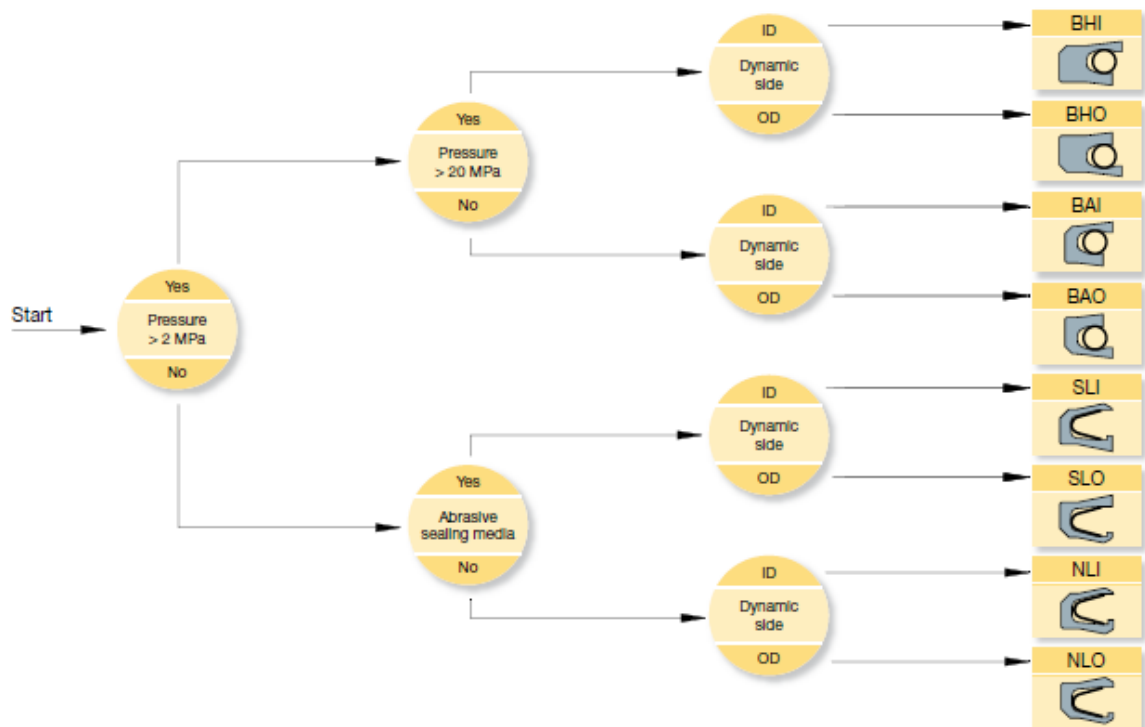
Figur 14 Fjäderaktiverade läpptätningar Källa: M-Seals

Denna typ av tätning har olika fjädrar som aktiverar tätningen, vilket ger ett mer kontrollerat tryck än den som fås vid kompressionen av en elastomer. De fjädrar som används är av normal spiraltyp, snedställd spiral och hävarm. Lägsta trycket och lägsta friktionen fås med hävarmsfjädern vilket önskas i detta fall.



Figur 15 Fjädertyper Källa: AllSealsInc

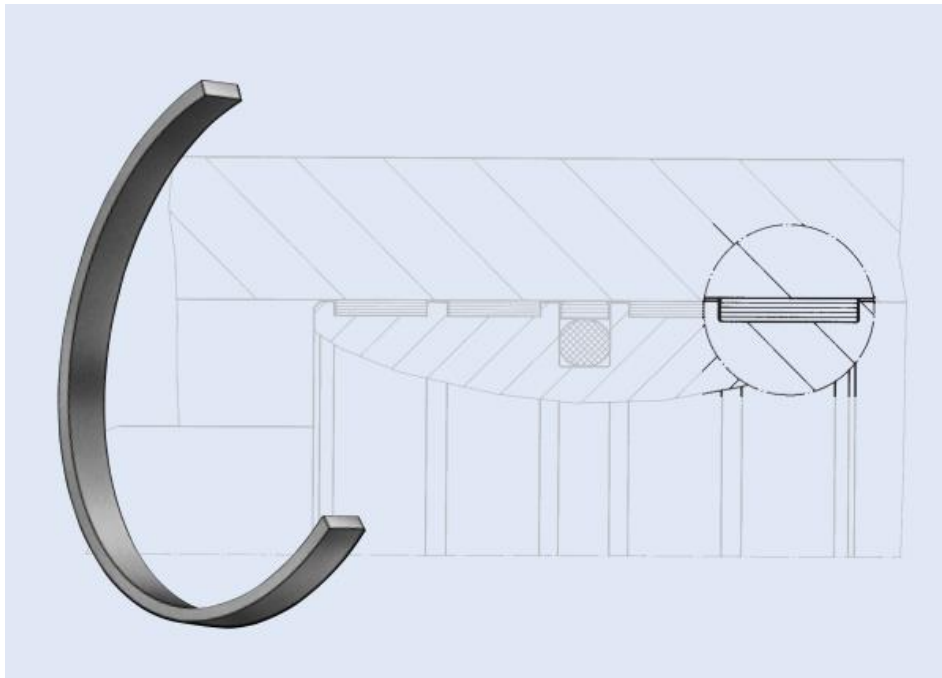
Fördelaktigt är även de hårda plastiska materialen kan tillverkas med sådan geometri att man får en bättre "skrap" effekt som håller rent och undviker att partiklar smiter igenom tätningen. Som möjliga leverantörer av denna artikel hittas Parker Hannifin och M-Seals, eftersom M-Seals levererar tätningar i betydande mängder per år åt Fluid-Bag går det lite enklare att få en specialvariant tillverkad. Tätningarna landar i slutändan på 192€/10st vilket gör att en komplett uppsättning till acceleratoren landar på 38,40€, det relativt humana priset medgör att varje gång man kör kundprov kan nya tätningar användas utan att man blir ruinerad eller testet blir dyrt för kunden.



Figur 16 Pradifa Engineered Seals Källa: Parker

I samråd med M-Seals designer för denna typ av tätningar diskuterades tätningsförmågan hos dessa tätningar vid låga tryck och vilken typ av förspänning de åstadkommer. Den förspänning som tätningen ger mot cylindern motsvarar ca 4 bars tryck vilket är mycket lågt i tätnings sammanhang. Torrkorning är inga problem och att läckaget kommer att vara negligerbart vid trögflytande media ficks även bekräftat, skrapfunktionen konstateras ett måste och görs specifikt för denna applikation.

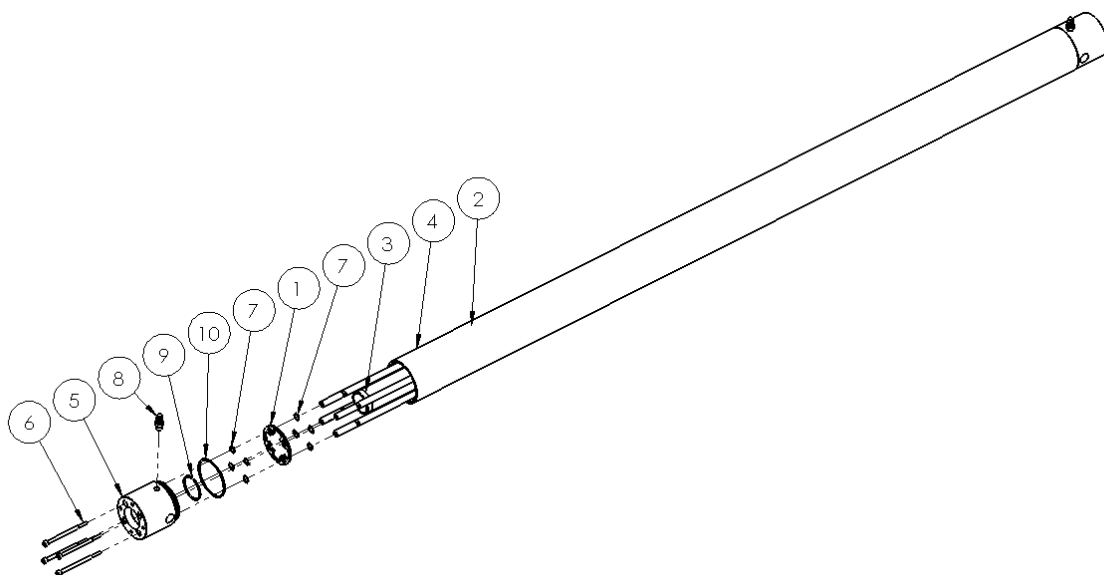
Kolvstyrningar görs utan destoidare eftertanke på annat än låg friktion och enkel montering. Därför väljs en standard kluven kantig bandstyrning av POM-PTFE-Brons blandning.



