

Smörjning av lager i kylmaskiner

Roger Tuomas
Avdelningen för Maskinelement
Luleå tekniska universitet
Luleå
Sweden

Förord

Detta arbete har utförts inom eff-Sys, energimyndighetens utvecklingsprogram Effektivare kyl- och värmepumpssystem. Programmet har pågått under en treårsperiod och startades i mars 2001 som en fortsättning på de tidigare kollektivforskningsprogrammen Klimat 21 och Alternativa köldmedier. eff-Sys är ett samarbete mellan statens energimyndighet, fyra svenska universitet/högskolor, ett fyrtiotal företag inom kyl- och värmepumpsindustrin och ett flertal energiföretag. Målet är att programmet på lång sikt ska bidra till en nationell utveckling på kyl- och värmepumpsområdet som karakteriseras av en hög energieffektivitet och liten miljöpåverkan till en låg kostnad. Företagen som varit delaktiga och gjort projektet möjligt är; SKF, The Trane Company Inc., United Technology Centre, York Refrigeration, and CPI Engineering. Ett speciellt tack går till kontaktpersonerna vid företagen för deras engagemang i projektet; David R. Mikalonis och Guillermo Morales (SKF), Art Butterworth (The Trane Company Inc.), Ulf Jonsson (United Technology Centre), Lars Andersen Skovlund (York Refrigeration) and Kenneth Lilje (CPI Engineering).

Sammanfattning

Smörjmedlet som används i en skruvkompressor avsedd för kylmaskiner har till huvuduppgift att smörja en rad högt belastade kontakter. Kontakter återfinns i lager, kuggar och rotorerna. Smörjmedlet har till uppgift att separera ytorna från varandra med en smörjmedelsfilm. I kontakterna är trycket så högt att ytorna deformeras elastiskt. Smörjregimen kallas därför *elastohydrodynamisk smörjning (EHL)*. Smörjmedlet har även andra uppgifter som att leda bort värme, smutspartiklar och fungerar som tätning mellan rotorerna. Smörjmedlet i en kyl/värmepumpskompressor är en blandning av olja och köldmediet. Köldmediet kan lösa sig i koncentrationer upp till 30-40 % i oljan, vilket påverkar oljans förmåga att bygga upp smörjfilm.

När de klorerade köldmedierna visade sig vara skadliga för miljön och förbjöds utvecklades en ny generation köldmedier utan klor. De nya köldmedierna visade sig dock inte var blandbara med de mineraloljor som användes. Som konsekvens medförde detta att smörjmedelstillverkare tvingades att utveckla nya typer av oljor. De nya kombinationerna har sämre smörjande egenskaper än sina föregångare, vilket resulterat i lagerhaverier.

I rapporten redovisas översiktligt resultat från forskningen där smörjmedlets och lagrets samverkan i kyl-/värmepumpmaskiner behandlas. Resultaten visar vilken effekt köldmediet har för smörjningen av lagret. Viskositeten reduceras i storleksordningen tio gånger när köldmediekoncentration höjs till 10 %. Tryckviskositetkoefficienten följer samma mönster men minskar inte lika drastiskt. Inblandningen av köldmediet medför också en ökning i friktion i den belastade kontakten, vilket ger upphov till förhöjda spänningar i lagerytan, med eventuella utmattningsskador som följd.

En kapacitiv/resistiv metod har använts för att mäta smörjförhållandena i kontakten. Resultaten har sedan använts för att ta fram kriterier för när smörjningen kan anses vara tillfredställande. Den kritiska koncentrationen beror av lasten på lagret och smörjmedlets egenskaper. Experiment med ett klorerat köldmedium där klorer fungerar som additiv indikerar att de negativa konsekvenserna av kontakter mellan rullkroppar och lagerbanor reduceras.

Abstract

The lubricant used in a screw compressor is designed for cooling machines whose main purpose is to lubricate a row of heavy loaded contacts. Contacts are found in bearings, gears, and rotors. The purpose of the lubricant's film is to separate the surfaces from each other. Pressure found in the contacts deforms the surfaces elastically. Hence, the lubricant regimen is called *elastohydrodynamic lubrication (EHL)*. Other purposes of the lubricant are to divert away heat and dirt particles, and to be used as packing between the rotors. The lubricant in a cooling/heating pump compressor contains a mixture of oil and a refrigerant. The concentration of refrigerant can dissolve 30 to 40% in oil, thereby affecting the oil's ability to build up a lubricating film.

When the chlorinated refrigerants indicated to be harmful to the environment and banned, a new generation of cold medium without chlorine was developed. This new cold medium, however, demonstrated to not be miscible with the mineral oils being used, resulting in lubricant producers being forced to develop new types of oils. As their predecessors, these new combinations have poorer lubricating qualities that result in damaged bearings.

The report presents clear results from research where lubricants and bearings cooperating in refrigerating machines and heatpumps are treated. The results indicate what negative effect the refrigerant has on rolling element bearing lubrication. Viscosity is reduced by the order of 10 when the refrigerant concentration is increased from 0-10 %. The pressure-viscosity coefficient follows the same pattern, but is not reduced as drastically. The admixture of a refrigerant also results in an increase in friction in the loaded contact, giving rise to enhanced tension in the surface layer, with eventual fatigue damage as a consequence.

