

# VÄRMEÖVERGÅNG VID FÖRÅNGNING AV R22 I EN KOMPAKT LÖDD PLATTVÄRMEVÄXLARE

JOACHIM CLAESSION, BJÖRN PALM  
KUNGL TEKNISKA HÖGSKOLAN, Inst. för Energiteknik,  
Avd. för Tillämpad termodynamik och kylteknik  
100 44 Stockholm  
E-post: claesson@egi.kth.se, bpalm@egi.kth.se

## Sammanfattning

Mätningar har utförts på en kompakt lödd plattvärmeväxlare där den för förångningen i anspråk tagna värmeväxlararean har observerats och registrerats med hjälp av temperaturkänsliga flytande kristaller (TLC). Flertalet överhettningar har använts vid mätningarna, likaså ett flertal överförda effekter och vattenflöden. Ett par observationer baserat på utvärderade mätdata kan göras, bland annat att den använda kokarean är nästan oberoende av den totala överförda effekten men uppvisar ett starkt beroende av överhettningen och att kokvärmeövergångstalet på köldmediesidan är beroende (enbart) av yteffekten,  $q''$ , för kokdelen. Detta tyder på att kokregimen är av typen kärkokning.

## Introduktion

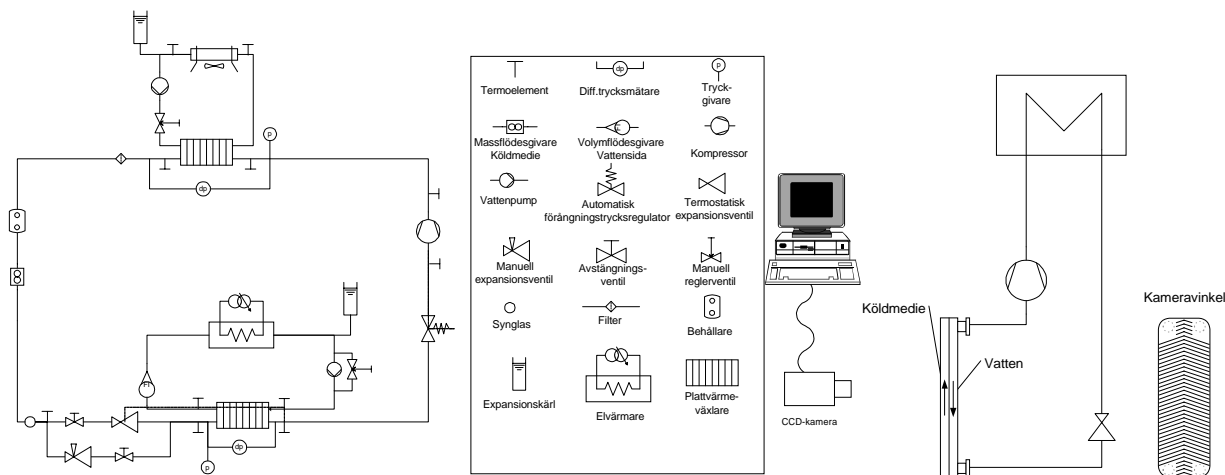
Plattvärmeväxlare har under en längre tid använts inom svensk industri. Ursprungligen utvecklades den bland annat för att erhålla en värmeväxlare som var enkel att rengöra, vilket efterfrågades hos livsmedelsindustrin. Efterhand utvecklades även metoder att löda ihop plattorna vilket ledde till högre tryck, som i sin tur innebar att plattvärmeväxlare kunde användas som förångare och kondensorer i kyl- och värmepumpsapplikationer. Tack vare deras utomordentliga prestanda och deras lilla inneslutna volym i förhållande till pris har inneburit att deras popularitet stadigt ökat.

För att de svenska aktörerna skall bibehålla sin ledande position är det av yttersta vikt att de har tillgång till tillförlitliga beräkningsmetoder. För enfasapplikationer finns det redan idag metoder som dels tagits fram av tillverkande företag och dels av universitet. För tvåfasapplikationer finns det dock mycket lite beskrivet i den öppna litteraturen.

Syftet med forskningsprojektet är dels att ta fram tillförlitliga beräkningsmetoder för värmeövergång och tryckfall vid förångning av köldmedier i små lödda plattvärmeväxlare och dels att få en förståelse för de mekanismer som ligger bakom dessa förlopp. Detta skall åstadkommas genom visualiseringsförsök och mätningar på en värmeväxlare med en köldmediekanal och omfattande mätningar på värmeväxlare med flera kanaler. Geometrins inverkan skall utredas, såsom korrugalvinkeln inverkan, inverkan av antal plattor osv.

