



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Verifiering av hållarelement till toroidrullagret CARB C2220

Materialval och lämplighetstester

Examensarbete inom maskiningenjörsprogrammet

Ludwig Wingsjö Elmehed

Verifiering av hållarelement till toroidrullagret CARB
C2220
Materialval och lämplighetstester

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

LUDWIG WINGSJÖ ELMEHED

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2014

Verifiering av hållarelement till toroidrullagret CARB C2220
Materialval och lämplighetstester
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik
LUDWIG WINGSJÖ ELMEHED

© Ludwig Wingsjö Elmehed, Sverige 2014

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Tryckeri /Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling
Göteborg, Sverige 2014

Förord

Detta examensarbete har utförts av Ludwig Wingsjö Elmehed på uppdrag av AB SKF Sverige under vårterminen 2014. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och har utförts vid institutionen för produkt- och produktionsutveckling på högskoleingenjörsprogrammet för maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola.

Jag skulle först och främst vilja tacka Michael Jacobson och AB SKF Sverige som gett mig möjligheten att utföra examensarbetet på SKF från första början. Därefter vill jag rikta ett stort tack till mina handledare på SKF, Johan Sahlgren, Jonas Kullin och Emma Björkman som bidragit med stort stöd under arbetets gång. Jag vill även tacka Mattias Uddegren som även han bidragit med stort stöd under de tester som utförts.

Chalmers tekniska högskola,

Göteborg 2014-06-01

Ludwig Wingsjö Elmehed

Sammanfattning

År 1995 introducerade SKF toroidrullagret CARB på marknaden. Två olika versioner, en med hållare och 17 rullar och en med 20 rullar utan hållare existerar i dagsläget i ett flertal storlekar. Modellen C2220 har en plåthållare och tillämpas i applikationer där snabba varvtal och något lättare last råder medan lagret med 20 rullar, det fullrulliga lagret, är verksamt i en miljö där varvtalen är lägre men istället krav på hög lasttålighet finns. Hade man kunnat ha det fullrulliga lagrets förmåga att klara av höga laster samtidigt som det klarar av jämförelsevis höga varvtal hade detta inneburit en värdefull förbättring, således har tanken om en hållare i form av separata hållarelement för toroidrullagret CARB väckts. Att använda hållarelement innebär att 19 rullar får plats, d.v.s. två fler än lagret med plåthållare och en mindre än det fullrulliga lagret.

En första prototyp i polyamid av dessa existerade redan vid arbetets början, men med tanke på att varken denna polymer eller den som hållaren i de mindre CARB lagren är tillverkad i, Polyamid 46 med 30 % glasfiber, utvärderats för applikation i de större lagren har därför en materialvalsprocess för hållarelementen genomförts. Med utgångspunkt i boken Plaster: materialval och materialdata har denna materialvalsprocess utförts i sju steg. Arbetet inleds med grundläggande teori där resonemang sedan förs kring vilka egenskaper hos materialet som är viktigast att undersöka med hänsyn till tidsramen för arbetet. Teorikapitlet består även av en beskrivning av olika tillverkningsmetoder som är intressanta för hållarelementen. Efter att ha använt programvaran CES EduPack 2013 för att generera potentiella polymerkandidater gjordes sedan en egenskapsprofil för ett utvalt antal vilka användes för att komma fram till ett slutligt materialval. Det slutliga materialvalet gjordes därefter varpå en tillverkningsmetod även valdes. Efter beställning från leverantör monterades hållarelementen i lagervarianten med namnet C220 och ett flertal tester genomfördes i SKF:s testrigg för att verifiera konstruktionens duglighet, vilket var en del av arbetets syfte. Vidare kunde testerna efter verifieringen utföras under flera olika förhållanden beträffande last och hastighet där lagret med hållarelement jämfördes med både ett fullrulligt lager och ett med plåthållare. Resultaten var positiva och de iakttagelser som gjordes var betydelsefulla då de är ytterst nödvändiga att ha med sig för att i framtiden eventuellt kunna tillämpa konceptet på en industriell nivå.

Summary

In 1995 SKF introduced the CARB toroidal roller bearing to the market. As of today, two different versions, one with cage and 17 rollers and one with 20 rollers and without cage exist in various sizes and models. The model C2220 has a sheet cage and is used in applications where high rotation speeds and a somewhat lower load is present whereas the one with 20 rollers, the full complement roller bearing that is, is used in applications with lower rotational speeds but where a higher demand for load bearing capacity exist. If you could take the higher load bearing capacity for full complement bearing and combine it with the ability to run at higher rotational speeds for the bearing with a sheet cage this would be a valuable improvement, thus creating the idea of a CARB with separate cage elements. By using separate cage elements there is space for 19 rollers, i.e. two more than in the roller bearing with sheet cage and one less than in the full complement roller bearing.

At the beginning of this report a prototype of the elements existed, made of polyamide. But given that neither this polymer nor the one that is used in the cages of the small and medium sized CARB bearings, Polyamide 46 with 30 percent glass fibre, has been evaluated regarding cage element applications, a material selection process has been performed. Using the book *Plaster: materialval och materialdata*, the material selection process has been performed in seven steps. The report starts by presenting basic theory where reasoning is made regarding which material properties that are the most vital to examine with respect to the time frame of the report. The theory chapter also consist of a description of different potential manufacturing methods for the cage elements. Using the software CES EduPack 2013, a profile of properties was made for a few selected polymers in order to generate potential candidates and eventually make a final material selection. Having made the final material selection a manufacturing method was chosen. After placing an order from a distributor the cage elements was assembled into a CARB C2220 on which a number of tests were performed in an SKF test rig. This was in order to verify the feasibility of the construction and also one of the objectives of this report. Having verified the construction more tests could be performed where different conditions, for instance load and rotational speeds, were compared between a bearing with cage elements, a full complement bearing as well as a bearing with sheet cage. The test results were positive and the observations that were made are of high value for future tests if consideration regarding industrial manufacturing is to be made.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställningen	2
2. Teoretisk referensram	3
2.1 Polymerer	3
2.2 Dagens hållare	4
Polyamid 46 30 gf.....	4
2.3 Viktiga egenskaper	5
Glasmvandlingstemperatur (°C).....	5
Elasticitetsmodul (GPa).....	5
Brottseghet (Mpa.m ^{0,5}).....	6
Draghållfasthet (MPa).....	6
Brottöjning (%).....	6
Drifttemperaturlåghet (°C).....	6
Resistans mot smörjmedel.....	6
Slagseghet (kJ/m ²).....	7
2.4 Tänkbara tillverkningsmetoder	7
Formsprutning.....	7
Selective Laser Sintering/Selektiv Laser Sintring (SLS).....	8
Stereolithography/Stereolitografi (SLA).....	9
Fused Deposition Modeling (FDM).....	10
Fräsning.....	11
3. Metod	12
3.1 Materialvalsprocessen	12
3.2 Definition av materialfunktioner	12
3.3 Kravprofil	12
3.4 Grogallring av material	13
3.5 Upprättande av egenskapsprofil	13
3.6 Val av tillverkningsmetod	13
3.7 Slutligt materialval	13
3.8 Beställning	14
3.9 Testutförande	14
4. Materialvalsprocessen	15
4.1 Definition av materialfunktioner	15
4.2 Kravprofil	15
Mekaniska parametrar.....	15
Termiska egenskaper.....	15
Kemiska egenskaper.....	15
4.3 Grogallring av material	16
CES EduPack 2013.....	16
Steg 1.....	16
Steg 2.....	17
4.4 Upprättande av egenskapsprofil	18
PET.....	18
PARA (Polyarylamid).....	19

LCP (Liquid Crystal Polymer/Polyester).....	19
PPA	20
Tabell 5. Egenskaper för PPA 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.	20
PPS	20
PEEK.....	21
PCT	21
4.5 Val av tillverkningsmetod.....	22
4.6 Slutligt materialval	23
Urval 1	23
Urval 2	24
4.7 Beställning	25
5. Resultat av test	26
Fullrulligt lager och lager med hållarelement.....	26
Lager med plåthållare och lager med hållarelement.....	27
6. Slutsats	28
7. Diskussion	29
8. Referenser	31
9. Bilagor.....	33

1. Inledning

1.1 Bakgrund

SKF har i över hundra år varit en av världens ledande lagertillverkare genom att skapa produkter som erbjuder sina kunder konkurrensfördelar. Toroidrullagret CARB introducerades på marknaden 1995 och är ett enradigt rullager med jämförelsevis långa och något bomberade rullar. Det kan beställas både med och utan hållare i plåt. Lagret med hållare har 17 rullar och används för lägre laster och relativt höga varvtal medan det fullrulliga utan hållare, som har 20 rullar, används för mycket höga laster och lägre varvtal. Hade man haft lagret utan hållares förmåga att klara av höga belastningar samtidigt som detta klarar av jämförelsevis höga varvtal hade detta inneburit en värdefull förbättring, således har tanken om en hållare i form av separata hållarelement för toroidrullagret CARB väckts. Att använda hållarelement istället för en hållare skapar utrymme för 19 rullar istället för 17 vilket innebär en högre bärförmåga hos lagret. Med hjälp av rapid prototyping metoden SLS (Solid Laser Sintering) har en första prototyp av hållarelementen i polyamid tillverkats för att vidareutvecklas och senare verifiera konstruktionens duglighet, vilket kan komma att innebära tillämpning i större skala i framtiden.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är främst att verifiera att lagret med hållarelementen fungerar, d.v.s. att rullarna hålls på plats och att lagret snurrar. Därefter kommer temperatur- och vibrationsvärden att jämföras mellan de tre olika lagren. Utöver detta komma även ett test som undersöker den minsta last som krävs för att rullsatsen skall fungera att utföras. Eftersom ingen utvärdering gjorts över hur lämpligt det material som de första hållarelementen är tillverkade i är kommer en stor del av arbetet läggas på att göra en undersökning av, och senare identifiera, tänkbara polymermaterial som kan vara lämpliga att tillverka dessa av. En jämförelse kommer även göras med det material som dagens hållare i de mindre CARB lagren är tillverkade i, PA46 30 gf. Detta ställer även krav på att ta reda på hur valet av tillverkningsmetod kommer påverkas av kraven på polymerens tolerans för olika förslitningsmekanismer. I samband med detta skall även en potentiell leverantör, helst i anslutning till Göteborg, identifieras varpå en beställning kan göras av hållarelementen tillverkade i den eventuellt nya polymeren.

1.3 Avgränsningar

Med tanke på att tidsramen för arbetet är begränsad och hållarelementen fortfarande befinner sig i prototypstadiet kommer inga noggrannare undersökningar såsom livscykeltester, friktionstester, kemikalietester och övriga tester som utvärderar hur den polymer som senare väljs kommer att påverkas på längre sikt kunna utföras. Även om resonemang kommer föras kring den totala tillverkningskostnaden för hela processen kommer polymerens pris i sig inte beaktas i det här arbetet, detta eftersom inga större volymer av denna kommer behöva användas vid utförandet av testet. Vidare, på grund av tidsramen,

kommer heller ingen hänsyn kunna tas till den grad av miljöpåverkan de olika materialen har, detta kommer därför lämnas ute vid det slutliga materialvalet.

Under arbetets gång kommer ingenting som har med designen av elementen att beröras i annat fall än om det visar sig att prototypen inte fungerar och en tydlig förbättringspotential finns, detta kommer i sådana fall att tas upp under avsnittet diskussion. I dagsläget är inte elementen anpassade till det lager som testen kommer utföras på, C2220, utan måste därför dimensioneras om innan en beställning från leverantör kan göras. Detta är något som kommer göras under arbetets gång av två personer på SKF:s produktutvecklingsavdelning.

1.4 Precisering av frågeställningen

Under arbetets gång kommer en materialvalsprocess att utföras varpå följande frågor kommer försöka besvaras:

- Vilken polymer lämpar sig bäst för att tillverka hållarelementen i, och hur påverkar dess egenskaper valet av tillverkningsmetod i förhållande till kraven på dess hållfasthet?
- Kommer utbudet av tillgängliga leverantörer påverka valet av tillverkningsmetod?
- Om en ny polymer väljs, hur förhåller dess egenskaper gentemot den tidigare använda polymeren PA 46 30 gf?

Eftersom hållarelementen är en prototyp så ligger fokus i det här arbetet på att först och främst verifiera att denna fungerar tillsammans med lagret. Därefter kommer ett antal frågor försöka besvaras:

- Hur förhåller sig de temperaturer och vibrationer som uppstår i CARB C2220 lagret med hållarelement till samma lager fast med och utan hållare, d.v.s. det fullrulliga lagret med 20 rullar och det med 17?
- Vilken är den minsta last som krävs för att rullsatsen skall fungera?

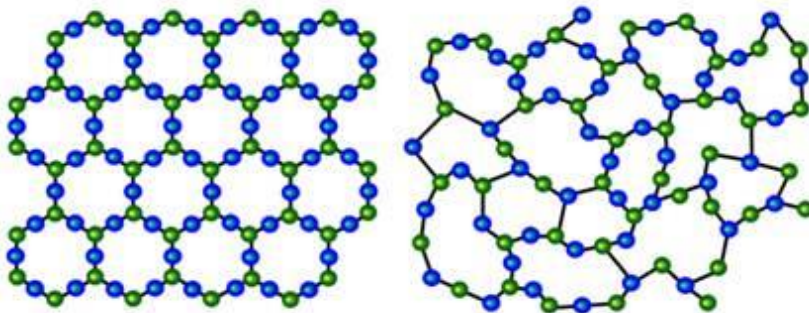
Frågorna besvaras efter att ett antal test som utförs i en testrigg på SKF gjorts. Visar det sig att de värden som fås är i klass med eller bättre än de för CARB versionerna med och utan plåthållare talar detta för en eventuell vidareutveckling av prototypen vilket så småningom kan leda till industriell tillämpning.

2. Teoretisk referensram

Nedan följer information om polymerer i allmänhet samt lite mer ingående information om materialet som de mindre CARB lagren är tillverkade i, PA 46 30 gf. Vidare ges grundläggande teori om de materialegenskaper som senare kommer tas hänsyn till vid såväl generering som eliminering av material. Till sist ges även en beskrivning av de olika tillverkningsmetoder som kan vara lämpliga att använda tillsammans med för- och nackdelar för dessa.