A capacitive/resistive method has been used to measure lubricant conditions in the contact. The results have been used to develop criteria for when lubrication can be considered as satisfactory. The critical concentration depends upon the load on the layer and the qualities of the lubricant. An experiment with a chlorinated refrigerant where the chlorine acts as an additive indicates a reduction in the negative consequences of the contact between rolling bodies and layer paths.

Innehåll

Bakgrund	6
Projekt mål	7
Deltagande parter	7
Olja/köldmedium som smörjmedel i rullningslager.	7
Smörjfilmsuppbyggnad i lagret	7
Smörjmedlets densitets/tryckberoende	12
Lagerlivslängd	13
Kapacitiv/resistiv mätmetod	15
Identifiering av metall-metall kontakt	16
Diskussion och slutsatser	18
Referenser	19

Bakgrund

Vid introduktionen av de miljöanpassade köldmedierna visade det sig att dessa klorfria köldmedier inte var blandbara med mineraloljor som används. Andra typer av oljor baserade på syntetiska estrar utvecklades och kom istället att användas.

För att bibehålla en hög verkningsgrad i kyl-/värmesystemet krävs en separering av olja från kylmediet med hjälp av en oljeseparator, för att undvika att oljan följer med köldmediet till förångare och kondensorn. I själva kompressorn är dock koncentrationen av köldmedium i oljan hög, upp till 30-40 %, denna blandning smörjer kompressorns lager.

Smörjmedlets primära uppgift är att separera lagerytorna från varandra med en smörjfilm, och förhindra att metall- metall kontakt uppstår mellan lagerbanorna och rullkropparna. Smörjmedlet har också ett antal sekundära uppgifter som att transportera ut föroreningar såsom nötningspartiklar, tillverkningsspån mm från systemet. I skruvkompressorer där spalterna är små fungerar smörjmedlet även som tätning mellan rotorerna. Vidare har smörjmedlet en viktig funktion i att kyla kompressorns mekaniska komponenter och den komprimerade gasen.

Lagren i en skruvkompressor har till uppgift att styra rotorerna radiellt och axiellt så att de kan rotera utan att kontakt uppstår mellan dessa eller kompressorhuset. Rullningslager gör det möjligt att konstruera kompressorer med små toleranser, vilket reducerar läckage och därmed höjer kompressorns verkningsgrad. I skruvkompressorer används ett antal olika typer av rullningslager såsom; spårkullager, fyrpunktslager, vinkelkontaktkullager, nållager, cylindriska rullager samt även CARB™ lager.

Smörjregimen i rullager sorterar under *elastohydrodynamisk smörjning*. Hydrodynamisk har att göra med den filmuppbyggnad som sker och som separerar lagerytorna. Elasto kommer av det faktum att ytorna signifikant deformeras elastiskt under belastning och måste beaktas vid analysen. Viktiga parametrar som avgör om god smörjning ska erhållas är smörjmedlets viskositet, tryckviskositet samt lagrets rotationshastighet och geometri. Wardle et al [i] har i tidigare studier visat att lagren inte klarar av att bygga upp en tillräcklig smörjfilm för att separera lagerytorna om köldmediekoncentrationen överskrider 25 %. Inblandning av kylmediet är förödande för smörjmedlets viskositet och tryckviskositetskoefficient, vilka sjunker dramatiskt då kylmediekoncentrationen stiger [ii,iii]. Enligt B. Jacobson [iv] kräver kylmedier som saknar klor 50% högre viskositet än de klorerade för att uppvisa samma nötning.

Projektmål

Målet med projektet har varit att öka förståelsen vid smörjning av lager med olja/köldmedie blandningar och utarbeta verktyg för användande vid dimensionering av lager till kompressorer, samt examinera en teknologie doktor i ämnet.

Deltagande parter

I projektet har följande företag och personer varit delaktiga;

Vid Luleå tekniska universitet, Sirius laboratoriet, avdelningen för maskinelement har, Tek. Dr Ove Isaksson och doktorand Roger Tuomas varit delaktiga.

I de inblandade företagen är det främst dessa som varit engagerade; **SKF**, med David R. Mikalonis och Guillermo Morales, **The Trane Company Inc.** med Art Butterworth, **York Refrigeration** med Lars Andersen Skovlund, **CPI Engineering** med Kenneth Lilje och **United Technology Centre** med Ulf Jonsson.

Olja/köldmedium som smörjmedel i rullningslager.

Ett flertal tester har genomförts för att öka förståelsen för de smörjförhållanden som råder för lager i kyl/värmemaskiner. De olika utredningar som framgår av denna rapport behandlar; smörjmedlets egenskaper, såsom viskositet, tryckviskositet, friktion, lagrens yttopografi och filmuppbyggnad. Vidare genomfördes några livslängdsexperiment för att undersöka om ett smörjmedel innehållande köldmedium, på ett signifikant sätt reducerar livslängden hos ett lager. Som jämförelse används SKF:s livslängdsteori. En vidareutveckling av en kapacitiv/resistiv mätmetod har också ingått i arbetet. Metoden används för övervakning av lagrens smörjförhållanden under drift för att indikera när smörjningen av lagret är otillfredsställande.