## Mätupställning

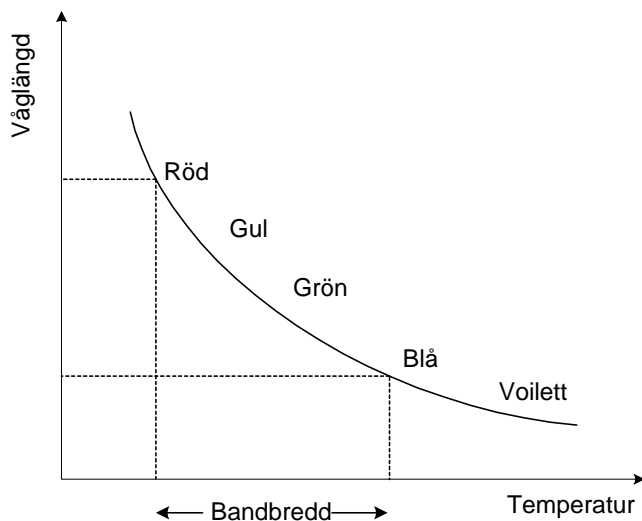
En enkel testanläggning har byggts bestående av enbart de mest nödvändiga komponenter, se Figur 1. Temperaturkänsliga flytande kristaller (TLC) har målats på den yttre plattan, som är synlig då plattvärmeväxlaren inte har någon skyddsplåt. Detta innebär att vi kan se plattans temperaturfält via färgåtergivningen hos TLC. I kanalen innanför flödar köldmediet, som förångas, och via temperaturfördelningen kan ett mått på hur stor del av värmeväxlaren som används för kokning och hur stor del som används för överhettning bestämmas. All mätdata sparas via HP-logger och HP-VEE till Excel, där all datareduktion har utförts.



Figur 1. Testanläggning

### Temperaturkänsliga Flytande Kristaller (TLC)

Som redan har nämnts används TLC för att registrera hur stor del av värmeväxlare som används till förångning respektive överhettning. TLC har den unika egenskapen att de reflektera en viss våglängd (färg), av det infallande vita ljuset, som en unik funktion av dess temperatur. Förloppet är reversibelt och kan användas för att mäta temperatur. Beroende på applikationen kan olika temperaturområden beställas. En typisk graf för förhållandet mellan temperatur och våglängd (färg) ses i Figur 2.



Figur 2. TLCs temperaturberoende (Hallcrest, 1991)

### Datareduktion

Från uppmätta data har systemets prestanda i allmänhet och förångarens prestanda i synnerhet beräknats. Termodynamiska data har beräknats i Excel via en egenutvecklade länk till NIST Standard Reference Database 23, Refprop ver. 6.01 (NIST, 1998). Vattnets termodynamiska data har beräknats via regressionsanalys inom det intressanta intervallet från den nya industristandarden, IAPWS-IF97 (Wagner & Kruse, 1998).

Vid beräkningarna har tryckfallet över värmeväxlaren försumrats. För området där förångning sker respektive där köldmediet överhettas kan värmeeffekten beräknas enligt ekv. (1).

$$\dot{Q}_i = \dot{m}_{R22} \cdot (h_{i,ut} - h_{i,in})_{R22} = \dot{m}_{H_2O} \cdot c_{p,H_2O} (t_{i,in} - t_{i,ut})_{H_2O} \quad (1)$$

Detta kan också uttryckas som en funktion av den logaritmiska medeltemperaturdifferensen över respektive del och dess värmegenomgångstal, U, se ekv. (2).

$$\dot{Q}_i = (U \cdot A \cdot \vartheta_m)_i \quad (2)$$

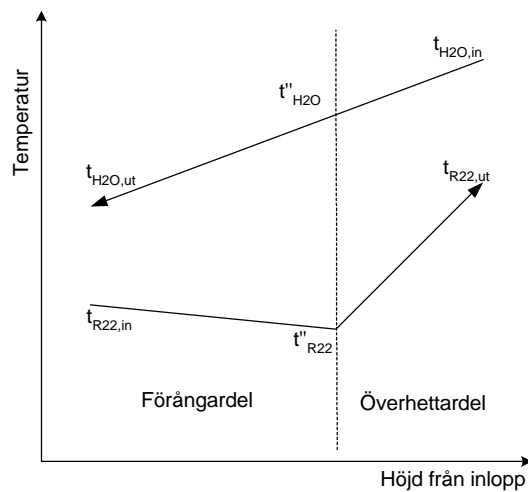
Den logaritmiska medeltemperaturdifferensen definieras

$$\vartheta_{m,i} = \left( \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\ln \frac{\vartheta_1}{\vartheta_2}} \right)_i \quad (3)$$