2.1 Polymerer

Egenskaperna hos en polymer beror till stor del på hur polymerkedjorna är strukturerade, d.v.s. om de är kristallina, amorfa (se figur 1) eller semikristallina vilket är en blandning av de båda. Beroende på molekylkedjornas orientering så ökar eller minskar polymerens hållfasthet och styvhet. I de kristallina polymererna är polymerkedjorna tätt och ordnat packade vilket ger dem fördelar som god utmattningshållfasthet, kemikalieresistens och hög temperaturlåglighet, framförallt när man armerar med glasfiber. I amorfa polymerer är polymerkedjorna tvärtom oordnade vilket istället bidrar med fördelar som formstabilitet och en styvhet som inte är temperaturberoende, dock begränsar detta polymerens kemikalieresistens och det finns även risk för spänningssprickbildning (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 10-18).

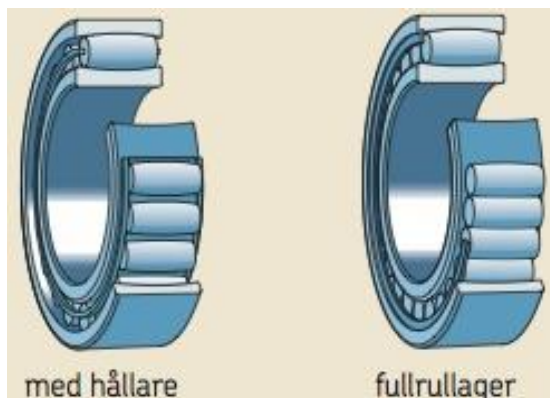


Figur 1. Kristallin respektive amorf polymerkedja. Källa: www.bnc.hu

En av flera viktiga parametrar att ha i åtanke vid materialvalet är polymerens brottseghet vilket kan sägas motsvara dess spänningssprickmotstånd mot såväl yttre som inre påkänningar, denna sätts framförallt på prov när lagret utsätts för en last under lång tid. När spänningar som uppstår i materialet samverkar med vibrationer skapade i omgivningen uppstår små mikrosprickor i form av hålrum i polymeren. När dessa sedan minskar slås sprickorna samman och bildar större hålrum vilket slutligen leder till materialbrott (Al-Zubi, R., Strong, Dr. A. B., Lampson, M., 2001). Eftersom denna typ av sprickbildning framförallt uppstår i majoriteten av alla amorfa polymerer kvalificerar de inte till att användas som lagerhållare (Tadic, V., 1998).

2.2 Dagens hållare

Det lager som kommer testas i det här arbetet heter CARB C2220 och versionen med hållare är i dagsläget gjord av plåt (se figur 2). Hållarens funktion är att hålla rullarna på plats vilket framförallt behövs när varvtalen ökar. I de mindre CARB lagren används istället hållare tillverkade i polymeren PA46 30 gf, som står för Polyamid 46 med 30 % glasfiber. Detta ger hållarna en 15 °C högre temperaturlåghet jämfört med större lager, där man använder hållare gjorda i PA66 30 gf, vilket gör att man kan ha en kontinuerlig drifttemperatur på upp till 130 °C (AB SKF, 2014). Tanken är att även få den nya hållaren tillverkad i en polymer istället för plåt då detta kan innebära såväl lägre drifttemperatur som vikt, beroende på vilket material som i slutändan väljs (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 26-27).



Figur 2. CARB lager med respektive utan hållare. Källa: www.skf.com

Polyamid 46 30 gf

Polymerer som polyamid går under samlingsnamnet konstruktionsplaster och tillhör de semikristallina polymererna och finns i många olika varianter. De skiljs vanligtvis åt av ett eller två nummer i namnet vilket refererar antalet kolatomer i dess molekylära struktur i form av aminer och syror (McKeen, L. W., 2007). Det som karakteriserar just polyamid 46 med 30 % glasfiber är att det har goda mekaniska egenskaper då det tål höga drifttemperaturer, har en låg friktionskoefficient, låg nötning och god resistans mot smörjmedel (SpecialChem – Omnexus, 2014). Faktorer som rådande temperaturförhållanden, smörjmedel och exponeringstid är något som påverkar de flesta material negativt i längden. Tillsammans utsätter de polymeren för s.k. åldring vilket uppstår i form av små sprickor som senare påverkar dess mekaniska egenskaper, därför är det främst dessa faktorer som är avgörande för hållarens och således hela lagrets livslängd (Tadic, V., 1998). Det enda negativa med PA 46 30 gf är egentligen att det absorberar fukt i hög grad vilket innebär att materialet måste torkas innan bearbetning. Det medför även att dess mekaniska egenskaper som elasticitetsmodulen minskas av fuktupptagning vid högre temperaturer (Murphy, J., 1994). I tabell 1 följer de värden för PA46 30 gf som kommer att användas som referens vid den kommande grovgallringen av tänkbara material. Notera att värdena för dess mekaniska egenskaper gäller för 50 % relativ fuktighet vid 23°C.

Polyamid 46 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	285°C
Glasomvandlingstemperatur	75°C
Elasticitetsmodul	5,40 - 6,70 GPa
Brottseghet	4,40 - 4,90 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	103 - 126 MPa
Drifttemperaturlåglighet	73 - 87°C
(Slagseghet	13 - 25 kJ/m ²)
(Brottöjning	5,5 - 8 %)

Tabell 1. Egenskaper för Polyamid 46 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

2.3 Viktiga egenskaper

Eftersom tidsramen för arbetet är begränsad kommer inte samtliga av polymerernas väsentliga egenskaper kunna undersökas. Nedan ges en förklaring till åtta egenskaper hos polymererna som är ansetts vara mest intressanta att undersöka, dessa kommer senare att användas vid grovgallringen av material¹.

Glasomvandlingstemperatur (°C)

Glasomvandlingstemperaturen, T_g , är den temperatur då ett amorft material (eller i det här fallet de amorfa polymerkedjorna av ett semikristallint material) övergår från att vara hårt och relativt sprött till ett mer mjukt gummilikt tillstånd, överdrivet förklarat. Detta innebär att både styvheten (elasticitetsmodulen) och styrkan hos materialet blir reducerad, även om det påverkar amorfa material mer än semikristallina. Till skillnad från exempelvis smältpunkten i ett material behöver alltså glasomvandlingstemperaturen inte nödvändigtvis utgöra en övre temperaturgräns. Något som även är viktigt att notera är att styvhetsminskningen hos ett material minskar vid T_g om materialet är glasfiberarmerat. (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 50-54). Den normala drifttemperaturen för lagret som undersöks i det här arbetet kommer ligga mellan 80-90°C, detta betyder dock inte att lagertemperaturen vid testutförandena kommer komma upp i samma nivå.

Elasticitetsmodul (GPa)

Hur styvt och hårt ett material är beror på hur hög dess elasticitetsmodul E är. Elasticitetsmodulen representerar förhållandet mellan spänning och töjning som uppstår när materialet uppför sig elastiskt. Med andra ord: ju högre elasticitetsmodul ett material har, desto svårare är det att böja, således ökar dess resistans mot deformation vid belastning. Detta innebär dock även en ökad sprödhet i materialet. Jämför exempelvis med hur en linjal beter

¹ De mest intressanta egenskaperna har tagits fram med hjälp av Thomas Krause som är utvecklingsingenjör av polymera material på SKF:s forsknings- och utvecklingskontor i Tyskland.

sig i förhållande till ett suddgummi när man böjer materialen tills de går sönder. Linjalen är gjord av ett mycket styvare material vilket gör att brottet uppstår mycket snabbare när brottgränsen överstigs jämfört med suddgummit. PA 46 30 gf som i dagsläget används i de mindre CARB lagren absorberar i en viss grad fukt, som nämnt innan, vilket minskar dess elasticitetsmodul (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 117).

Brottseghet (Mpa.m^{0,5})

Brottseghet, eller Fracture toughness som det heter på engelska, är en egenskap som motsvarar ett materials förmåga att motstå sprickbildning under last. En spricka koncentrerar spänningar i ett material vilket innebär att denna vid en viss gräns kommer sprida sig i materialet vilket slutligen leder till brott om lasten är konstant. Därför är detta en egenskap hos materialet som är mycket viktig (Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D., 2010, s. 166-174).

Draghållfasthet (MPa)

Ett materials draghållfasthet motsvarar hur mycket spänning ett material kan motstå utan att deformeras permanent. Spänningsvärdet fås genom att dividera belastningen på materialet med dess tvärsnittsarea (Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D., 2010, s. 4).

Brottöjning (%)

Brottöjningen hos ett material mäts genom att man undersöker hur mycket materialet sträckts ut från det att brott uppstått jämfört med dess ursprungliga form. Ett materials brottöjning kan inte räknas som en egenskap hos materialet eftersom de värden som finns till stor del beror på dimensionerna på det prov man utför testet på, icke desto mindre fungerar det bra som indikator på huruvida ett material deformeras eller inte (Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D., 2010, s. 114).

Drifttemperaturlåghet (°C)

Ett materials egenskaper beror till stor del på den temperatur under vilken det är verksamt, framförallt dess styrka. Det innebär att om ett materials drifttemperatur överstiger den maximalt tillåtna kommer dess användbarhet vara ytterst begränsad om inte oanvändbar då detta kan leda till brott eller att det rentav bryts ned (Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D., 2010, s. 244-245).

Resistans mot smörjmedel

Värdena om polymerernas resistans mot smörjmedel hämtas från programvaran CES EduPack och är graderade på en femgradig skala: otillfredsställande, tveksam, begränsad, troligtvis tillfredsställande och tillfredsställande. Att en polymer har tillfredsställande resistans mot smörjmedel innebär att den står emot smörjmedlet i minst 14 dagar i en rumstempererad miljö utan någon applicerad spänning, därefter förväntas den ha mekaniska egenskaper som inte skiljer sig mer än 10 % jämfört med de ursprungliga².

² Informationen har hämtats från programvaran CES Edupack 2013.

Slagseghet (kJ/m^2)

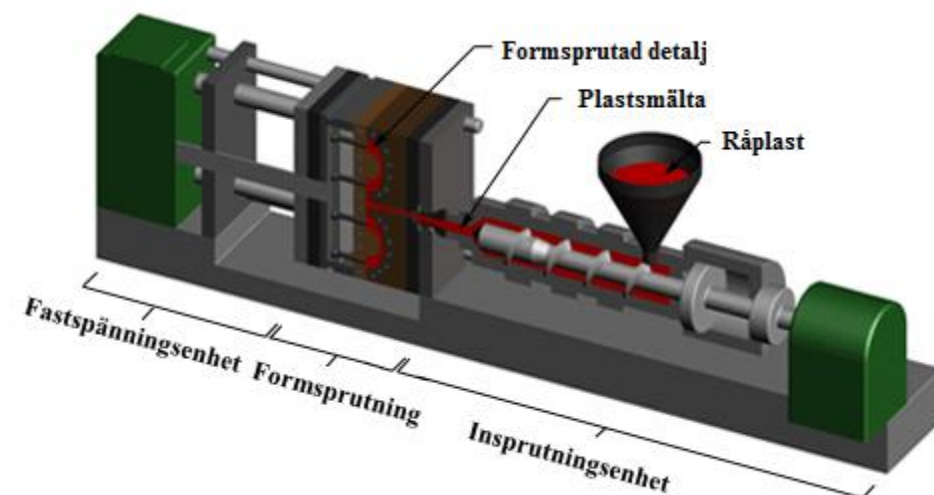
Ett materials förmåga att plastiskt deformeras och absorbera energi innan brott kallas för dess slagseghet och är i många fall avgörande för livslängd och funktion. Det är viktigt att inte blanda ihop slagseghet med duktilitet som motsvarar ett materials förmåga att plastiskt deformeras utan att sprickbildning uppstår. Det är eftersträvansvärt med ett material som har både hög styvhet (elasticitetsmodul) och hög slagseghet, vilket tyvärr är mycket ovanligt. Eftersom PA46 30 gf har en mycket hög slagseghet jämfört med andra polymerer kommer värdet av den anledningen inte tas med vid grovgallringen då detta kan leda till att många material som kvalificerar sig andra med goda egenskaper riskerar att sållas bort direkt (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 219-220).

Ett sätt att mäta ett materials slagseghet är med ett s.k. Izod Impact test där man låter en pendel träffa ett fastspänt materialprov så att brott uppstår. Förhållandet mellan den energi staven förbrukar och den skåra som uppstår i materialet motsvarar då materialets slagseghet och mäts i kJ/m^2 (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 219).

2.4 Tänkbara tillverkningsmetoder

Formsprutning

Formsprutning är en tillverkningsmetod som erbjuder tillverkning av mycket komplexa detaljer i en mängd olika material. Enkelt beskrivet går det till på så sätt att man smälter ned materialet, i det här fallet råplast, i en värmekammare där en cylinderformad axel långsamt pressar plastsmältan in i ett formverktyg som fyller ut hela formen och formar detaljen (se figur 3). Smältan får sedan svalna tills den är tillräckligt styv varpå trycket i fastspänningseenheten, som åker bakåt, avtar som tar med sig den färdiga formpressade detaljen och stöter ut den (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 231-232).