Smörjfilmsuppbyggnad i lagret

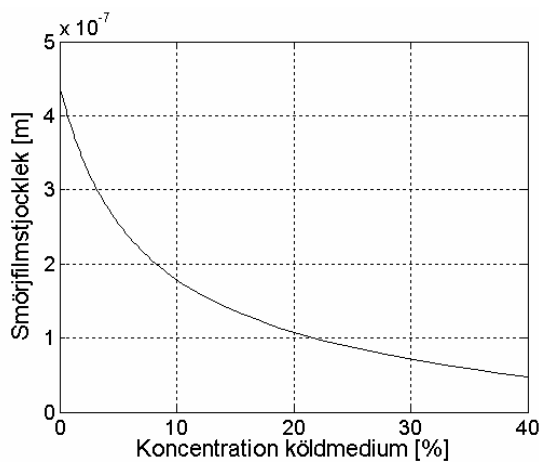
Den smörjregim som råder under normala betingelser i ett rullningslager är elastohydrodynamisk smörjning (EHL). Kännetecknande för denna regim är att ytorna mellan rullkropparna och lagerbanan är fullständigt separerade av en smörjfilm efter inkörning av lagret. Trycket i kontakten är högt och medför

elastisk deformation av ytorna. För att beräkna den minsta filmtjockleken i kontakten kan Ekvation 1 tillämpas.

$$h_{\min} = R_x \cdot 3,63 \left(\frac{U \cdot \eta}{E' \cdot R_x} \right)^{0,68} \cdot (\alpha \cdot E')^{0,49} \cdot \left(\frac{w_z}{E' \cdot R_x} \right)^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k}) \quad \text{Ekvation 1}$$

Minsta smörjfilmtjockleken i kontakten, (h_{\min}), beräknas, utifrån geometrin, (R_x), hastighetsparametern, (U), viskositeten, (η), tryckviskositetskoefficienten, (α), lasten, (w_z) och materialparametern, (E').

Filmtjocklek minskar med ökande köldmedie koncentration enligt Figur 1. Grafen gäller för konstant last och hastighet.



Figur 1 Filmtjockleken beroende av köldmediekoncentration vid 3000 rpm och ett lastförhållande på 6.2.

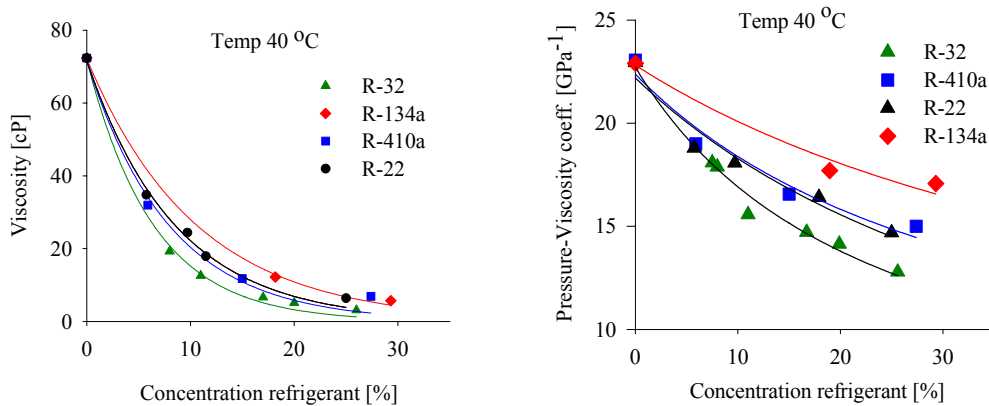
Då köldmedium blandas i oljan förändras smörjmedlets egenskaper signifikant. Två av de viktigaste parametrarna som påverkas och som har stor inverkan då det gäller att bygga upp en smörjfilm i kontakten är smörjmedlets viskositet, η och tryckviskositetskoefficienten, α .

Mätningar utförda med en POE (polyolester olja) och fyra olika köldmedier finns sammanställda i Tabell 1.

Tabell 1 Använda köldmedier.

Refrigerant	Chemical name	Type	Molecular weight [g/mol]
R-32	Difluoro-methane	HFC	52.02
R-134a	Tetrafluoro-ethane	HFC	102.03
R-410a	50/50% R-32/R-125	HFC mixture	72.58
R-22	Chlorodifluoro-methane	HCFC	86.48

Resultaten av mätningarna visar att inblandningen av köldmedia reducerar viskositeten och tryckviskositetskoefficienten [ii,iii], se Figur 2a resp. 2 b. Även molekylvikten hos köldmedium inverkar.

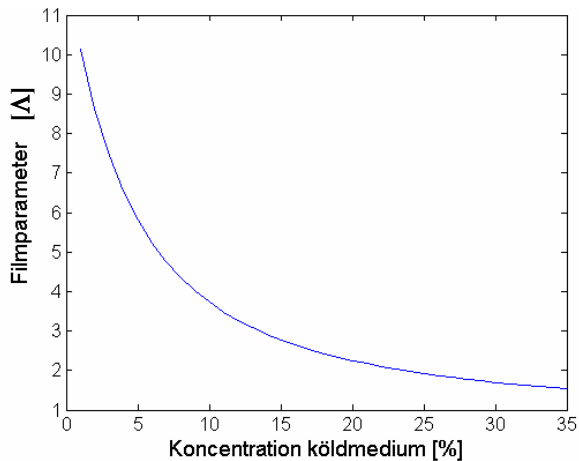


Figur 2. a) Viskositet och b) tryckviskositetskoefficient, som funktion av koncentration av köldmedia.