Figur 17 Kolvstyrning Källa: Hunger-Dichtungen

8 Konstruktionen

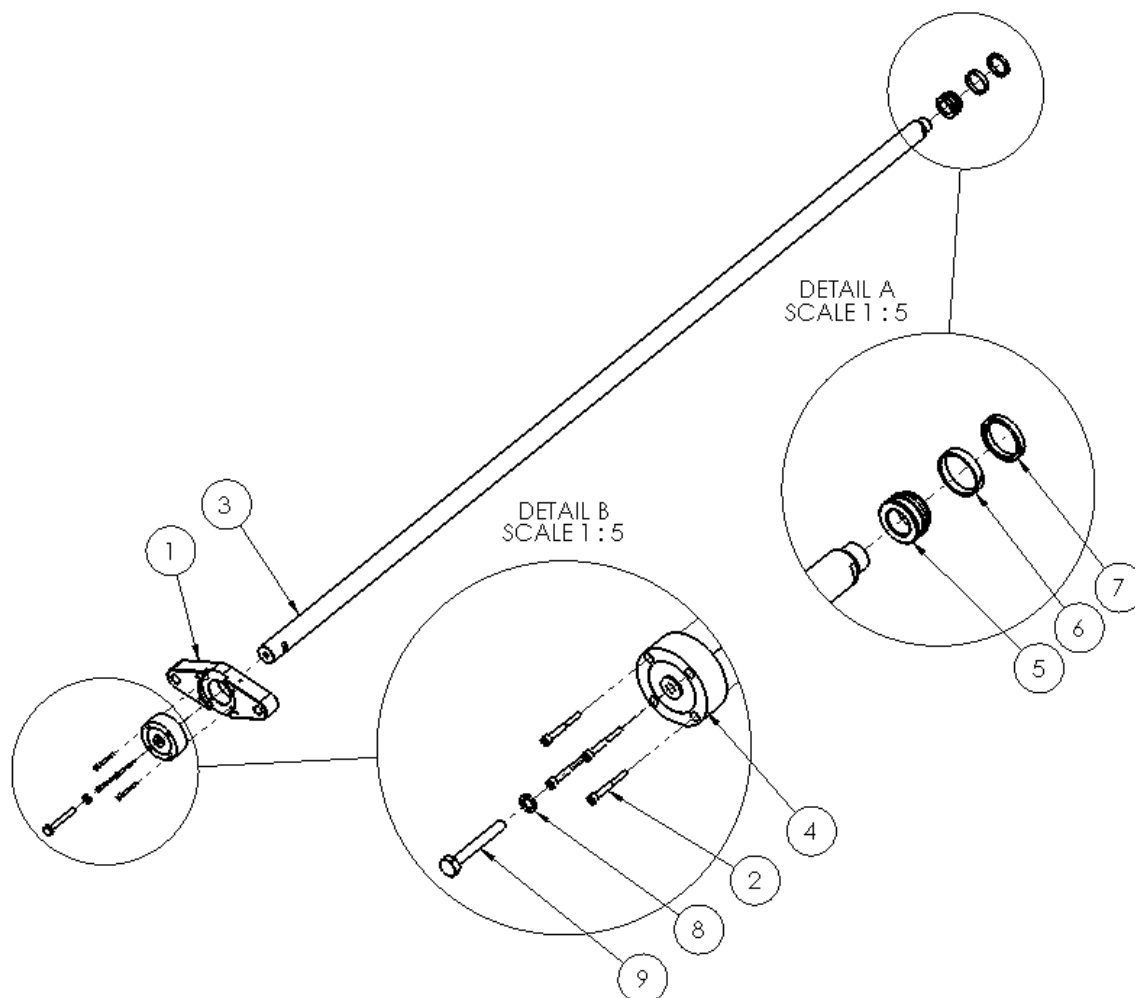
Den mest fundamentala komponenten i acceleratoren är testcylindern med dragstänger, dubbelmantling och gavlar. Statiska o-rings tätningar i NBR mot värme-/kylkretsen och FPM mot testcylindern. Snabbanslutningarna med backventiler som gör värme-/kylkretsen sluten när den inte är inkopplad. Hela paketet spänns ihop med skruvar som via dragstängerna håller allt samman. Denna del kan tas i sin helhet ur acceleratoren endast med att koppla bort värme-/kylkretsen och skruva loss matningsenheterna och urtappningsventilerna, för att kunna servas och granskas enklast möjligt. Gavlarna är den mest kostsamma komponenten pga. att de har snäva toleranser i princip överallt, hål överallt och svåra bearbetningar.



Figur 18 Sammanställning 403277.

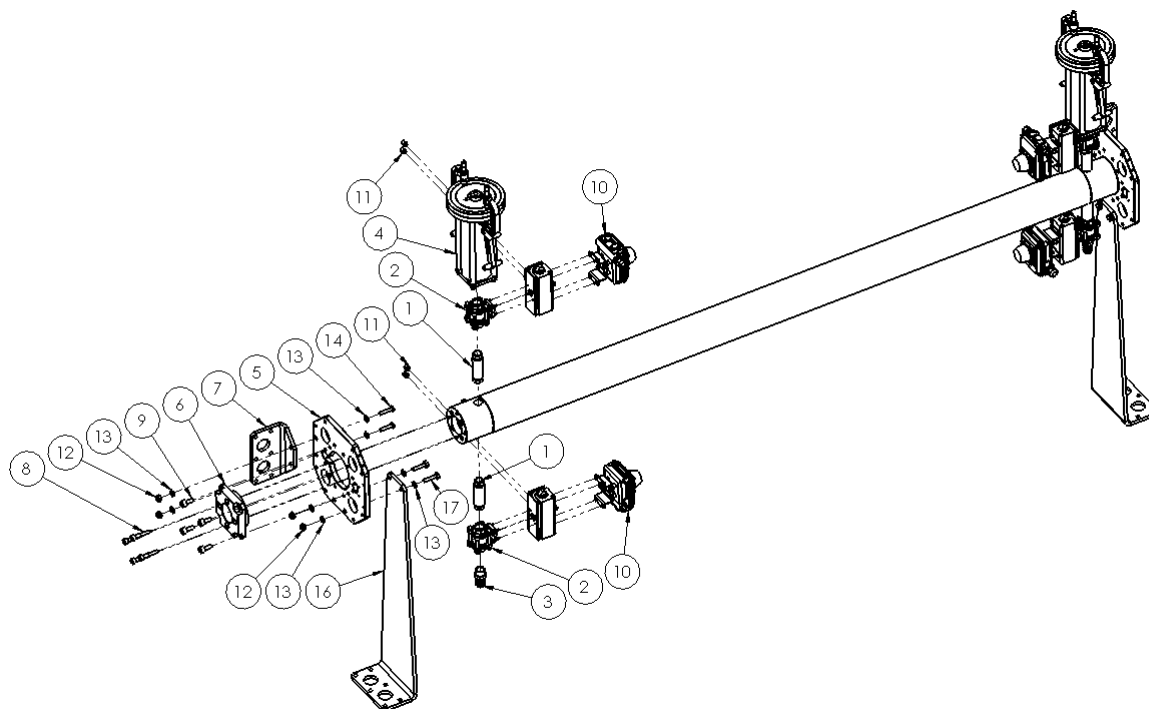
Som en positiv bieffekt som helt av slump kommit med är att dubbelmantlingen som fungerar som värmeväxlare även kommer att kunna användas för att hjälpa hålla temperaturen på materialet konstant. Även i scenariot att kylning eller värmning inte ens skulle användas så leder testcylindern i aluminium ut värmen via konduktion till mediet inne i dubbelmantlingen, som ger systemet en betydligt större värmetröghet vilket är önskvärt vid långa testserier. Var en stor energimängd hamnar på ett litet produktprov som helst skulle hållas på en så konstant temperatur som möjligt. Samtidigt har dubbelmantlingen gjord av PMMA även ganska dålig värmeledningsförmåga vilket hjälper till att isolera systemet från omvärlden.

Den kanske näst mest grundläggande detaljen i acceleratoren är testkolv med kolvstång, lastcell och dragbalk. Hålet i dragbalken är gjort så att man kan endast med att demontera lastcellen dra ut hela kolvstången, varefter att byta tätningar och styrningar på kolven är ytterst enkelt utfört. Kolven är gjord på ett sånt sätt att tätningen enkelt kan tryckas på kolven var den snäpper fast, inga verktyg behövs. Dock orsakar den samma designen stora smutsfickor.



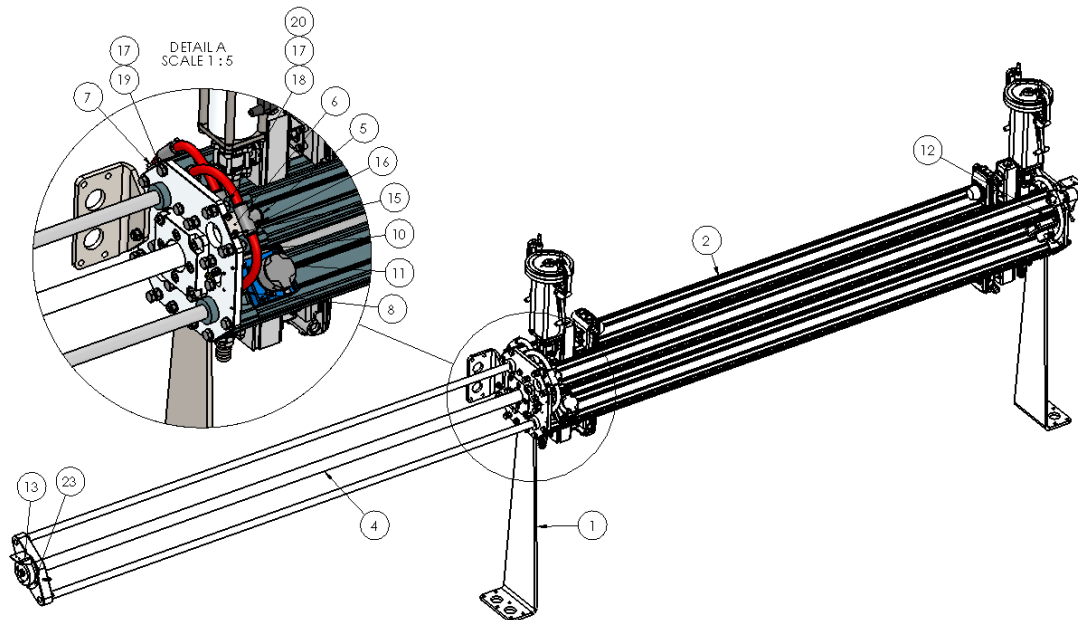
Figur 19 Sammanställning 403109.

Följande steg innehåller huvudgavlarna, flänsförband till testcylinder samt fästen, matningsenheter och urtappningsventiler. Vid detta skede kan acceleratoren monteras fast i vägg och golv så man har en fast utgångspunkt. Urtag i huvudgavlarna är gjorda så att snabbkopplingarna för värme-/kylkretsen som sitter på testcylindern skall kunna dras ut utan att behöva demonteras. Anslutningen mellan testcylindern och ventilerna bör tätas i gängorna.



