

CO₂ 냉동시스템 증발기에서 PAG 및 POE 오일 회수에 관한 실험적 연구

이 성 광, 강 병 하^{*†}, 김 석 현^{*}
국민대학교 대학원, ^{*}국민대학교 기계·자동차공학부

An Experimental Study on PAG and POE Oils Return in CO₂ Evaporator Model

Sung Kwang Lee, Byung Ha Kang^{*†}, Sukhyun Kim^{*}

ABSTRACT: This study has been conducted to select the suitable refrigeration oil for a CO₂ refrigeration system. The oil return is one of the most important characteristics for refrigeration oils. PAG and POE oils are considered as a test fluids in this study. An evaporator model is employed to simulate the evaporator of a CO₂ refrigeration system. Oil return characteristics has been investigated for CO₂/PAG and CO₂/POE mixtures in the range of oil concentration 0 to 5 weight-percent and the mixture temperature range of 0°C to 15°C. The results obtained indicate that oil return is decreased with an increase in the oil concentration and mixture temperature for both POE and PAG oils. It is also found that POE oil is seen to be superior than PAG oil in terms of oil return in an evaporator of a CO₂ refrigeration system.

Key words: Concentration(농도), Oil(오일), PAG(Poly Alkylene Glycol) POE(Polyol Ester), Density(밀도), Carbon dioxide(이산화탄소)

기 호 설 명

R : 오일 회수율

그 리 스 문 자

ρ_0 : 순수 CO₂ 밀도 [g/l]
 ρ_{evap} : 증발기 부착시 밀도 [g/l]
 $\rho_{no-evap}$: 증발기 탈착시 밀도 [g/l]

1. 서 론

근래의 산업 사회는 인류의 삶의 질을 향상시키기 위해 기술 개발뿐만 아니라 환경보호문제를 함께 고려하고 있다. 이러한 지구환경 문제들 중 대표적인 문제로서 오존층 파괴와 지구 온난화의 문제가 심각하게 대두되고 있다. 이러한 인식아래 1987년 몬트리올 의정서에서 CFC 계열과 HCFC 계열 물질의 규제에 이어, 1999년 교토의 정서에 의한 지구 온난화 물질에 대한 규제는 HFC계열 냉매의 사용에도 제동을 걸게 되었다. 이러한 문제에 근본적으로 대처하기 위한 방법으로 환경론자들은 자연에 존재하는 물질을 냉매로 사용하는 자연냉매의 도입을 요구하고 있다. 이에 따라 암모니아, 질소, CO₂, 프로판 등의 자연

[†] Corresponding author
Tel.: +82-2-910-4681; fax: +82-2-910-4839
E-mail address: bhkang@kookmin.ac.kr

물질이 관심의 대상이 되고 있으며, 이 중 CO₂는 오존층 파괴지수(ODP)가 '0'이고, 지구온난화지수(GWP)가 '1'로서 환경적인 장점이 있다. 또한 안정성이 뛰어나고, 무취, 무독하며 폭발성이 없어 대체 냉매로서 관심이 집중되고 있다.⁽¹⁾

새로운 대체냉매를 시스템에 적용하기 위해서는 그에 따라 수행해야 할 여러 가지 중요한 일들이 있는데 그중의 하나가 대체냉매에 적합한 냉동기유를 개발하는 것이다. 냉동기유는 압축기의 접촉부위에 공급되는 윤활유이며 냉각, 세정, 실링, 부식방지 등의 기능을 수행한다. 이러한 냉동기유는 대부분 압축기 내에 존재하나, 오일이 냉매의 유동에 의해 냉동시스템 내부를 순환하여 다시 압축기로 돌아오게 된다.