Som sagt tidigare är rullningslager designade för att arbeta under elastohydrodynamisk smörjning, dvs. ingen kontakt inträffar mellan rullkroppar och lagerbanor. Ett mått som talar om i vilken smörjregim man befinner sig i är filmparametern, Λ , och beräknas enligt ekvation 2 [v].

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{\sqrt{Rq^2_{\text{race}} + Rq^2_{\text{ball}}}} \quad \text{Ekvation 2}$$

Filmparametern är kvoten mellan minsta filmtjocklek, h_{\min} och ytornas RMS värden. För att vara säkra på att lagret arbetar i elastohydrodynamiska området ska Λ ha ett värde på 3-10. Ytorna är då separerade från varandra och elastiskt deformerade. I Figur 3 har Λ plottats som funktion av köldmediekoncentrationen. Med uppmätta Rq -värden för lagerbanan respektive kulan efter körning, på 50 nm och 34 nm. Noteras kan, att redan vid en köldmediekoncentration på 10-12 % är filmparametern under 3.



Figur 3 Filmparametern Δ , som funktion av köldmediekoncentrationen efter inkörning, vid 3000 rpm och lastförhållandet 6.2. R_q för kulan uppmättes till 34 nm och lagerbanan 50 nm.

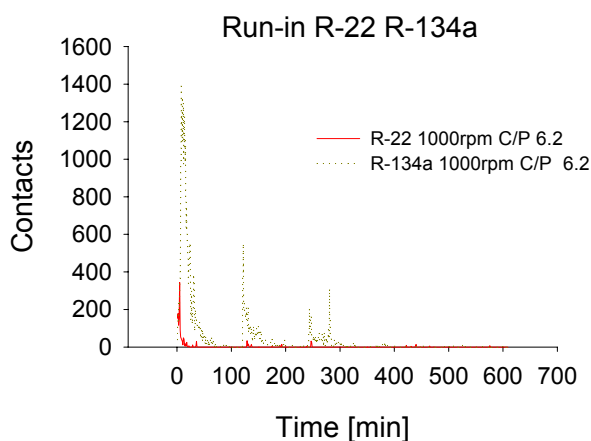
Additiverade smörjmedel

Vid kritiskt tunna smörjfilmer rekommenderar SKF att additiv ska användas för att bygga upp en skyddande film på ytan som förhindra rullkropparna att få direktkontakt med lagerbanorna. För att avgöra vad som är kritiskt använder SKF sig av en parameter som ingår i livslängdsberäkningen [v_1] och kallas, κ , se ekvation 3.

$$\kappa = \frac{v}{v_1} \quad \text{Ekvation 3}$$

κ är förhållandet mellan viskositeten som krävs för att upprätthålla god smörjning, v_1 , och den faktiska viskositeten, v , som smörjmedlet har vid givna driftförhållanden. När κ -värdet underskrider 1 rekommenderar SKF att använda EP-additiver (EP = Extreme Pressure).

Lager i kyl/värmepumpmaskiner är smorda med en olja utspädd med köldmedium vilket resulterar i en låg viskositet vilket leder till att κ kommer att underskrida värdet 1 vid höga köldmediekoncentrationer. Då CFC och HCFC köldmedier användes fram till slutet av -90 talet fungerade klorerade som EP additiv [v_1]. De nya köldmedierna innehåller inte klorerade. I Figur 4 visas skillnaden i metall- metall kontakt där de klorerade R-22 och det icke klorerade R-134a använts som köldmedie.



Figur 4 Skillnad i metall- metall kontakt mellan det klorerade R-22 och det icke klorerade R-134a under ett inkörningsförlopp.

Experimentet är utfört under ett inkörningsförlopp under 10 h med en rotationshastighet av 1000 rpm och ett lastförhållande av 6.2. Experimentet startades med en låg köldmediekoncentration, ca 5%, för att varannan timme ökas i steg tills koncentrationen blev ca 25% efter 600 min.

Friktion i kontakten

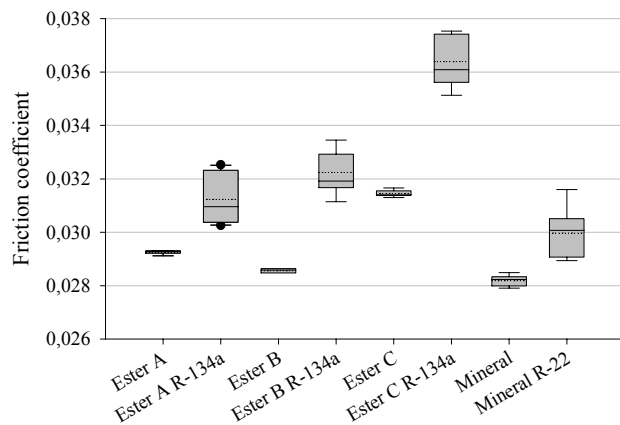
En annan viktig faktor att beakta när inte ren rullning förekommer i lagren och som påverkar lagrets livslängd är friktionskoefficienten i kontakten. Om friktionen är hög ger det en högre totalspänning i lagermaterialet vilket kan leda till att lagret utmattas i förtid.

Friktionen uppmätt i en testutrustning utvecklad av B. O. Åhrström [vii], på fyra olika smörjmedel och två olika köldmedier finns att se Tabell 2.

Tabell 2 Oljor och köldmedier som ingick i experimentet.