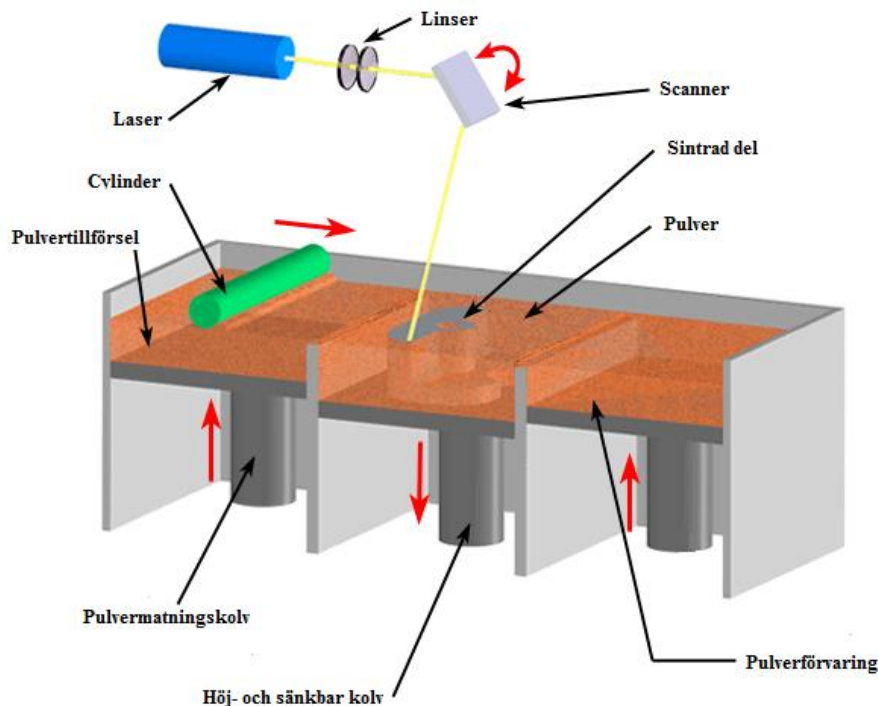
Figur 3. Formpressningsprocessen. Källa: www.custompartnet.com.

Nackdelen med att använda formsprutning i det här fallet är att det är mycket kostsamt, både vad gäller tid och pengar. Att tillverka och få levererat ett formsprutningsverktyg kan beroende på detaljens utformning, storlek och material ta allt ifrån åtta till tolv veckor och kosta mellan 20-500 000 kronor, och då är inte företaget som utför formsprutningens

kostnader och tillverkningskostnad. Det finns material som har en smälttemperatur på över 300 °C vilket sätter mycket höga krav på formverktygets material vilket innebär ett högre pris. En annan faktor att ha i åtanke är dimensionerna på den detalj man vill ha tillverkad. Har man en detalj med sektioner som är mindre än en mm och ett material som har mycket hög viskositet, d.v.s. ett trögflytande material, kommer detta innebära en risk för att materialet inte kan fylla de minsta utrymmena i formen³. Fördelen med formsprutning är att detaljpriset oftast blir lågt eftersom metoden främst lämpar sig vid tillverkning av stora serier i industriell skala, något som kan bli aktuellt i framtiden vad beträffar de nya hållarelementen.

Selective Laser Sintering/Selektiv Laser Sintring (SLS)

SLS är en tillverkningsmetod inom rapid prototyping som erbjuder tillverkning av 3D detaljer i såväl plast som metall och keramiska pulver. Det fungerar på så sätt att en infraröd koldioxidlaser riktas genom två linser mot en scanner som i sin tur riktar lasern mot pulvret vilket smälter detta (se figur 4). När lagret är färdigt sänker en kolv det hittills sintrade materialet varpå en cylinder rullar över nytt pulver och proceduren upprepas till dess att 3D detaljen är färdig (Sclater, N., 2011).



Figur 4. Selective Laser Sintering processen. Källa: www.custompartnet.com.

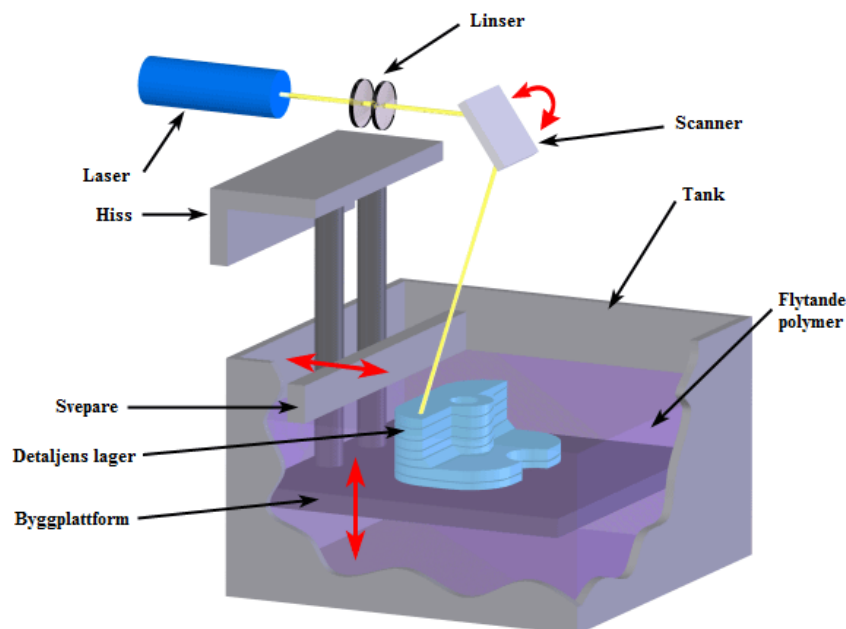
En fördel med SLS jämfört med andra rapid prototyping metoder är att det erbjuder fler material att tillverka detaljerna i, även om mängden inte är i närheten av de olika material som erbjuds av formsprutning. De tillverkade detaljerna kräver ingen efterhärdning och kan även användas vid tillverkningen av gjutformar. En nackdel är att den färdigsintrade detaljen lätt får porösa ytor som kan vara aningen grova och pulverartade vilket innebär att man, beroende

³ Informationen har fått från Thomas Krause som är utvecklingsingenjör av polymera material på SKF:s forsknings- och utvecklingskontor i Tyskland.

på vad prototyperna skall användas till, kan behöva efterarbeta detaljen något (Sclater, N., 2011). Med tanke på att man endast tillverkar en detalj i taget lämpar sig SLS därför endast för tillverkning i mindre serier, det är trots allt en metod inom rapid prototyping där den främsta anledningen till utnyttjandet är att man snabbt kan gå från CAD underlag till färdig detalj.

Stereolithography/Stereolitografi (SLA)

SLA är den vanligast förekommande rapid prototyping metoden och fungerar på liknande sätt som SLS, skillnaden är att istället för ett pulver som smälts så ligger materialet (vanligtvis en polymer eller epoxy) flytande i en tank som man riktar en ultraviolett laserstråle mot, även här via en scanner, vilket härdar materialet (se figur 5). När ett lager är färdigt sveps ett nytt lager över det gamla, samtidigt som byggplattformen sänks, och processen upprepas tills detaljen är färdig. Resten av det flytande materialet kan återanvändas till nästa detalj.

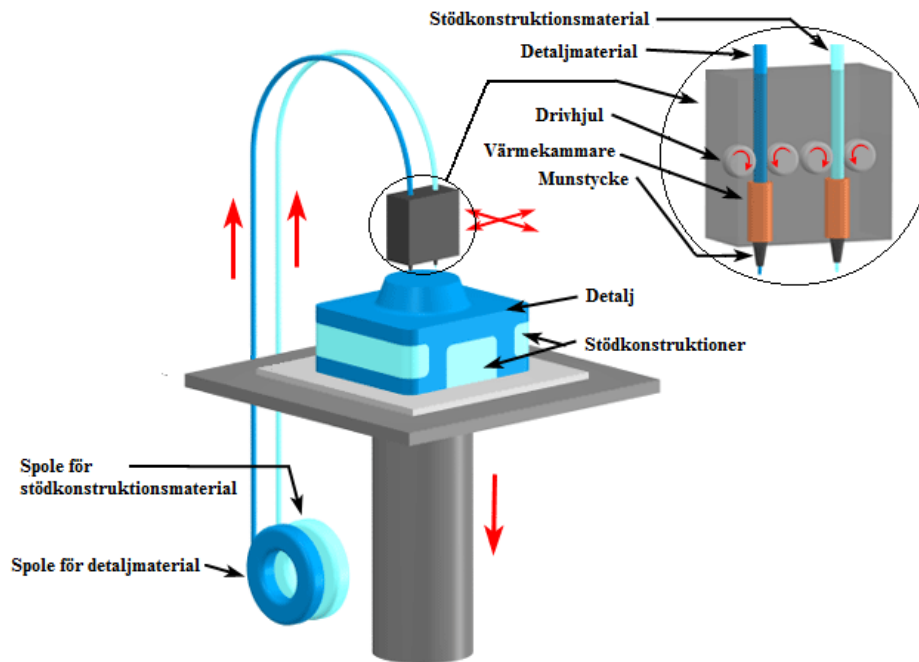


Figur 5. Stereolithography/Stereolitografi processen. Källa: www.custompartnet.com.

En fördel med SLA är att man kan tillverka komplicerade detaljer på kort tid (laserstrålen bearbetar upp till 890 cm material i sekunden) och ytan blir mycket god om man jämför med exempelvis SLS, sedan är det även billigare. Nackdelarna är att vissa detaljer med horisontella eller fritt hängande delar kräver en stödkonstruktion vid tillverkning vilken måste formas samtidigt med hjälp av lasern, detta är för att materialet inte skall sjunka ihop innan det stelnat färdigt. Vidare måste man även efterbearbeta detaljen då man tar bort stödkonstruktionerna varpå man härdar detaljen i en speciell ugn så att materialet stelnar ordentligt (Sclater, N., 2011). Även om tillverkningsprocessen går snabbt så är man delvis begränsad i sina materialval eftersom inte alla material går att härda med ultraviolett laser, därför lämpar sig denna metod för prototyp tillverkning i mindre serier där man inte alltför höga krav på materialet existerar.

Fused Deposition Modeling (FDM)

En annan rapid prototyping metod är FDM där materialet, som är lindat kring en spole, förs in i en värmekammare via två drivhjul där det smälts och sedan pressas genom ett munstycke ned på en plattform lager för lager där det stelnar direkt (se figur 6). Även denna metod kräver en stödstruktur för att inte detaljen skall sjunka ihop innan stelning, därför pressas detaljens material och stödkonstruktionens material genom två olika munstycken samtidigt när processen utförs.

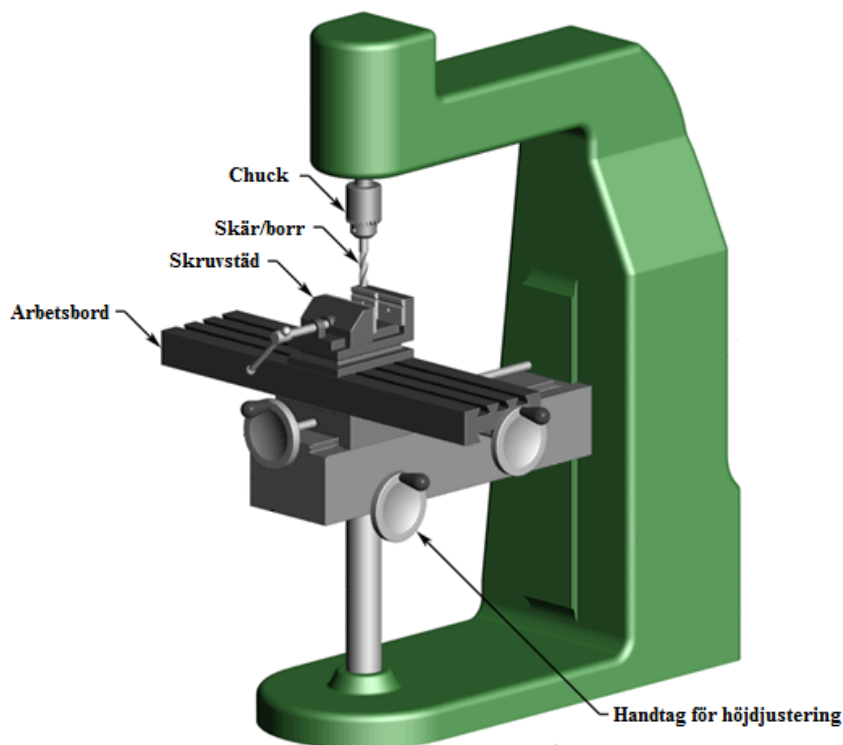


Figur 6. Fused Deposition Modeling processen. Källa: www.custompartnet.com.

De vanligast förekommande materialen här är ABS-plast, polyamid, polykarbonat, polyetylen, polypropylen och polysulfon. Toleranserna som fås är oftast beroende på vilken hastighet som används vid tillverkningen men ligger någonstans runt 0,2 mm (Sclater, N., 2011). Med tanke på att man även här är begränsad i sitt materialval är det svårt att välja FDM som tillverkningsmetod efter att man valt sitt material, inte minst om materialet innehåller en glasfiberarmering vilket sätter mycket högre krav på utrustningen som smälter materialet innan detaljer utformas.

Fräsning

Fräsning är en tillverkningsmetod som fungerar tvärt emot rapid prototyping genom att man fräser bort material istället för att addera det från ett stycke med hjälp av en cylinderformad chuck med ett antal skär eller ett borrhål. Materialet som bearbetas sitter fastspänt i ett skruvstöd, som i sin tur sitter fast på ett höj- och sänkbart arbetsbord, medan verktyget fräser bort materialet i ett eller flera steg till dess att önskad geometri av detaljen är färdig. Fräsningsmaskiner finns i både manuella och datorstyrda utföranden. Vid komplexare geometrier med snäva toleranskrav används datorstyrda fräsar som med hjälp av en STP-fil fräser ut detaljen med hänsyn till önskade toleranser (Sclater, N., 2011). Figur 7 nedan visar en manuell fräsningsmaskin och illustrerar hur processen går till.



Figur 7. Fräsningsprocessen. Källa: www.custompartnet.com.

En av fördelarna med fräsning är att man inte är begränsad till endast ett antal olika material jämfört med de flesta rapid prototyping metoder. Så länge man själv eller leverantören har möjlighet att införskaffa det material man önskar få sin detalj tillverkad i så går det att fräsa fram detaljer i de flesta material med mycket god ytfinitet (Sclater, N., 2011). Till skillnad från olika rapid prototyping metoder är det här vanligare med tillverkning i större serier, även om antalet tillverkade detaljer vanligtvis är färre än när man använder formsprutning. Trots att skären som används vid fräsning inte är lika dyra som verktygen som framställs inför en formsprutning kan det ändå bli kostsamt beroende på vilket material man önskar fräsa i då detta sliter på skären, därför är dessa vanligtvis tillverkade i kolfiber- eller koboltstål för att man skall slipa byta alltför ofta (Sclater, N., 2011). En annan faktor som påverkar den totala kostnaden är hur höga krav man har på ytan, ju finare yta man vill ha desto längre tar det i regel att fräsa fram detaljerna, vilket innebär en högre kostnad.