I den del av värmeväxlaren där förångning sker är  $\vartheta_1$  och  $\vartheta_2$  definierade enligt ekv. 4 och Figur 3

$$\begin{aligned} \vartheta_{1,kok} &= t_{H_2O,ut} - t_{R22,in} \\ \vartheta_{2,kok} &= t''_{H_2O} - t_{R22,in} \end{aligned} \quad (4)$$

där tryckfallet försumrats, enligt tidigare.



Figur 3. Principiell temperaturdistribution längs värmeväxlaren (Pelletier, 1998)

Från mätvärden och ekv. (1), (2), (3) och (4) kan värmegenomgångstalet, U, beräknas. Det består i sin tur av flera värmemotstånd och om eventuell försmutsning försummas kan detta skrivas som

$$\frac{1}{U_i} = \left\{ \frac{1}{\alpha_{R22}} + \left[ \frac{\delta}{\lambda} \right]_{platta} + \frac{1}{\alpha_{H_2O}} \right\}_i \quad (5)$$

Yteffekten beräknas enligt ekv. (6) där respektive effekt är känd enligt ekv. (1) och värmeöverförande arean beräknas från bilder med TLC.

$$q_i'' = \left[ \frac{\dot{Q}}{A} \right]_i \quad (6)$$

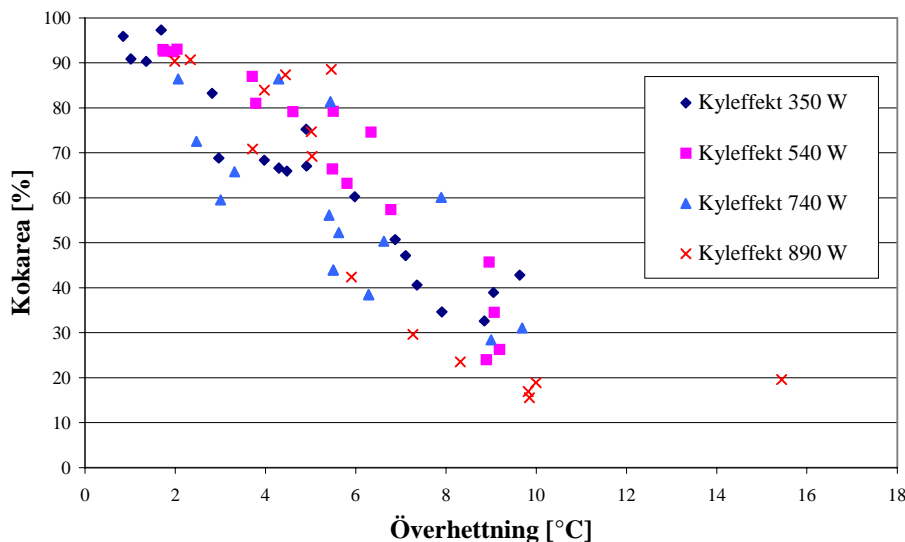
För att kunna beräkna värmeövergångstalet under förångning,  $\alpha_{\text{kok}}$ , på köldmediesidan måste motsvarande värmeövergångstal på vattensidan vara känt. Detta kan göras på flera sätt, bland annat genom att utföra en Wilson-plot analys, men här har leverantörens, SWEP International AB, korrelation använts. Denna har en noggrannhet bättre än 5% (Pelletier, 1999). I princip är detta en korrelation av den välkända Dittus-Boelter typen, se ekv. (7).

$$\alpha_{\text{H}_2\text{O}} = C \cdot \text{Re}^n \cdot \text{Pr}^{f_{\text{Pr}}(\text{Pr})} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_{\text{vägg}}} \right)^{f_{\mu}(\text{Re})} \cdot \frac{\lambda}{d_h} \quad (7)$$

För att beräkna värmeledningstal,  $\lambda$ , och viskositet,  $\mu$ , hos medierna har ett medelvärde använts för vätskesidan och värdet för mättad vätska på köldmediesidan. Vidare har ingen hänsyn tagits till viskositetsförhållande mellan medelströmmen och nära väggen.