Olja	Kemisk sammansättning	Viskositetsgrad	Mängden grenade syror	Köldmedium
POE A	C ₃₉ H ₇₂ O ₈	VG68	70%	R-134a
POE B	C ₃₁ H ₅₆ O ₈	VG68	8%+67%	R-134a
POE C	C ₃₃ H ₆₂ O ₆	VG46	100%	R-134a
Mineral	-	Base viscosity 57cst at 40°C	-	R-22

Resultatet presenteras i Figur 5 och visas som boxar vilka innehåller fem experiment per box, höjden på boxarna anger standardavvikelsen. Mätningarna är utförda dels utan köldmedium och med köldmedium i koncentrationer på ca 7 %±2 %.



Figur 5 Friktionen i kontakten.

Smörjmedlets densitets/tryckberoende

En viktig smörjmedelsparameter är smörjmedlets densitet/tryck beroende. Ett smörjmedel som inte har förmågan att ändra densitet då trycket stiger gör att smörjmedlet blir hårdare i kontakten och påverkar tryckspiken i kontaktens utlopp. Tryckspikens storlek kan stiga med upp till 4 ggr på grund av att oljan inte är kompressibel mot en som är kompressibel. Även tryckspikar från ruffiga lagerytor kommer att påverka trycket och i sin tur spänningen i lagermaterialet. Högre spänningar ger upphov till en snabbare utmattning av lagerytan och därmed ett kortare liv.

Experiment har utförts för att undersöka om köldmedie inblandningen påverkar kompressibiliteten av smörjmedlet. De testade smörjmedlen beskrivs i Tabell 3.

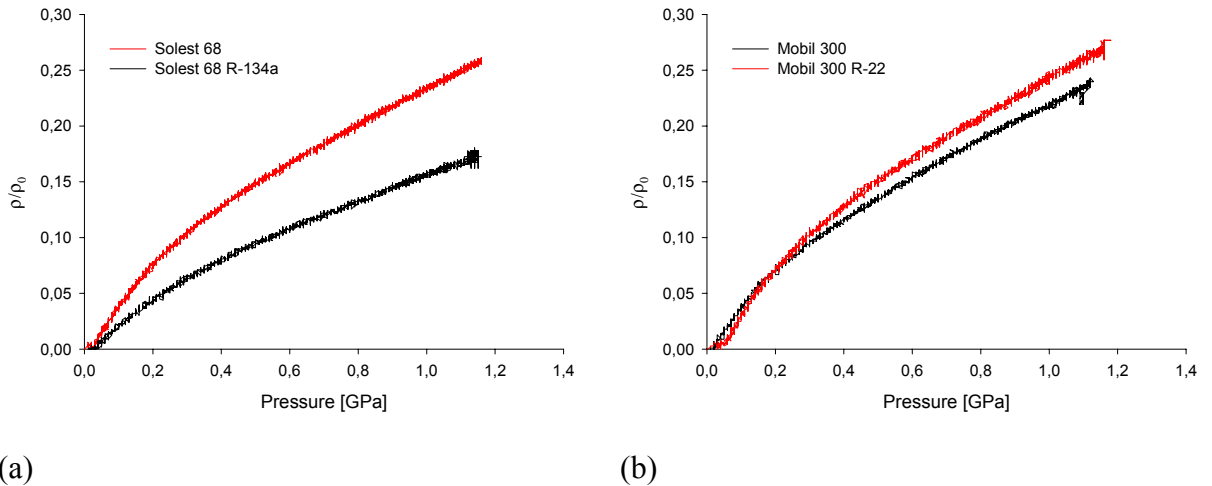
Tabell 3 Testade oljor och olja/köldmedie kombinationer.

Lubricant	Chemical structure	Viscosity grade	Branched acids	Refrigerant used	Refrigerant chemical structure
Solest 68	$C_{39}H_{72}O_8$	VG68	70%	R-134a	CH_2FCF_3
Solest 68	$C_{39}H_{72}O_8$	VG68	70%	-	
Mobil Arctic 300	Naphthenic mineral oil	VG68	-	R-22	$CHClF_2$
Mobil Arctic 300	Naphthenic mineral oil	VG68	-	-	

Test apparaten är en högtryckskammare som klarar att belasta smörjmedlet med ett tryck på upp till 4.5 GPa. En utförlig beskrivning av högtryckskammaren ges av Jacobson [viii].

I Figur 6 visas resultaten av experimenten. Vad som är intressant att notera är att när 20 wt% av köldmedium tillförs ökar smörjmedlets styvhet. R-134a i

kombination med POE oljan visar på en kraftig reduktion av kompressibiliteten, ca 30% medan R-22 tillsammans med mineraloljan uppträder betydligt mer kompressibelt.



Figur 6(a) visar densitet/tryck beroendet för dels ren POE (Solest 68) och blandad med 20 wt% R-134a. (b) visar densitet/tryck beroendet för dels ren Mineralolja (Mobil 300) och blandad med 20 wt% R-22.