3. Metod

Eftersom hållarelementens dimensioner först måste anpassas till det CARB C2220 lager som avses testas kommer fokus först att läggas på att ta fram den bäst lämpade polymeren för dessa innan en beställning från leverantör kan göras. Som tidigare nämnt finns det i dagsläget en mindre version av lagret CARB med en polymerhållare vars material PA46 30 gf kommer att utvärderas och undersökas beträffande lämplighet för att tillverkas som hållarelement. Men eftersom det CARB lager elementen skall sitta i är större är kraven på polymerens egenskaper högre, såväl mekaniska som termiska och kemiska. Informationen om lämpliga material kommer att insamlas med hjälp av de databaser som finns tillgängliga via Chalmers Tekniska Högskola, studentlitteratur, Chalmers bibliotek och även de lärare som finns tillgängliga på Chalmers.

Faktorerna som påverkar hur mycket ett material nöts i den miljö där det är verksamt är många. Även om materialets egenskaper i sig spelar en stor roll så får man inte glömma bort omgivande faktorer som egenskaperna på materialet som materialet ligger emot, i det här fallet rullar av högkvalitetsstål, hastighetsförhållanden, lasten på axeln som lagret sitter på och eventuella kemikalier för att nämna några få. Men som tidigare nämnt är tidsramen för arbetet begränsad vilket gör att fokus i första hand kommer läggas på materialets egenskaper. Visar det sig att hållaren fungerar kan testerna i framtiden komma att utföras i större skala.

3.1 Materialvalsprocessen

För att ta fram den bäst lämpade polymeren för hållaren kommer en materialvalsprocess, delvis baserad på det materialvalstillvägagångssätt som beskrivs av Klason m.fl. i boken Plaster: materialval och materialdata (2008), att utföras i sju följande steg: Definition av materialfunktioner, kravspecifikation, grovgallring av material, upprättande av egenskapsprofil, val av tillverkningsmetod, slutligt materialval och beställning.

3.2 Definition av materialfunktioner

Här reflekteras det över polymerens huvudsakliga funktionskrav såsom mekaniska egenskaper vilket innefattar bland annat att kunna bära en last utan att deformeras. Även polymerens termiska och kemiska egenskaper behandlas.

3.3 Kravprofil

De krav som ställs på polymeren kan sammanfattas under tre huvudområden: mekaniska parametrar, termiska egenskaper och kemiska egenskaper. Här undersöks även vilka ytterligare materialegenskaper som ingår i de mekaniska, termiska och kemiska egenskaperna. Ett annat viktigt område är självklart polymerens kostnad men som tidigare nämnt kommer detta behandlas inom parentes eftersom inga större volymer av hållarelementen kommer krävas för att utföra testerna i det här arbetet då endast ett lager med prototypållaren kommer testas.

3.4 Grovgallring av material

Genom att ställa upp krav i form av materialegenskaper för polymeren kommer ett flertal polymerer kunna sällas bort. Detta kommer göras med hjälp av programvaran CES EduPack 2013 från Granta Design som är en industristandard för att systematiskt göra olika materialval. Med programmet kan man enkelt generera och eliminera tänkbara kandidater genom att applicera materialegenskaper i två steg, där de material som uppfyller egenskaperna går vidare till nästa steg eller elimineras. Värdena på egenskaperna från polymeren som används i de mindre CARB lagren, PA 46 30 gf, kommer att användas som minimum krav.

3.5 Upprättande av egenskapsprofil

De polymerer som kvalificerat sig vidare kommer alla mer eller mindre uppfylla de uppställda minimum kraven på egenskaper vilket gör det svårt att särskilja dem genom att enbart titta på värden. Därför kommer de egenskaper hos polymererna som är mest utmärkande tillsammans med en tabell där de viktigaste egenskaperna finns listade undersökas på samma sätt som med PA 46 30 gf för att senare lättare kunna göra ett slutligt materialval. Informationen om respektive material kommer förlitas till diverse vetenskapliga artiklar m.m.

3.6 Val av tillverkningsmetod

Vid framställning av små detaljer i polymera material som i det här fallet finns som nämnt innan ett antal olika tillverkningsmetoder att välja bland. Här behandlas faktorer som tillverkningsmetodens tid och kostnad såväl som vilka material som finns tillgängliga.

3.7 Slutligt materialval

För att kunna göra ett slutligt materialval kommer Pughs urvalsmatris (Johannesson, H., Persson, J-G., 2004, sid. 133-134) att användas i två steg för att jämföra de polymerer som kvalificerat sig där PA 46 30 gf kommer att användas som referens. I Pughmatrisen jämförs fem egenskaper med referensen PA 46 30 gf och ges, beroende på om dess värde är högre eller lägre eller likvärdigt, ett plus, ett minus eller en nolla. När samtliga fem egenskaper jämförts summerar man antalet plus och minus och bland de polymerer som fått högst antal plus väljer man vilka som tas vidare till urval 2. Här sätts istället den eller någon av de polymerer med högst antal plus som referens vilket innebär att man bör ha en eller två slutkandidater att välja mellan när urval 2 genomförs.

De egenskaper som kommer jämföras är elasticitetsmodul, draghållfasthet, brottseghet, slagseghet och resistans mot smörjmedel. Notera att det först är nu som polymerernas slagseghet beaktas. Denna kommer under steg 1 och 2 i grovsällningen ignoreras eftersom PA 46 30 gf har en mycket hög slagseghet vilket innebär att flertalet polymerer riskerar att elimineras om denna egenskap räknas med, som eventuellt kunnat kvalificera sig med andra goda egenskaper. Brottöjningen är, som nämnt innan, inte en specifik egenskap hos polymererna utan de värden som finns i olika databaser är starkt beroende av dimensionerna på provet och även de förhållanden under vilka testet utförs. Därför kommer detta värde först

tas hänsyn till om det skulle visa sig att två eller flera polymerer får samma resultat efter urval 2.

3.8 Beställning

När tillverkningsmetod och det slutliga materialet valts kommer en leverantör identifieras, helst i närområdet Göteborg eller närmsta möjliga stad eller ort varpå en beställning kan göras. Förmodligen kommer företaget först skicka en offert som måste godkännas från SKF:s håll innan den slutliga beställningen görs. När hållarelementen sedan levererats kommer de undersökas för att verifiera att de passar i det CARB C2220 lager som de skall sitta i. Om de gör det kommer nödvändiga förberedelser att göras inför det test som skall utföras i SKF:s testrigg. Om hållarelementen inte passar i lagret kommer beslut fattas från SKF om en eventuell dimensionsändring är nödvändig eller om problemet går att åtgärda från eget håll.

3.9 Testutförande

Testprocessen kommer att utföras på en testrigg med benämningen R3-148. Riggen består i stora drag av en 100 mm (diameter) axel och ett lagerhus som håller de monterade lagren på plats, ett smörjsystem, ett tryckbelastningssystem samt ett övervakningssystem för temperatur och vibration. Till testriggen är maskiner som kallas hjärtan kopplade, här belastas en axel med en last varpå denna överförs till lagret via tryckbelastningssystemet som kan belasta upp till 41 gånger den last som används. Till hjärtanen är ett stort mätinstrument kopplat där man avläser att trycket i testriggen överensstämmer med det önskvärda. Vidare är även ett system som heter LabVIEW kopplat till riggen som genererar textfiler med data där varvtal, temperatur och vibrationen (mäts i Envelope) i lagren kan avläsas.

Vid testutförandet kommer två CARB C2220 lager monteras på samma axel, först ett fullrulligt (20 rullar) och ett med hållarelementen (19 rullar). Det fett som kommer användas är LGPE2 och lastförhållandet är $C/P = 10$ vilket innebär en radiell last på axeln med 41,5 kN. Fett kommer att sprutas in mellan samtliga rullar på båda lagren. Som nämnt innan kommer hållarelementens konstruktions duglighet först att verifieras genom att långsamt starta upp riggen och köra på cirka 80 varv/minut. Förutsatt att inga problem uppstår kommer varvtalet sedan stegras upp till cirka 200 varv/minut där lagren får snurra till dess att steady state uppnås, d.v.s. det läge då temperaturen inte längre ökar. Därefter ökas varvtalet till 400 respektive 800 varv/minut och samma värden noteras. När testerna med de två lagren är utförda kommer det fullrulliga lagret att bytas ut mot ett med hållare, d.v.s. lagret med 17 rullar, där de tester som utförs kommer vara beroende av utfallet på de första testerna. När samtliga tester är utförda kommer den data som loggats i LabVIEW att användas för att jämföra resultaten mellan de båda lagren. Något som är viktigt att tänka på är att man sällan kan förutspå utgången av ett riggtest, därför kan ändringar komma att göras beroende på hur testerna fortskrider. Samtliga tester kommer även att filmas för att senare kunna analyseras och demonstreras.

4. Materialvalsprocessen

Nedan följer resultatet av de sju steg som utförts i materialvalsprocessen vilken avslutas med det slutliga materialvalet och beställning från leverantör.

4.1 Definition av materialfunktioner

Med tanke på den på många olika sätt utsatta miljö en lagerhållare befinner sig i finns det ett antal krav på olika egenskaper som polymeren måste ha. Hållarelementen måste kunna

- utstå den drifttemperatur som uppstår när lagret snurrar,
- klara av att belastas och stå emot den förslitning som skapas av rullarnas rotation utan att spricka,
- behålla sin ursprungliga form,
- vara verksamma i en fettfylld och oljig miljö på grund av de smörjmedel som används vilket även ställer krav på resistans mot kemikalier

Uppfylls dessa egenskaper samtidigt som polymeren kan utsättas för dessa förhållanden under en längre tid, vilket spelar en stor roll för hållarens livslängd, kan man öppna upp för fler tester i framtiden (Tadic, V., 1998).

4.2 Kravprofil

Med utgångspunkt i de tidigare beskrivna karaktäristiska egenskaperna hos PA 46 30 gf kommer huvudområdena ha följande underkategorier vars värden är intressanta:

Mekaniska parametrar

- Formbevarande egenskaper
- Lastbärande egenskaper
- Spänningsresistans
- Nötningsresistans

Termiska egenskaper

- Driftstemperaturlåghet
- Glasomvandlingstemperatur

Kemiska egenskaper

- Resistans mot smörjmedel

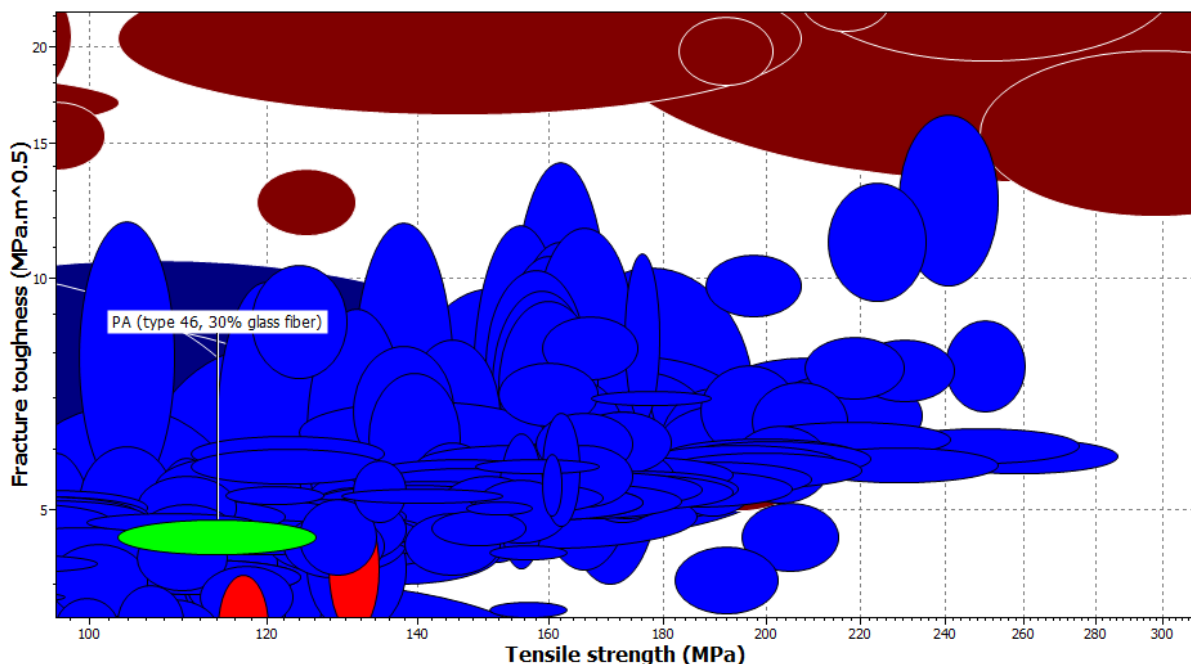
4.3 Groggallring av material

CES EduPack 2013

Med hjälp av programvaran CES EduPack 2013 har man på ett smidigt sätt i två steg eliminerat material genom att skriva in önskade egenskaper hos polymeren. Eftersom de värden som polymeren PA46 30 gf har används som minimum krav visas endast de polymerer med egenskaper som är mer eller lika tillfredsställande när steg 2 är avslutat varpå man identifierar ett antal material som uppfyller egenskapskraven.

Steg 1

Två värden, ett på en x-axel och ett på en y-axel, ställs upp mot varandra för att på så sätt få fram den första sorteringen av material som uppfyller grundkraven. På y-axeln finner vi materialens brottseghet (Fracture toughness) och på x-axeln och dess draghållfasthet (Tensile strength) plottade mot varandra (se figur 8). Varför just dessa två värden används är för att de utgör en stabil grund vid val av lastbärande polymerer (Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D., 2010, s. 175-176). Används värdena från tabell 1 innebär detta att endast de polymerer som har ett lika högt eller högre värde på dess brottseghet än $4,40 \text{ Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ och lika hög eller högre draghållfasthet än 103 MPa visas. Detta innebär att ju längre upp åt höger i diagrammet polymererna befinner sig, desto bättre är det. PA46 30 gf är markerat med limegrön färg i figuren och som man kan se finns en mängd material som ligger närmre det övre högra hörnet. Anledningen till varför det finns material som ligger närmre det nedre vänstra hörnet än PA46 30 gf är för att man aldrig exakt kan mäta dessa värden utan det finns vanligtvis ett spann vars storlek skiljer sig från material till material, därför visas även de material vars övre spann är högre än minimumkraven, vilket å andra sidan genererar fler potentiella slutkandidater. Resultatet av steg 1 blev att 92 polymerer med olika sammansättningar genererade totalt 650 varianter som uppfyllde minimumkraven.