## Resultat

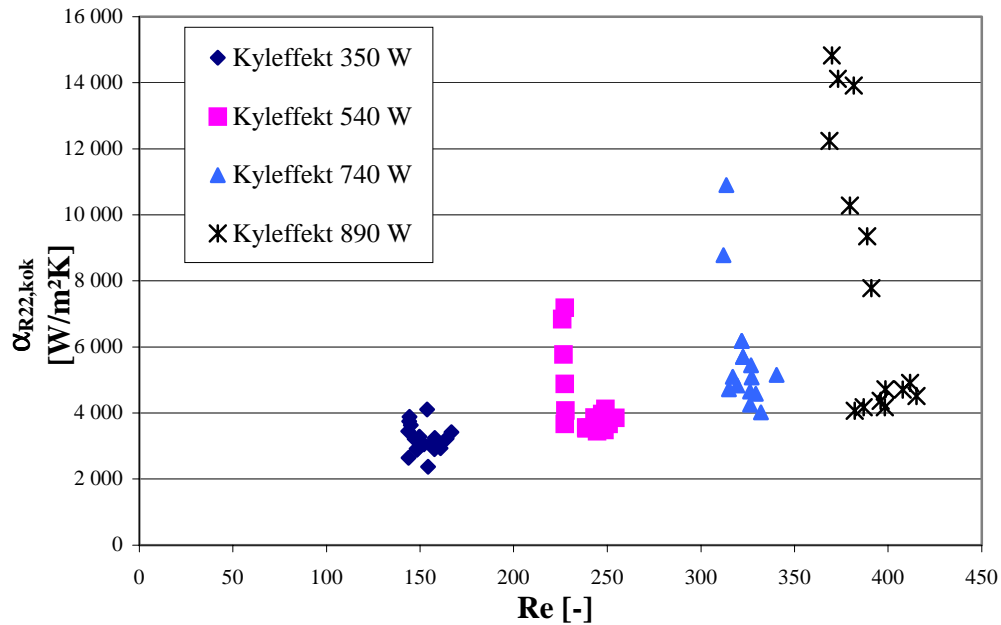
Ett antal överförda effekter och överhettningar har uppmätts, totalt cirka 64 mätpunkter. Genom att fotografera färgåtergivningen hos TLC för varje mätpunkt, ca 100 bilder per mätpunkt, och låta datorn räkna antal pixlar med en viss färg, motsvarande kokdelen, i förhållande till totalt antal pixlar på värmväxlarytan kan arean som används för kokning respektive överhettning bestämmas. I Figur 4 observeras att redan vid måttliga överhettningar används endast en mindre del av värmväxlaren till att förångare köldmediet och en stor del av värmväxlaren används till överhettning.



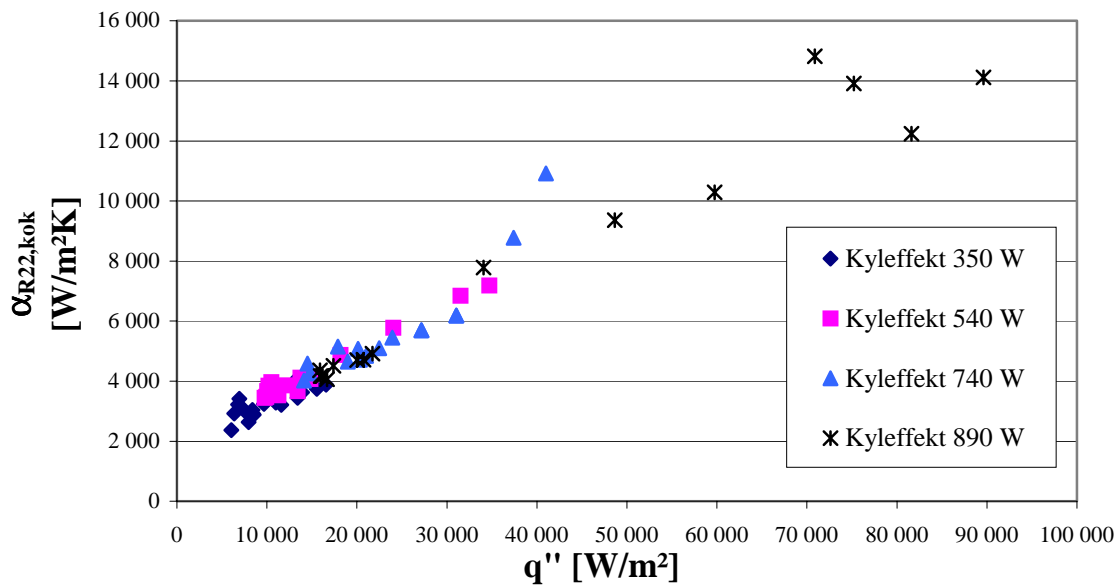
Figur 4. Använd värmväxlararea för kokning sfa Överhettning

