



Resurseffektiva kyl- och värmepumpssystem

Ammoniak som köldmedium i små kyl- och värmepumpssystem

Björn Palm

Juni 2014

Förord

Denna rapport redovisar arbete utfört inom Energimyndighetens program Effsys+, delprojekt EP-19 *Ammoniak som köldmedium i små kyl- och värmepumpsystem*. Projektet har utförts vid Kungl. Tekniska Högskolan, Inst Energiteknik, Avd Tillämpad termodynamik och kylteknik, under ledning av professor Björn Palm som också är huvudförfattare till denna rapport.

Flera personer har varit involverade i projektet. I första hand är det Behzad Monfared, doktorand vid institutionen, Wietse Offringa, gästforskare samt Peter Hill, Benny Sjöberg och Karl-Åke Lundin, alla anställda vid institutionens laboratorium.

Författaren vill till alla dessa, samt till företag och personer utanför KTH som deltagit i projektet, framföra sitt erkännande och varma tack.

Stockholm

Juni 2014

Björn Palm

Sammanfattning

Ammoniak har använts som köldmedium alltsedan kylteknikens allra första tid. I många avseenden är det ett utmärkt köldmedium: Det ger rimliga trycknivåer, höga värmeövergångstal och låga tryckfall. Vid större tryckförhållanden blir hetgastemperaturen betydligt högre än för andra vanliga köldmedier. Detta brukar betraktas som en nackdel, men i värmepumpar kan den höga hetgastemperaturen användas för att producera tappvarmvatten vid temperaturer högre än kondenseringstemperaturen. Detta öppnar för högre värmefaktorer i bergvärmepumpar, speciellt vid installation i lågtemperatursystem där andra värmepumpar behöver köras på hög kondensering för tappvarmvattenproduktionen.

I detta projekt har en vatten-vatten ammoniakvärmepump enligt beskrivningen ovan testats och vidareutvecklats från en tidigare befintlig prototyp. Värmepumpen hade varvtalsreglering och vid tester gjordes noggranna mätningar av förlusterna, i invertern, i elmotorn och i kompressorn. Det senare möjliggjordes genom installation av en momentmätare på axeln mellan motor och kompressor. Resultaten visar att inverter och elmotor gav höga verkningsgrader vid alla varvtal, men högst vid höga varvtal. Däremot sjönk kompressorns verkningsgrad, definierad som kvoten mellan effekt tillförd köldmediet och effekt tillförd kompressoraxeln, väsentligt vid låga varvtal.

Ett problem med tidigare värmepumpsprototyp har varit att den prototyp-förångare som användes gav för höga tryckfall på vattensidan. I projektet har möjligheterna att ersätta denna med en plattvärmeväxlare testats. Prestanda för värmepumpen var vid kortvarig drift ungefär samma, men vid drift under flera timmar sjönk prestanda med plattvärmeväxlaren. Detta visades bero på att olja samlades i förångaren.

I ett annat delförsök har koppar, stål och aluminiumkutsar förvarats tillsammans i förslutna glasrör i mycket torr ammoniak under hela projektet. Inga spår av korrosion kunde iakttas på någon av kutsarna efter denna tid. Detta visar att mycket torr ammoniak (i testen en renhet av 99,9999%) skulle kunna användas i hermetiska system av kopparrör.

Slutligen har värmeöverföring och tryckfall vid kokning av ammoniak i smala rör testats. Testerna visar att värmeöverföringen i de flesta fall (undantaget höga ånghalter i det smalare av de två använda rören) kan predikteras med hyfsad noggrannhet med Coopers kärkokningskorrelation. Tryckfallet kunde inte korreleras med någon korrelation från litteraturen, men genom att anpassa en korrelation föreslagen av Tran så kunde god överensstämmelse uppnås.

Summary

Ammonia has been used as a refrigerant since the first years of refrigeration technology. In many respects it is an excellent refrigerant: It gives reasonable pressure levels, high heat transfer coefficients and low pressure drops. For large pressure ratios the hot gas temperature will be considerably higher than for other common refrigerants. This is usually seen as a drawback, but in heat pumps the high hot gas temperature can be used for producing domestic hot water at temperatures higher than the condensing temperatures. This opens up for high coefficients of performance in ground source heat pumps especially in installations in low temperature heating systems where other heat pumps would need to be run at high condensing temperatures to produce domestic hot water.

In this project a water-water ammonia heat pump according to the description above has been tested and further developed from an earlier existing prototype. The heat pump had variable speed control and during the tests accurate measurements of the losses, in the inverter, in the electric motor and in the compressor, were performed. Compressor losses could be measured thanks to a momentum measuring system installed on the shaft in between the motor and the compressor. The results show that the inverter and the motor had high efficiencies, with the highest efficiencies at high speeds. On the other hand, the compressor efficiency, defined as the ratio between the power delivered to the refrigerant and the power delivered to the compressor shaft, decreased considerably at low speed.

A problem with the previous heat pump prototype was that the prototype-evaporator which was used gave too high pressure drops on the water side. In the project, the possibility of exchanging this for a welded plate heat exchanger has been investigated. The performance of the heat pump was, during short tests, approximately the same, but during several hours of testing there was a gradual decrease in the performance with the plate heat exchanger. This was shown to be caused by oil accumulating in the evaporator.

In another type of test performed within the project small pieces of copper, steel and aluminium were kept immersed in very dry ammonia in sealed glass tubes for the duration of the project. No traces of corrosion could be seen on the pieces after this time. This shows that very dry ammonia (in the test the purity was 99,9999%) could be used in hermetic systems designed from copper tubes.

Finally, heat transfer and pressure drop of ammonia during boiling inside narrow channels has been investigated. The tests show that the heat transfer in most cases (the exception being at high vapor content in the more narrow of the two tested tubes)

can be predicted reasonably well by Cooper's pool boiling correlation. The pressure drop could not be correlated with any correlation from the literature, but by adjusting a correlation suggested by Tran, good agreement with the measured data could be reached.

Innehåll

Bakgrund.....	5
Projekt deltagare	6
Mål	7
Genomförande	7
Måluppfyllelse	17
Lärdomar.....	18
Förslag på fortsatt arbete	18
Referenser	20
Projektets vetenskapliga publikationer	21
Projektets populärvetenskapliga publikationer och presentationer.....	21
Bilagor:.....	22

Bakgrund

CFC och HCFC har idag av miljöskäl ersatts av HFC som köldmedium i små och medelstora kyl- och värmepumpsystem. I den nyligen klubbade F-gasförordningen införs begränsningar av HFC-användningen inom EU av samma skäl. Flera EU-projekt med syfte att utveckla tekniken för naturliga köldmedier pågår eller har avslutats de senaste tio åren. Detta pekar på vikten som läggs vid denna utveckling inom EU. Dessa EU-projekt och andra liknande har resulterat i goda kunskaper om framförallt kolväten som köldmedium. Användningen av koldioxid som köldmedium ökar redan starkt för vissa applikationer, framförallt butikskyla och (på vissa marknader) varmvattenberedning. Ammoniak i små system har också varit föremål för studier, men här har tekniken ännu inte kommit lika långt, på grund av brist på lämpliga komponenter och därför att systemlösningar, bl.a. återföring av kompressorolja, är mer svårlöst i detta fall.