Figur 8. Brottseghet plottat mot draghållfasthet. Källa: CES EduPack 2013.

Steg 2

I steg två fylls övriga materialegenskaper som E-modul, smälttemperatur, glasomvandlingstemperatur, brottöjning och drifttemperaturlåghet i ett formulär (se figur 9) som sedan appliceras på den tidigare filtreringen varpå de polymerer som uppfyller kraven i både steg 1 och 2 visas. För att inte riskera att potentiellt lämpliga polymerer faller bort på grund av enstaka egenskaper som smälttemperatur har gränserna för denna sänkts till 150°C medan slagsegheten, som nämnt innan, ännu inte tagits med alls i beräkningarna.

Stage 1 Stage 2 ×

Young's modulus, Tensile strength, Fracture toughness, Melting point, Glass temperature,

Properties Apply Clear

Click on the headings to show/hide selection criteria

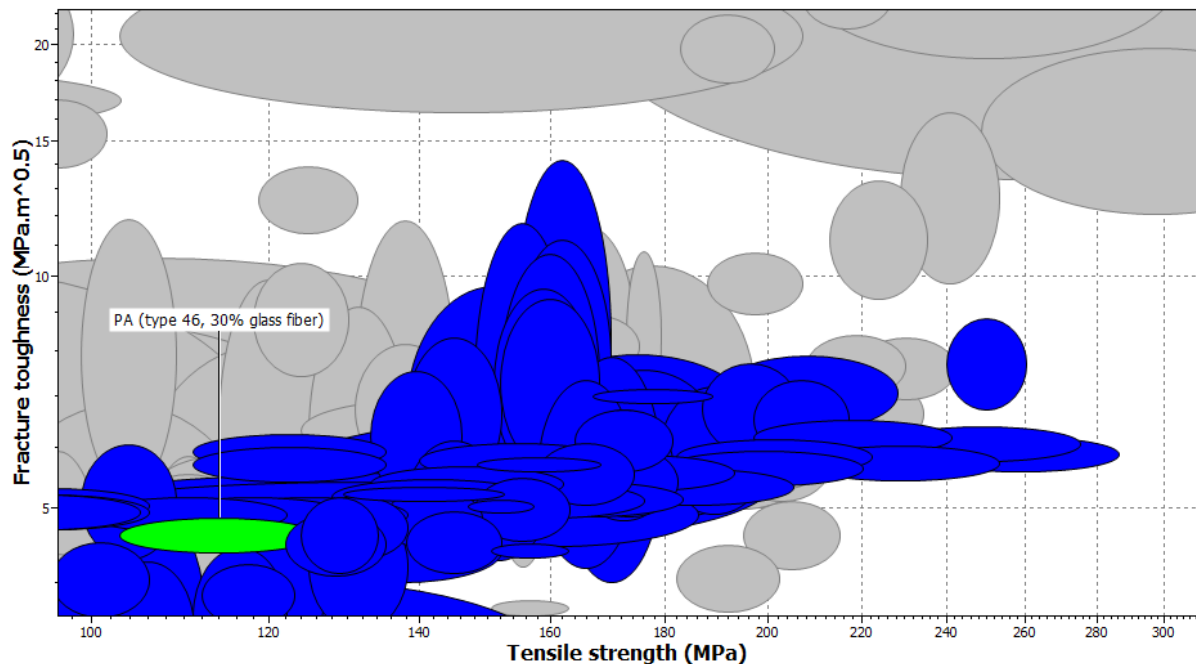
- ▶ General properties
- ▶ Composition overview
- ▶ Composition detail (polymers and natural materials)
- ▶ Mechanical properties
- ▶ Impact properties
- ▶ Thermal properties
- ▶ Processing properties
- ▶ Electrical properties
- ▶ Optical properties
- ▶ Absorption, permeability
- ▶ Durability: flammability
- ▶ Durability: fluids and sunlight
- ▶ Chemical resistance to specific chemicals
- ▶ Primary material production: energy, CO2 and water
- ▶ Material processing: energy
- ▶ Material processing: CO2 footprint
- ▶ Material recycling: energy, CO2 and recycle fraction

Figur 9. Materialegenskapsformulär i steg 2. Källa: Urklipp från CES EduPack 2013.

Resultatet av steg 2 blev att sju polymerer, utöver PA46 30 gf, genererade totalt 69 olika sammansättningar (73 med PA46 30 gf) som uppfyllde kraven i både steg 1 och 2. Polymererna som uppfyllde kraven är:

- PCT (sju olika sammansättningar)
- PEEK (två olika sammansättningar)
- PET (22 olika sammansättningar)
- PARA (Polyarylamid) (nio olika sammansättningar)
- LCP (Liquid Crystal Polymer/Polyester) (fem olika sammansättningar)
- PPA (nio olika sammansättningar)
- PPS (15 olika sammansättningar)

Något samtliga polymerer har gemensamt är att alla är fyllda med alltifrån 15-65 % glas- eller kolfiber vilket gör dem till komposit. I figur 10 nedan är en översikt över de 73 sammansättningar som uppfyllde kraven i både steg 1 och 2.



Figur 10. Översikt över kvalificerade polymerer. Källa: CES EduPack 2013.

4.4 Upprättande av egenskapsprofil

Eftersom det inte finns tidsutrymme i arbetet för att undersöka samtliga 73 sammansättningar för att sedan ta fram den bäst lämpade polymeren har ett beslut tagits att välja ut en av varje utav de sju polymererna, varav samtliga innehåller 30 % glasfiber. Dessa kommer sedan med hjälp av Pughmatrisen elimineras tills endast en återstår. Anledningen till varför just 30 % glasfiber valts är för att det är en sammansättning som ger ett mycket bra förhållande mellan styrka och styvhet för polymerer i allmänhet, medan det för PA 46 30 gf är den sammansättning som ger bäst förhållande mellan dessa två egenskaper. Väljs ett material som är mycket styvt i förhållande till dess draghållfasthet och brottöjning kan detta leda till sprödbrott när det utsätts för höga laster⁴. Nedan följer en beskrivning av de polymerer som kvalificerat sig vidare genom både steg 1 och 2 tillsammans med en tabell som anger värden på de mest intressanta egenskaperna.

PET

Likt samtliga sammansättningar av PET som kvalificerade sig genom både steg 1 och 2, förekommer denna polymer vanligtvis med en viss andel glasfiberarmering vilket ger den hög elasticitetsmodul. Det som utmärker PET är att det är en hård (hög E-modul) polymer,

⁴ Informationen har fått via mejlkontakt med Thomas Krause som är utvecklingsingenjör av polymera material på SKF:s forsknings- och utvecklingskontor i Tyskland.

nötningsresistent, har låg friktion, god olje- och fettresistens, tål höga drifttemperaturer och har låg vattenabsorption. En nackdel är att det har en tendens att bli elektrostatiskt vilket suger åt sig damm- och fettpartiklar (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 122). I tabell 2 nedan finns polymerens egenskaper listade.

PET 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	245 °C
Glasomvandlingstemperatur	72 °C
Elasticitetsmodul	9 – 10 GPa
Brottseghet	4,6 – 9,7 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	138 – 165 MPa
Driftstemperaturtålighet	176 – 194 °C
(Slagseghet	10 – 11,5 kJ/m ²)
(Brottöjning	2 – 7 %)

Tabell 2. Egenskaper för PET 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

PARA (Polyarylamid)

Glasfiberarmerad Polyarylamid är mycket hårt och starkt vilket ger det god formbeständighet, vilken ökar med mängden glasfiber. Det har enastående egenskaper mot utmattning och mycket god ytfinhet vilket framförallt är eftersträvansvärt vid tillverkning av små detaljer som i det här fallet. Dess resistans mot oljor och fett är även mycket god (Sanner, W., Nuyttens, A., 2013). Något som är sämre med materialet är att det kräver en hög bearbetningstemperatur på cirka 350 °C vilket kan vara avgörande vid valet av tillverkningsmetod (SpecialChem – Omnexus, 2014). I tabell 3 nedan finns polymerens egenskaper listade.

PARA 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	267 °C
Glasomvandlingstemperatur	85 °C
Elasticitetsmodul	9 – 11 GPa
Brottseghet	4,9 – 5,4 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	150 – 183 MPa
Driftstemperaturtålighet	186 – 207 °C
(Slagseghet	5,20 – 10 kJ/m ²)
(Brottöjning	1,94 – 2,8 %)

Tabell 3. Egenskaper för PARA 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

LCP (Liquid Crystal Polymer/Polyester)

Det som kännetecknar LCP är dess mycket goda formbevarande egenskaper (E-modul), styrka och låga friktion vid höga temperaturer. Det har även god resistans mot oljor och fett samt nötning, utmattning och sprickbildning (McKeen, L. W., 2014). På grund av dess struktur och sammansättning är dess termiska expansionskoefficient mycket låg samtidigt

som det vid låga temperaturer är mycket duktilt (segt). Vidare påverkar även den höga smälttemperaturen valet av tillverkningsmetod (Evans, D., Morgan, J. T., 1991). I tabell 4 nedan finns polymerens egenskaper listade.

LCP 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	310 °C
Glasomvandlingstemperatur	120 °C
Elasticitetsmodul	15,7 – 16,6 GPa
Brottseghet	4,95 – 5,15 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	147 – 157 MPa
Driftstemperaturlåghet	180 – 217 °C
(Slagseghet	16 – 34 kJ/m ²)
(Brottöjning	1,8 – 2,1 %)

Tabell 4. Egenskaper för LCP 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

PPA

Glasfiberarmerad PPA karaktäriseras av hög E-modul och styrka, formbeständighet, låg fuktabsorption, god ytfinhet, låg utmattning och hög temperaturlåghet. Dess höga temperaturlåghet sätter dock krav på höga bearbetningstemperaturer vilket påverkar valet av tillverkningsmetod (Hempy, B. E., Lyons, J. S., 1999). I tabell 5 nedan finns polymerens egenskaper listade.

PPA 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	300 °C
Glasomvandlingstemperatur	127 °C
Elasticitetsmodul	11 – 13,6 GPa
Brottseghet	5,1 – 5,6 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	168 – 205 MPa
Driftstemperaturlåghet	215 – 235 °C
(Slagseghet	6 – 12 kJ/m ²)
(Brottöjning	1,75 – 2,5 %)

Tabell 5. Egenskaper för PPA 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

PPS

PPS är en mycket styv termoplast vilket gör den formbeständig, framförallt med glasfiberarmering. Det tål drifttemperaturer upp till 200 °C, har god utmattningshållfasthet, god ytfinhet. PPS lämpar sig för formsprutning. Något negativt med materialet är att det har en låg slagseghet, vilket ofta är fallet med polymerer som har hög E-modul (Klason, C.,

Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 134-135). I tabell 6 nedan finns polymerens listade egenskaper.

PPS 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	275 °C
Glasomvandlingstemperatur	89 °C
Elasticitetsmodul	11,4 – 12 GPa
Brottseghet	4,3 – 5,8 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	144 – 159 MPa
Driftstemperaturlåghet	220 – 240 °C
(Slagseghet	5,2 – 6 kJ/m ²)
(Brottöjning	1,4 – 1,61 %)

Tabell 6. Egenskaper för PPS 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

PEEK

PEEK har en mycket hög hållfasthet och styvhet i både låga och höga drifttemperaturer. Dess höga resistans mot utmattning, oljor och fett, nötning, låga friktionskoefficient och fuktabsorption gör det till en högpresterande polymer (Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M., 2008, s. 139-140). Likt ett flertal av de tidigare nämnda polymererna har PEEK en mycket hög smälttemperatur vilket påverkar tillverkningsmetoden. I tabell 7 nedan finns polymerens egenskaper listade.

PEEK 30 gf - Egenskaper	
Smälttemperatur	322 °C
Glasomvandlingstemperatur	150 °C
Elasticitetsmodul	8,6 – 11 GPa
Brottseghet	5,3 – 8 Mpa.m ^{1/2}
Draghållfasthet	155 – 197 MPa
Driftstemperaturlåghet	260 – 280 °C
(Slagseghet	9,1 – 11 kJ/m ²)
(Brottöjning	2 – 3 %)

Tabell 7. Egenskaper för PEEK 30 gf. Källa: CES EduPack 2013.

PCT

PCT är en högtemperatur polyester som har samma höga förmåga av resistans mot oljor, bearbetbarhet och formbevarande egenskaper som bland annat PET. Dock, eftersom materialet i en viss sammansättning är patenterat sedan 1989 (vilket betyder att det går ut i år, 2014) finns ingen möjlighet att införskaffa detta inom tidsramen för arbetet, därför elimineras PCT som potentiell slutkandidat (Eastman Kodak Company A Corp. Of Nj., 1989).

4.5 Val av tillverkningsmetod

Samtliga nu sex polymerer, eftersom PCT eliminerats, uppfyller med sina totalt 62 sammansättningar de uppställda kraven på polymerens egenskaper. Vad man inte får glömma är att vissa av egenskaperna, exempelvis temperaturlåghet och E-modul, påverkar valet av tillverkningsmetod. Andra faktorer som är av stor vikt är vilken slutkostnad beställningen får, även om ingen hänsyn tagits till själva materialkostnaden, samtidigt som det måste ske inom tidsramen för arbetet.

Sammanfattar man finns ett flertal olika tillverkningsmetoder att välja mellan vid prototypframställning. Vill man ha en detalj snabbt där kraven på materialen inte är alltför specifika så lämpar sig någon av rapid prototyping metoderna med fina toleranser. Problemet med dessa metoder är att det i längden kan bli kostsamt att tillverka större serier jämfört med exempelvis formsprutning, samtidigt som man är begränsad till de material som det företag man beställer från använder. Vidare ställer material med glasfiberarmering högre krav på verktygen som bearbetar materialen eftersom det innebär ökade mekaniska egenskaper såsom smälttemperatur. Eftersom den största fördelen med rapid prototyping är att kunna gå från CAD underlag till färdig detalj så snabbt som möjligt för att spara tid innebär detta att det materialutbud som står till förfogande blivit lidande på grund av tillverkningsprocessen.