Det kan även observeras att i stort sett är kokarean oberoende av den totala kyleffekten men klart beroende av överhettningen. Några generella slutsatser kan inte göras då spridningen för en given överhettning är relativt stor. Frågan uppstår dock om det verkligen är ekonomiskt riktigt att använda den relativt dyra arean hos en plattvärmväxlare till att överhetta gasen eller om en annan, billigare och enklare, geometri bör användas.

Vilket kokförlopp råder i värmeväxlaren? Om värmeövergångstalet på köldmediesidan vid kokning är en funktion av Reynoldstalet råder flödeskokning (Flow Boiling). Å andra sidan, om det visar sig att värmeövergångstalet är en funktion av yteffekten,  $q''$ , råder kärkokning (Collier & Thome, 1996). I Figur 5 och Figur 6 är värmeövergångstalet för kokdelen och köldmediesidan plottade, dels mot Reynoldstalet som baseras på om hela köldmedieflödet var mättad vätska, dels mot yteffekten för kokdelen.



Figur 5. Värmeövergångstal vid kokning på köldmediesidan sfa Reynoldstalet



Figur 6. Värmeövergångstal vid kokning på köldmediesidan sfa yteffekten för kokdelen

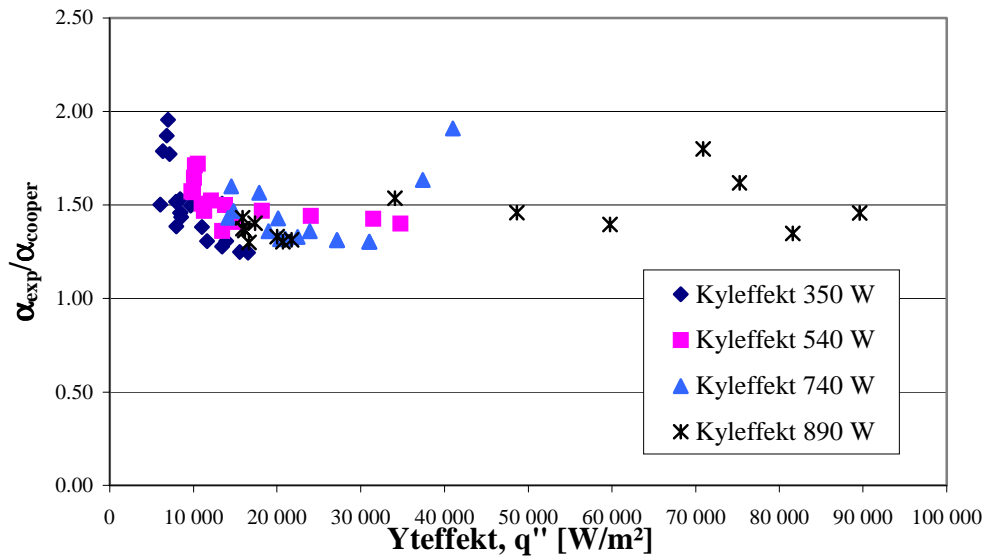
Spridningen bland mätpunkterna i Figur 5 är på grund av att ett flertal överhettningar har använts. Som synes verkar värmeövergångstalet inte korrelera mot Reynoldstalet, i alla fall endast ytterst marginellt. Däremot verkar det som yteffekten har ett starkt inflytande på värmeövergångstalet. Av

de båda diagrammen kan slutsatsen dras att kokförloppet är av typen kärkokning, där yteffekten är den styrande parametern.