그러나 냉동시스템의 구성 형태나 냉매/오일 혼합물의 용해도 및 상용성 등에 영향을 받아 압축기를 떠난 오일의 양보다 회수되는 오일의 양이 적을 경우 압축기 내에 오일의 양이 줄어들게 되어, 최종적으로 윤활에 문제가 발생하여 압축기의 파손을 가져올 수 있다. 고장 난 압축기를 개방했을 때 고장원인 중 가장 손쉽게 찾을 수 있는 요인 중의 하나는 윤활유의 부족이다. 베어링 표면에 윤활유가 없는 상태에서 운전되며 마찰에 의한 과열로 고착되게 된다. 또한 크랭크 샤프트와 베어링 그리고 로트가 손상을 입고 고착이 되어 거의 파손 직전에 이른 것을 알 수 있으며 오일펌프가 장착 되었다면 오일펌프 또한 심하게 손상되고 마모된다. 그리고 오일이 냉매와 함께 혼합되어 냉동시스템을 순환하게 되면 열교환기나 팽창장치의 성능에 영향을 끼친다. 특히, 오일이 증발기에 유입되면 증발기의 열전달률이 변화되어 냉동장치 전체의 성능이 변화된다.⁽²⁾

냉매/오일 혼합물의 냉동시스템에서 오일회수 특성에 관한 기존 연구를 살펴보면 다음과 같다. Schlager et al.⁽³⁾은 냉매/오일 혼합물의 micro-fin tube에서 오일의 회수 양을 측정하고, 질량 유속, 오일 분율, 혼합물 점도, 증발기 출구의 상태에 따라 오일의 회수량이 변함을 제시하였다. Fung and Sundaresan⁽⁴⁾은 냉동 시스템에서 R-404A/MO 혼합물과 R-404A/POE 혼합물의 오일 회수 특성에 대한 실험을 수행하고, 오일회수량을 측정하기 위해서 압축기 크랭크 케이스에서 오일 레벨을 측정하였다. 이 실험에서 낮은 응축 온도와 높은 증발온도에서 오일 회수량

이 증가함을 보였고, R-404A/POE 혼합물이 R-502/MO 혼합물과 R-404A/MO 혼합물보다 오일 회수 측면에서 우수함을 보였다. Biancardi et al.⁽⁵⁾은 주거용 열펌프 시스템에서 HFC/POE 혼합물과 HFC/MO 혼합물의 순환 특성을 분석하고, 배관에서 오일의 축적을 가시화 하였다. Reyes-Gavilan et al.⁽⁶⁾은 가정용 냉장고의 다른 증발 온도에서 오일회수와 윤활유의 유동 특성을 실험적으로 밝히고, R-134a/POE 혼합물과 R-134/MO 혼합물의 오일 회수 특성을 비교 실험하였다. 이 실험에서 압축기로의 오일 회수에 냉매 유속의 중요한 역할을 제시하였다. Sumida et al.⁽⁷⁾은 액관에서 R-410A/AB 혼합물의 유동 특성과 오일 회수 특성을 분석하였다. 이 실험에서 액관에서는 오일 유속이 냉매유속보다 더 적음을 알고, 1 wt.% 이하의 오일 순환 농도에서 오일은 100% 회수됨을 보였다. Cremaschi et al.⁽⁸⁾은 R22, R410A 냉동 시스템에서 오일의 순환특성을 분석하고, 증발기, 응축기에서 오일 축적 양을 측정하였으며, 오일축적량의 증가에 따라 압력강하가 증가함을 보였다.

이들의 연구로부터 HFC/오일 혼합물의 오일 회수 특성에 관한 연구는 많이 이루어 졌지만, CO₂/오일 혼합물의 오일 회수 특성에 관한 연구가 부족한 현실이다. 따라서 본 연구에서는 PAG 및 POE 오일에 대하여 CO₂ 냉동시스템 중 증발기에서의 오일회수 특성을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

냉매/오일 혼합물이 항상 액체 상태로 혼합되어 유동할 수 있는 폐회로 시스템을 설계 제작하였다. CO₂는 다른 냉매에 비하여 낮은 임계온도에서 높은 임계압력을 갖기 때문에 초월 임계 사이클을 이루게 된다. 따라서 본 연구의 실험 장치는 CO₂냉매의 특성을 고려하여 실험장치의 각 부분을 고압 피팅으로 연결하였다. Fig. 1은 실험 장치의 개략도를 나타내었다.