Figur 20 Sammanställning 403214

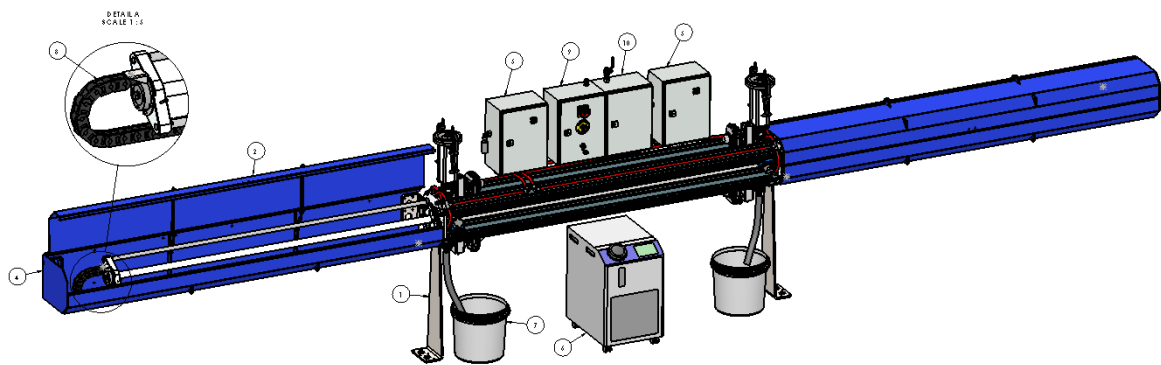
Därpå följande steg är att montera testkolvorna till testcylindern, cylindrarna till huvudgavlarna, fästen för slangdragningar, fästen för kabelkedja, pneumatik kopplingar till cylindrarna och vajergivare. Slangdragningar till cylindrarna görs så symmetriskt som möjligt för att acceleratoren skall bete sig likadant i bägge riktningar i bägge sidor.



Figur 21 Sammanställning 403267.

Slutligen monteras skyddskåpor, täckplåtar, värme-/kylenheten sätts in. Proportional styrning, el och pneumatik skåp sätts upp. Pneumatiken kopplas till styrdonen på ventilerna, och matningen till proportional skåpen kan dras.

Tryckluft och elanslutning finns bägge i detta fall rakt ovanför, varvid deras anslutningar bekvämt kan placeras ovan på respektive skåp. Tryckluften förses med ventil för att säkert kunna isolera acceleratoren från energikällan, huvudbrytaren kan låsas med hänglås så oönskad användning under service eller dylikt ej kan ske. Huvudbrytare och nödstopp placeras på framsidan av elskåpet. På elskåpet sätts även en Ethernet anslutning i vilken användaren stöpslar i sin dator för att utföra test. Inom elskåpets väggar sitter en enkel PLC som endast fungerar som kollektor och förmedlare av signaler. Viktigt att notera är att tanken är att all styrning sker via LabView, därmed är acceleratoren fullständigt vettlös om inget är inkopplat. Det enda man kan göra är att tvångsköra funktionerna via ventilblocken.



Figur 22 Sammanställning 403269.

Utan el, data eller byggnadstekniska komponenter innehåller acceleratoren lite drygt 1000 komponenter varav 132 komponenter är unika (tillverkade) och 78 sammanställningar. Den är 7000mm lång, 600mm djup och 1450mm hög.

För att ge lite perspektiv så innehåller en normal personbil ca 30.000 komponenter, tar mellan 1 – 4 år och ca 1000 personer i anspråk att utveckla. (Autoblog).

9 Applicerbara teorier

Mycket material finns att tillgå kring ämnet viskösa flöden, vad som dock gör saken lite knepigare är hur mer extrema eller säregna material skall modelleras. De flesta modeller fallerar på ett eller flera ställen och passar ofta bara in under specifika flödesintervall eller för fluider med specifika beteenden. Olika analytiska modeller och metoder finns för olika typer av viskösa fluider, men felet kan snabbt bli ackumulerade till ofantliga proportioner när fluiderna i sig själva inte direkt alltid passar perfekt mot de modeller som används.

Detta arbete söker främst de enklaste möjliga direkta tekniska applikationerna av diverse teorier som kan hittas. Hårda och kalla analytiska metoder har enligt egen utsägo ett för brett spektrum att försöka passas mot, med endast ett fåtal variabler att tillgå för denna passning. T.ex. är de flesta matematiska modeller beroende av viskositeten som en konstant, funktion eller variabel. Att få ett tillförlitligt värde på viskositet i områden som motorolja är en enkel process, med god noggrannhet. Detta är dock inte fallet med icke-newtonska fluider eller fluider med extremt högviskositet. Eftersom viskositet inte är en storhet som direkt kan observeras mäts den indirekt. T.ex. genom att snurra en stav i ett kärl och mäta hur mycket den bromsas av materialet (Brooksfeld viskosimeter), eller genom att mäta mängden som rinner genom en öppning med noga bestämd geometri över en viss tid (målfärg), eller genom att släppa en kula genom fluiden och mäta tiden den tar att falla till botten (motoroljor).

För de material acceleratorn är tänkt så fallerar dessa metoder ofta p.g.a. orsaker som att materialet är så skjuvkänsligt att det ändrar hela tiden under mätningen, materialet rinner inte till så att man får provstaven som snurras täckt i en Brooksfeld viskosimeter. Kulor lämnar liggande ovanpå ytan iom. att många material beter sig som pseudo-plastiska material och inte alls som fluider till en viss gräns. Att låta materialet rinna genom bestämda geometrier fungerar heller inte särskilt tillfredställande, iom samma pseudo-plastiska beteenden och även vid tillräckligt höga viskositeter så blir metoden för grov eller kräver för stora prover.

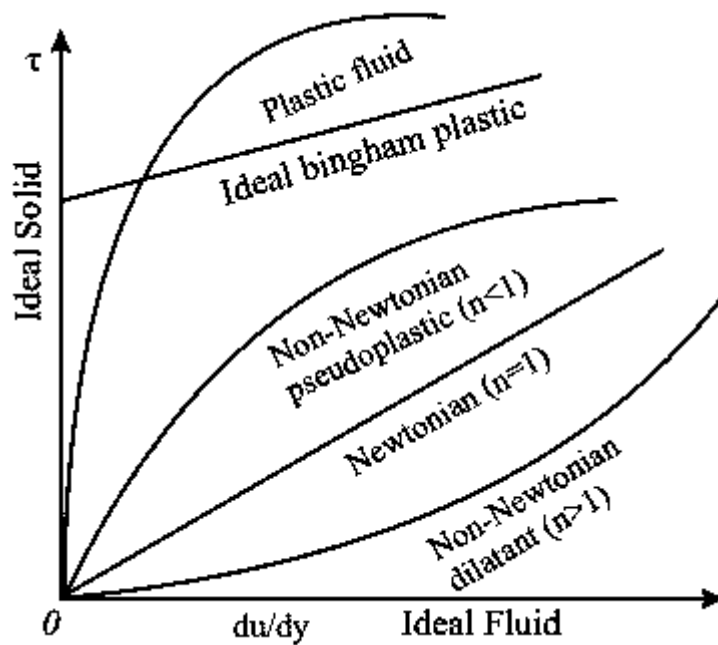
9.1 Typer av fluider

Baserat på beteende vid påfrestning kan man klassificera de reella fluiderna i 4 kategorier:

- Plastiska
- Pseudo-plastiska
- Newtonska
- Dilatanta

Därtill finns även ett par kategorier som ej har motsvarigheter i verkligheten:

- Ideella fluider
- Ideella plastiska fluider (Bingham plastic)



Figur 23 Shear stress and deformation rate relationship of different fluids. Källa: NPTEL

9.1.1 Ideella fluider

En ideell fluid innehar egenskaperna:

1. Okompressibel
2. Ingen viskositet
3. Jämmt flöde (ingen friktion -> inget motstånd -> plugströmmning)

En ideell fluid är ett teoretiskt påfund som ej återfinns i naturen, dock så är vissa fluider relativt nära ideella i specifika sammanhang så ofta används ideella fluider i matematiska modeller. T.ex. för vatten och luft inom rimliga intervall var friktionen kan försummas. Eftersom en ideell fluid har noll viskositet finns heller inga krafter som kan skapa turbulens, virvlar eller för den delen motkraft mot flödet. (NPTEL, u.å.)

$$\mu = 0$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} = 0$$

En ideell plastisk fluid (ofta kallar Bingham Plastic) är en fluid som beter sig som en solid under elasticitetsgränsen och som en fluid över denna, medans skjuvspänningen är linjärt proportionell mot skjuvningen över elasticitetsgränsen (Hookes lag). Iom. denna egenskap kränker en plastisk fluid definitionen av en fluid något eftersom den beter sig som ett fast material under denna gräns. Över elasticitetsgränsen beter sig dock fluiden som en fluid enligt tidigare definitioner torde te sig. (The University of California at Berkeley, u.å.)