Formsprutning lämpar sig vid tillverkning i både större och mindre serier, men för att få ett lågt detaljpris i förhållande till de kostnader man får lägga ut för att få verktyget tillverkat så måste man tillverka stora serier. Detta är en kostnad som till stor del beror på vilket material man skall få sin detalj tillverkad i, och med tanke på att vissa av materialen som har kvalificerat sig har en smälttemperatur som sträcker sig över 300 °C kommer verktyget med största sannolikhet bli mycket dyrt. Att få ett formsprutningsverktyg tillverkat och levererat till ett företag som kan tillverka detaljerna kan ta upp till tolv veckor beroende på vilket land det fraktas från, och då är inte tiden det tar för företaget att tillverka detaljerna inräknad. Med tanke på att det i det här fallet endast rör sig om maximalt 200 detaljer och tidsramen är begränsad lämpar sig inte därför inte formsprutning som tillverkningsmetod i det här arbetet, på grund av både tids- och kostnadsfaktorer.

Den metod som återstår och håller möjligheterna för såväl materialval som seriestorlek öppna är fräsning. Här varierar den totala slutliga kostnaden beroende på vilket material och ytfinhet som önskas men jämfört med ett formsprutningsverktyg är denna mindre. En annan fördel med fräsning är att de verktyg som tillverkningen kräver vanligtvis redan finns hos företaget man beställer detaljerna från vilket sparar mycket tid. Om materialet inte skulle finnas på lager så är tiden det tar att beställa detta fortfarande förhållandevis liten om man jämför med leveranstiden på ett formsprutningsverktyg.

4.6 Slutligt materialval

I tabell 8 nedan finns de sju polymerernas resistans mot smörjmedel listade, inklusive referensen PA 46 30 gf. Notera att värdena från mätningarna som gjorts inte är exakta då resultaten beror på många olika faktorer som exponeringstid, temperatur, rådande spänningsförhållanden och vilken typ av smörjmedel de utsatts för.

Pa 46 30 gf	Troligtvis tillfredsställande
PPS 30 gf	Tillfredsställande
PEEK 30 gf	Tillfredsställande
PET 30 gf	Tillfredsställande
PARA 30 gf	Troligtvis tillfredsställande
LCP 30 gf	Tillfredsställande
PPA 30 gf	Tillfredsställande

Tabell 8. De sju polymerernas resistans mot smörjmedel. Källa: CES EduPack 2013.

Nedan visas resultatet av Pughmatriserna i urval 1 och 2. Anledningen till varför inte egenskaper som smälttemperatur och glasomvandlingstemperatur räknas med är för att dessa redan uppfylls mer än tillräckligt av samtliga polymerer. Om ett material är verksamt i en miljö med drifttemperaturer runt 100 °C spelar det ingen roll om dess smälttemperatur är 245 °C eller 320 °C och borde således inte vara anledningen till varför en polymer väljs över en annan.

Urval 1

I urval 1 jämfördes samtliga sju polymerer inklusive referensen PA 46 30 gf (se figur 11). Ingen av de nya kandidaterna fick sämre resultat än referensen, detta var dock inte helt oväntat eftersom det var dess värden som användes som minimum krav vid grovgallringen. Resultatet blev att fyra polymerer (PEEK, PET, LCP och PPA) fick en nettosumma på tre, medan resterande två fick två respektive ett och valdes därför att elimineras till urval två. Eftersom de fyra som gick vidare till fick samma nettosumma slumpvaldes LCP 30 gf som referens inför urval 2.

Egenskap	PA46 30 gf	PPS 30 gf	PEEK 30 gf	PET 30 gf	PARA 30 gf	LCP 30 gf	PPA 30 gf
Elasticitetsmodul		+	+	+	+	+	+
Draghållfasthet	R	+	+	+	+	+	+
Brottseghet	E	0	+	+	0	0	+
Slagseghet	F	-	-	-	-	0	-
Smörjmedelsresistans	E	+	+	+	0	+	+
Σ +	R	3	4	4	2	3	4
Σ -	E	1	1	1	1	0	1
Netto	N	2	3	3	1	3	3
Rang	S	5	2	2	6	1	2
Beslut		Nej	Ja	Ja	Nej	Ja	Ja

Figur 11. Pughmatris för urval 1.

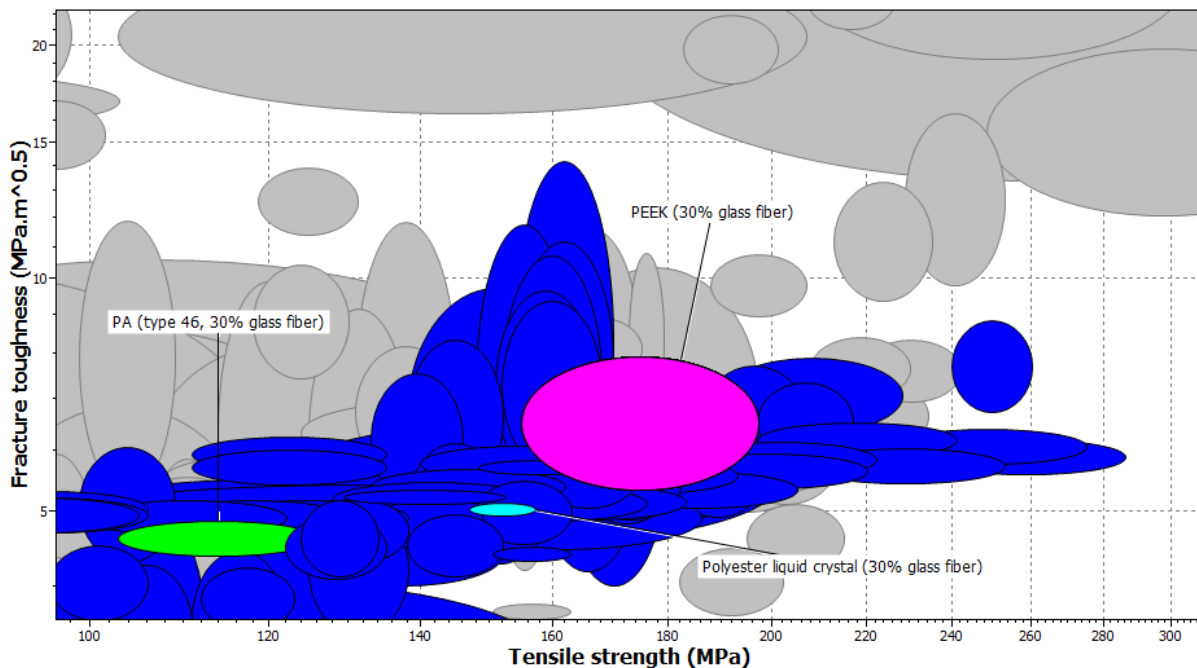
Urval 2

I figur 12 nedan visas resultatet av urval 2 där PEEK, PET och PPA jämfördes med LCP som slumpvaldes som referens. Som man kan utläsa var det PEEK som fick det bästa resultatet med en nettosumma på noll. Detta betyder att det är LCP och PEEK som får bäst resultat när de jämförs med de andra polymererna, vilka samtliga nu eliminerats, i Pughmatrisen.

Egenskap	LCP 30 gf	PEEK 30 gf	PET 30 gf	PA 46 30 gf	PPA 30 gf
Elasticitetsmodul		-	-	-	-
Draghållfasthet	R	+	0	-	+
Brottseghet	E	+	+	0	0
Slagseghet	F	-	-	0	-
Smörjmedelsresistans	E	0	0	-	0
$\Sigma +$	R	2	1	0	1
$\Sigma -$	E	2	2	3	2
Netto	N	0	-1	-3	-1
Rang	S	1	3	4	2
Beslut		Ja	Nej	Nej	Nej

Figur 12. Pughmatris för urval 2.

För att fatta ett slutligt beslut om vilken polymer hållarelementen skall tillverkas måste LCP 30 gf och PEEK 30 gf jämföras ytterligare med varandra. Ser man till polymerernas egenskaper är de snarlika. Båda har smält- och glasomvandlingstemperaturer som ligger en bra bit ovanför den mormala drifttemperaturen på 80-90 °C vilket innebär att deras egenskaper inte kommer påverkas nämnvärt av detta. Båda karakteriseras av goda mekaniska egenskaper vid såväl höga som låga temperaturer och de har båda god resistans mot nötning, utmattning, sprickbildning och smörjmedel. De har även en låg friktionskoefficient och fuktabsorption. Ser man till deras brottöjning, som utelämnats i Pughmatriserna, så har PEEK ett något högre värde med 2–3 % jämfört med 1,8–2,1 % hos LCP vilket är en marginell skillnad. Av Pughmatrisen i urval 2 och de tidigare listade egenskapsprofilerna framgår det att LCP har högre en elasticitetsmodul och slagseghet än PEEK som i sin tur har högre värden på brottseghet och draghållfasthet. Enligt Ashby m.fl. (2010, s. 176) utgör draghållfasthet och brottseghet en stabil grund att utgå ifrån när man skall skilja lastbärande polymerer från andra. Det är även dessa två egenskaper, fracture toughness och tensile strength, som återfinns på x- och y-axeln i figur 2 vilken användes i steg 1 och 2 vid grovgallringen av material av samma anledning. Därför faller det slutliga valet på PEEK 30 gf för tillverkning av hållarelementen. I figur 13 nedan visas en ny version av figur 2 där PA 46 30 gf, PEEK 30 gf och LCP 30 gf är markerade med limegrön, rosa respektive turkos färg, med brottseghet och draghållfasthet på x- och y-axeln.



Figur 13. Brottseghet och draghållfasthet för PA 46 30 gf, PEEK 30 gf och LCP 30 gf. Källa: CES EduPack.

4.7 Beställning

Efter att PEEK 30 gf valts som polymer för hållarelementen undersöktes olika leverantörer som erbjuder fräsning av olika material. Det slutliga valet landade på Prototech AB i Helsingborg som erbjuder fräsning i flera olika högkvalitetsmaterial, däribland PEEK 30 gf. STL-filen skickades ner och en offert skickades tillbaka varpå en beställning gjordes. Om fler tester än det i arbetet skall utföras i framtiden kan det vara nödvändigt med ca 200 stycken hållarelement, men eftersom det var osäkert huruvida dessa skulle passa i lagret eller inte beställdes 30 stycken till en början för verifikation. Efter att elementen monterats och fått sitta i lagret ett par dagar kunde vi verifiera att kontaktytan mellan elementen och rullarna uppstod där den var tänkt: ett par millimeter från sidorna vilka bidrar med att hålla rullarna på plats.

5. Resultat av test

Fullrulligt lager och lager med hållarelement

Det första som gjordes var att ganska snabbt accelerera upp lagren till 82 varv/minut (moturs rotation), vilket gick utan problem, således kunde hållarelementens konstruktion verifieras. Lagren fick snurra i cirka tio minuter medan observationer gjordes och anteckningar fördes. Något som noterades här var att hållarelementen tenderar att, om man tänker sig lagret med hållarelementen sett från sidan som en klocka, studsa upp och ned mellan rullarna mellan ett och tio, d.v.s. under ett kvarts varv, innan de faller tillbaka och snurrar vidare. Därefter accelererades hastigheten upp till 220 rpm tills dess att steady state uppnåts, d.v.s. då temperaturen inte längre ökade. Detta tog cirka fem timmar. Av de mätdata som erhöles ur LabVIEW kunde man utläsa att Envelope värdet (vibrationen) för det fullrulliga lagret var dubbelt så högt som för det med hållarelementen. Temperaturen för det fullrulliga lagret låg på 39,4 °C medan den för det med hållarelement låg på 42,1 °C. Därefter ökades varvtalet till 400 varv/minut. Testet valdes dock att avbrytas efter tre timmar då både temperatur och vibration ökat kraftigt hos det fullrulliga lagret samtidigt som det lät illa, då låg temperaturen på det fullrulliga lagret på 60 °C med en tendens till att stiga medan det med hållarelementen låg på 55,1 °C. Notera att ett diagram som illustrerar hela detta test återfinns i bilaga 1.

Ett beslut togs om att starta upp samma test igen, men nu med acceleration upp till 400 varv/minut direkt. Även här fylldes det fullrulliga lagret med fett innan start medan det med hållarelement förblev orört sedan avbrottet. Efter sex timmar gjordes en kontroll och båda lagren verkade snurra på bra. Temperaturen på det fullrulliga låg då på 59,2 °C medan det med hållarelement låg på 55,2 °C, detta trots att bärlagret (det lager som på samma axel sitter intill respektive provlager och tar upp den motkraft som skapas) på lagret med hållarelementens sida låg på 52,6 °C medan det fullrulliga lagrets låg på 47,6 °C. Det noterades även att Envelope värdet hos det fullrulliga lagret var sex gånger högre än för det med hållarelement. En annan observation som gjordes var att det fullrulliga lagrets lagerhus, i vilket lagret sitter i och hålls på plats, vibrerade i axiell riktning. Detta tros bero på att lagret är mer snedställt (mer s.k. "roller skew") än det med hållarelement som en följd av att rullarna rör sig mer fritt. I lagret med hållarelement hålls rullarna på plats i större utsträckning vilket bidrar till en lägre grad av vibrationsutveckling. Testet avbröts efter totalt 18 timmar då det fullrulliga lagret uppnått en temperatur på 65 °C vilken tenderade att fortfarande stiga, då hade lagret med hållarelement uppnått steady state och låg på 52 °C. Notera att ett diagram som illustrerar hela detta test återfinns i bilaga 2.