Inst Energiteknik vid KTH deltog tidigare i EU-projektet SHERHPA och var inom detta ansvarig för utvecklingen av en prototyp till en liten värmepump med ammoniak som

köldmedium. Arbetet ledde till att en fungerande första prototyp utvecklades. Efter EU-projektets slut fortsatte arbetet och ytterligare ett par prototyper byggdes och testats. Resultat har, innan detta projekt startades, redovisats vid några vetenskapliga konferenser och i några vetenskapliga tidskriftsartiklar, bl.a. i International Journal of Refrigeration, samt i IEA Heat Pump Newsletter.

De prototyper som byggdes före projektet använde plattvärmeväxlare som hetgasvärmeväxlare och kondensor. Som förångare användes en minikanalsvärmeväxlare utvecklad i ett tidigare projekt om propanvärmepumpar. Minikanalsförångaren i kombination med en speciell olja löslig i ammoniak har möjliggjort god oljeåterföring till kompressorn utan ytterligare arrangemang för oljeåterföringen. Valet av värmeväxlare har också bidragit till att mängden köldmedium kan hållas mycket lågt. De olika prototyperna har krävt mellan 100 och 200 g köldmedium.

För utvecklingen av små system med ammoniak är minimering av köldmediemängden och därmed utveckling av kompakta värmeväxlare av yttersta vikt. Dessa ämnen har studerats i projekt stödda av energimyndigheten och i en arbetsgrupp inom IIR där avdelningen aktivt deltar. Betydande kunskaper inom detta område fanns alltså redan vid institutionen innan projektet påbörjades.

Minimering av köldmediemängden förutsätter värmeväxlare med små innervolymer, men bibehållen värmeöverföringsyta. Detta kan bara uppnås med värmeväxlare med smala spalter eller små kanaler. Av detta skäl är det för projektet väsentligt att kunna förutsäga värmeövergång och tryckfall i sådana kanaler.

Projekt deltagare

Förutom KTH har följande företag/partners deltagit i projektet:

Företaget NH3 solutions har, som namnet antyder, specialiserat sig på att bygga mindre kylsystem med ammoniak. Dock har deras minsta system hittills varit för stora för att passa som villavärmepump. Det förväntade kunskapsutbytet med företaget har tyvärr varit mycket begränsat.

Företaget Ammonia Partnership drevs av Anders Lindborg, en världskänd auktoritet vad gäller ammoniaksystem. Anders dog tyvärr efter en tids sjukdom under projektiden och hans deltagande är därmed begränsat till första delen av projektet.

Företaget Frigopol Sverige säljer en typ av semihermetiska kompressorer som kan användas för ammoniak. De har också stor erfarenhet att bygga mindre ammoniaksystem baserade på dessa kompressorer.

Företaget Schick har lång erfarenhet av tillverkning av ammoniak med mycket hög renhet, använd bland annat som köldmedium. De har även medverkat i projekt i Tyskland rörande ammoniak och ammoniak/kolhydratblandningar. Deras medverkan är begränsat till att bidra med hög-ren ammoniak för projektet.

Professor Trygve Eikevik från NTNU i Trondheim har arbetat på en villavärmepump med ammoniak som köldmedium. Erfarenhetsutbyte mellan projekten har skett kontinuerligt och bidragit till kunskapsuppbyggnaden vid båda universiteten.

Mål

Målet för projektet finns uttryckt i ansökan enligt följande:

Målet för projektet är att presentera en fungerande andra generationens prototyp till en villavärmepump med ammoniak som köldmedium. Denna prototyp ska klara uppvärmning och försörjning av tappvarmvatten för ett enfamiljshus med värmefaktorer 10% över vad som normalt uppnås med HFC-medier. Konstruktionen ska vara sådan att gällande säkerhetsföreskrifter uppfylls med god marginal. Detta innebär bl.a. att fyllnadsmängden ska vara mycket låg. För att detta ska uppnås krävs speciellt att värmeväxlare med liten inre volym används.

Genomförande

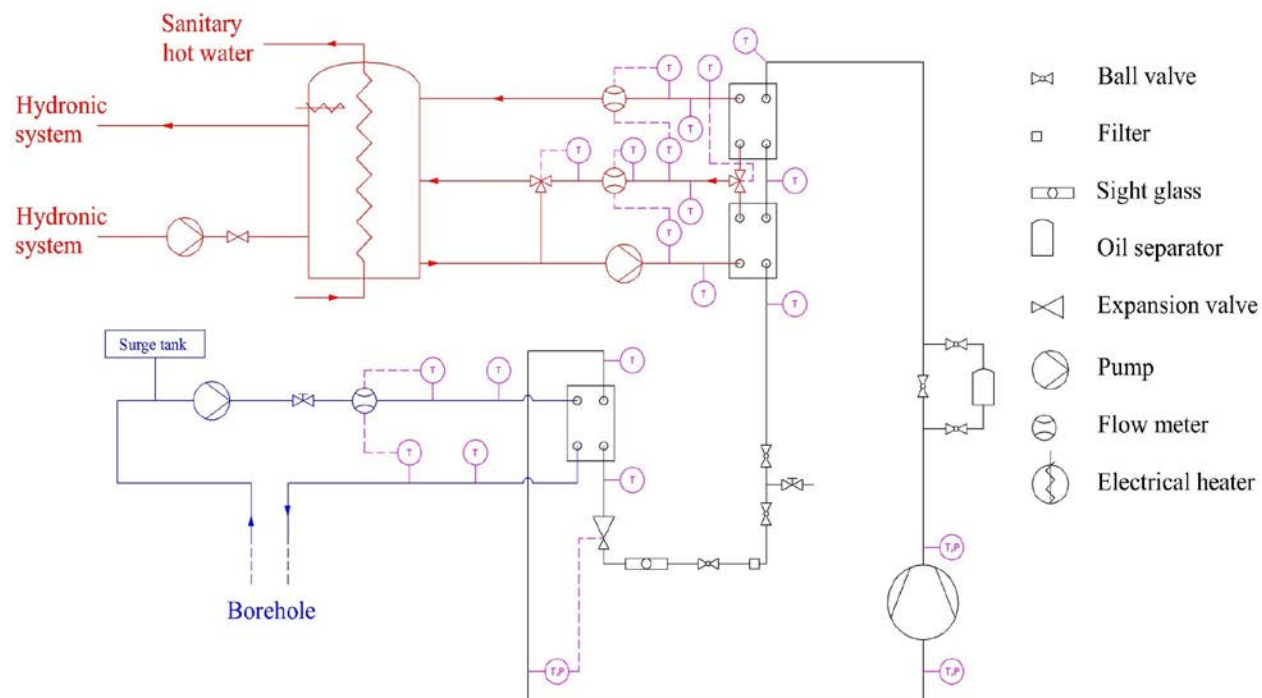
Projektet har varit utsträckt i tiden från 1 mars 2012 till 30 juni 2014. Samtidigt har projektets totala budget för aktiviteter på KTH varit lågt, bara 312 kkr. Detta har inneburit att projektet bedrivits huvudsakligen i form av kortare intensiva kampanjer utspridda under projektiden.

Vid projektets start förutsattes att värmepumpen vid projektets början skulle kunna placeras ut för fältmätningar. På grund av problem med förångaren, bestående i alltför höga tryckfall på vattensidan, beslutades att ytterligare tester av prototypen skulle göras på KTH. Dessa tester har varit av två slag: prestandatester av prototypen med befintlig minikanalsvärmeväxlare och tester av en alternativ lösning för förångaren, bestående av att använda en helsvetsad plattvärmeväxlare i stället för minikanalsvärmeväxlaren. Förutom dessa aktiviteter som utförts direkt på prototypen så har två typer av tester genomförts: Långtidstest av korrosion med mycket torr ammoniak tillsammans med provbitar av koppar, stål och aluminium, samt tester av värmeövergång och tryckfall med ammoniak i smala kanaler med dimensioner liknande de i mikrokanalsvärmeväxlaren. Nedan kommer resultaten av de olika aktiviteterna att redovisas i korthet. För mer utförliga redovisningar hänvisas till publicerade artiklar och till den interna rapport som skrivits om delar av testerna.