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

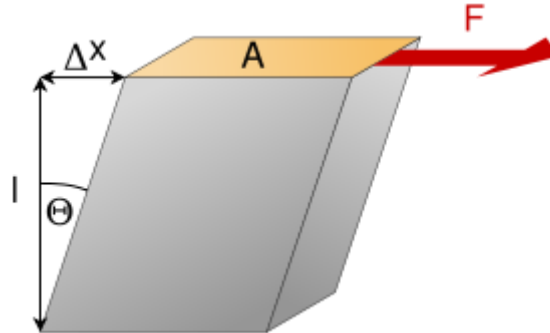
$$\tau = G \cdot \gamma$$

Var skjuvmodulen G kan härledas från poissons tal och E-modulen:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Och skjuvtöjningen γ definieras som skjuvningen av ett skikt (Valtanen, E. , 2009):

$$\gamma = \frac{\Delta x}{l}$$



Figur 24 Shear-modulus Källa: Wikipedia

Eftersom endast en elastisk deformation åstadkomms under den kritiska skjuvspänningen uppstår ingen kontinuerlig rörelse ($u = 0$). Därmed blir skjuvspänningen enligt tidigare definitioner hos den ideella plastiska fluiden räknat som fluid noll. (NPTEL, u.å.)

$$|\tau_{rz}| < \tau_0 \quad \frac{du}{dr} = 0 \quad (\text{Stum kropp})$$

$$|\tau_{rz}| > \tau_0 \quad \tau_{rz} = \mu_\infty \frac{du}{dr} \pm \tau_0$$

9.1.2 Reella fluider

En reell fluid innehar egenskaperna:

1. Kompressibel
2. Viskositet
3. Ojämn flödesfördelning (friktion -> turbulens, rotation, eddy flöden)

I praktiken är alla vätskor reella fluider iom att de alla har en viskositet > 0 . Specialfall som superfluider finns, såsom flytande helium nära nollpunkten som inte har någon viskositet. Fenomen som detta bör dock ej överhuvudtaget beaktas i detta arbete.

En Newtonsk fluid är en reell fluid vars skjuvspänning är linjärt proportionell mot skjuvningen, pga. att viskositeten är konstant (vid konstant temperatur och tryck). Den beter sig precis som en fluid förväntas bete sig, flyter och formas mot den omgivning den befinner sig i. Den kan icke motstå någon form av skjuvspänningen utan att flyta/deformera, men gör alltid motstånd mot att flyttas och deformerar. Under denna kategori faller vatten, oljor, sirap, glycerin och de flesta gaser. (NPTEL, u.å.)

$$\mu > 0$$

$$\mu = \text{konstant}$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} \rightarrow \tau \propto u$$

En icke-Newtonsk fluid är en fluid vars skjuvspänning icke är proportionell mot skjuvningen. Den beter sig som en newtonsk fluid i den meningen att en påsatt kraft kommer att orsaka en förflyttning/deformation av fluiden, oberoende hur liten denna än är. Likheten tar dock slut där iom att en icke-newtonsk fluids viskositet ej är konstant utan varierar mot skjuvhastigheten.

Ingen universell analytisk modell finns för att beskriva sambandet mellan skjuvning och skjuvspänning men flertalet modeller finns för att approximera detta samband. Man brukar dela in icke-Newtonska fluider i pseudoplastiska och dilatanta (eller thixotropiska och rheopecta), beroende på om de förtunnas eller förtjockas under skjuvning. Under pseudoplastiska icke-newtonska fluider hamnar t.ex. de flesta geler, tryckfärg, polymerer, etc. Under dilatanta icke-newtonska fluider hamnar plättsmet, gjutharts, etc. De pseudoplastiska fluiderna är betydligt vanligare än de dilatanta.

9.2 Oswald–de Waele modellen

En av de vanligaste modellerna för icke-newtonska fluider är Power-Law modellen vilken också går under namnet Ostwald-de Waele modellen efter dess upphovsman. I denna modell ges fluiden ett flödes konsistens index m och ett flödes beteende index n . Flödes konsistens index m och flödes beteende index n används för att modellera skjuvspänningen mot skjuvningen. Viskositeten brukar här kallas verklig eller effektiv viskositet.

$$n \neq 0$$

$$\tau = m \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1} \frac{du}{dr}$$

$$\mu_{eff} = m \left| \frac{du}{dr} \right|^{n-1}$$

Flödes beteende index n ger även klassificeringen för fluiden:

$$n < 1 \rightarrow \textit{Pseudoplastisk}$$

$$n = 1 \rightarrow \textit{Newtonsk}$$

$$n > 1 \rightarrow \textit{Dilatant}$$

Flödesprofilen i ett cirkulärt rör hos en Newtonsk fluid får en parabolisk form var det yttersta lagret närmast väggen är stillastående. Flödesprofilen för en icke-Newtonsk fluid enligt power-law modellen följer:

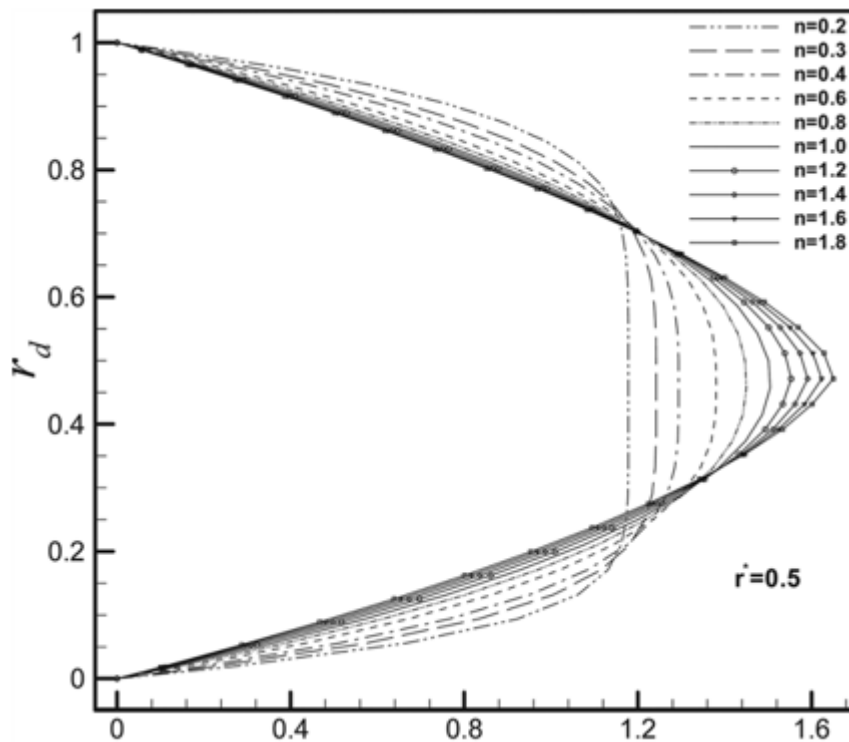
$$u(r) = \frac{n}{n+1} \left(\frac{dp}{dz} \frac{1}{2m} \right)^{1/n} \left(R^{\frac{n+1}{n}} - r^{\frac{n+1}{n}} \right)$$

Sätter man $n = 1$ så får man ekvationen som beskriver flödesprofilen hos en newtonsk fluid:

$$u(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} (R^2 - r^2)$$

Var u som funktion av r är den lokala axiala hastigheten vid radien r och R är rörets radie, med tryckskillnaden p över längden z .

I nedanstående figur kan man se hur flödesprofilen förändras vid olika flödes beteende index n . Vid $n = 1$ är som förväntat profilen parabolisk.



Figur 25 Flödesprofil mot beteende index n . Källa: University of California at Berkeley

Det volymetriska flödet kan beräknas enligt:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\frac{1}{n} + 3} \left(\frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot L \cdot m} \right)^{\frac{1}{n}}$$

Vilket reduceras till Hagen-Poiseuille's ekvation om man sätter $n = 1$ och $m = \mu$. Ekvationen håller inom det laminära området. (Hinch, u.å.)

$$Q = \frac{\pi R^3}{\frac{1}{1} + 3} \left(\frac{\Delta p \cdot R}{2 \cdot L \cdot m} \right)^{\frac{1}{1}} = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L} = \frac{\pi D^4 \Delta p}{128\mu L}$$

Man bör givetvis vidta extra försiktighet i användningen av denna ekvation eftersom man lätt kan dra slutsatser om flöden vid helt andra omständigheter, men för en reell icke newtonsk fluid är inte beteende index n konstant. Varvid denna modell fallerar.

Reynolds tal som annars brukar beräknas:

$$Re = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu}$$

Har en generaliserad form för icke newtonska vätskor:

$$Re_n = \frac{\rho \cdot u^{2-n} \cdot D}{8^{n-1} \cdot \mu_{ap}}$$

Var den uppenbara viskositeten μ_{ap} beräknas från:

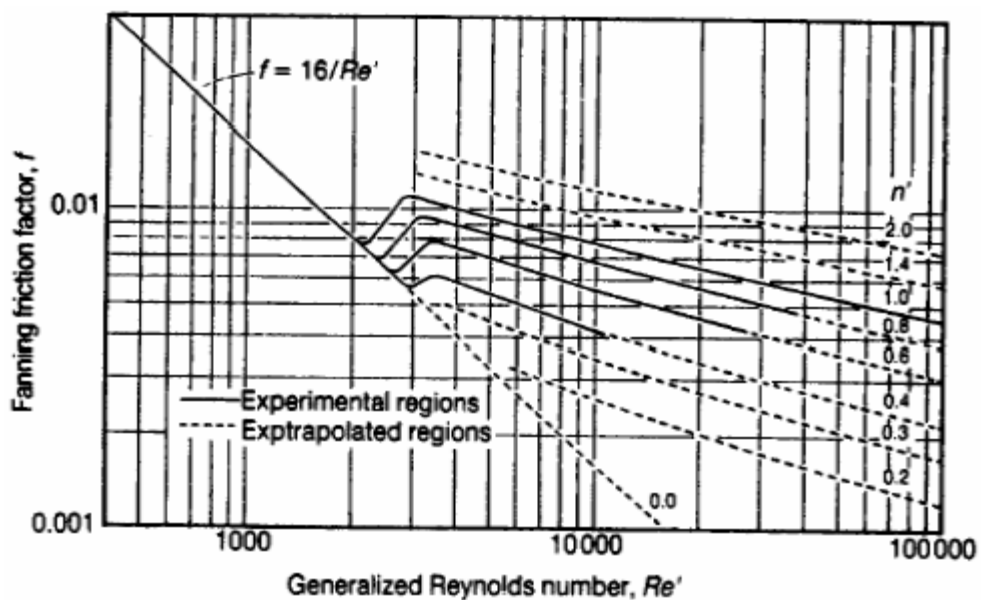
$$\mu_{ap} = m \left(\frac{8u}{D} \right)^{n-1}$$