Lagerlivslängd

I lager, under normala smörjförhållanden, beräknas lagerlivslängden enligt ekvation 4 [vi].

$$L_{nm} = a_1 \cdot a_{skf} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad \text{Ekvation 4}$$

där L_{nm} är livslängden i miljoner varv. a_1 sätter säkerheten, a_{skf} är livslängdsfaktorn, se ekvation 5, C är lagrets dynamiska bärighetstal, P är den ekvivalenta dynamiska lagerbelastningen som lagret utsätts för och exponenten p är 3 för kullager och 10/3 för rullager.

$$a_{skf} = f \left(\kappa, \eta_c, \frac{P_u}{P} \right) \quad \text{Ekvation 5}$$

κ är förhållandet mellan viskositeten som krävs för att upprätthålla god smörjning, v_1 , och den faktiska viskositeten, v , som smörjmedlet har. η_c anger hur rent smörjmedlet är, P_u anger lastutmattningsgränsen.

I lager smorda med en olja/köldmedieblandning kommer flertalet av de ingående parametrarna i livslängdsformen att variera med koncentrationen.

Livslängden beror också av tryckviskositetskoefficienten hos smörjmedlet. För att beakta det i livslängdsberäkningen föreslås att κ justeras med hjälp av viskositeten och tryckviskositetskoefficienten [ix], se ekvation 6.

$$\kappa_{adj} = \frac{\nu \cdot \left(\frac{\alpha}{\alpha_{\text{mineral}}} \right)^{0,72}}{3 \cdot \nu_1} \quad \text{Ekvation 6}$$

Viskositeten justeras med ett förhållande mellan tryckviskositetskoefficienten, α , för smörjmedlet och tryckviskositetskoefficienten för mineralolja, α_{mineral} . Den erforderliga viskositeten ν_1 blir justerad med en faktor 3 då HFC köldmedier används. Detta resulterar i att konstruktören måste välja större lager och/eller högre viskositet på smörjmedlet. Kompressortillverkarnas har dock inte kunnat tillämpa dimensioneringskriteriet fullt ut enligt ovan eftersom andra kriterier inte tillåter det. För stora lager innebär att toleranserna inte går att uppfylla. Större lager och högre viskositet på oljan ger dessutom upphov till ökade förluster i kompressorn.

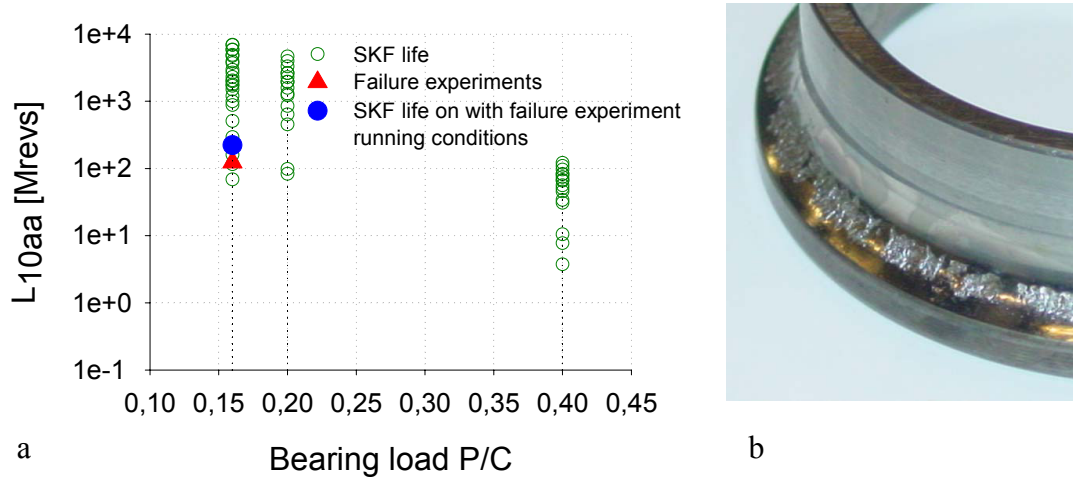
Livslängdsexperiment

För att undersöka om köldmediet i sig påverkar livslängden hos lagret genomfördes fyra livslängds experiment, se Tabell 4. Experimenten har körts till haveri i tre av fallen, den fjärde avbröts efter 2100 h.

Tabell 4 Livslängds experiment

Lubricant	Refrigerant	Viscosity [cP]	Load ratio [C/P]	Speed [rev/min]	Failed [h]
Solest 68	R-134a	5.7	6.2	3000	460h
Solest 68	R-134a	5.7	6.2	3000	180h
Solest 68	R-134a	5.1	6.2	3000	130h
Solest 68	R-134a	5.3	6.2	3000	>2100h

Resultaten från experimenten har använts för att generera en Weibull punkt i Figur 7a (Röd). Om driftsparametrarna från experimenten används i SKF:s livslängdsformel, ekvation 4, och görs till en Weibull punkt fås den blåa punkten. I figuren har även punkter genererade med SKF:s livslängds teori (gröna ringar), dessa punkter är genererade under olika driftförhållanden, exempelvis hastighet, viskositet mm., men under med konstant lastförhållande 6.2. I Figur 7b visas ett lager som havererat på grund av utmattning.

