

# Projekt C13: Smörjning av lager i kylmaskiner

Roger Tuomas och Ove Isaksson  
Luleå tekniska universitet  
Avdelningen för maskinelement  
971 87 Luleå

## Sammanfattning

Smörjmedlet i en kylkompressor har till uppgift dels att smörja en rad högt belastade kontakter men även att leda bort värme och täta mellan kontakterna. Olja är i sin tur i kontakt med det köldmedium som cirkulerar i anläggningen. Eftersom köldmediet är normalt är lösligt i oljan kommer en viss andel att lösa sig i oljan och därmed förändra oljans smörjande egenskaper.

Under de senaste åren har det uppdagats att miljön tar skada av användandet av freoner innehållande klor, detta har tvingat fram en ny generation icke klorerade köldmedier. Dessa nya köldmedier visade sig inte var blandbara med mineralolja vilket medfört att smörjmedelstillverkare tvingades att utveckla nya typer av oljor för denna applikation. Det har visat sig att dessa nya kombinationer inte hade samma smörjande egenskaper som sin föregångare, med lager haverier som följd.

Avgörande för ett smörjmedels smörjande egenskaper är dess förmåga att bygga upp en separerande smörjfilm i kontakter utsatt för höga laster. Smörjfilmens tjocklek är till stor del beroende av smörjmedlets viskositet och tryckviskositet. För att kunna beräkna den förväntade livslängden av ett lager i en kylmaskin måste viskositeten och tryckviskositeten vara känd för blandningen mellan olja och köldmediet. I rapporten redovisas hur köldmediets koncentration i oljan och molekylvikt påverkar viskositeten och tryckviskositeten för fyra olika köldmedier. En lagertestrigg har utrustats med en kapacitans mätare för att mäta smörjfilmtjockleken. Dessa experiment har visat att lasten har en avgörande inverkan på lagrets förmåga att bygga upp en god smörjfilm. Experimenten visar även att det finns en klar gräns för när smörjfilmen är god och när metall-/metallkontakt startar.

Detta ligger som grund för projekt C13 där 5 intressenter är delaktiga (SKF, Trane Company, York Refrigeration, CPI Engineering och AKA Kyla). Under projekttiden har dessa varit aktiva med dels mätningar, finansiering och ett gott engagemang vid projektmötena som hållits i snitt varannan månad. Aktiva i projektet vid Luleå tekniska universitet har Roger Tuomas (doktorand), Ulf Jonsson (Tek doktor) och Ove Isaksson (Tek doktor) varit. I mars 2001 avser Roger att avlägga licentiatexamen.

## Abstract

The main purpose of the lubricant in the compressor is to separate the surfaces in the highly loaded contacts, and also seal and cool the compressor. Bearing lubrication in a refrigeration screw compressors refer to the Elasto- Hydro-Dynamic, (EHD), lubrication regime, i.e. the deformation of the surfaces is significant and must be considered when calculating the film thickness. To provide a proper film thickness in an EHD contact the viscosity,  $\eta$ , and pressure-viscosity coefficient,  $\alpha$ , of the lubricant plays an important role. The dilution of refrigerant in the oil decreases both the viscosity and pressure-viscosity. With increasing dilution of refrigerant in the oil, asperity contacts occur resulting from the lubricating film break down.

To measure the film thickness under operation a capacitance method was used. The measured capacitance is the sum of the capacitances between the inner ring and the ball, and the ball and the outer ring, of the bearing. Experiments have been carried out for different oil-refrigerant mixtures with an increasing dilution of refrigerant and different load ratios. The refrigerant dilution is increased until the lubricating film breaks down and asperity contact occurs. The experiments show that the load is an important parameter when estimating the film thickness of the lubricating film.

These are the main conclusions of the project C13 where five companies have been involved (SKF, Trane Company, York Refrigeration, CPI Engineering and AKA Refrigeration). The companies contribution to the project has mainly been measurements carried out at the companies, financing and scientific interesting discussions during the project meetings. The researchers at Luleå University of Technology have been Roger Tuomas (PhD student), Ulf Jonsson (PhD) and Ove Isaksson (PhD). Roger Tuomas will during March 2001 receive a Licentiate degree.