Det finns ett flertal korrelationer för kärkokning och en av de vanligaste är föreslagen av Cooper (1984). Denna är att föredra enligt Collier & Thome (1996). I sin artikel föreslår Cooper att kärkokning skall beräknas enligt

$$\alpha_{R22, \text{kok}} = C \cdot 55 \cdot p_r^{0.12 - 0.2 \cdot \log_{10} R_p} \cdot (-\log_{10} p_r)^{-0.55} \cdot \tilde{M}^{-0.5} \cdot q''^{0.67} \quad (8)$$

där konstanten C är geometriberoende. För kokning från ett horisontellt kopparrör föreslår Cooper  $C = 1.7$ .



Figur 7. Jämförelse mellan Experiment och Coopers korrelation

I diagrammet är konstanten  $C = 1.0$  och ytråheten  $R_p = 1.0 \mu\text{m}$ . En kvalitativ överrensstämmelse erhålls och ett medelvärde av den plottade kvoten är  $\sim 1.5$  vilket tyder på att konstanten skall vara  $C = 1.5$  för denna värmeväxlare. Resultaten styrker i viss utsträckning resultat från Pelletier (1998).

### Slutsatser

För en liten lödd plattvärmväxlare som testats tyder resultaten på att kokförloppet är av typen kärkokning. Ett flertal korrelationer finns för denna typ av kokning och i litteraturen föreslås Coopers korrelation (Collier & Thome, 1996).

Vidare visades att redan vid måttliga överhettningar används endast en mindre del av värmeväxlarytan till att förångna köldmediet, största delen används då till att överhätta detsamma.

### Nomenklatur

A	area	$\text{m}^2$	Pr	Prandtl-talet	-
$c_p$	specifik värmekapacitet	$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	$\dot{Q}$	värmeeffekt	W
$d_h$	hydraulisk diameter	m	$q''$	yteffekt	$\text{W} / \text{m}^2$
h	entalpi	$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	Re	Reynoldstalet	-
$\dot{m}$	massflöde	$\text{kg} / \text{s}$	$R_p$	ytråhet	$\mu\text{m}$
$\tilde{M}$	molmassa	$\text{kg} / \text{kmol}$	t	temperatur	$^\circ\text{C}$
$p_r$	reducerat tryck, $p_r = p/p_k$	-	U	värmegenomgångstal	$\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$

<i>Grekiska</i>			<i>Index</i>	
$\alpha$	konvektiva värmeövergångstalet	W / (m <sup>2</sup> · K)	1	övre gränskurvan
$\delta$	tjocklek hos platta	m	2	sida 1
$\vartheta$	temperaturdifferens	K, °C	kok	sida 2
$\lambda$	värmeledningsförmåga	W / (m ° K)	i	kokdelen i vvx
$\mu$	dynamisk viskositet	Pa · s	in	den i:te delen av vvx
			ut	inlopp
			platta	utlopp
			R22	korrugerad platta i vvx
			H <sub>2</sub> O	köldmediesidan
				vattensidan

## Referenser

Cooper M.G., 1984, Heat flow rates in saturated nucleate pool boiling - A wide ranging examination using reduced properties, *Advances in Heat Transfer*, vol. 16, ed. Harnett J.P. and Irvine T.F. Jr., Academic Press, Orlando, Florida.

Collier J.G., Thome J.R., 1996, *Convective Boiling and Condensation*, 3<sup>rd</sup> ed., Oxford Science Publications, Oxford, 596 s., ISBN 0-19-856296-9.

Hallcrest, 1991, *Handbook of Thermochromic Liquid Crystal Technology*, Hallcrest Ltd, 8-9 Stepnell Reach, 541 Blandford Road, Poole, Dorset, BH16 5BW, UK, 34 s.

Hewitt G.F., 1998, *Heat Exchanger Design Handbook 1998*, Begell House, New York, Three Volume Set, ISBN 1-56700-098-3.

NIST, 1998, The US National Institute of Standards and Technology, Refrigerant properties computer code, REFPROP 6.01.

Pelletier O., 1998, *Propane as Refrigerant in Residential Heat Pumps*, Avd. för Tillämpad termodynamik och kylteknik, Inst. för Energiteknik, Kungl Tekniska Högskolan, Stockholm, 132 s., Trita REFR No 98/24 ISSN 1102-0245.

Pelletier O., 1999, Personlig kommunikation.

Wagner W., Kruse A., 1998, *Properties of Water and Steam - The Industrial Standard IAPWS-IF97 for the Thermodynamic Properties and Supplementary Equations for Other Properties*, Springer-Verlag, Berlin, 354 s., ISBN 3-540-64339-7.