Som kan användas för att beräkna Fanning friktionsfaktorn:

$$f = \frac{16}{Re_n}$$

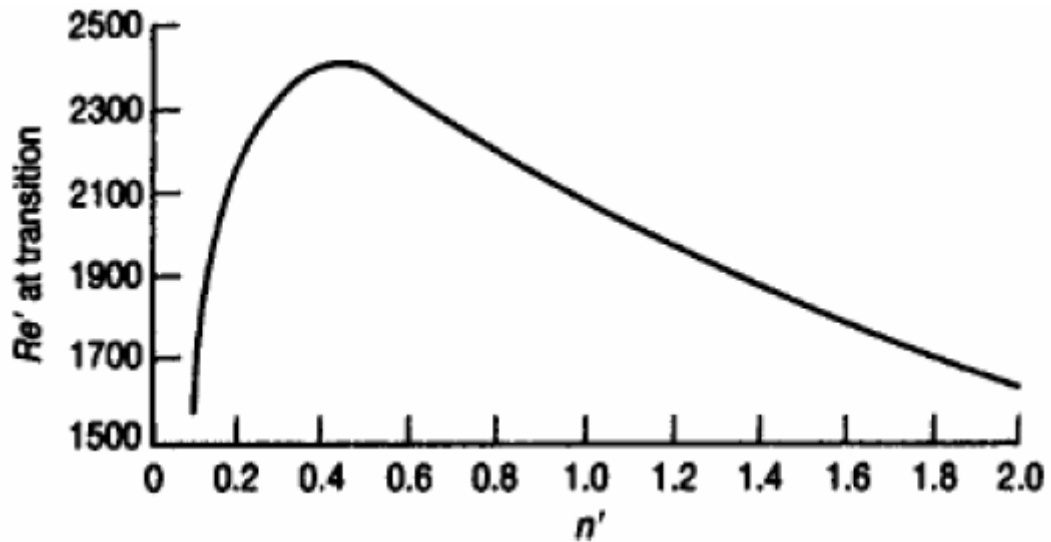
Som i sin tur kan användas för att beräkna tryckfallet med:

$$\Delta p_f = 4 \cdot f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{\rho u^2}{2}$$



Figur 26 Fanning friction factor. Källa (Nguyen, Q. 2012)

En sak till att hålla tungan rätt i mun med är att gränsvärdet mellan laminärt och turbulent flöde ej ligger i det normala intervallet mellan $2100 < Re < 2400$. Icke newtonska vätskor beroende på beteende index n har olika gränsvärden som kan ses ur diagrammet nedan.



Figur 27 Kritiska värden för Reynolds tal. Källa: Nguyen, Q.

9.2 Hagen-Poiseuille

Används för att beskriva flödet hos ett okomprimerbart, homogent material i cirkulära ledningar med konstant tvärsnitt under laminär strömning. Uppkallad efter Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen och Jean Marie Louis Poiseuille som upptäckte den oberoende av varandra. (Hyperphysics)

$$Q = \frac{dV}{dt} = v\pi R^2 = \frac{\pi R^4}{8\mu} \left(-\frac{\Delta p}{\Delta x} \right) = \frac{\pi R^4}{8\mu} \frac{|\Delta p|}{L} = \frac{\pi D^4}{128\mu} \frac{|\Delta p|}{L}$$

Poiseuille's lag har vissa begränsningar som att flödet är laminärt och att hastighetsprofilen hos flödet är väl etablerad. Dvs. så är modellen ej applicerbar på korta sträckor, i närheten av öppna ändar, på grova rör eller låga viskositeter som kan göra att flödet överskattas. Om sträckan är kort kan Hagen-Poiseuille ekvationen ge omåttligt höga flöden, ett övre tak kan ges utgående från Bernoulli's princip som:

$$Q = \pi R^2 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

9.3 Andra teoretiska modeller

En mycket stor skara andra teoretiska modeller finns vilka kan användas för att modellera och beräkna flöden och tryckfall hos dessa. Oswald-de Waele modellen är kanske en av de sista som ännu har stor applikationsbredd, efter det blir ekvationerna mer specifika, variablerna fler och användningsområdet smalare. Oftast så byter de mer exakta modellerna ut enkelheten mot komplexiteten för att få en bättre passning. T.ex. är Oswald-de Waele modellen en modell med endast två variabler, merparten har 3, 4 eller fler. Snokar man runt tillräckligt så hittar man ändå till sin förvåning och ämnets torra art, parametrar på flera vanligt förekommande material för Oswald-de Waele modellen. Detsamma kan inte sägas om andra modeller. (Nguyen, Q. 2012)

För att nämna några modeller som inte kommer att behandlas vidare här, men delar av dem kan kanske komma i användning senare för databehandlingen av mätdata till acceleratorn. (Nguyen, Q. 2012)

- Carreau viscosity equation,
 - Skiljer sig från Oswald-de Waele modellen vid mycket hög och mycket låg skjuvning.
 - 4 parametrar.
- Cross viscosity equation
 - Använder en övre och en undregräns för viskositeten.
 - 4 parametrar.
- Ellis fluid model
 - Skiljer sig från Oswald-de Waele modellen endast vid låg skjuvning.
 - 3 parametrar.
- Herschel-Bulkley fluid model
 - Modifierad version Bingham plastisk som omfattar icke-linjärt beteende över flytgränsen.
 - 3 parametrar.
- Casson fluid model
 - Beskriver viskoplastiskt beteende vid konstant skjuvning
 - Används specifikt för yoghurt, blod, tomat puré och smält choklad.
 - 2 parametrar.

- Rabinowitsch-Mooney equation
 - Använder korrektionsfaktorer för att jämföra en newtonsk mot en icke-newtonsk fluid.
 - Behöver mätdata över intervall för att anpassas.

Andra vanligt förekommande saker som ofta kan utnyttjas rakt av eller hittas i modifierad form för icke newtonska fluider är bl.a. Darcy-Weisbach ekvationen som är grundstenen i ett vanligt Moody diagram. Darcy-Weisbach ekvationen ger upphov till friktionstalet f_D som är 4ggr större än friktionstalet f som är Fannings friktionsfaktor, men baseras i princip på samma sak. Särskild uppmärksamhet bör läggas på att man inte blandar ihop dessa.

10 Dimensionering

Iom att tryck upp till drygt 30bar (i praktiken 20bar) önskas kunna köras i acceleratoren så bör särskild hänsyn tas till detta eftersom de pneumatiska cylindrar (och ventiler) som driver anläggningen inte kan köras högre än 10bar. För att kunna åstadkomma önskat tryck görs de drivande cylindrarnas kombinerade area (två per kolv) större än testcylinderns för att på så sätt växla ut trycket från systemtryckets tillgängligt dryga 7bar (1bar säkerhetsmarginal). Kolvarna skulle ogärna göras mindre än 50mm eftersom det blir trångt med tätningar, anslutning, glapp- och snedställningstoleranser annars. Fördelaktigt är även om man kan hålla sig till vanligare standard dimensioner så är tätningarna enklare att få fram.

$F_C =$ *Kolvkraft i testcylinder*

$F_p =$ *Dragkraft ur pneumatiska cylindrar*

$p_C =$ *Tryck på testkolv*

$p_l =$ *Tillgängligt lufttryck*

$d_1 =$ *Kolv diameter på pneumatisk cylinder*

$d_2 =$ *Stång diameter på pneumatisk cylinder*

$d_c =$ *Kolv diameter på test cylinder*

$$F_C = \frac{p_C \cdot \pi \cdot d_C^2}{4} \quad F_p = \frac{p_l \cdot 2 \cdot \pi \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{4}$$

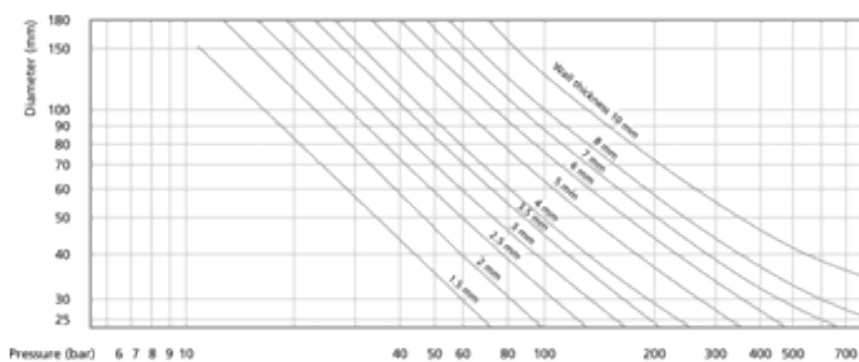
$$F_C = F_p \rightarrow \frac{p_C \cdot \pi \cdot d_C^2}{4} = \frac{p_l \cdot 2 \cdot \pi \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{4} \rightarrow p_C = \frac{2 \cdot p_l \cdot (d_1^2 - d_2^2)}{d_C^2}$$

$$\rightarrow p_C = \frac{2 \cdot 7\text{bar} \cdot ((80\text{mm})^2 - (25\text{mm})^2)}{(50\text{mm})^2} = 32,3\text{bar}$$