# Innehållsförteckning

1	Bakgrund & motiv för projektet .....	1
2	Syfte och mål .....	1
3	Forskare & industrirepresentanter .....	2
4	Resultat .....	2
4.1	Viskositet och Tryckviskositetskoefficient .....	3
4.2	Smörjfilmens uppbyggnad .....	4
5	Energi och Miljöpåverkan .....	5
6	Examina .....	5
7	Publicering .....	6
	• “Influence of refrigerant on viscosity and pressure-viscosity coefficient of refrigeration compressor lubricant”, 99 .....	6
	• “Influence on molecular structure on the lubrication properties of four different esters”, 2000 .....	6
8	Internationell samverkan .....	6
9	Diskussion och Slutsatser .....	6
10	Referenser .....	7

# 1 Bakgrund & motiv för projektet

Ersättandet av klorerade köldmedier (CFC och HCFC) med miljöanpassade alternativ, (HFC), har på vissa håll medfört stora tekniska problem för tillverkare och brukare av kylanläggningar. Ett av problemen har varit att erhålla en tillförlitlig smörjning av lagren i skruvkompressorer. Tidigare använda köldmedier har haft en sekundär effekt som slitage reducerande additiv tack vare sitt klorinnehåll. Klorinnehåll i köldmedier, om utsläpp sker till atmosfären, påverkar den yttre miljön bland annat ozonskiktet.

De nya köldmedierna visade sig vara icke blandbara med mineraloljorna som användes i CFC anläggningarna, detta ledde till att en ny generations oljor för kylmaskiner utvecklades. Erfarenhet hos skruvkompressortillverkare tyder på att problemen med lagersmörjning är större för de nya kombinationerna av miljövänliga köldmedier/syntetisk olja, jämfört med de klorerade CFC och HCFC köldmedierna blandade med mineralolja.

Med målsättningen att skraddaresy kylkompressorer till de kundkrav som ställs både vad avser miljökraven som andra krav, kräver mer forskning och utveckling för att förstå kylmediets inverkan på smörjningen. I praktiken är studierna beträffande alternativa köldmedier i sammanhanget önskvärda för att verifiera deras kompatibilitet med kompressorn. Dessa alternativ är mindre skadliga för miljön eftersom de innehåller endast låga halter klor eller är helt klorfria.

Vid Avdelningen för maskinelement vid Luleå tekniska universitet har forskning bedrivits inom området tribologi, d.v.s. friktion, smörjning och nötning, under mer än 20 år. Fokus har huvudsakligen varit på elastohydrodynamisk smörjning och reologi. Under 90-talet har de vetenskapliga studierna även innefattat grundläggande egenskaper hos olje/kylmedieblandningar som används i kylkompressorer.

## 2 Syfte och mål

Syftet med projektet har varit att generera direkt användbara metoder för dimensionering av lager i kylmaskiner. I detta innefattas metoder för livslängdsberäkningar och effektförluster, utformning av lagerkaviteter och oljecirkulationssystem.

Det viktigast målet har varit att fastställa den minst tillåtna viskositeten för de specifika lagertyper som förekommer i kylkompressorer. Denna information är sedan användbar i arbetet med att optimera den mekaniska verkningsgraden hos kompressorn. Vidare gäller det att förstå varför lager smorda med icke klorerade köldmedier uppvisar så låg tolerans mot låg viskositet.

Målen vad avser oljecirkulationssystem har ej uppnåtts, med anledning av att mer tid har fått disponeras på att det viktigast målet, nämligen verktyg för dimensionering av rullningslager.

### 3 Forskare & industrirepresentanter

De aktiva forskare under projektets genomförande har varit; Roger Tuomas (doktorand), Ulf Jonsson (Tek. doktor) och Ove Isaksson, (Tek. doktor).