Beskrivning av värmepumpen

För att möjliggöra för läsaren att följa resultatredovisningen nedan är det nödvändigt att först kort förklara värmepumpens funktion. Värmepumpen är uppbyggd enligt principskissen i Figur 1. Från kompressorn går köldmediet via en bortkopplingsbar oljeavskiljare till en hetgasvärmeväxlare och därifrån vidare till kondensorn. Båda dessa värmeväxlare är helsvetsade plattvärmeväxlare från Alfa Laval (AlfaNova 27-10H och

Alfanova 52-20H). Köldmediet fortsätter via avstängnings- och påfyllningsventiler till ett specialutformat synglas som också fungerar som receiver, bestående av ett nästan horisontellt glasrör, se Figur 2.



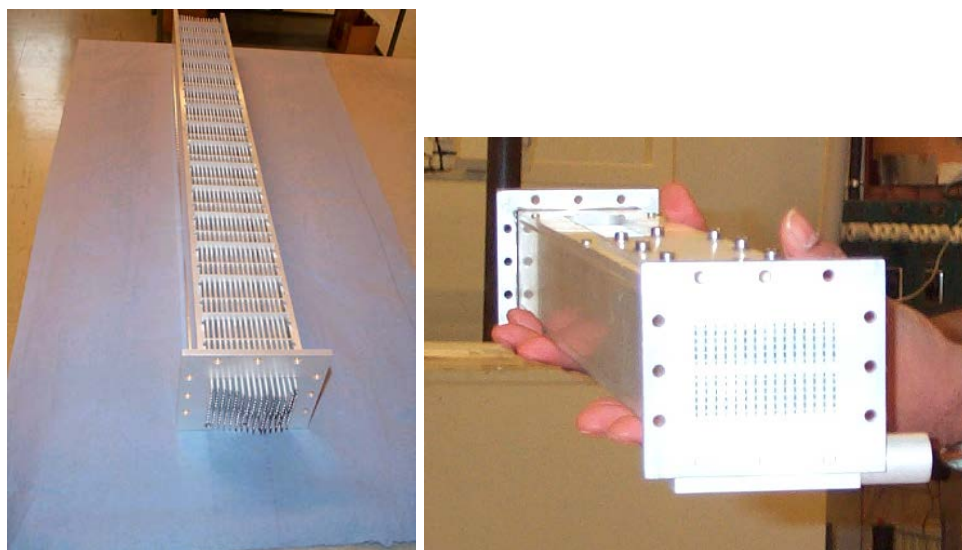
Figur 1: Principskiss över värmepumpen



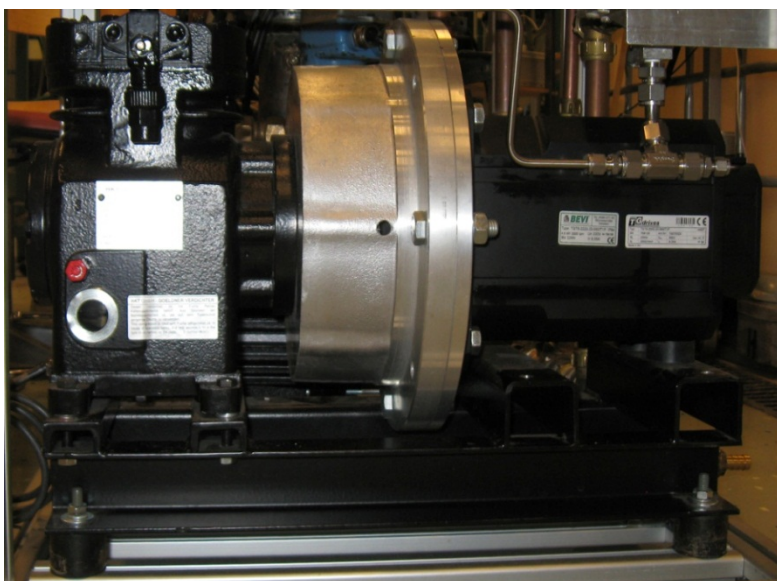
Figur 2: Kombinerat synglas och receiver

Därefter passerar köldmediet den elektroniska expansionsventilen (Carel E2V), vars drivenhet kan programmeras för att användas med ammoniak. Som nämnts har två olika förångare använts under projektet: Dels en plattvärmväxlare av samma typ som kondensorn, dvs AlfaNova 52-20H, dels en minikanalsvärmväxlare uppbyggd som en tubpanna med platta, mångkanals aluminiumrör från Hydro, se Figur 3. Slutligen återkommer köldmediet till kompressorn, som är en öppen kompressor från HKT Goeldner O12 3 DK100. Denna drivs av en permanentmagnetmotor från TG Drives TGT6-2200-20-560/T1P, som i sin tur är kopplad till en inverter, OMRON V1000 45P5. Hela drivpaketet finns avbildat i Figur 4.

Värmepumpen är avsedd att hämta värme från ett borrhål och som framgår av Figur 1 så innehåller borrhålskretsen, förutom pump, även en flödesmätare. På den varma sidan avses värmepumpen kopplas till en ackumulatortank som även fungerar som varmvattenberedare. Vatten tas från tankens botten och leds genom kondensorn. Därefter finns en trevägsventil som gör det möjligt att styra hur mycket vatten som ska tillåtas passera genom hetgasvärmväxlaren. På så sätt kan temperaturen på det utgående vattnet ges en betydligt högre temperatur än kondenseringstemperaturen. Speciellt med ammoniak, som ger högre hetgastemperaturer än HFC eller HC-medier kan detta utnyttjas till en fördel då hett varmvatten (60C) kan genereras utan att driva upp kondenseringstemperaturen till detta värde. Mer om värmepumpens konstruktion återfinns i de publikationer som omnämns i publikationslistan, t.ex. (Palm, 2008).