Med tanke på tidigare resultat togs beslut om att nu istället köra på lägre varvtal och last för att undersöka den minsta last som krävs för att rullatsen skall fungera hos lagret med hållarelementen, d.v.s. den last då rullarna stannar och endast innerringen snurrar. Enligt SKF standard är denna last en procent av den statiska bärigheten C_0 vilken för ett CARB C2220 med hållare ligger på 460 kN. Eftersom det vid detta test användes ett fullrulligt CARB C2220 med 20 rullar jämfört med 17, vars värde inte finns i SKF katalogen, bör dess statiska bärighet vara högre och uppskattades ligga runt 500 kN vilket innebär att den minsta lasten ligger omkring $500 \cdot 0,01 = 5$ kN. Till en början accelererades hastigheten upp till 50 varv/minut och 11 kN där lagren fick snurra i tio minuter. Här noterades inga tecken på att rullarna ville stanna. Därefter sänktes lasten till 3,7 kN, fortfarande med 50 varv/minut, där det fick snurra i tre minuter. Även här verkade lagret snurra på bra. Till sist sänktes lasten till

0,5 kN, fortfarande med 50 varv/minut och inga tecken på att rullarna ville stanna noterades vilket var positivt. Med andra ord tenderar inte rullarna att stanna på lagret med hållarelement, trots att både last och varvtal sänkts betydligt.

Lager med plåthållare och lager med hållarelement

Förhållandena i detta test var detsamma som tidigare. Lasten var fortfarande 41,5 kN ($C/P = 10$) och samma fett som tidigare använts användes även här, LGEP2. Både lagret med plåthållare och det med hållarelementen fylldes med fett innan testerna startades. Det första som gjordes var att långsamt stegra upp till 800 varv/minut och sedan köra i knappt 19 timmar över natten. Resultatet av detta blev att temperaturen hos både lagren ökade i tre timmar och började därefter plana ut. Även om detta var ett tecken på att steady state uppnåts kunde det inte bekräftas eftersom trycket därefter började sänkas i tryckstegraren vilket ledde till att temperaturen på både lagren och bärlagren sänktes kontinuerligt. Eftersom detta skedde under natten så upptäcktes inte tryckminskningen förrän på morgonen, då låg lasten på 11 kN istället för den tänkta 41,5 kN. Då temperaturen efter tre timmar börjat plana ut så gjordes hursomhelst ett antagande att någon form av steady state börjat uppnås, temperaturen hade då uppnått 76 °C för lagret med element och 70 °C för lagret med plåthållare. Bärlagren hade vid denna tidpunkt temperaturer på 67 °C respektive 57 °C. Vibrationen här var knappt två gånger större för lagret med plåthållare. Notera att ett diagram som illustrerar hela detta test återfinns i bilaga 3.

Nästa förändring som gjordes var att snabbt stegra upp varvtalet till 1200 varv/minut, där det fick snurra i tre timmar innan testet avbröts. Detta gjordes i princip enbart för att bekräfta att lagret med hållarelement gick att köra på 1200 varv/minut. Då noterades tecken på att temperaturkurvan började plana ut hos samtliga lager och bärlager. Lagret med hållarelement låg på 87,6 °C och det med plåthållare på 73,8 °C. Bärlagren låg på 78,1 °C respektive 67,2 °C. Vibrationen hos lagret med plåthållare var då cirka hälften så hög som för det med hållarelement. Det sista testet som gjordes var att göra en observation vid 100, 150, 200, 250 respektive 300 varv/minut för att kolla närmre på studsningarna som noterades i det första testet som gjordes. Notera att ett diagram som illustrerar hela detta test återfinns i bilaga 3, diagrammet är detsamma som illustrerar testet som kördes vid 800 varv/minut. I bilaga 4 återfinns ett urklipp från Excel där testförhållanden, temperatur och kommentarer finns till de tester som utförts.

6. Slutsats

Genom att i sju steg utföra en materialvalsprocess där hänsyn till åtta utvalda materialegenskaper togs kunde slutligen, efter eliminering, ett material väljas för tillverkning av hållarelementen – PEEK med 30 % glasfiber. Slutsatserna som kan dras av materialvalsprocessen är att PEEK 30 gf är ett material som har likvärdiga eller bättre än samtliga PA 46 30 gf:s egenskaper utom en, slagsegheten, av de åtta som fokus lagts på i det här arbetet. Eftersom PEEK 30 gf är ett material med så pass goda mekaniska egenskaper och så hög smältpunkt begränsar detta tillverkningsmetoderna både avseende tid och materialutbud. Genom att då ta hänsyn till och föra resonemang kring såväl tidsaspekt som de material som finns till hands för de många olika tillverkningsmetoder som står till förfogande valdes slutligen fräsning som lämplig tillverkningsmetod. Efter identifiering av en leverantör gjordes en beställning från Prototech AB och när hållarelementen levererats kunde dessa monteras i lagret och testerna påbörjas.

Dugligheten av hållarelementens konstruktion verifierades i och med de första funktionstester som utfördes då en acceleration upp till 80 varv/minut gjordes. Efter att först ha utfört ett antal olika tester på det fullrulliga lagret (med 20 rullar) tillsammans med lagret med hållarelement kan man dra slutsatsen att såväl temperatur som vibration är lägre för lagret med hållarelement när varvtalet ökade till 400 varv/minut, detta trots att bärlagret för detta hade en högre temperatur än det för det fullrulliga vilket kan tänkas borde öka provlagrens temperatur i och med att de sitter monterade på samma axel. På lagret med hållarelement noterades att dessa tenderar att börja studsa upp och ned när de når den högsta punkten i rotationen, vilken sker moturs. Detta sker under en fjärdedels varv innan de faller ned mellan rullarna igen. Beteendet tros bero på att rullarnas ständiga rotation och den centrifugalkraft som uppstår strävar efter att trycka upp hållarelementen men lyckas endast göra detta då de passerat den högsta punkten i lastad zon och gravitationen hjälper till, när de sedan passerat en fjärdedels varv faller de på plats igen på grund av sin egentyngd. Den lägsta last då rullatsatsen fungerar uppmättes inte hos lagret med hållarelement men eftersom det gick att köra så lågt som 0,5 kN viket var tio gånger lägre än den beräknade lasten var resultatet mycket positivt.

Vid jämförelsen av lagret med plåthållare och lagret med hållarelement så var temperaturen högre på lagret med hållarelement. Vibrationen var däremot hälften så hög. Något som var mycket positivt här var att vi kunde bekräfta att lagret med hållarelement gick att köra så högt som vid 1200 varv/minut vilket var huvudmålet med det testet. Överlag får resultatet av de tester som utförts anses vara mycket lyckade då hållarelementen inte visade några tecken på att inte klara av de rådande testförhållandena. Något som är viktigt att notera här är att eftersom ett flertal faktorer som fettmängd, lufttemperatur och antal rullar i lagren spelar roll för de temperaturmätningar som görs är inte resultaten i sig absoluta och bör därför inte användas för att dra förhastade slutsatser, däremot är de lämpliga att använda som goda riktmärken för framtida tester som kommer att planeras och utföras.

7. Diskussion

Med tanke på slutresultatet som fåtts kan man konstatera att tillvägagångssättet som använts i det här arbetet har varit mycket smidigt då det möjliggjort att hålla sig inom omfattningen på 15 högskolepoäng. Att endast åtta faktorer tagits i beaktning vid genereringen av och slutligen elimineringen av potentiella polymerer kan ifrågasättas men med tanke på arbetets tidsram var en gräns tvungen att sättas. Det faktum att hållarelementen fortfarande befinner sig i prototypstadiet är en annan anledning till att man kan acceptera att inte samtliga av de intressanta faktorer som existerar tagits hänsyn till. Skall man se till tillämpning i större skala kommer som tidigare konstaterat valet av tillverkningsmetod istället falla på formsprutning då styckpriset per detalj blir så mycket lägre jämfört med fräsning, samtidigt som detta innebär att tillverkningsseriernas storlek kan göras mycket större. En faktor som är viktig att ta hänsyn till vad beträffar material som PEEK som har hög viskositet (tjockhet) är att ju mindre detaljen är, desto svårare är det att fylla kaviteterna (håligheterna) som utgörs av detaljens geometri vid formsprutning. Därför är approximerad rekommendation att inte ha ytor som är tunnare än en millimeter i detaljen när högviskosa material skall tillverkas med formsprutning⁵. Överlag verkar valet av att använda en polymer som hållarmaterial lovande då detta bevisligen bidrar till såväl lägre temperaturer som vikt jämfört med plåt.

Skall man se framåt så bör självklart fler och längre tester utföras. Hur monteringsvänliga hållarelementen är i förhållande till lager med plåthållare är en fråga som är mycket intressant sett ur ett kostnadsperspektiv. Vidare är friktionstester, utmattningstester, kemikalietester och övriga analyser som utvärderar hur polymeren reagerar på längre sikt är något som är av stor vikt att undersöka. Eftersom inga tecken som tyder på att polymeren PEEK inte klarar av den miljö som CARB C2220 är verksam i talar detta för att dess egenskaper är tillräckliga för att utföra tester på prototypnivå. En annan fråga som då väcks är självklart om det kan vara så att dess egenskaper istället är överdimensionerade i förhållande till de krav som sätts på hållarelementen. Skall eventuell industriell tillämpning av hållarelement till CARB toroidlager ske i framtiden är kostnadsfrågan något som är av mycket stor vikt att beakta, något som i det här arbetet inte tagits hänsyn till i annan utsträckning än tillverkningskostnaden av 30 stycken hållarelement. För de flesta material gäller att ju bättre egenskaper det har, desto högre är dess pris. Om man då har ett material som har bättre egenskaper än vad dess verksam miljö faktiskt kräver innebär detta onödiga kostnader. Därför kan det vara intressant att utföra tester med en lägre grad av glasfiber i polymeren, exempelvis 15 % istället för 30 % och på så sätt arbeta fram en noggrannare gräns för vilka krav som ställs på polymerens egenskaper.

Vidare kan det vara intressant att undersöka beteendet som uppstod hos det fullrulliga lagret då dess lagerhus vibrerade i axiell riktning när hastigheten nådde upp till 400 varv/minut, något som inte noterades hos lagret med hållarelement. Några ytterligare observationer av detta gjordes inte under de resterande tester som utfördes vid 800 respektive 1200 varv/minut. Beteendet som hållarelementen uppvisade i samtliga tester där dessa tenderade att studsas upp och ned under en fjärdedels rotation är något som kan ha med designen att göra, dock kan inga slutsatser om anledningen till detta bekräftas baserat på de testresultat som fåtts. En programvara som kan användas för att undersöka dessa typer av beteenden är BEAST

⁵ Måttrekommendationen på en millimeter har fåtts via mejlkontakt med Thomas Krause som är utvecklingsingenjör av polymera material på SKF:s forsknings- och utvecklingskontor i Tyskland.

(BEARING Simulation Toolbox) som är ett av SKF och PELAB utvecklat program vilket används för att utföra simuleringar av olika lagers dynamik. Detta möjliggör en utförligare analys av de inre rörelser och krafter som uppstår inuti lagren under en given kraft. Med andra ord är detta som att ha en testrigg i datorn vilket sparar såväl kostnader som tid vilket i slutändan resulterar i en effektivare produktutvecklingsprocess.

8. Referenser

- AB SKF. (2014). *Cage Materials*. Tillgänglig på:
<http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/bearing-data-general/materials-for-rolling-bearings/cage-materials/index.html>. Senast besökt 2014-01-13.
- AB SKF. (2010). *Varför SKF? CARB toroidrullager*. Tillgänglig på:
www.sverull.se/10.0.1.0/188/download_447.php. Senast besökt 2014-05-16.
- Al-Zubi, R, Strong, Dr. A. B., Lampson, M. (2001). Understanding Environmental Stress Crack Resistance (ESCR) in Rotomolded Polyethylene Tanks. Sid. 1.
- Ashby, M., Shercliff, H., Cebon, D. (2010). *Materials: engineering, science, processing and design*. 2:a upplagan. Kidlington, Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Eastman Kodak Company A Corp. Of Nj. (1989). *Poly(1,4-cyclohexylene Dimethylene Terephthalate) Molding Compositions*. US4837254A.
- Evans, D., Morgan, J. T. (1991). Low temperature mechanical and thermal properties of liquid crystal polymers. *Cryogenics*. 31 (4), Sid. 220-222.
- Hempy, B. E., Lyons, J. S. (1999). Comparison of measured and empirically predicted creep of reinforced polyphthalamide. *Polymer Testing* 18, Sid. 439-447.
- Johannesson, H., Persson, J-G. (2004). *Produktutveckling: effektiva metoder för konstruktion och design*. Stockholm: Liber. 133-134.
- Klason, C., Kubát, J., Boldizar, A., Rigdahl, M. (2008). *Plaster: Materialval och materialdata*. 5th ed. Sverige: Liber AB.
- McKeen, L. W. (2014). *The Effect of Long Term Thermal Exposure on Plastics and Elastomers*. Waltham, MA, USA: William Andrew Inc. Sid. 85-86.
- McKeen, L. W. (2007). *Effect of Temperature and other Factors on Plastics and Elastomers*. 2:a upplagan. Norwich, NY, USA: William Andrew Inc. Sid. 243-377, 687-764.
- Murphy, J (1994). *The Reinforced Plastics Handbook*. Oxford, UK: Elsevier. Kapitel 1, sid. 41.
- Niklasson, G. A. (2014). *Disordered materials* [Elektronisk bild].
Tillgänglig på: <http://www.bnc.hu/?q=node/24>. Senast besökt 2014-01-13.
- Sanner, W., Nuyttens, A. (2013). *Replacing Metals with Ixef® PARA*. Tillgänglig på:
http://www.solvayplastics.com/sites/solvayplastics/EN/Solvay%20Plastics%20Literature/TB_Ixef_Metal_Substitution_Article_EN.pdf. Hämtad 2014-02-27.

Sclater, N. (2011). Rapid Prototyping. In: Sclater, N. *Mechanisms and Mechanical Devices Sourcebook*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education. Kap 18.

SpecialChem - Omnexus. (2014). *Properties of PA 46 30% GF - Polyamide 46 30% glass fiber*. Tillgänglig på:

<http://www.omnexus.com/tc/polymerselector/polymerprofiles.aspx?id=179&us=0&tab=3>. Hämtad 2014-02-19.

SpecialChem - Omnexus. (2014). *Strength and Limitations of PARA 30-60% GF - Polyarylamide 30-60% glass fiber*. Tillgänglig på:

<http://www.omnexus.com/tc/polymerselector/polymerprofiles.aspx?id=321&us=0&tab=1>. Hämtad 2014-02-27.