Företagens engagemang i projektet har varit värdefullt och de har på många sätt kompletterat varandra med olika typer av kompetenser som rullningslager, additiver, oljor, provutrustning och mätmetoder. De deltagande företagen har varit:

- SKF
- York Refrigeration
- The Trane Company
- CPI Engineering Services
- AKA Industriprodukter Kyla AB

### 4 Resultat

Moderna skruvkompressorer har flera högt belastade smorda kontakter som, rullningslager, kuggar och rotor. Denna typ av kontakter benämns elastohydrodynamiska smorda kontakter på grund av den elastiska deformationen som uppkommer av ytorna. Den förväntade livslängden hos lagret bestäms i stort av den smörjande filmens tjocklek i kontakten (se Formel 1) och Hamrock and Dawson [1]. Vid allt för tunna smörjfilmer eller ett förorenat smörjmedel som passerar genom rullkontakten uppstår höga spänningar i materialet med resulterande utmattningsskador som följd i materialets ytskikt. Upprepade överrullningar leder till urflisning med lagerhaveri som följd. Två avgörande parametrar för smörjmedlets förmåga att separera ytorna är viskositeten, ( $\eta_0$ ), och tryck- viskositetskoefficienten, ( $\alpha$ ). Båda dessa parametrar reduceras med ökad inlösning av kylmedium i oljan.

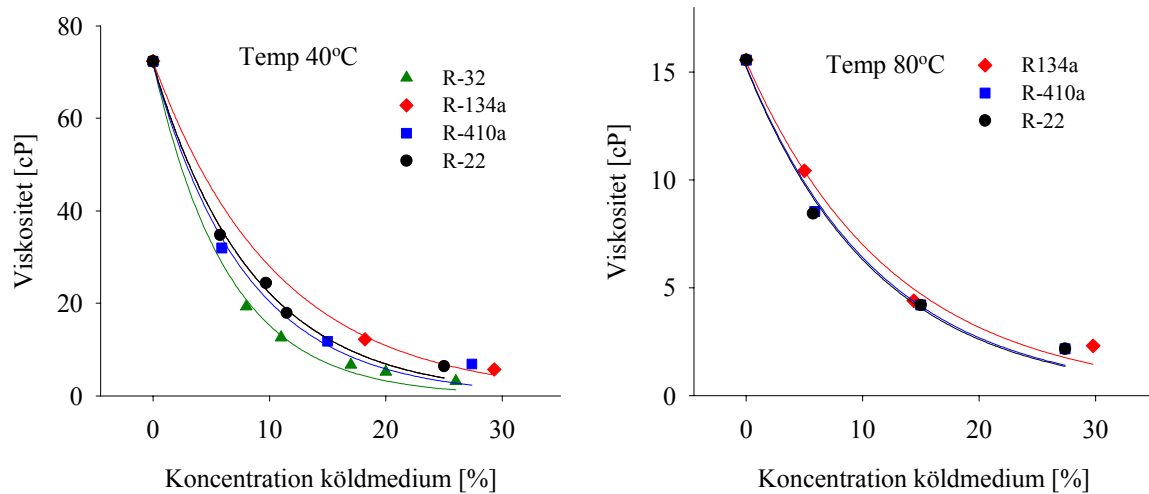
$$h_{\min} = R_x \cdot 3,63 \left( \frac{U \cdot \eta_0}{E' \cdot R_x} \right)^{0,68} \cdot (\alpha \cdot E')^{0,49} \cdot \left( \frac{w_z}{E' \cdot R_x} \right)^{-0,073} \cdot (1 - e^{-0,68 \cdot k})$$

*Formel 1 beskriver de parametrar som är inkluderade för att erhålla en smörjfilmstjockleken för att separera ytorna.*

I Formel 1 beskrivs hur smörjfilmens minimitjocklek, ( $h_{\min}$ ), beräknas, utifrån geometrin, ( $R_x$ ), hastighetsparametern, ( $U$ ), viskositeten, ( $\eta_0$ ), tryckviskositetskoefficienten, ( $\alpha$ ), lasten, ( $w_z$ ) och materialparametern, ( $E'$ ). En närmare studie av Formel 1 visar att det är hastigheten, viskositeten och tryckviskositetskoefficienten som gör den största påverkan på smörjfilmens tjocklek, medan lasten endast har en ringa påverkan.