$$i = \frac{p_C}{p_l} = 4,62 \quad \text{Utväxling}$$

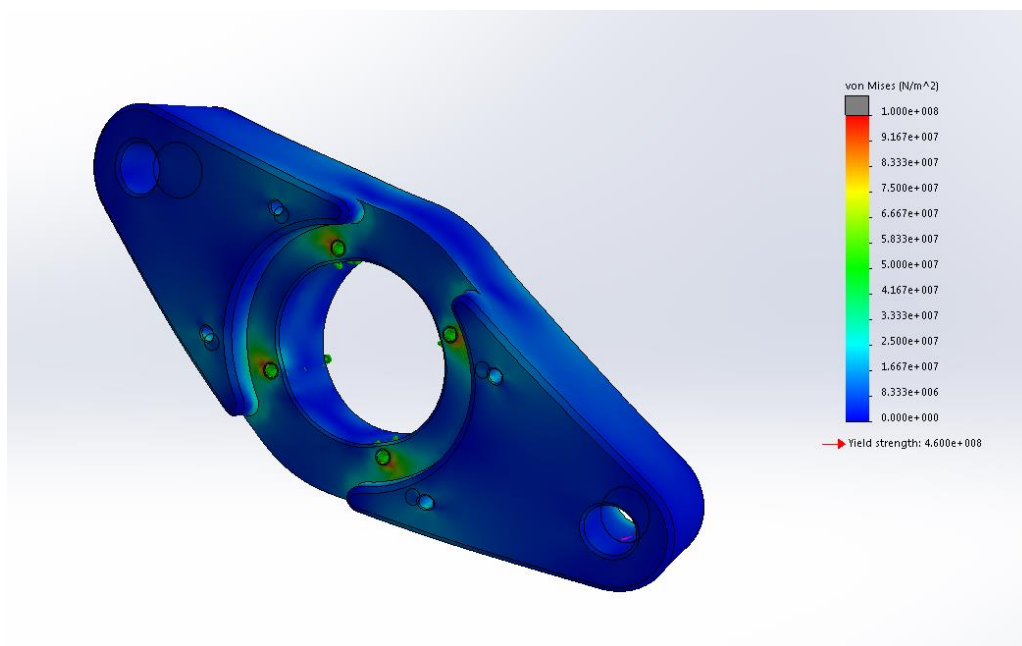
Som kan ses av beräkningarna ovan blir trycket utväxlat 4,62ggr med Ø50mm testcylinder och 2st Ø80mm drivande cylindrar med Ø25mm stång. Detta medför att trycket utväxlas från tillgängliga 7bar till 32,3bar.

Testcylindern dimensioneras hållfasthetsmässigt från tabellvärden och grafer. Den pneumatiska är per automatik inom sitt nominella bruksområde iom att ingen tryckstegring sker på den sidan. Positivt i detta upplägg är att de pneumatiska cylindrarna endast belastas med drag på kolvstången vilket gör att knäckning av denna inte kommer att ske. Grafen nedan visar max tillåten kontinuerlig belastning mot väggjocklek. Vald testcylinder profil Ø50mm i material EN-AW6060 T6 har en standard väggjocklek om 3mm vilket resulterar i ett max tryck om 70bar, vilket lämnar generös säkerhetsmarginal.

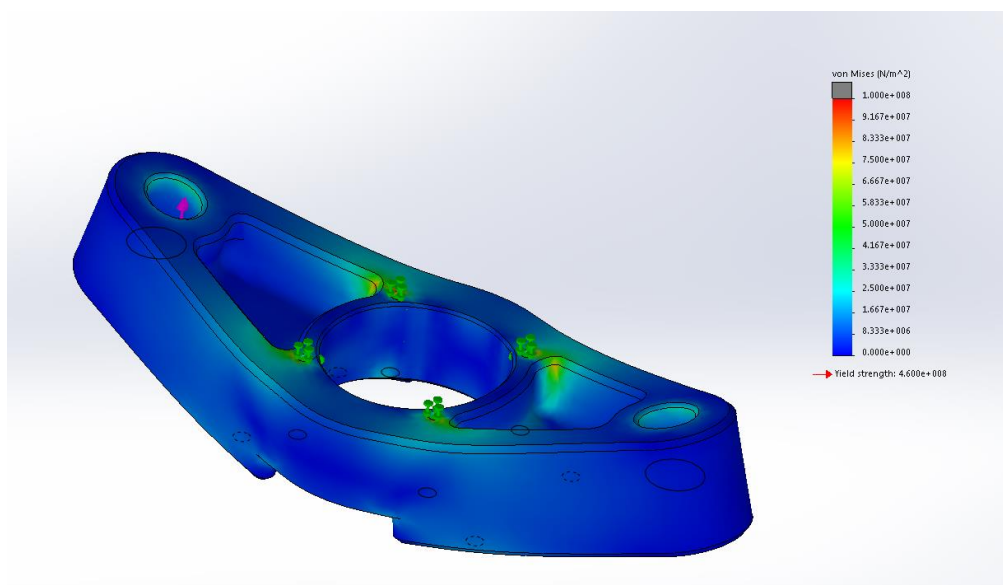


Figur 28 Max tillåtet tryck gentemot väggjocklek för cylinder profil Källa: Alumeco

Dragbalken genom vilken kraften från de pneumatiska cylindrarna förs över till den tryckstång som sitter ihop med kolven i testcylindern dimensioneras med FEA pga. dess geometri är för komplicerad för handberäkningar. Ett par snabba analyser medgör att låglegerat stål eller höghållfast aluminium är att föredra. Pga. dragbalkens placering långt ute på kolvstängerna utan stöd från annat håll är låg vikt att föredra. Valet av material faller på EN-AW 7075, slutvikten landar på 1,25kg med en säkerhetsfaktor kring 3 och en försumbar deformation.



Figur 29 FEA-analys av dragbalk



Figur 30 FEA-Analys av dragbalk

Tryckstången som sitter mellan kolven och dragbalken dimensioneras mot knäckning med MITCalc. Snabbt kan konstateras att den kommer att bli grov, pga. dess längd på drygt ett par meter och kraften den överför $\sim 6430\text{N}$. Eftersom låg vikt på denna komponent är av värde så prioriteras aluminiumlegeringar. Med ett par snabba test i programmet kan konstateras att en höghållfast aluminiumlegering som EN-AW 2014 skulle ge en säkerhetsfaktor kring 6 vid ett slankhetstal omkring 138 och en total vikt på 7,5kg. Motsvarande stång i S355 skulle ge en vikt omkring 21kg med en säkerhetsfaktor kring 13, valet av aluminium leder till att den rörliga massan minskar med 27kg totalt av att endast denna komponent ändras och säkerhetsfaktorn halveras.

Slender strut (column) buckling

i Calculation without errors.

3.0 Calculation and check of buckling

3.1 Actual strut length	L	2123,00	[mm]
3.2 Axial load (force)	F	6430,00	[N]
3.3 Effective length	Leff	1379,95	[mm]
3.4 Slenderness ratio	SR(λ)	138,00	

3.5 Design of profile dimensions (Secant)

3.6 Safety coefficient	SF	10,00	Start
3.7 Excentricity ratio	μ	0,25	

3.8 Euler (elastic buckling)

3.9 Critical stress	σ_c	37,89	[MPa]
3.10 Critical force	Fcr	47610	[N]
3.11 Safety coefficient	SF	7,40	

3.12 Linear formula, Tetmajer

3.13 Critical stress	σ_c	37,89	[MPa]
3.14 Critical force	Fcr	47610	[N]
3.15 Safety coefficient	SF	7,40	

3.16 Parabolic formula, Johnson

3.17 Critical stress	σ_c	37,89	[MPa]
3.18 Critical force	Fcr	47610	[N]
3.19 Safety coefficient	SF	7,40	

3.20 Secant formula

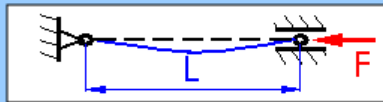
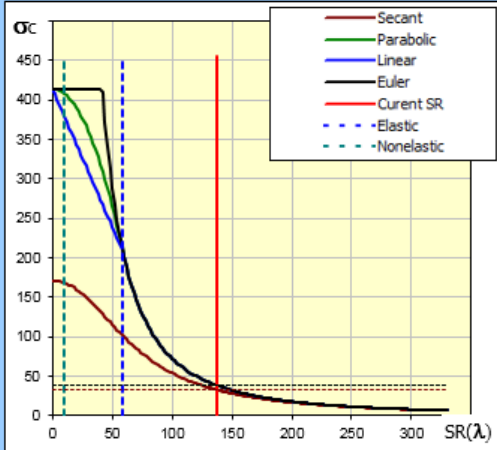
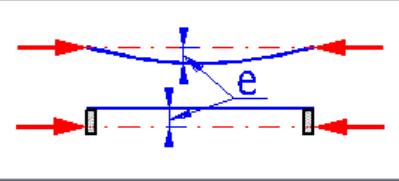
3.21 Eccentricity	e	7,08	[mm]
3.22 Max. fibre distance	y	20	[mm]
3.23 Eccentricity ratio	μ	1,42	0,25
3.24 Stress in column	σ	13,76222346	[MPa]
3.25 Critical stress	σ_c	32,31288327	[MPa]
3.26 Critical force	Fcr	40605,56668	[N]
3.27 Safety coefficient	SF	6,32	

3.28 Pure pressure

3.29 Compressive stress	σ	5,12	[MPa]
3.30 Critical force	Fcr	520248	[N]
3.31 Safety coefficient	SF	80,91	


3.32 Calculation of the max. force

3.33 Safety coefficient	SF	10,00	<input checked="" type="checkbox"/>
3.34 Max.F (Euler)	Fmax	4761	[N]
3.35 Max.F (Parabolic)	Fmax	4761	[N]
3.36 Max.F (Secant)	Fmax	4061	[N]

Figur 31 Mitcalc dimensionering av tryckstång mot knäckning.

Statiska o-rings tätningar dimensioneras m.h.j.a. Trelleborgs O-Rings kalkylator. Programmet fungerar som hjälpmedel genom att man matar in måtten på spår och o-ring samt väljer material, hårdhet och typen av belastning. Programmet ger direkt svar på om fyllnadsfaktorn är ok och om tillräcklig kompression uppnås, detta i både övre och undre änden av inmatade toleranser. Andra intrikata saker som om den försträcks tillräckligt vid montering och vilken typ av kraft som uppstår mellan hus och axel fås även svar på. Med detta hjälpmedel itererar man lätt fram till en fungerande design om man har lite erfarenhetsvärden man kan utgå från.