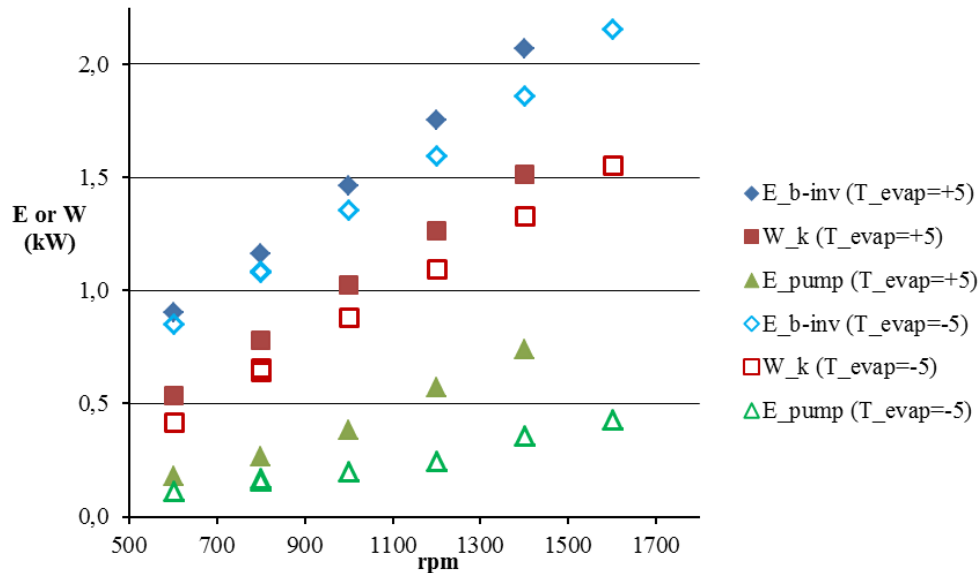
Figur 3: Förångarprototyp av aluminium



Figur 4: Kompressor med elmotor och momentmätare

Test av prestanda

Värmepumpen testades i labbet under olika driftförhållanden. Inför testerna var den försedd med mätutrustning som möjliggjorde mätning av temperaturer, flöden och energimängder på både varma och kalla sidan, samt mätning av eleffekt före och efter invertern, liksom mekanisk effekt ut från elmotorn. Det senare mättes med en momentgivare. Därigenom var det möjligt att spåra förlusterna i varje steg från tillförd eleffekt till kompressoraxel och köldmedium. Detta är en typ av mätningar som är rätt unika och som inte kan göras för hermetiska kompressorer. De möjliggör alltså bestämning av förlusterna i inverter, motor och kompressor var för sig.



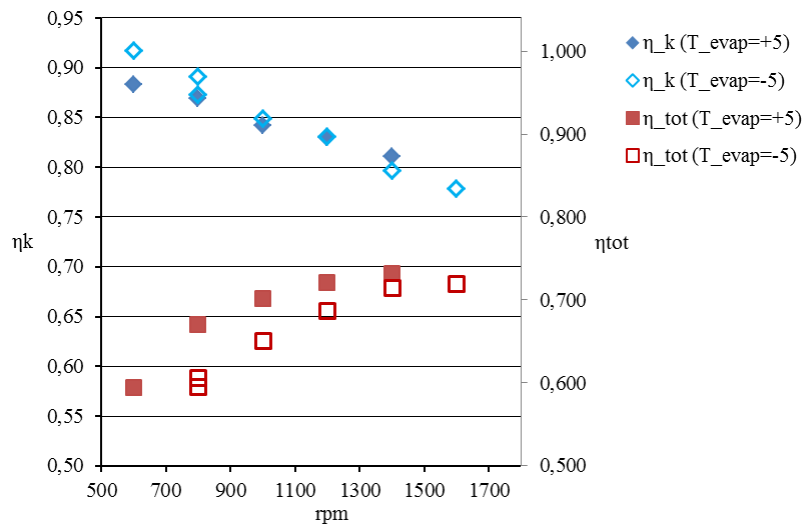
Figur 5: Elförbrukning och kompressionsarbete som funktion av kompressorns varvtal

Figur 5 visar elförbrukningen uppmätt in till invertern, kompressorarbetet och pumparbetet som funktion av varvtalet vid två olika förångningstemperaturer, +5 och -5°C. Pumpens varvtal har anpassats så att temperaturändringen på brinen är 3K vid alla driftförhållanden.

Testerna visar att ungefär 15% av värmeeffekten kan tas ut som 60°C varmt vatten om kondenseringstemperaturen hålls vid 40°C och förångningstemperaturen +5°C. Andelen blir omkring 20% vid förångningstemperaturen -5°C (och samma kondenseringstemperatur). I det senare fallet var hetgastemperaturen nästan 135°C vid högsta varvtal. I detta läge går kompressorn under förhållanden som ligger nära vad som tillåts av kompressortillverkaren. Med inkommande kallvattentemperatur mellan 5 och 15°C blir nödvändig temperaturhöjning mellan 55 och 45°C. Temperaturhöjningen från den antagna kondenseringstemperaturen (40°C) till 60°C utgör alltså omkring 40% av höjningen vilket innebär att för ren varmvattenproduktion kommer kondenseringen att behöva ligga en bit över 40°C.

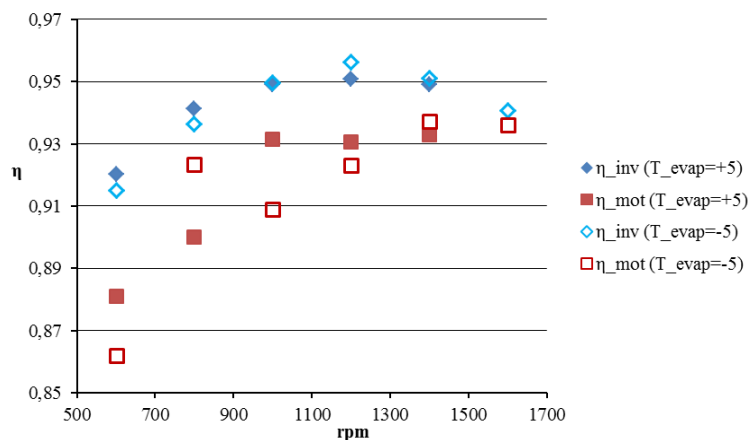
Figur 6 visar isentropverkningsgrad och totalverkningsgrad, (produkten av inverterverkningsgrad, motorverkningsgrad och kompressorverkningsgrad där det senare är kvoten mellan effekt tillförd köldmediet (=massflöde * entalpidifferens) och axeleffekt), som funktion av kompressorvarvtal vid två olika förångningstemperaturer

och 40C kondenseringstemperatur. Som framgår är den uppmätta isentropverkningsgraden mycket hög, speciellt vid låga varvtal. Totalverkningsgraden sjunker däremot kraftigt vid låga varvtal. Resultaten kan jämföras med tidigare resultat från litteraturen som oftast visat att varvtalsstyrning av kompressorer inte ger några tydliga vinster i form av ökad värmefaktor trots att temperaturdifferenserna i värmeväxlarna bör bli lägre, vilket potentiellt borde ge högre värmefaktor.



Figur 6: Isentropverkningsgrad för kompressorn, samt totalverkningsgrad för kompressor, motor och inverter som funktion av varvtal vid två olika förångningstemperaturer och 40C kondenseringstemperatur.

Verkningsgraderna för inverter och elmotor finns vidare uppdelade i Figur 7. Figuren visar att inverterverkningsgraden har ett maximum vid ca 1200 rpm, medan motorverkningsgraden sjunker kontinuerligt med sjunkande varvtal. I absoluta tal är värdena dock relativt höga, mellan 86 och 96%.