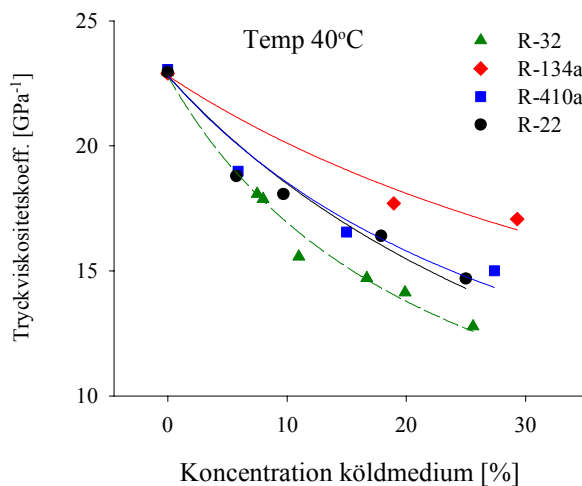
## 4.1 Viskositet och Tryckviskositetskoefficient

För att mäta viskositeten och tryckviskositetskoefficienten användes en modifierad Höppler viskosimeter, beskriven i Jonsson och Lilje [2]. Viskosimetern gör det möjligt att mäta viskositeten vid tryck upp till 34 MPa och hålla temperaturen vid konstant nivå. En VG68 polyesterolja användes och testades med olika köldmedier, R-22, R-134a, R-410a och R-32 vid 40 och 80°C (se Figur 1).



Figur 1 visar viskositetens beroende av koncentration inlöst köldmedium i oljan.

Ur Figur 1 kan köldmediekoncentrationens inverkan på blandningens viskositeten vid 40°C resp. 80°C avläsas. Diagrammen visar en kraftig reducering av viskositet redan vid låga koncentrationer.



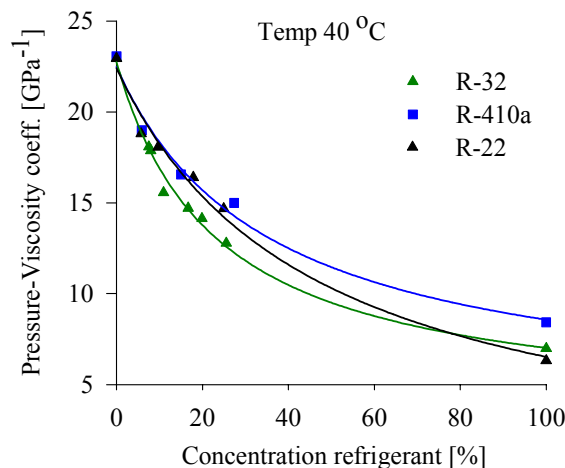
Figur 2 visar tryckviskositetens beroende av koncentration inlöst köldmedium i oljan.

I diagrammen ovan presenteras resultaten av tryckviskositetsmätningarna som symboler. Akei och Mizuhara [3,4] har visat att Eyrings ekvation, (se Ekv. 1) kan användas för att göra en kurvanpassning av punkterna. Dessa mätningar visar på en kraftig reduktion av tryckviskositetskoefficienten med ökande koncentration.

$$\alpha_{\text{mix}} = \frac{m \cdot s_{\text{refr}} (\alpha_{\text{refr}} - \alpha_{\text{lubr}})}{s_{\text{refr}} (m-1) + 1} + \alpha_{\text{lubr}} \quad \text{Ekv. 1}$$

- $\alpha_{\text{mix}}$  Blandningens tryckviskositetskoefficient
- $s_{\text{refr}}$  Koncentration köldmedium i blandningen
- $\alpha_{\text{refr}}$  Köldmediets tryckviskositetskoefficient
- $\alpha_{\text{lubr}}$  Oljans tryckviskositetskoefficient
- $m$  Kvoten mellan oljans och köldmediets molekylmassor

Viskositetsmätningarna är tidsödande men det har visat sig att Eyrings ekvationen även kan användas för att göra en approximation av viskositeten och tryckviskositeten för en olje-köldmedieblandning baserad på förhållandet mellan molekylmassorna av kylmediet och oljan. Det finns även möjlighet att prediktera kurvan för koncentrationer som är kritiska att mäta. I diagrammet (se Figur 3), nedan visas en prediktering av tryckviskositetskoefficienterna upp till 100% köldmedium.