Trelleborg Sealing Solutions

Open File Save File Create PDF Print Reset Language Selection

ISO Quick Search
O-Rings + Housings

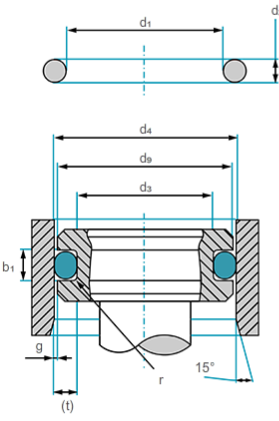
O-Ring Quick Search
O-Ring dimensions

Radial Outer Sealing | Radial Inner Sealing | Axial Sealing

static dynamic

inch millimeter

My Notes



Input [mm]	Nominal Size	Standard/Fit	Lower Tolerance Limit	Upper Tolerance Limit	Min. Dimension	Max. Dimension
Bore-Ø	d4	100.000	optional	0.000	0.100	100.000 100.100
Piston-Ø	d9	100.000	h9*	-0.087	0.000	99.913 100.000
Groove-Ø	d3	94.600	h9*	-0.087	0.000	94.513 94.600
Groove Width	b1	5.700	recom.	0.000	0.250	5.700 5.950
Groove Radius	r	0.300	recom.	-0.100	0.100	0.200 0.400
O-Ring Inside-Ø	d1	91.67	ISO	-0.77	0.77	90.90 92.44
OR Cross-Section-Ø	d2	3.53	ISO	-0.10	0.10	3.43 3.63

Temperature	°C	23	Linear Thermal Expansion Coefficient 10 ⁻⁶ K ⁻¹	175
O-Ring Material Group		NBR	O-Ring Material Hardness [IRHD]	70.00

	Concentric Position		Eccentric Position	
	min.	max.	min.	max.
Compression incl. R [%]	16.14	24.21	13.33	25.43
Compression incl. R [mm]	0.54	0.86	0.44	0.91
Gap g [mm]	0.000	0.093		0.187
Housing Fill [%]	53.95	66.68	TSS Part No:	
Stretch OR Inside-Ø [%]	2.24	4.07		
R [%]	1.86	2.89		
OR Cross-Section-Ø incl. R [mm]	3.33	3.56		
t [mm]	2.70	2.79		
Total Compression Force [N]	544	1178		

Version 5.1

ISO = in accordance with ISO 3601-1 Class B
R = Reduction in cross section due to elongation
OR = O-Ring
t = Radial Housing Depth (incl. gap)
* = in accordance with ISO 286-2

Figur 32 Trelleborg O-rings kalkylator.

Värme-/kylenheten överslagsberäknas för att ge ett hum om man är inom rätt effektområde. I beräkningarna försummas förlusterna, merparten av förlusterna är konvektiva i detta fall vilket även gör det svårare att få ett vettigt värde på dem, iom accelerators komplicerade form och hopsättning. Behövs ett mer exakt värde på denna förlust så finns alltid möjligheten till FEA analys men den bedöms vara onödig i detta fall. En del värden tas direkt ur SolidWorks av lathet och att risken för misstag är mindre den vägen.

Massan vatten som ryms inne i dubbelmantlingen + 5 liter som finns i tanken:

$$m_v = (A \cdot l + 5dm^3) \cdot \rho$$

$$m_v = \left(\frac{\pi \cdot [(100mm)^2 - (56mm)^2 - 4 \cdot (15mm)^2]}{4} \cdot 1940mm + 5dm^3 \right) \cdot 998 \frac{kg}{m^3}$$

$$= 14,06kg$$

Massan av gavlarna, testcylindern och dragstängerna tas direkt ur programmet. Dragstängerna är av syrafast stål medan testcylinder och gavlarna är av aluminium, därför separeras massan i varsin variabel.

$$m_a = 6,52kg$$

$$m_s = 10,96kg$$

Deras respektive specifika värmekapaciteter nedan (Valtanen, E. 2009):

$$c_v = 4,182 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$c_a = 0,896 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

$$c_s = 0,480 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Systemets specifika värmekapacitet beräknas till:

$$q = (c_v \cdot m_v + c_a \cdot m_a + c_s \cdot m_s) = 69,897 \frac{kJ}{K}$$

Värme- och kyleffekten:

$$P_c = 2400 \text{ W}$$

$$P_h = 650 \text{ W}$$

Tiden att värma och kyla systemet beräknas:

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{q \cdot \Delta T}{P} \rightarrow \frac{t}{\Delta T} = \frac{q}{P}$$

$$\frac{t_c}{\Delta T} = \frac{q}{P_c} = \frac{69897 \text{ J/K}}{2400 \text{ J/s}} = 29,124 \text{ s/K}$$

$$\frac{t_h}{\Delta T} = \frac{q}{P_h} = \frac{69897 \text{ J/K}}{650 \text{ J/s}} = 107,54 \text{ s/K}$$

Svaret är som tillsynes ovan ca 108s per grad för värmning och 29s per grad för kylning. Detta resulterar i att ett max kast från 5°C till 40°C tar ca 63min. Och ett kast från 40°C till 5°C tar ca 17min i anspråk.

I normala fall är utgångsläget rumstemperatur dvs. ca 20°C vilket betyder att en uppvärmning till 40°C tar ca 36min. Och en nerkyllning från rumstemperatur till 5°C tar ca 7,5min. Denna tid är ok även om man kan anta att ett påslag om gissningsvis 50% vore i sin ordning för att återspegla verkligheten.

I beräkningarna har vatten använts och det är vattenvolymen som står för ca 84% av värmekapaciteten. Detta har gjorts för att använda värsta möjliga tänkbara scenario, i verkligheten kommer kretsen ha antingen en glykol blandning eller vatten med tillsatser för att förhindra mikrobiologisk tillväxt. Bägge av dessa alternativ ger ett medium med lägre värmekapacitet än det som räknats här. Eftersom systemet är litet och tanken är i förhållande till systemet stor (~55%) gynnas man av att hålla en låg vätskenivå i tanken för att snabba upp kylningen eller uppvärmningen.

11 Resultat

Detta ingenjörarbete har slutligen utmynnat i en planerad apparat vilken kan anses uppfylla de ursprungliga kraven hyfsat, tillverkning kommer troligen starta under våren/sommaren 2017.

Kompromisser har hamnats göras med materialen och deras kemiska resistens, för att komma till en praktiskt applicerbar apparat som kan användas, tillverkas och underhållas till en rimlig kostnad. Speciellt svåra punkter att få ihop har varit uppställningen av pneumatiska styrdon till testcylinder och kolv. Detta mycket pga. att stor vikt har lagts på att göra apparaten servicevänlig, iom att kritiska komponenter kommer behöva demonteras med jämna intervall.

Konstruktionen är gjord i enlighet med rådande Maskindirektiv 2006/42EG, trots att maskiner konstruerade för forskningsändamål för tillfälligt bruk i laboratorier är undantaget från detta direktiv. Eftersom den tolkningsbara termen "tillfälligt bruk" finns med valdes att göra apparaten enligt direktiven för att garantera en hög säkerhetsnivå. Acceleratorns användning kommer att vara restriktad till en handfull personer med tillgång, av vilka alla skall utbildas i funktionen och användningen av denna. Detta eftersom möjlig felanvändning kan få följder av bisarra proportioner.

Apparaten kommer aldrig att bli helautomatisk men uppnår en nivå på både kvalite och repeterbarhet som gör metoden tillämpbar i praktiskt bruk och dagligt arbete. Tvättningen är en av de saker som är svårast att automatisera, manuell tvättning måste utföras på t.ex. matningsmekanismen iom att den innehåller ett stort antal svåråtkomliga komponenter.

I detta fall har valts att referensköra apparaturen torr för att se om de interna delarna erhåller snarlika resultat som vid uppstart. Detta är en av de mest kritiska punkterna eftersom den ej kan övervakas kontinuerligt eller direkt, utan endast då acceleratorn är i sitt utgångsläge dvs. tom, torr och tvättad. I praktiken betyder detta att man referenskör acceleratorn torr före påbörjat test vid olika tryck för att erhålla en friktionsprofil vid olika tryck, varefter testning utförts så kollar man om denna friktionsprofil är densamma inom rimliga marginaler. Friktionsprofilen kommer att fungera som ett fingeravtryck åt acceleratorn som påverkas av de komponenter som använts, montering, tillverkningstoleranser och deras individuella slitage sinsemellan.

En stor del är vunnen över att alla givare, mätare och styrning redan finns på plats. Vilket med tidigare metoder var att allt riggades upp skilt för varje enskilt test som i sin tur gjorde mätdatat kontaminerat av felkällor. Testen som tidigare gjorts har ofta involverat ganska spartanska uppställningar och mätmetoder. T.ex. har stoppur, tuschmarkeringar och koordination mellan flera personer använts för att genomföra dessa test. Vilket omedelbart ger en indikation om kvaliteten och tillförlitligheten. Kvaliteten och noggrannheten på komponenterna som har planerats in i acceleratorn har getts särskild hänsyn åt att fås av god kvalitet, för att minimera felkällornas storlek. Konstruktionen är även gjord så att de flesta givare kommer att ha någon form av redundans eller kontroll så att ett fel av en enskild komponent ej kan gå onoterat.

T.ex. monitoreras både kraften ut ur de pneumatiska cylindrarna via tryckgivare och via lastceller, uppstår läckage eller mekanisk tröghet i systemet kan detta ses och alarmeras om. Dubbel uppsättning av linjärgivare och lastceller gör att man kan övervaka om endera sida av acceleratorn har fått problem. Pneumatikskåpen för respektive cylindrars tryck-proportional styrning är separerade så att de känsliga instrument och komponenter som används ej skall störa varandra.