Figur 7: Verkningsgrader för inverter och elmotor

$$COP_{1k} = \frac{Q_1}{W_k}$$

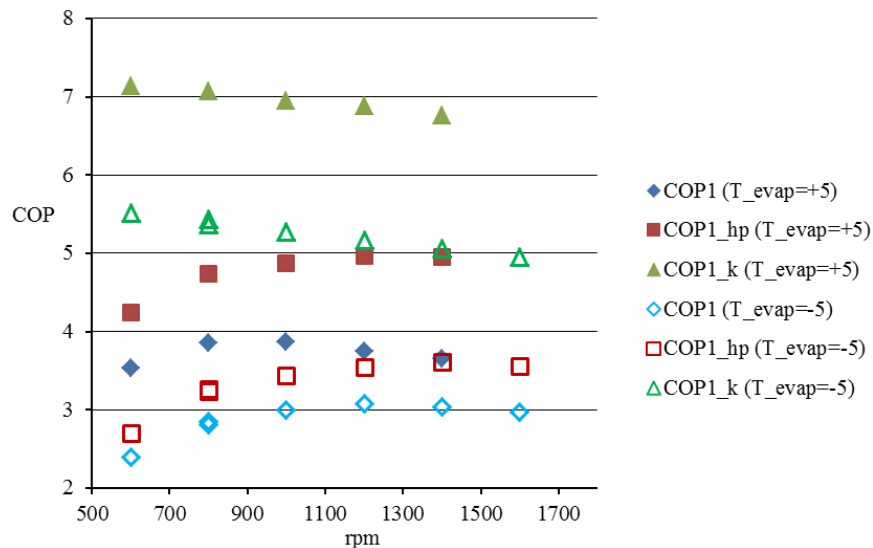
$$COP_{1,hp} = \frac{Q_1}{E_{b-inv}}$$

$$COP_1 = \frac{Q_1}{(E_{b-inv} + E_{pump})}$$

$$\eta_{tot} = \frac{W_k}{E_{b-inv}}$$

En slutsats av testerna är att motor och inverter ger höga verkningsgrader, men högst vid höga varvtal. Att totalverkningsgraden ändå inte blir så hög vid låga varvtal kan bara förklaras av att kompressorverkningsgraden blir väsentligt lägre under dessa förhållanden. Möjligen kan detta förklaras av att värmeavgivningen från kompressorn (i absoluta tal) är relativt konstant oberoende av varvtal och att därför de relativa förlusterna blir betydligt högre vid låga varvtal.

Testerna visar också att brinepumpen kräver relativt stor effekt, vilket påverkar värmefaktorn väsentligt. Detta resultat var en bidragande orsak till att göra ytterligare tester med plattvärmeväxlare som förångare, eftersom testerna antydde att tryckfallet på vattensidan i förångaren var alltför stort.



Figur 8: Värmefaktorer som funktion av varvtal vid två förångningstemperaturer och 40C

Värmefaktorer, beräknade på olika sätt, finns redovisade i Figur 8. COP1 är värmefaktorn baserat på summan av el till inverter och el till brinepumpen, i COP1hp är pumpen inte inräknad och COP1k är kvoten mellan avgiven värme och arbete tillfört köldmediet. Det är tydligt att brinepumpens effektbehov påverkar resultatet väsentligt. Med denna pump, och tryckfallet i denna förångare, är värmefaktorerna inte anmärkningsvärt höga. Det bör dock poängteras att testerna gjorts under förhållanden där varmvatten vid 60C produceras kontinuerligt (15 -20% av avgiven effekt). Värdena bör därför jämföras med andra värmepumpar med kondenseringstemperaturer över

60C och då är resultaten även med den använda brinepumpen och förångaren bra. Som jämförelse kan nämnas att en av de ledande svenska värmepumptillverkarna anger värmefaktorn 2,4 vid varmvattenberedning.

Säkerhet

Systemet kunde köras utan problem med endast 200 g ammoniak. I detta fall var underkylningen ett par grader och det kombinerade synglas/receivern var fullt. En fyllnadsmängd av 150g skulle gett en mer lämplig nivå i receivern. 200g motsvarar ca 12 mol, vilket vid normalt lufttryck upptar ca 270 liter. För att uppnå en brännbar blandning måste koncentrationen av ammoniak i luft vara ca 15%. Det innebär att om hela fyllningen släpps ut i ett utrymme så litet som två m³ så kan brännbar blandning inte uppkomma. Eftersom tänkbara placeringsutrymmen är flera gånger större så bör i praktiken en fyllning av 200 g inte innebära någon fara för brand.

Ammoniak i luften innebär en omedelbar fara för livet (IDLH) vid koncentrationer över 500 ppm, dvs 0,05%. Sådana koncentrationer kan uppstå omedelbart intill ett läckage eller i ett slutet utrymme med volymen mindre än 60 m³ (eller ca 25 m² med normal takhöjd) om 200 g ammoniak plötsligt släpps ut. Det är uppenbart att värmepumpen bör placeras i ett särskilt utrymme (maskinrum/pannrum) med möjlighet till ventilation till omgivningen. En enkel lösning för att ytterligare öka säkerheten är att ventileras värmepumpens hölje via en enkel scrubber i händelse av läckage. Någon sådan lösning har dock inte testats. Placering i ett särskilt rum med icke låsbar dörr bör vara en tillräckligt säker lösning.

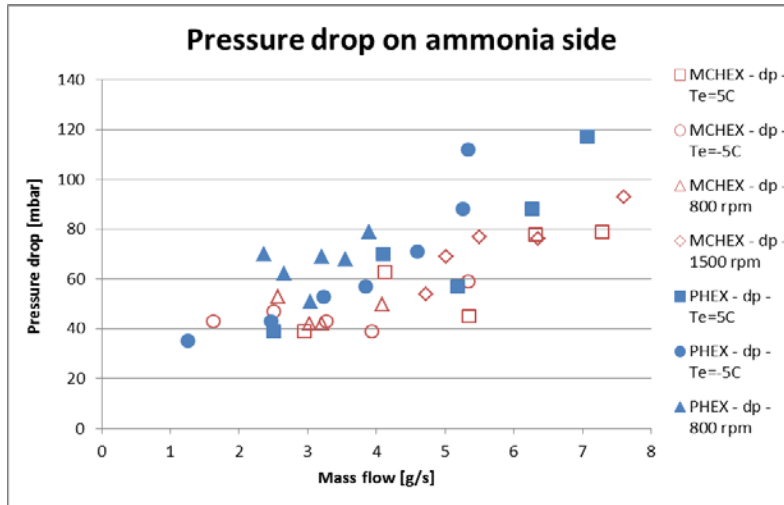
Test med annan värmeväxlare

Värmepumpen testades i ytterligare en serie tester, där två olika värmeväxlare användes som förångare. I det första fallet användes prototypvärmeväxlaren som beskrivits ovan och i det andra en helsvetsad plattvärmeväxlare. Värmeväxlarnas ytor var ungefär lika.

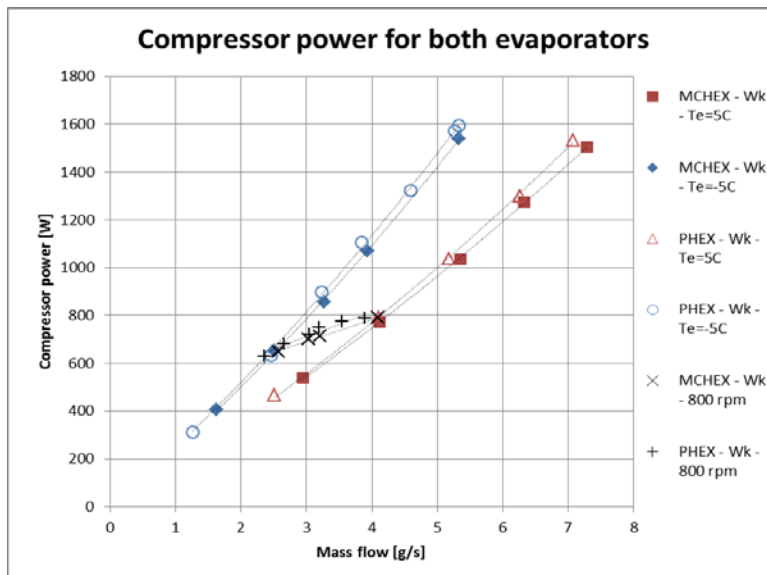
Flera olika tester gjordes, alla sammanfattade i en intern rapport (Offringa 2013). Ett försök gjordes att bedöma tryckfallet på köldmediesidan utifrån skillnader i uppmätt mättnadstemperatur före och efter förångaren. Sådana mätningar är vanskliga att göra och kan bara ge en indikation. Resultaten redovisas i Figur 9. Som framgår finns en antydning att tryckfallet är lägre i minikanalsvärmeväxlaren (MCHEX, Microchannel Heat Exchanger) än i plattvärmeväxlaren (PHEX), men skillnaden är inte stor.