실험 장치는 크게 CO₂냉매 순환부와 냉매의 설정온도를 유지시키기 위해 에틸렌글리콜/물을 사용한 냉 항온조 순환부로 구성되었다. 에틸렌글리콜/물 순환부에 의해 설정온도로 유지되어 수액기내에 저장되어 있는 CO₂냉매는 마그네틱

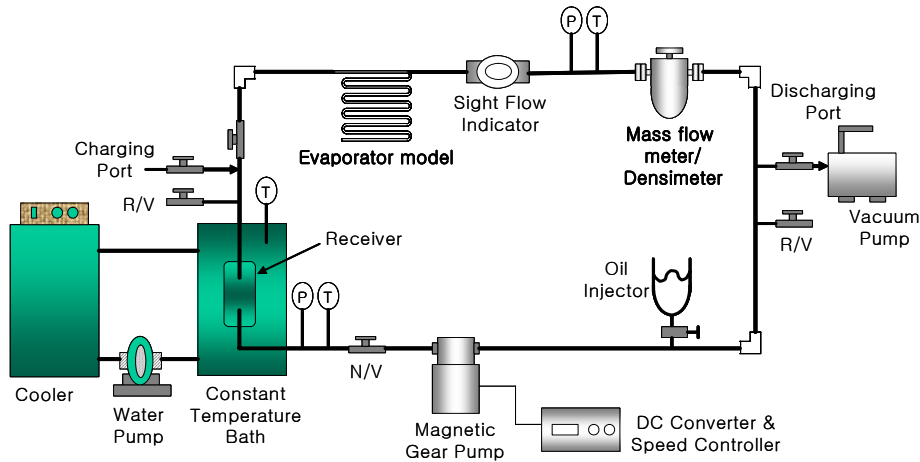


Fig. 1 Schematic diagram of an experimental system

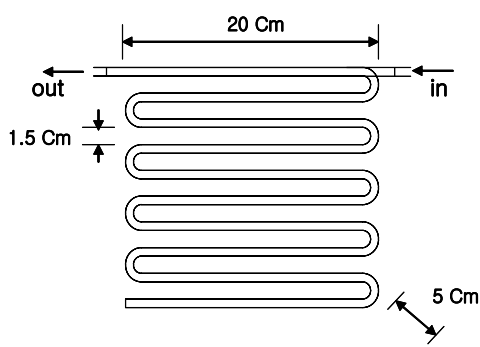


Fig. 2 Schematic diagram of an evaporator model

기어펌프에 의해서 순환을 하게 되며, CO₂/오일 혼합물의 유량은 기어펌프의 회전속도를 변환시키는 속도조절기로 조절되며 유량은 질량 유량계로 측정하였다. 오일혼합을 위한 오일의 주입은 오일주입기(oil injector)를 사용하였다. CO₂를 관내에 충전하기 전에 진공펌프를 이용하여 관내를 진공으로 유지시키면서 실험 조건 농도에 해당하는 오일이 주입된 오일주입기를 반대편 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 압력차를 이용하여 주입시켰다.

기어펌프에서 배출된 냉매는 밀도 측정을 위해 밀도계를 통과한다. 밀도가 측정되는 혼합물의 상태를 확인하기 위해 밀도계 출구에 설치된 가시화부(sight glass)를 통과한 후 최종적으로 수액기로 모아지는 순환과정을 거치게 된다. 가시화부는 강화유리가 전·후면에 설치된 형상으로 부식과 냉매와의 화학적 반응을 방지하기 위해 SUS관을 사용하여 제작하였다. 증발기 형상은

고압에 견딜 수 있는 1/4 SUS관을 사용하여 제작하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 실험 조건 및 방법

증발기 형상에서 PAG 및 POE 오일의 회수 특성 실험을 위하여 증발기 형상의 탈부착 시, 온도 변화와 CO₂/오일 혼합물의 농도 변화에 따른 혼합물의 밀도 변화를 밀도계를 이용하여 측정하였다. 먼저 순수 CO₂인 경우 설정온도를 유지시키기 위해 냉동기(cooler)순환부를 가동한다. 또한 진공펌프를 이용하여 원형 유동관내를 진공으로 유지시킨다. 그 후 CO₂ 충전용기를 저울에 달아 초기질량을 기록해둔 후 원하는 질량을 충전포트(charging port)를 통해 수액기로 주입한다. 주입이 끝나면 마그네틱 기어 펌프를 가동하여 CO₂냉매를 순환시킨다. 설정된 질량유량은 기어펌프에 부착된 속도조절기를 증감시키면서 조절할 수 있다. 설정한 입구온도와 질량유량에서 정상상태를 이루도록 시간을 두어 순환시킨다.