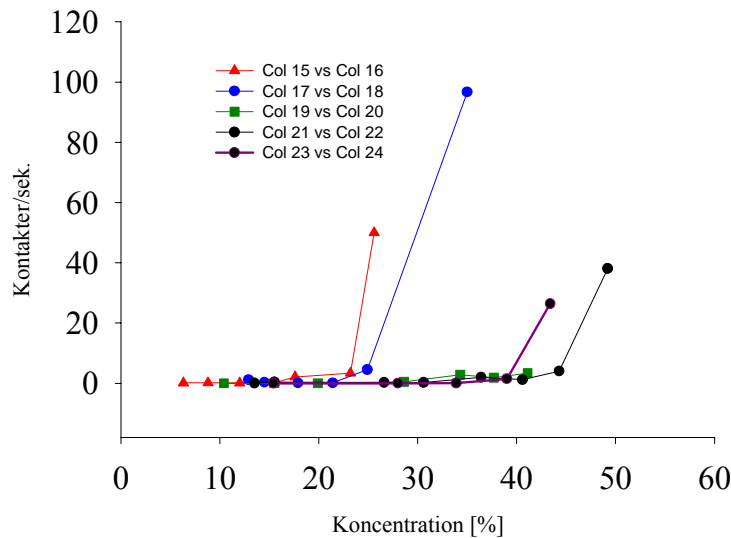
Figur 3 visar predikterade tryckviskositetskoefficienten

## 4.2 Smörjfilmens uppbyggnad

I en lagertestrigg har experiment genomförts med olika koncentration av köldmedium i oljan, där både koncentrationen, rotationshastighet och lasten har varierats. Lagertestriggen är utrustad med en kapacitansmätare som med hjälp av kapacitans mäter filmtjockleken mellan kulan och inner- resp. ytter- ringen i lagret. En bättre beskrivning ges av Storcken [5] i mätinstrumentets handbok. Resultaten av experimenten visar att lasten har en avgörande inverkan när genomslag ska inträffa. Nedan visas ett diagram som beskriver vid vilken köldmedie koncentration genomslag kan noteras för ett specifikt lastförhållande och rotationshastighet mm., (se Figur 4) Det enda som varierats mellan mätpunkterna i diagrammet är koncentrationen inlöst köldmedium i oljan.



## Brytpunkt



Figur 4 indikerar när smörjfilmen tappat sin förmåga att separera ytorna i lagret vilket leder till metall-/metall-kontakt.

Experimenten avslöjar upp till vilken köldmediekoncentration som lagret kan köras vid utan att skador uppträder. Vetskap om den kritiska koncentrationen vid en given last är mycket användbara för en konstruktör. Vid låga laster kan koncentrationen kylvätska tillåtas bli uppemot 45% innan det blir kritiskt. De senaste resultaten kommer att publiceras i början av 2001.

## 5 Energi och Miljöpåverkan

Ett övergripande syfte med projektet har varit att medverka till att kylkompressorer som helhet skall ge så liten påverkan som möjligt på miljön. Genom ökade kunskaper om alternativa och mer miljövänliga köldmedier så kan dessa komma att användas i större utsträckning i kylmaskiner. Användandet av rullningslager i stället för glidlager reducerar friktionsförlusterna och därmed energiförbrukningen.

Idag används vid lagerval för en skruvkompressor lagertillverkarnas dimensioneringskriterier se SKF application handbook [6]. Dessa bygger på att viskositeten av blandningen i systemet justeras med hjälp av tryckviskositetskoefficienten, men även en säkerhetsfaktor. Detta resulterar i att det valda lagret i många fall blir onödigt stora, till följd att effektförlusterna och kostnaden för lagren blir höga.