På liknande sätt visas kompressoreffekten som funktion av massflöde i Figur 10, och resultaten antyder en något högre kompressoreffekt med plattvärmeväxlare än med mikrokanalsvärmeväxlare vid givet massflöde, dvs vid ungefär samma värmeeffekt.

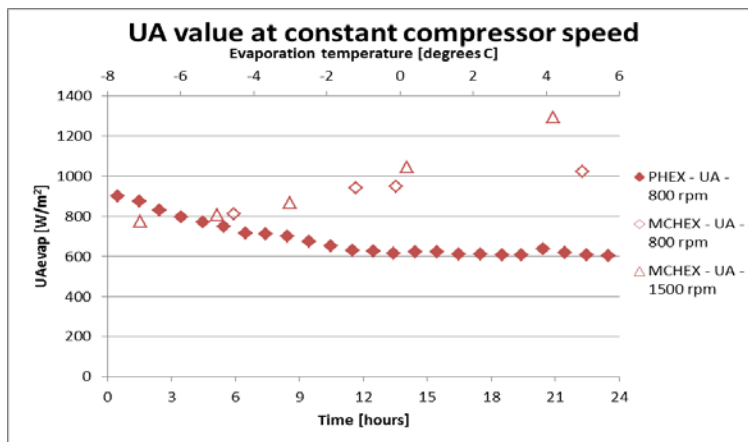
En ytterligare viktig slutsats om värmeväxlarna kunde dras genom längre tester med konstanta driftsförhållanden under 24 timmar. Dessa tester visade att plattvärmeväxlarens prestanda försämrades i tid (se Figur 11). Mikrokanalsvärmeväxlarens prestanda försämrades däremot inte utan förbättrades.



Figur 9: Tryckfall på köldmediesidan uppskattade från ändring i mättnadstemperatur.



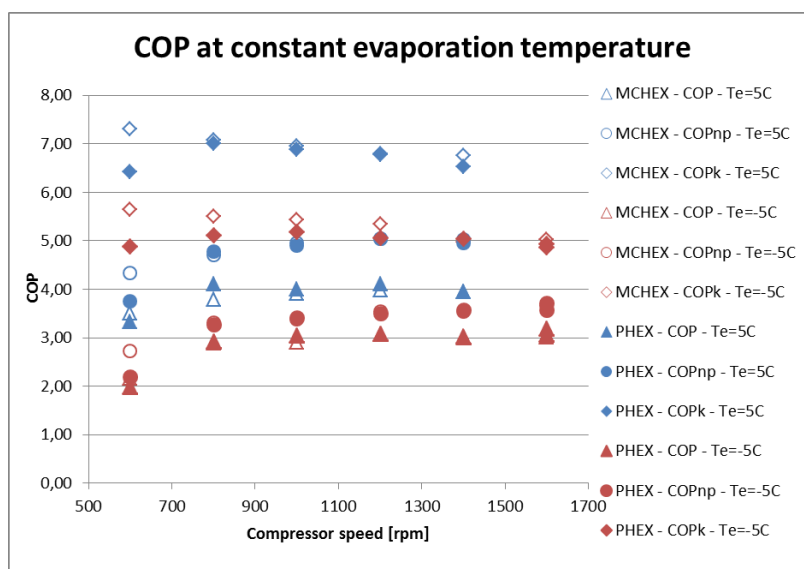
Figur 10: Kompressoreffekt som funktion av massflöde för de två olika förångarna.



Figur 11: UA-värde för värmeväxlarna under lång tid (24 timmar)

Orsaken till försämringen för plattvärmeväxlaren visade sig vara att olja ansamlats i denna och påverkade därmed värmeövergången negativt. Orsaken till förbättringen för minikanalsvärmeväxlaren tros vara densamma: Bättre oljeåterföring har under dessa tester tvättat systemet på olja och ger därmed bättre värmeövergång.

Slutsatsen är att plattvärmeväxlare av den testade typen inte passar för ammoniak med direktexpansion. Det bör tilläggas att en speciell PAG-olja (Fuchs Reniso GL68) som skall vara blandbar med ammoniak användes i alla försök. Trots detta kan alltså oljeåterföringen vara ett problem och lösningen på detta är att använda värmeväxlare med smala kanaler där skjuvkraften invid väggarna blir hög.



Figur 12: Värmefaktor med två olika förångare som funktion av varvtal vid 40C kondenseringstemperatur.

I Figur 12 visas värmefaktorer som funktion av kompressorhastighet för tester med de två värmeväxlarna vid två olika förångningstemperaturer och kondenseringstemperaturen 40C. Tre olika definitioner av värmefaktor har använts: COP utan index är kvoten mellan avgiven värmeeffekt och tillförd eleffekt i inverter och pump. COPnp är samma kvot, men utan pumpeffekt. COPk är kvoten mellan avgiven värmeeffekt och effekt tillförd köldmediet. Först kan konstateras att värdena är mycket lika för de två värmeväxlarna. Värdena utan brinepumpen, COPnp, är betydligt högre än då pumpen är inräknad, COP (utan index).

Värmeöverföring i smala kanaler

Studier av värmeöverföring med ammoniak i kanaler med hydrauliska diametrar liknande de som användes i mikrokanslvärmeväxlaren gjordes som ett stöd för beräkningen av värmeövergång och tryckfall i denna. Försöken gjordes i enskilda cirkulära rostfria rör, 1,7mm resp 1,244 mm i diameter invändigt, uppvärmda genom att elektricitet leddes direkt genom rören. Genom att mäta ytemperaturen på flera ställen kunde värmeövergångstalets förändring längs röret bestämmas.

Resultaten finns redovisade i två publikationer (Maqbool et al. 2012a och Maqbool 2012b) vars sammanfattningar finns i bilagorna. Sammanfattningsvis kan konstateras att i det större röret var värmeövergångstalet kraftigt beroende av yteffekten och knappt alls beroende av massflödet. I det smalare röret fanns ett omslag: Vid de lägre ånghalterna fanns samma trend som i det grövre röret, medan vid högre ånghalter värmeövergångstalet var i stort sett oberoende av yteffekten, men i stället beroende av massflöde och ånghalt. För de flesta mätpunkterna, undantaget höga ånghalter i det smala röret, kunde värmeövergångstalet bestämmas med hyfsad noggrannhet med Coopers kärkokningskorrelation.

Tryckfallsmätningarna finns redovisade i den andra av de två artiklarna (se abstract i bilagan). Resultaten jämfördes med flera kända korrelationer från litteraturen. Ingen av dessa gav god överensstämmelse med mätdata. I stället föreslogs en ny korrelation baserad på Trans tidigare föreslagna korrelation.

Studie av korrosion av ammoniak på koppar

I ett tidigare examensarbete erhöles resultat som antydde att mycket torr ammoniak inte har korroderande inverkan på koppar. Dessa tester var dock begränsade i tid och för att kunna ge ett mer definitivt besked i frågan har långtidstester genomförts under hela projektiden. För att testa korrosionsbenägenheten användes provrör i glas, i vilka placerades korta testbitar av tre metaller: Koppar, stål och aluminium. Därefter tillfördes torr ammoniak och rören förslöts. Rören har sedan förvarats först vid förhöjd temperatur (50C) i fyra månader och därefter vid rumstemperatur. Som framgår av bilderna i Figur 13 finns inga antydningar till korrosion av kopparkutsen (eller de andra metallbitarna). Inte heller finns någon antydning till oxidbeläggning av glaset vid vätskemenisken. Slutsatsen av detta är att vattenfri ammoniak inte korroderar koppar på ett märkbart sätt. Vid försöken användes en extremt torr ammoniak med beteckningen 6.0 från företaget Schick. Innehållet framgår av tabellen nedan.