CO₂/오일 혼합물인 경우 오일의 농도는 질량비(wt%)로 설정하므로 충전하고자 하는 CO₂의 질량에 대한 오일의 질량을 오일주입기에 주입한 후, 순수 CO₂인 경우의 실험과정에서 초기에 원형유동관내를 진공펌프를 사용해 진공으로 유지시킬 때, 오일 주입기를 반대편 충전포트에 연결하고 밸브를 열어 음압을 이용하여 주입시킨다. 다음 과정은 순수 CO₂인 경우의 실험과정과 동일하게 수행하면서 데이터를 기록하게 된다. 실험이 끝나면 유동관로를 모두 분리하여 관내와

Table 1 Typical properties of oils

Items	Property	Property
Type	PAG oil	POE oil
Company	CPI	MOBIL
Model	RPAG-100	EAL Arctic 100
Specific gravity at 15°C	1.007	0.962
Pour point (°C)	-40	-30
Flash point (°C)	168	254
Viscosity at 40°C (cSt)	100	100

구성품을 세척제를 이용하여 깨끗하게 세척 한 후 증발기 형상을 부착하고 같은 방법으로 실험을 수행하게 된다. 실험에 사용된 오일은 CO₂냉매와 같이 상용되며 극성 냉동기유인 PAG와 POE오일을 사용하였다. 이 오일은 화학적 안정성, 윤활성, 혼화성이 우수한 합성오일이다. 오일의 물성은 Table 1 과 같다.

시스템은 압력 60bar, 유속 2kg/min로 유지시키고, 오일농도는 1~5 (wt%) 온도는 0, 5, 10, 15°C에서 각각 밀도를 측정하였다. 온도 변화와 CO₂/오일 혼합물의 농도 변화에 따른 증발기 형상에 의한 오일 회수율의 변화를 식(1)을 이용하여 계산하였다.

$$R_{oil\ return\ ratio} = \frac{\rho_{evap} - \rho_o}{\rho_{no- evap} - \rho_o} \quad (1)$$

3. 실험결과 및 고찰

증발기가 있을 때와 없을 때 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도와 온도의 변화에 따른 밀도 변화를 Fig. 3에 나타내었고, 혼합물의 농도변화에 따른 오일 회수율의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 온도가 10°C에서 오일농도가 1%일 때 오일 회수율은 74%, 오일농도가 3%일 때 오일 회수율은 69%, 오일농도가 5%일 때 오일 회수율은 67%를 보였다. 모든 온도범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일의 회수율은 감소하였다. CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도 변화에 따른 오일 회수율을 Fig. 5에 나타내었다.