Tadic, V. (1998). *Tystare och svalare med polymerhållare*. Available:

<http://evolution.skf.com/sv/tystare-och-svalare-med-polymerhllare/>. Senast besökt 2014-01-13.

[Formpressningsprocessen] n.d. [Elektronisk bild]

<http://www.custompartnet.com/wu/InjectionMolding>

[Fräsningsprocessen] n.d. [Elektronisk bild]

<http://www.custompartnet.com/wu/milling>

[Fused Deposition Modeling processen] n.d. [Elektronisk bild]

<http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>

[Selective Laser Sintering processen] n.d. [Elektronisk bild]

<http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-sintering>

[Stereolithography processen] n.d. [Elektronisk bild]

<http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>

9. Bilagor

I: Illustrativt diagram för det första testutförandet (fullrulligt lager och lager med hållarelement)

II: Illustrativt diagram för det andra testutförandet (fullrulligt lager och lager med hållarelement)

III: Illustrativt diagram för det tredje testutförandet (lager med plåthållare och lager med hållarelement)

IV: Ett urklipp från Excel där samtliga tester med testförhållanden och viktiga värden har noterats tillsammans med kommentarer.

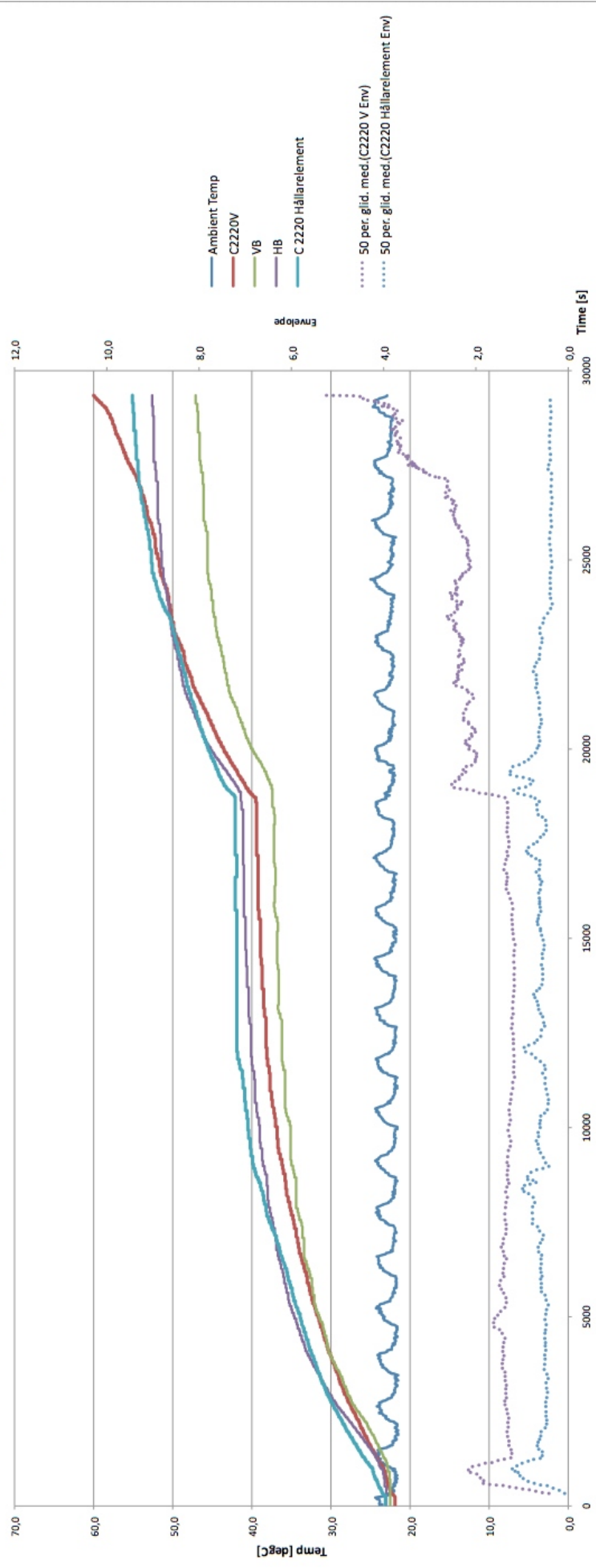
VP = vänster provlager (test 1-3: fullrulligt, test 4-5: plåthållare)

VB = vänster bärlager (test 1-3: fullrulligt, test 4-5: plåthållare)

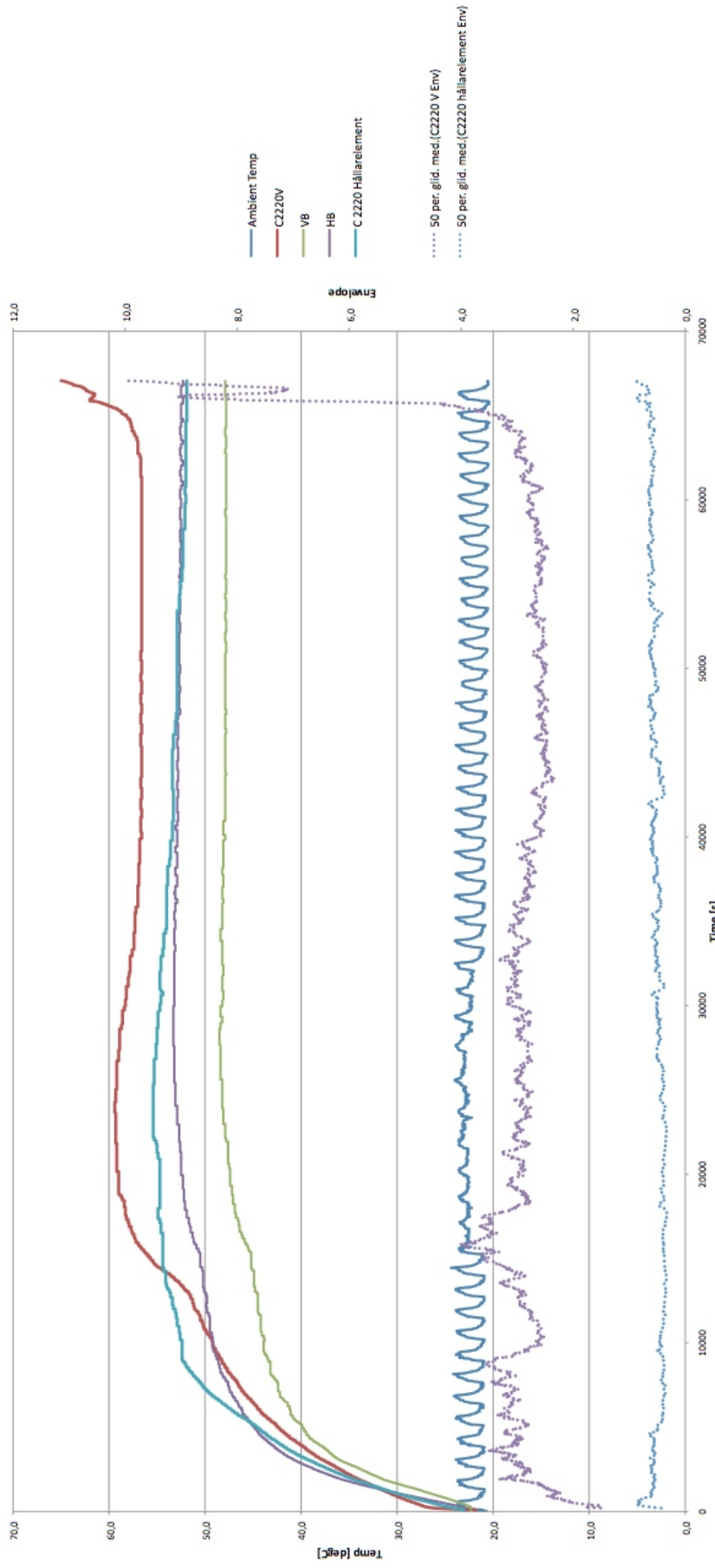
HB = höger bärlager (hållarelement)

HP = höger provlager (hållarelement)

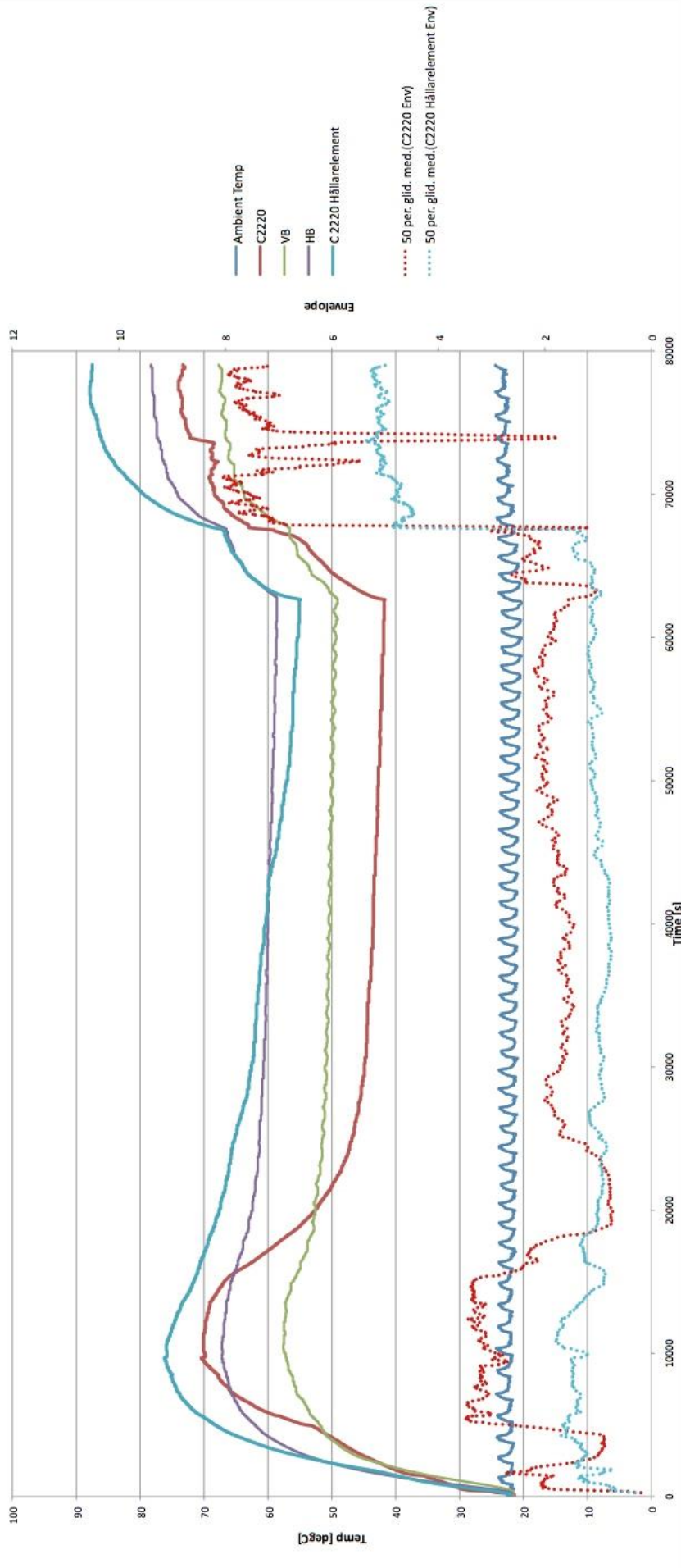
C 2220 Hållarelement vs C2220V Load 41,5 kN, - 10 min @ 80rpm - 5h@220rpm - 3h @400 rpm



C 2220 Hällarelement vs C2220V Load 41,5 kN, 18h @400 rpm



C 2220 Hållarelement vs C2220 - Load 41,5 kN, 18,5h @800 rpm - Load 20,75 kN, 3h@1200 rpm



Test nr	Testförhållanden	Lager (C2220)	Varv/minut	Testtid	VP (°C)	VB (°C)	HB (°C)	HP (°C)	Kommentar
1	Last: 41,5 kN (C/P=10)	Fullrulligt + Hållarelement	80	10 min	-	-	-	-	Hållarelementen studsar mycket upp och ned
1	Last: 41,5 kN (C/P=10)	Fullrulligt + Hållarelement	220	5 h	39,4	37,2	41,4	42,1	Hållarelementen studsar upp och ned
1	Last: 41,5 kN (C/P=10)	Fullrulligt + Hållarelement	400	3 h	60	47,1	52,6	55,1	Avbröts då VP > 60 °C
2	Last: 41,5 kN (C/P=10)	Fullrulligt + Hållarelement	400	18 h	65	47,9	52,3	51,9	Avbröts då VP > 65 °C, vänster lagerhus vibrerar i axiell riktning
3	Last: 11 kN	Fullrulligt + Hållarelement	50	10 min	-	-	-	-	Rullarna visade inga tecken på att sluta snurra
3	Last: 3,7 kN	Fullrulligt + Hållarelement	50	3 min	-	-	-	-	Rullarna visade inga tecken på att sluta snurra
3	Last: 0,5 kN	Fullrulligt + Hållarelement	50	5 min	-	-	-	-	Rullarna visade inga tecken på att sluta snurra
4	Startlast: 41,5 kN (C/P=10)	Plåthållare + Hållarelement	800	18,5 h	70 (3 h)	57 (3 h)	67 (3 h)	76 (3 h)	Kontin. tryckminskn. eft. 3h > 18 h (41,5 kN > 11 kN)
4	Last: 20,75 kN (C/P=20)	Plåthållare + Hållarelement	1200	3 h	73,8	67,2	78,1	87,6	
5	Last: 41,5 kN (C/P=10)	Plåthållare + Hållarelement	100	3 min	-	-	-	-	
5	Last: 20,75 kN (C/P=20)	Plåthållare + Hållarelement	150	3 min	-	-	-	-	
5	Last: 20,75 kN (C/P=20)	Plåthållare + Hållarelement	200	3 min	-	-	-	-	
5	Last: 20,75 kN (C/P=20)	Plåthållare + Hållarelement	250	3 min	-	-	-	-	
5	Last: 20,75 kN (C/P=20)	Plåthållare + Hållarelement	300	3 min	-	-	-	-	