I förlängningen kommer resultaten från projektet att ge konstruktören möjlighet att optimera lagret i kompressorn för de specifika driftfallet. Detta minimera lagerkostnaderna och ökar verkningsgraden i kompressorn, då tillåtna koncentrationer och laster för god smörjfunktion är kända.

## 6 Examina

Roger Tuomas ska avlägga licentiatexamen under mars månad 2001.

## 7 Publicering

De artiklar och konferensbidrag som kommit fram under projekttiden visas nedan:

- [“Influence of refrigerant on viscosity and pressure-viscosity coefficient of refrigeration compressor lubricant”, 99](#)
- [“Influence on molecular structure on the lubrication properties of four different esters”, 2000](#)

Resultat under utarbetande:

- “Influence of refrigerant on the lubricating film in ball bearings”, 2000.
- “Detection of film breakdown in Elastohydrodynamic lubricated bearings used in Refrigerant Environment”, 2001.

Dessa artiklar och konferensbidrag kommer att ingå i Roger Tuomas licentiatexamen.

## 8 Internationell samverkan

De direkta internationella aktiviteterna inom projektet har huvudsakligen utgjorts av bidrag till internationella konferenser samt att utländska företag varit aktiva i projektet. Eftersom projektet är en del av avdelningens forskning inom området tribologi har indirekt samverkan med andra forskningsställen skett via andra pågående projekt. Omvärldsbevakningen har huvudsakligen skett via aktiv bevakning av vetenskaplig publicering och deltagande i för området viktiga internationella konferenser. Förutom de vetenskapliga artiklarna samt licentiatavhandlingen kommer även en populärvetenskaplig artikel av resultaten att ske under 2001.

## 9 Diskussion och Slutsatser

Projektet har genom sitt upplägg med regelbundna projektmöten med deltagande företag åstadkommit en nära samverkan mellan industri och högskola. Kunskapsöverföringen från projektet till företagen har fungerat över förväntan. Den mer långsiktiga kompetensuppbyggnaden inom avdelningen säkerställs via den vetenskapliga publiceringen av artiklar och uppsatser och de experimentella faciliteter som projektet resulterat i.

Då många av de problemställningarna vi söker svar på är direkta problem för kylkompressortillverkare och oljebolagen har projektet en mycket starkt koppling till industrins behov. Det aktiva samarbetet med deltagande företagen har också inneburit att näringslivets problemställningar varit i fokus.

Projektet uppfyller förväntningarna på följande punkter:

- En djupare förståelse för hur rullningslager fungerar i kylkompressorer har erhållits via de experimentella resultaten.
- Vidare är artikelproduktionen (några under utarbetande) och att Roger Tuomas i mars avser avlägga licentiatexamen helt i linje med vad som förväntades av projektet.

Projektet nådd inte riktigt fram vad avser bredden, då oljecirkulationssystem ej hunnit behandlas inom ramen för projektet. I gengäld har framtagning av lämpliga verktygen för lagerdimensionering prioriterats och fått mer utrymme i projektet.

## 10 Referenser

---

- 1 Hamrock, B. J., and Dawson, D. (1977a): “Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of point contacts, Part III-Fully Flooded Results. *Lubr. Technol.*, vol. 99, no. 2, pp 264-276.
- 2 Jonsson, U. and Lilje, K. “Elastohydrodynamic Lubrication Properties of Polyol Ester Lubricants-R-134a Mixtures”, Presented at the International Compressor Engineering Conference at Perdue (1998).
- 3 Akei, M. and Mizuhara, K., Taki, T., and Yamamoto, T., “Evaluation of film-forming capability of refrigeration lubricants in pressurized refrigerant atmosphere”, *Wear* 196, pp180-187 (1996)
- 4 Akei, M., Mizuhara, K., “The Elastohydrodynamic properties of Lubricants in Refrigerant Environments”. ASME/STLE Tribology conference in San Francisco Oct 13-17, (1996)
- 5 Storken, J “Lubcheck Mk3 used manual”, SKF Engineering and Research Center B.V, Nieuwegein, The Netherlands, (1997).
- 6 “Bearings in Twin Screw Compressors - Application Handbook”, SKF, King of Prussia, USA, To be published July 98