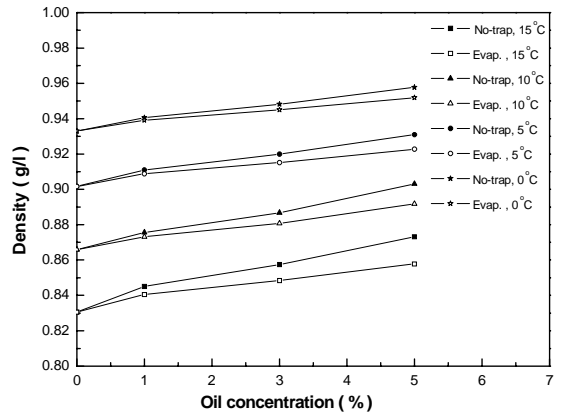


Fig. 3 Density of CO₂/PAG oil mixture for oil concentration and temperature

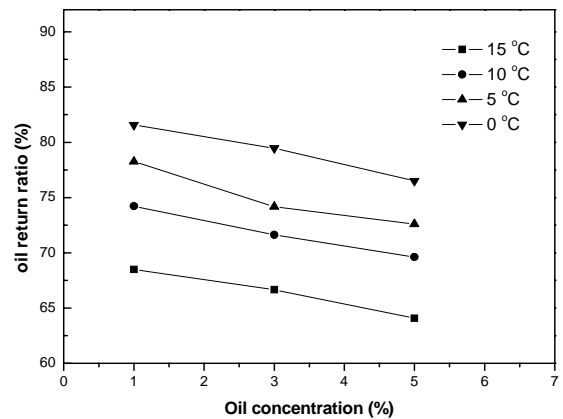


Fig. 4 PAG oil return ratio for oil concentration

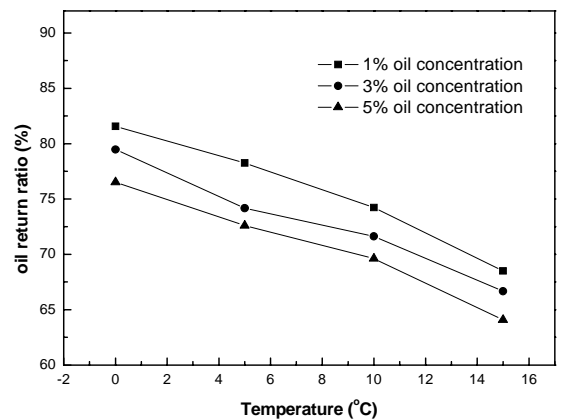


Fig. 5 PAG oil return ratio for temperature

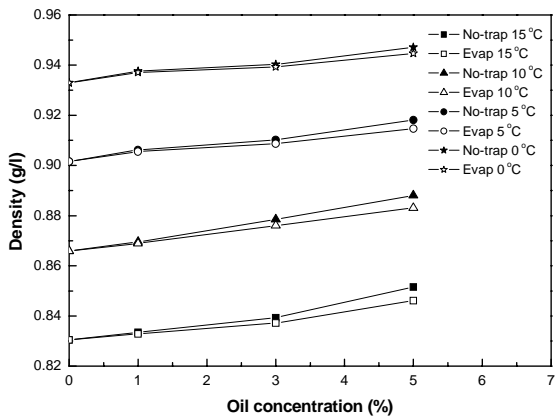


Fig. 6 Density of CO₂/POE oil mixture for oil concentration and temperature

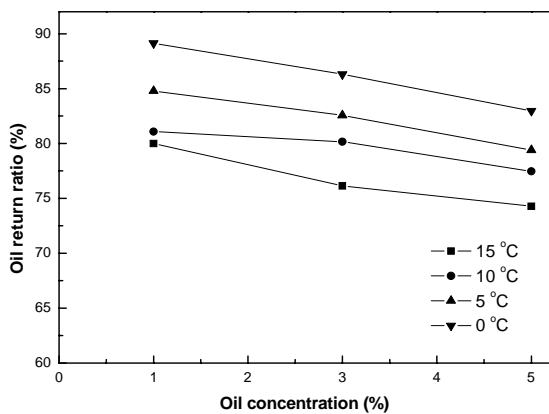


Fig. 7 POE oil return ratio for oil concentration

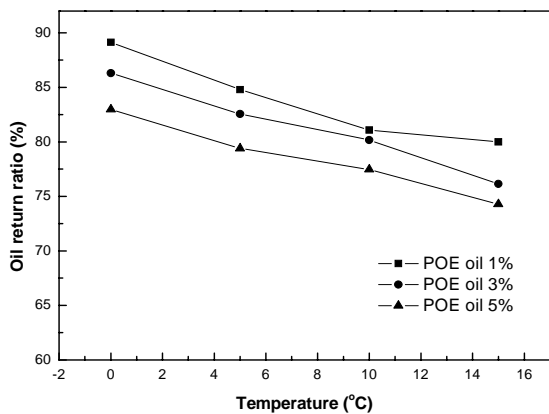


Fig. 8 POE oil return ratio for temperature

오일농도가 3%에서 온도가 0°C일 때 오일회수율은 79%, 5°C일 때 오일 회수율은 74%, 10°C일 때 오일 회수율은 71%, 15°C일 때 오일 회수율은 66%를 보였다. 모든 농도 범위에서 CO₂/PAG 오일 혼합물의 온도가 감소함에 따라 오일 회수율은 증가하였다. PAG오일 회수율은 CO₂/PAG 오일 혼합물의 상용성 영향으로 오일농도가 감소함에 따라, 온도가 감소함에 따라 오일 회수율이 증가하는 것으로 판단된다.