Figur 13: Sealed tube test med bitar av koppar, stål och aluminium i ammoniak.

Specifikationer för den torra Ammoniak 6.0 som användes,

Ammoniak	min. 99,999999 g/100g
Vatten	max. 0,2 ppm
Syre	max. 0,1 ppm
Kväve	max. 0,5 ppm
Kolmonoxid	max. 0,1 ppm
Koldioxid	max. 0,2 ppm
Lätta kolväten, C1 - C4	max. 0,1 ppm
Järn	max. 0,1 ppm

Resultaten visar alltså att det är möjligt att använda koppar tillsammans med ammoniak om ammoniaken är fullständigt torr. Testen visar dock inte hur låga koncentrationerna behöver vara för att säkerställa att korrosion inte sker. I mindre, hermetiskt tillslutna system kan det vara möjligt att åstadkomma torra förhållanden liknande de i testen, men kostnaden för detta skulle behöva undersökas ytterligare. Det bör påpekas att fyllnadsmängden i detta fall var 200g, vilket är en mycket liten mängd varför ett relativt högt kilopris skulle kunna vara acceptabelt.

Måluppfyllelse

Målen för projektet har redovisats ovan. Det kan konstateras att den befintliga prototypen klarar uppvärmning och försörjning av tappvarmvatten för ett enfamiljshus. Värmefaktorn kan inte direkt jämföras med andra värmepumpars eftersom tappvarmvatten kan produceras vid 60C med betydligt lägre kondenseringstemperatur, vilket är en unik egenskap. Mätningarna visar att värmepumpen har högre värmefaktor än en av marknadens bästa bergvärmepumpar när denna producerar tappvarmvatten. För rena uppvärmningsuppgifter är det tveksamt om värmepumpen i nuvarande utformning ger 10% högre värmefaktor än marknadsledarna. Värmefaktorn skulle dock kunna höjas något genom användning av en effektivare pump. Ett kvarstående problem är också utformningen av förångarens vattensida, som ju gav för högt tryckfall med mikrokanalsvärmväxlaren och därmed påverkade värmefaktorn negativt.

Vad gäller säkerheten kan konstateras att de små mängder ammoniak som behövs i det testade systemet inte kan ge upphov till brännbara blandningar vid normal placering. Om enheten placeras i ett dedicerat maskinrum med icke låsbar dörr bör detta tillfredsställa kraven på säkerhet.

Prototypen var tänkt att placeras i fält för långtidstest. Detta har inte genomförts bl.a. på grund av tveksamheter vad gäller förångarens utformning. En insats är planerad under sommaren 2014 för att lösa dessa problem och kunna starta fälttesten under hösten 2014.

Ett icke uttalat mål med projektet har varit att sprida intresset för små ammoniaksystem. Detta mål har uppnåtts med råge. Intresset för projektet är stort även utanför Sveriges gränser. Författaren har blivit inbjuden att redogöra för projektet vid norska kölemötet och vid danska kyltekniska föreningens årsmöte samt inbjudits att vara del av den vetenskapliga kommittén i IIRs vartannat år återkommande konferens om ammoniak. Examensarbetet som Behzad Monfared genomförde har också belönats med ett internationellt pris från organisationen EURAMMON (Monfared 2011).

Lärdomar

De viktigaste lärdomarna från projektet kan sammanfattas i följande punkter:

- Det går att utforma en villavärmepump med ammoniak för direktexpansion med en fyllnadsmängd av 150 – 200g, men det saknas kommersiellt tillgängliga värmeväxlare som passar att användas som förångare eftersom oljeåterföringen är ett problem med vanliga plattvärmeväxlare.
- Med dessa små fyllnadsmängder bör kraven på säkerhet kunna anses uppfyllda vid installation i ett avdelat maskinrum.
- Mätningarna av förluster i hela kedjan inverter – elmotor - kompressor – köldmedium antyder att verkningsgraderna för inverter och elmotor är höga även vid låga varvtal (även om de är högst vid höga varvtal). Kompressorverkningsgraden definierad som kvoten mellan effekt tillfört köldmediet och effekt till kompressoraxeln tycks däremot sjunka väsentligt vid låga varvtal.
- Mycket torr ammoniak korroderar inte koppar, stål eller aluminium, inte ens om dessa finns tillsammans i systemet.

Förslag på fortsatt arbete

Som redan nämnts är oljeåterföringen i förångare med ammoniak ett problem, dels på grund av att ammoniak inte är lösligt i normala oljor, men också för att molekylvikten är låg och friktionsmotståndet lågt. Detta är vanligen positivt, men bidrar till att en oljerik film på förångarens väggar inte lätt dras med av köldmedieflödet. Flödes hastigheterna skulle därmed behöva vara högre för att säkerställa oljeåterföringen. Ett kvarstående arbete är alltså att identifiera, eller utveckla en lämplig förångare med liten innervolym, goda värmeöverföringsegenskaper som säkrar oljeåterföringen utan att ge för höga tryckfall på köldmediesidan eller vattensidan.

En ytterligare kvarstående uppgift är att genomföra långtidstester i fält med värmepumpen för att undersöka hur lösningen med varmvattenproduktion baserad på hetgasvärmväxling fungerar och vilken årsvärmefaktor värmepumpen kan få.

Kunskapen att torr ammoniak inte korroderar koppar inbjuder till att undersöka om hermetiska system, med hermetiska kompressorer, kan fås att fungera med god tillförlitlighet. Detta kräver även utbyte av polymerer, packningsmaterial, elektriska isoleringar etc. i dagens hermetiska kompressorer.

Referenser

Palm, B., 2005, *Ammonia in Small Capacity Heat Pump and Refrigeration Systems*, Proc. IIR Conf. Ammonia Refrigeration Systems, Renewal and Improvements, Ohrid, Macedonia, May 2005.

Palm, B. 2007, *Ammonia in Small Capacity Refrigeration and Heat Pump Systems*, Proceedings of IIR Conference: Ammonia Refrigeration Technology for Today and Tomorrow, Ohrid, Macedonia, April 2007.

Palm, B. 2008, *Ammonia in low capacity refrigeration and heat pump systems*, Int. J. Refrigeration, Volume 31, Issue 4, June 2008, Pages 709-715, doi:10.1016/j.ijrefrig.2007.12.006

Palm, B., 2009, *Ammonia as refrigerant in small-capacity systems*, IEA Heat Pump Centre Newsletter, v. 26, no. 4.

Palm, B., 2009, *Summarizing a Decade of Experience on Charge Reduction for Small Hydrocarbon, Ammonia and HFC Systems*, RCR 2009, Proc. 1st IIR Workshop on Refrigerant Charge Reduction in Refrigerating Systems

Monfared, B. A., 2010, *Design and Construction of a Small Ammonia Heat Pump*, M. Sc. Thesis, KTH, School of Industrial Engineering and Management (ITM), Department of Energy Technology, Division of Applied Thermodynamics and Refrigeration, <http://kth.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:483090>

Monfared, B. A. and Palm, B. 2011, *Design and Test of a Small Ammonia Heat Pump*, Proc. 10th IEA Heat Pump Conference, 16 - 19 May 2011, Tokyo, Japan

Monfared, B. A. and Palm, B. 2011, *Design and Test of a Small Ammonia Heat Pump*, 4th IIR Ammonia Refrigeration Conference, Ohrid, 2011

Maqbool M.H., Palm B., Khodabandeh R., 2011, Boiling Heat Transfer of Ammonia in Vertical Smooth Minichannels: Experimental Results and Predictions, International Journal of Thermal Sciences.