Experter inom ett flertal områden har utnyttjats för deras högkvalitativa gråsubstans, kunskaper och erfarenheter. Särskilt inom styrteknik, datainsamling, pneumatik och tätningsteknologi. För att nämna några utan innebördes ordning:

Fredrik Ylander	M-Seals
Juhana Erelä	M-Seals
Raimo Kärjä	SMC
Martti Nieminen	SMC
Petri Keski-Honkala	SMC
Jukka Nivala	Festo
Pekka Poikulainen	AVS
Torbjörn Södergård	Solving
Mikko Ala-Jaakkola	National Instruments
Rasmus Pettersson	National Instruments

12 Diskussion

Tillvägagångsättet för att erhålla användbara data ur de material som skall hanteras är det som skiljer denna apparat från lejonparten av den apparatur som finns kommersiellt tillgänglig. Jag vill lägga särskild vikt på att denna metod är annorlunda, och är en kombination av laboriemätningarnas repeterbarhet kombinerat med fysiskt gjorda mer pragmatiska test. Ett mellanting var det bästa av två världar har försökts kombineras för att ge önskat resultat, inom rimlig felmarginal mot minsta möjliga arbetsinsats.

Dock så har denna fusion även solkat ner det vackraste av de båda aspekterna, laborietesternas höga noggrannhet och kvalitet solkas ner av den stora mekaniska konstruktionen, toleranser, tätningar, dåligt utförd tvättning, etc. Enkelt sagt har de exakta explicita mätvärdena som fås av laborieanalys byts ut mot mer användbara pragmatiska oexakta implicita sådana.

Medans det fysiska verkliga testet har solkats av att man inte testat specifikt det värde man är ute efter. Dvs. man testar inte ett komplett systems tryckfall, med ventiler, korrekt antal krökar, i korrekt dimension, med rätt pump vid en specifik driftpunkt. Utan istället fås ett värde på t.ex. tryckfall vid vissa flöden, vid vissa tryck, vid detta temperaturintervall, utan krökar, vid en rördimension med orealistiskt bra ytfinish.

Samtidigt har dock åstadkommit exakt det som förväntats. Från att försöka komma till ett slutgiltigt svar om tryckfall med de extensiva storheterna: densitet, viskositet och klassificering. Använder man istället den mer direkt mätta intensiva egenskapen tryckfall (vid en specifik dimension och vid specifika flöden) för att modellera och extrapolera mätdata till användbara värden i den verkliga applikationen, vilket är mer tillförlitligt och enklare att göra, från det direkt mätta tryckfallet under snarlika omständigheter. Än vad det är från de mindre raffinerade mer lösryckta, främmande och fragmenterade extensiva mätvärdena.

I praktiska applikationer har det visat sig att svårigheten att få ut ett vettigt tryckfall baserat huvudsakligen på viskositet vara mycket svårt, otillförlitligt eller både och. Två citat som jag anser att lämpligt avslutar och sammanfattar diskussionen är:

"Data is the new oil, It's only useful when it's refined!" *-Jess Greenwood*

"Data is like garbage. You'd better know what you are going to do with it before you collect it" *-Mark Twain*

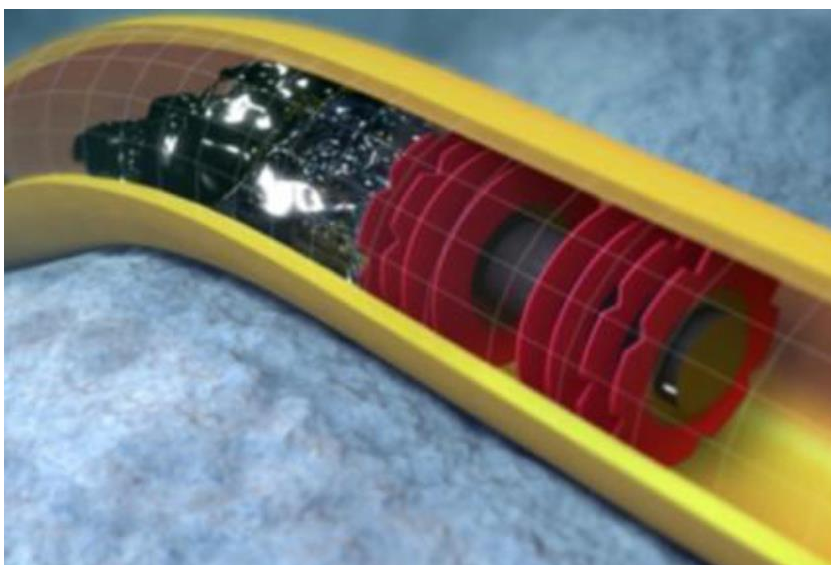
13 Fortsatt utveckling

En stor nackdel med denna apparatur är dess intermitentta operation som uppstår av att den arbetar fram och tillbakagående. Detta är främst bedrövligt utrymmeskrävande och för det andra så blir en stor del av mätsträckan oanvändbar kring ändlägen var acceleratoren skall byta riktning.

Iom. längdbegränsningarna som finns på de drivande komponenterna får mätlängden en direkt övre gräns av dessa. Därtill minskar den användbara längden beroende på hur mycket material som sätts in vilket tar bort av längden detta material kan förskjutas. Ändströmningseffekterna blir gissningsvis påtagliga vid liten insatt mängd vilket kommer att skjuva resultatet negativt.

För att kombatara dessa saker borde fortsatt utvecklingsarbete göras. En andra version av denna produktaccelerator som använder kontinuerliga loopar kunde ta bort delar av denna problematik.

Ett annat alternativ är att ta inspiration från kemikalie-, livsmedels-, och oljeindustrin var metoder som "Pigging" används för att utföra ungefär samma funktion som denna accelerator men i annat syfte. Pigging används för att tvätta rörsystem och pipelines, eller för att separera en produkt från en annan i långa rörsystem var dessa ej kan spolas rent eller tömmas vid byten. Metoder som GPS och RFID har börjat användas för att mer exakt kunna bestämma positionen på dessa proppar.



Figur 33 Pigging system Källa: ResearchGate

Eftersom användaren av acceleratoren manuellt hamnar att försöka spilla i materialet i matningsenheten kan vissa problem uppstå. T.ex. kan luft komma med eller så uppstår mer eller mindre klott. Användaren hamnar även att försöka avlufta matningsenheten innan produktprovet trycks in, glöms detta bort så är provet inte representabelt och därmed odugligt för ändamålet. I om svårigheterna att få bort innesluten luft ur högviskösa material så är provet med största sannolikhet förstört. Att sätta produktprovet i vakumkammare och avgasa det är ett alternativ, men det innebär också att man kan ta bort gaser som borde finnas med i provet. Detta problem borde åtgärdas med en standardiserad metod att utföra detta som är enklare och medför mindre risker än den som använts här.

Ganska snart kommer databehandlingsystemen att behöva börja planeras för acceleratoren. På denna gren av detta projekt finns mycket att göra, eftersom detta arbete lite skrapat på ytan av de teorier som kan appliceras. Visserligen kommer de modeller som är kända att försöka appliceras som t.ex. Oswald-de Waele modellen, men finns det något annat applicerbart? Var finns de? Och fungerar de? Trots att detta arbete tagit en mer pragmatisk approach till hur man får mätvärden så är undertecknad en ringrostig men stor anhängare av sedvanlig matematik. Och jag skulle gärna se vad goda teorier kan extrapolera ut av mätvärdena från denna mer direkta råbarkade apparatur gentemot vad de kan av svåråtkomliga abstrakta viskosimeter mätvärden.

14 Källförteckning

Litteraturkällor

Parker Prädifa, (u.å.), *PTFE Seal Design Guide*, Parker Hannifin Corp.

Europeiska unionens officiella tidning, (2006), *Europaparlamentets och rådets direktiv 2006/42EG*, EU

M-Seals, (u.å.), *PTFE Sealing Systems 005093 vers.4*, M-Seals Ab

Viklund, S. (2014), *The History of Fluid-bag ID 6174*, Fluid-Bag Ltd

Sandström, C. (2014), *Fluid-Bag logo, for digital use (rgb) ID 2986*, Fluid-Bag Ltd

Valtanen, E. (2009), *Tekniikan taulukkokirja*, Genesis kirjat

Festo, (2016), *Ball valve actuator units VZBA*, Festo GmbH

SMC, (u.å.), *HRS-F Circulating Fluid Temperature Controller*, SMC Corp.

Hinch, E. (u.å.), *Simple Flows*

Nguyen, Q. (2012), *Continuum Mechanics – Progress in Fundamentals and Engineering Applications*, InTech

Internetkällor

ResearchGate, (2015), *SPE-174827-MS Experimental Study on Mechanisms of Wax Removal During Pipeline Pigging*, www.researchgate.net, (hämtat 20.5.2017)

Hunger-Dichtungen, (u.å.), Leverantör av tätningar, www.hunger-dichtungen.de, (hämtat 1.5.2017)

AluMeco, (u.å.), Leverantör av aluminium råmaterial, www.alumeco.fi, (hämtat 2.1.2017)

AllSealsInc, (2016), Leverantör av tätningar, www.allsealsinc.com, (hämtat 10.2.2017)

Ludwig-Meister, (u.å.), *Profildichtungen – O-Ringe, X-Ringe, Rundschnüre*, www.ludwigmeister.de, (hämtat 4.5.2017)

SKF, (u.å.), Leverantör av tätningar, www.skf.com, (hämtat 7.3.2017)

Hydrosanat, (u.å.), Leverantör av tätningar, www.hydrosanat.com, (hämtat 15.5.2017)

Wikipedia, (2017), *Shear-modulus*, www.wikipedia.org, (hämtat 25.2.2017)

NPTEL, (u.å.), *Fluid-Mechanics*, National Programme on Technology Enhanced Learning, www.nptel.ac.in (hämtat: 4.4.2017)

The University of California at Berkeley, (u.å.), *CBE 150A Transport Processes*, www.cchem.bberkeley.edu, (hämtat: 1.3.2017)

Hyperphysics, (u.å.), *Fluid Flow*, www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, (hämtat: 6.2.2017)

SMC, (u.å.), Leverantör av pneumatik, www.smc.eu, (hämtat: 21.5.2017)

Autoblog, (2010), *Why does it cost so much for automakers to develop new models*, www.autoblog.com, (hämtat 21.5.2017)