증발기가 있을 때와 없을 때 CO₂/POE 오일 혼합물의 농도와 온도의 변화에 따른 밀도 변화를 Fig. 6에 나타내었고, 혼합물의 농도변화에 따른 오일 회수율의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 온도가 10°C에서 오일농도가 1%일 때 오일 회수율은 81%, 오일농도가 3%일 때 오일 회수율은 80%, 오일농도가 5%일 때 오일 회수율은 77%를 보였다. 모든 온도범위에서 CO₂/POE 오일 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일의 회수율은 감소하였다. CO₂/POE 오일 혼합물의 온도 변화에 따른 오일 회수율을 Fig. 8에 나타내었다. 오일농도가 3%에서 온도가 0°C일 때 오일회수율은 86%, 5°C일 때 오일 회수율은 82%, 10°C일 때 오일 회수율은 80%, 15°C일 때 오일 회수율은 76%를 보였다. 모든 농도 범위에서 CO₂/POE 오일 혼합물의 온도가 감소함에 따라 오일 회수율은 증가하였다. POE오일 회수율 또한 CO₂/POE 오일 혼합물의 상용성 영향으로 오일농도가 감소함에 따라, 온도가 감소함에 따라 오일 회수율이 증가하는 것으로 판단된다. CO₂/PAG 오일 혼합물과 CO₂/POE 오일 혼합물의 회수율을 비교해보면, 온도 및 농도 변화 시 POE 오일이 PAG 오일보다 회수율 면에서 더 우수함을 보였다.

4. 결론

PAG 및 POE 오일에 대하여 CO₂ 냉동시스템 증발기에서의 오일회수 특성을 규명하기위한 실험을 수행하였다. 증발기 형상의 탈부착 시, 온도 변화와 CO₂/오일 혼합물의 농도 변화에 따른 혼합물의 밀도 변화를 밀도계를 이용하여 측정하였다. 혼합물의 농도가 증가함에 따라 오일회수율은 감소함을 보였고, 온도가 감소함에 따라 오일 회수율은 증가함을 보였다. CO₂/오일 혼합물은 상용성에 따라 오일의 회수율이 결정됨을 알 수 있었다. 또한 오일의 회수 측면에서는 POE 오일

이 PAG 오일보다 우수함을 보였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대 신기술 개발 사업 중 “환경친화적 자연냉매인 CO₂를 적용한 고효율 냉난방 시스템 개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Devotta, S., Padalkar, A. S, Joshi, S. N., Sawant, N. N., and Sane, N. K., 2000, Comparative assessment of CO₂ for window air-conditioners, Preliminary Proceedings of the 4th IIR-Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids at Purdue, pp. 17-24.
2. ASHRAE, 1994, Lubricants in refrigerant system, ASHRAE HANDBOOK, Refrigeration Systems and Applications, Ch. 29.
3. Schlager, L. M., Pate, M. B. and Bergles, A. E. 1990, Oil quantity measurements in smooth and micro-fin tubes during evaporation and condensation of refrigerant-oil mixtures, ASHRAE Trans., Vol. 1, pp. 465-469.
4. Fung, K. and Sundaresan, S. G., 1994, Study of Oil Return Characteristics in a Display Case Refrigeration System. Comparison of Different Lubricants for a HFC-Bend Refrigerant, Proc. 5th International Refrigeration Conference at Purdue, pp. 121-128.
5. Biancardi, F. R., Michels, H. H., Sienel, T. H, and Pandey, D. R.. 1996, Study of lubrication circulation in HVAC systems, The Air Conditioning and Refrigeration Technology Institute, ARTIMCLR project number 665-53100, DOE/CE/23810-71-Vol.1.
6. Reyes-Gavilan, J., Flak, G. T. and Tritcak, T. R. 1996, Lubricant Return Comparison of Naphthenic and Polyol Ester Oils in R-134a Household Refrigeration Applications, ASHRAE Trans., Vol. 102(2), pp. 180-185.
7. Sumida, Y., Nakayama, M., Suzuki, S. and Kawaguchi, S., 1998, Alkylbenzene for Split Air Conditioner with R-410A Part 2: Oil Return Characteristics, Proc. 1998 International Compressor Engineering Conference at Purdue, pp. 471-476.
8. Cremaschi, L., Hwang, Y. and Radermacher, R., 2004, Investigation of oil retention in residential heat pumps, Proc. 10th International Refrigeration Conference at Purdue, R104.