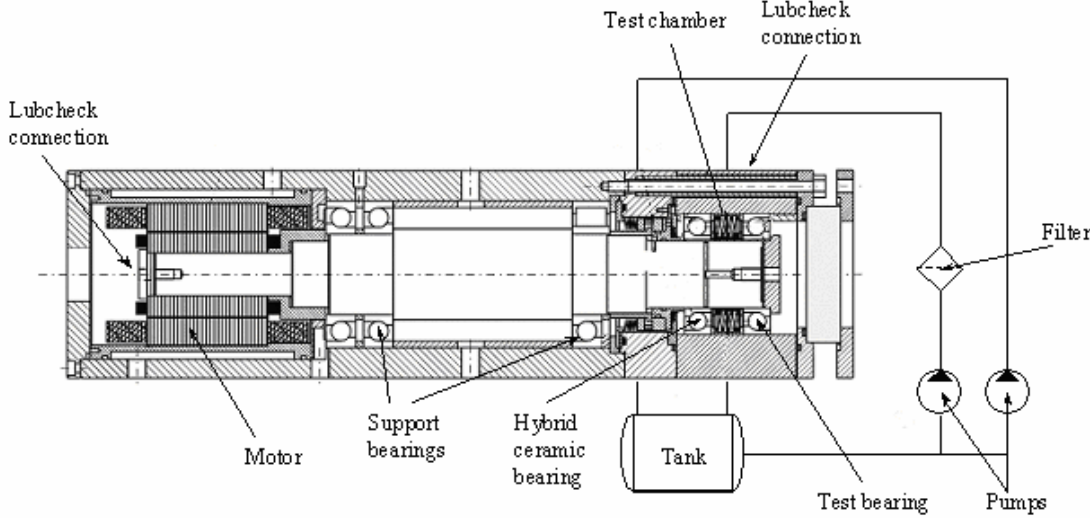


Figur 7a Livslängdsexperimenten plottade som en Weibull punkt (röd triangel) tillsammans med den förväntade livslängden för smörjförhållandet (blå cirkel) och punkter genererade med hjälp av livslängdsformeln. 7b visar ett av de havererade lagren.

Kapacitiv/resistiv mätmetod

För att mäta smörjfilmen och avgöra om kontakten är separerad eller inte används en kapacitiv/resistiv mätmetod. Metoden är utvecklat av Heemskerck et. al.[x] och har vidareutvecklats i projektet. Metoden använder en kapacitiv spänningsdelare och inkluderar även en resistiv komponent. Vid full film är resistansen hög och utsignalen beror mer eller mindre enbart av den uppmätta kapacitansen. När resistansen blir tillräckligt låg, dvs då asperitetskontakter uppkommer, ges utsignalen av resistansen. För att undvika skador på lagret matas kretsen med en spänning på 90 mV och en frekvens av 410 kHz.

Mätning sker på testlagret placerad i främre delen av testlagerhuset, se Figur 8. En utförligare beskrivning av test apparaten ges av Hansson och Jonsson xi.



Figur 8 Testapparat i genomskärning.

Lagren som används i experimenten är vinkelkontaktkullager (BEP7210) och består av sexton kulor. Mätning kommer därav att ske över trettio två kontakter samtidigt. Ett fjäderpaket mellan testlagret och stödlagret genererar en konstant axiell belastning, vilket gör att samtliga kontakter är lika belastade. Utsignalen från instrumentet ger ca 7.5V vid full separation och 0V vid full kontakt.

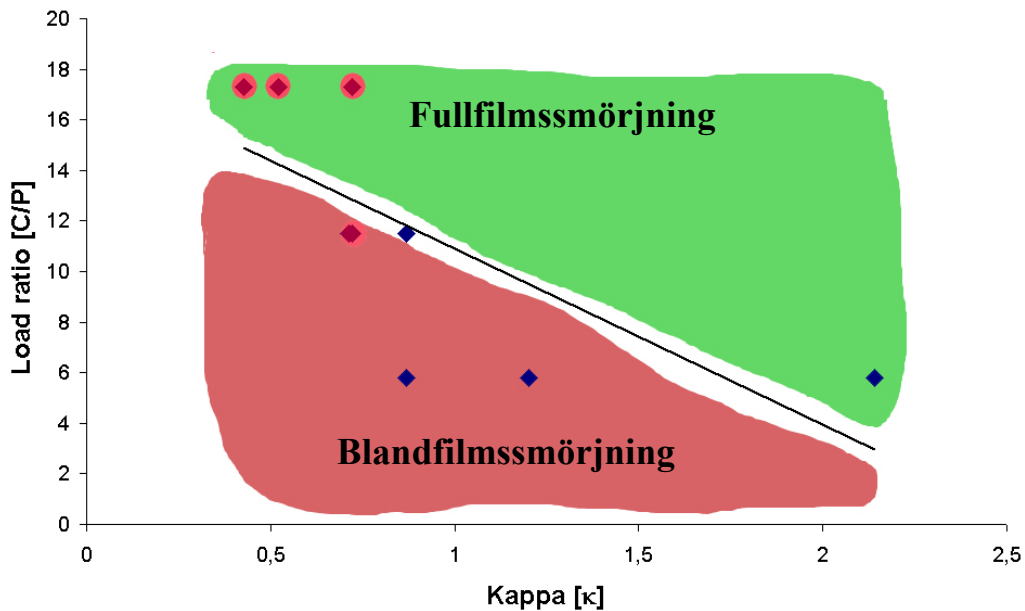
Identifiering av metall-metall kontakt

Mätmetoden används för att undersöka när kontakt uppkommer mellan kulorna och lagerbanan. För att kunna identifiera en kontakt används ett tröskelvärde på utsignalen från instrumentet. Tröskeln är inställd på 0.1 V under medelvärdet av utsignalen. Alla data under detta tröskelvärde registreras som kontakter. En matris på nio experiment har utförts där last, hastighet och köldmediekoncentrationen varierats för att hitta en gräns för när kontakter börjar uppträda, se Tabell 5.