Published Online (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.09.012>).

Maqbool M.H., Palm B., Khodabandeh R., Ali R., 2010, *Two Phase Pressure Drop of Ammonia in a Mini/Micro Channel*, In the proceedings of, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nano channels, Micro channels, and Minichannels, FEDSM2010-ICNMM2010, August 2-4, Montreal, Canada.

Maqbool M.H., Palm B., Khodabandeh R., Ali R., 2010, *Two Phase Heat Transfer of Ammonia in a Mini/Micro Channel*, In the proceedings of, ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on

Nano channels, Micro channels, and Minichannels, FEDSM2010-ICNMM2010, August 2-4, Montreal, Canada.

Projektets vetenskapliga publikationer

Palm, B. and B. Abolhassani Monfared, 2012, *Small Ammonia Heat Pump with Variable Speed Compressor*, paper no. 255, 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Delft, The Netherlands,

Maqbool, M.H., B. Palm, R. Khodabandeh, 2012a, *Boiling heat transfer of ammonia in vertical smooth mini channels: Experimental results and predictions*, International Journal of Thermal Sciences, vol. 54, pp. 13 – 21.

Maqbool M.H., Palm B., Khodabandeh R., 2012b, *Flow Boiling of Ammonia in Vertical Small Diameter Tubes: TwoPhase Frictional Pressure Drop Results and Assessment of Prediction Methods*, International Journal of Thermal Sciences.
Published Online (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.11.018>).

Offringa, S. C., 2013, *A Small Scale Ammonia Heat Pump, Exchanging Evaporators*, Intern rapport, KTH, Inst Energiteknik, Avd Tillämpad termodynamik och kylteknik

Projektets populärvetenskapliga publikationer och presentationer

Palm, B. 2012, *How to reduce refrigerant charge – in heat pumps with natural refrigerants*, Presenterat vid Norska kyltekniska föreningens möte 2012

Palm, B. 2013, *Mini channel heat exchangers for heat pumps with natural refrigerants*, Presenterat vid Danska kyldagarna, 2013

Palm, B. 2012, *Ammoniak i små och stora kyl- och värmepumpsystem*. Presentation vid Effsys+-dagen i Göteborg, 19 oktober 2012

Monfared, B. M., 2011, *Design and Construction of a Small Ammonia Heat Pump*, Presentation made before receiving Eurammon award, Schaffhausen, October 2011

En populärvetenskaplig presentation kommer att erbjudas tidningen Kyla och Värmepumpar i forsknings-numret hösten 2014.

Bilagor:

Sammanfattningar från artiklar:

Palm, B. and B. Abolhassani Monfared, 2012, *Small Ammonia Heat Pump with Variable Speed Compressor*, paper no. 255, 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Delft, The Netherlands,

Paper No. 255

SMALL AMMONIA HEAT PUMP WITH VARIABLE SPEED COMPRESSOR

Behzad A Monfared^(a) and Björn Palm^(b)

^(a) Royal Institute of Technology, Department of Energy Technology
Stockholm, SE-10044, Sweden, behzadam@kth.se

^(b) Royal Institute of Technology, Department of Energy Technology
Stockholm, SE-10044, Sweden, bpalm@energy.kth.se

ABSTRACT

Ammonia is a natural refrigerant which has been used continuously for more than 100 years. From almost any technical perspective, it is an attractive refrigerant, having good cycle efficiency, good heat transfer properties and low pressure drop compared to most other refrigerants. The volumetric refrigerating effect is also higher than for other fluids of the same vapor pressure. Applications are nowadays restricted almost exclusively to large industrial or commercial systems.

We have previously demonstrated that ammonia is also a viable refrigerant for small systems (Palm 2008, Monfared and Palm 2011). In this paper we report on additional tests with a small capacity (7.2 kW) water to water heat pump for sanitary hot water production and space heating. Particularly, the losses in the compressor, electric motor and variable speed drive are investigated under full and part load conditions. New data for the general performance of the heat pump in terms of heat delivered at 60 °C for sanitary hot water production and at 40 °C for space heating, energy efficiency, etc. will also be reported.



Boiling heat transfer of ammonia in vertical smooth mini channels: Experimental results and predictions

M.H. Maqbool, B. Palm*, R. Khodabandeh

Applied Thermodynamics and Refrigeration, KTH, Stockholm, Sweden

ARTICLE INFO

Article history:

Received 8 March 2011

Received in revised form

15 September 2011

Accepted 22 September 2011

Available online 9 November 2011

Keywords:

Flow boiling

Ammonia

Heat transfer

Experimental study

ABSTRACT

In this article, flow boiling heat transfer results of ammonia in mini channels are reported. Experiments have been performed to investigate heat transfer in circular vertical mini channels made of stainless steel (AISI 316) with internal diameters of 1.70 mm and 1.224 mm and a uniformly heated length of 245 mm. The test conditions are: mass flux ranging from 100 to 500 kg/m²s, heat flux ranging from 15 to 355 kW/m² and saturation temperatures of 23 °C, 33 °C and 43 °C. The effects of mass flux, heat flux, vapour quality, saturation temperature and internal diameter on heat transfer coefficients are explored in detail. The local heat transfer coefficients of ammonia with 1.70 mm tube at all vapour qualities and at lower vapour qualities with 1.224 mm tube, are more or less independent of mass flux and vapour quality and are a function of heat flux while the local heat transfer coefficients with 1.224 mm tube at higher vapour qualities are function of mass flux and vapour quality and independent of heat flux. The heat transfer coefficient is observed to be higher for lower internal diameter tube. The heat transfer coefficient is higher for higher saturation temperature at lower vapour qualities and no effect of saturation temperature is observed at higher vapour qualities for both test sections. The experimental data is compared with well known correlations and among them, the Cooper's [1] correlation gave best predictions if all data points are included.



Flow boiling of ammonia in vertical small diameter tubes: Two phase frictional pressure drop results and assessment of prediction methods

M.H. Maqbool , B. Palm  · , R. Khodabandeh 

Choose an option to locate/access this article:

Check if you have access through your login credentials or your institution

[Check access](#)

 Purchase \$39.95

[Get Full Text Elsewhere](#)

[R Show more](#)

DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2011.11.018

[Get rights and content](#)

Abstract

Two phase pressure drops were measured for ammonia at a wide range of test conditions in two sizes of vertical mini channels. The test sections were made of stainless steel (AISI 316) tubes with internal diameter of 1.70 mm and 1.224 mm and a uniformly heated length of 245 mm. Experiments were conducted at three saturation temperatures of 23 °C, 33 °C and 43 °C, the heat flux ranging from 15 to 355 kW/m² and the mass flux ranging from 100 to 500 kg/m²s. The effect of the heat flux, the mass flux, the vapour quality, the saturation temperature and the internal diameter on the two phase pressure drop are presented in this article. Some generalized two phase pressure drop correlations suggested for macro and micro scale channels are examined by comparing them with our experimental data. None of the examined correlations agreed well with the test data. A new correlation (modified form of Tran et al. correlation) is proposed which is able to predict the experimental data with MAD of 16% and 86% of the data is within ±30% range.