Tabell 5 Experiment utförda för att finna gränsen för tillfredställande smörjning.

Oil	Refrigerant	Speed [rpm]	Load ratio C/P
Solest 68	R-134a	1000	6.2
Solest 68	R-134a	1000	12.4
Solest 68	R-134a	1000	18.6
Solest 68	R-134a	1500	6.2
Solest 68	R-134a	1500	12.4
Solest 68	R-134a	1500	18.6
Solest 68	R-134a	3000	6.2
Solest 68	R-134a	3000	12.4
Solest 68	R-134a	3000	18.6

I Figur 9 visas resultaten av dessa experiment. Nivån då kontakt uppträder är plottat mot lastförhållandet C/P och κ -värdet.



Figur 9 Gräns för när fullfilmssmörjning råder.

De rödmarkerade punkterna i figuren visade att fullfilmssmörjning råder och att ingen kontakt uppkommer. Medan vid driftförhållandena som råder för de blå punkterna gav kontakt vid det kappavärdet. För att experimenten som inte uppvisar kontakt ska uppvisa kontakter krävs att kappavärdet sänks ytterligare.

Diskussion och slutsatser

Projektet har resulterat i fördjupade kunskaper om smörjningen av lager i kyl/värme maskiner. Syftet har varit att presentera resultaten så att de är användbara för konstruktörer vid lager- och smörjmedels- val vid konstruktion av nya maskiner.

- Höjd köldmedie koncentrationen medför lägre viskositet och tryckviskositetskoefficient. I vissa fall blir reduktion så kraftig att smörjfilmsuppbyggnaden inte blir tjock nog för att separera ytorna utan kontakt uppstår. Förhållandet mellan köldmediets och oljans molekylvikt påverkar viskositets och tryckviskositetsens. Köldmedium med hög molekylvikt uppvisar en kraftigare viskositets- och tryckviskositetskoefficients- reduktion med koncentration
- Eyrings modell [xii] kan användas för att beräkna viskositet och tryckviskositet för varje koncentration om oljans och köldmediets molekylvikter, viskositet och tryckviskositetskoefficient, för ren olja respektive köldmedium är kända
- Med ökad köldmediekoncentration ökar friktionskoefficient i kontakten.
- Inblandning av R-134a i polyolester olja ger en mindre kompressibel olja vilket medför högre spänningar i lagermatreialet.
- Resultaten indikerar att livslängden för lager smorda med R-134a och POE är kortare jämfört med beräkningar enligt SKF livslängsteori.
- Den kapacitiva mätmetoden gör det möjligt att detektera status under inkörning av ett lager.
- För klorerade köldmediet R-22 erhöles betydligt färre kontakter än för de icke klorerade köldmediet R-134a.
- Filmparametern indikerar att redan vid koncentration runt 10-12% uppkommer kontakt mellan rullkroppar och lagerbanorna
- Inkörning av lagret är möjlig för koncentrationer upp till 20 %.

Referenser

- i F. P. Wardle, B. Jacobson, H. Dolfsma, and A. Butterworth, "Lubrication of refrigerant compressor bearings", US Patent 5469713, (1995).
- ii R. Tuomas och U. Jonsson, "Influence of refrigerant on viscosity and pressure-viscosity coefficient of refrigeration compressor lubricants", Proc. Leeds-Lyon (1999).
- iii M. Akei och K. Mizuhara, "The Elastohydrodynamic properties of Lubricants in Refrigerant Environments", ASME/STLE Tribology conference in San Francisco, Oct 13-17, (1996).
- iv B., Jacobson, "Ball bearing lubrication in refrigeration compressors". Proc. of the 1996 International Compressor Engineering Conference at Purdue. pp 103-108 (1996).
- v B. J., Hamrock, "Fundamentals of Fluid Film Lubrication", ISBN 0-07-025956-9, pp 41-42, (1994).
- vi SKF, "General Catalogue", edition 5000 E, SKF publ., pp 53, (2003).
- vii B-O., Åhrström, "Investigation of Lubricants at Transient EHD-Conditions", Bench Testing of Industrial Fluid Lubrication and Wear Properties Used in Machinery Applications, ASTM STP 1404, ISBN 0-8031-5867-3, 2000.
- viii Jacobson, B., O., "A New high Pressure Chamber for Lubricant Investigations", Proc. Of the Int. Trib. Conf. Nagasaki, Japan, 2000, ISBN 4-9900139-5-6, pp. 1199-1202.
- ix K., Meyers, "Creating the right environment for compressor bearings", SKF Evolution, #4 15 Nov, 1997.
- x R. S. Heemsker, K. N. Vermeiren and H. Dolfsma, "Measurment of Lubrication Conditioning in Rolling element Bearings", (1982), ASLE Trans., Vol. 24, pp. 519-527.
- xi U., J., Jonsson and N., Hansson, "Lubrication Limits of Rolling Element Bearings in Refrigeration Compressor", Proc. Vol. 1, 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 129-134.
- xii S., Glasstone, K., J., Laidler and H., Eyring, "The Theory of Rate Process", McGraw-Hill Book Company. Company. Inc., New York. (1941).