



PVDF 중공사막을 이용한 진공 막 증류 모듈의 공급수 조건에 따른 열성능 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Characteristic of Thermal Performance according to Feed Water Conditions to of Vacuum Membrane Distillation Module using PVDF Hollow Fiber

주흥진·곽희열*

Hongjin Joo·Heeyoul Kwak*

한국에너지기술연구원 태양열융합연구실

Solar Thermal Convergence Laboratory, Korea Institute of Energy Research (KIER)

ABSTRACT

In this study, thermal performance test of VMD module was performed, prior to the construction of the demonstration plant using the vacuum membrane distillation (VMD) module of the capacity of 400 m³/day and to the commercialization of the VMD module. For the thermal performance test, the experimental equipment of capacity of 2 m³/day was constructed. The permeate flux test and thermal performance test according to feed water conditions such as temperature and flow rate were conducted. The VMD module used in the study was manufactured by ECONITY Co., LTD with PVDF hollow fiber membrane. As a result, the Performance Ratio (PR) of the VMD module showed the maximum value of 0.904 under the condition of feed water temperature of 75°C and flow rate of 8 m³/h. PR value of the VMD module using PVDF hollow fiber membrane showed linearly increasing relationship with feed water temperature and flow rate. Also, The permeate flux of the VMD module was analyzed to have maximum value of 18.25 LMH and the salt rejection was 99.99%.

Key words: Desalination, Hollow Fiber Membrane, Membrane Distillation, Vacuum Membrane Distillation

주제어: 해수담수화, 중공사막, 막 증류법, 진공 막 증류법

1. 서 론

인구증가 및 산업화에 따른 물 수요량이 지속적으로 증가하고 있으나 기후변화에 따른 강수량 변화 및 사막화 등으로 인하여 인류가 이용할 수 있는 물의 양은 급격히 감소하고 있다. 따라서 지속적인 물 수요 증가에 따른 대체수원의 필요성이 부각되고 있다 (McGinnis et al, 2009).

이러한 물 부족 문제를 해결하기 위한 대체수자원 확보 기술로서 해수담수화의 중요성이 증가되고 있다. 해수담수화는 무한한 수자원인 바닷물을 담수로 이용할 수 있다는 측면에서 물 부족 문제를 해결하는 강력한 대안으로 부각되고 있다.

해수담수화 공정으로 증발법, 전기투석법, 역삼투법 (Reverse osmosis: RO) 등이 많이 사용되고 있고, 특히 역삼투법이 많이 연구되고, 운전 중에 있다. 그 중 증발법은 해수를 끓는점 이상으로 열을 가해야하기 때문에 석유, 석탄과 같은 화학에너지 자원이 풍부한 국

Received 21 July 2017, revised 8 August 2017, accepted 10 August 2017

*Corresponding author: Heeyoul Kwak(E-mail: hykwak@kier.re.kr)

pp. 273-279

pp. 281-287

pp. 289-296

pp. 297-301

pp. 303-310

pp. 311-319

pp. 321-328

pp. 329-338

pp. 339-346

pp. 347-356

pp. 357-362

가에서 많이 사용되고 있다 (McGinnis et al, 2009). 이로 인해 점차적으로 에너지 소비량이 적은 역삼투법이 중점적으로 연구되고, 또 운전중에 있다. 역삼투법은 전처리 후 고압펌프를 이용하여 유입수에 삼투압 이상의 압력을 가하여 담수를 얻어 내는 공정으로써 소비동력이 크고 친수성 막을 사용해야 하기 때문에 부유입자 및 유기물에 의해 쉽게 막이 오염된다는 단점이 있다 (McGinnis et al, 2009, Escobar et al 2009, Greenlee et al 2009).

따라서 이러한 해수담수화의 문제점을 해결하기 위해 세계 각국에서는 해수담수화 공정에 사용되는 에너지 사용량 저감 및 친환경 해수담수화 기술에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다. 그 중에서도 막 증류법(Membrane Distillation, 이하 MD) 공정은 태양 열이나 폐열과 같은 저온의 열원을 직접적으로 활용할 수 있기 때문에 차세대 담수 기술로 주목 받고 있다(Koschikowski et al 2003, Banat et al 2007, Curcio et al 2012, Guillén-Burrieza et al 2012, Alkhudhiri et al 2012, Sarbatly et al 2013).

막 증발법은 소수성의 다공성 분리막을 이용하여 분리막의 표면 미세 기공을 통해 원수로부터 순수한 증기만 투과시켜 물을 분리하는 공정이다. 막 증류법에 의해 처리되는 원수는 분리막의 한쪽 면과 접촉되지만 분리막의 높은 소수성 때문에 발생된 표면장력으로 인해 원수가 분리막의 미세 기공안으로 투과되지 못하기 때문에 증기만 분리막을 통과하게 된다 (Lawson et al 1997, Alkhudhiri et al 2012). 막 증류 공정에서 증기의 이동 원리는 분리막을 경계로 높은 온도의 원수와 낮은 온도의 여과수 사이에 형성되는 온도차이 때문이며, 이러한 온도차이는 원수와 여과수 사이에 증기압 차이를 유발하여 원수로부터 발생된 증기를 여과수쪽으로 이동하게 만드는 구동력이 된다 (Lawson et al 1997, Alsaadi et al 2014). 막 증류법은 구동력인 증기압 구배를 발생시키기 위해 여과수 측면에 적용하는 방법에 따라 직접 접촉식 막 증류법(Direct Contact Membrane Distillation; DCMD), 공기 간극형 막 증류법(Air Gap Membrane Distillation; AGMD), 스위프가스 흐름형 막 증류법(Sweep Gas Membrane Distillation; SGMD), 진공 막 증류법(Vacuum Membrane Distillation; VMD) 4가지 방식으로 구분할 수 있다 (El-Bourawi et al 2006, Abu-Zeid et al 2015, Joo et al 2016).

이 중 진공 막 증류법(이하 VMD)은 대기압 보다 낮은 압력을 이용하기 때문에 같은 공급수의 온도가 동일 할 시 DCMD나 AGMD 보다 많은 양의 증기를 생산할 수 있으며, 다른 막 증류법보다 더 낮은 온도에서 구동이 가능한 장점이 있다. 그러나 VMD 공법은 다른 막 증류 공법과 달리 진공을 유지하기 위한 에너지가 추가적으로 필요하다(Lawson et al 1997, El-Bourawi et al 2006, Joo et al 2016). 또한 이러한 VMD 공법은 아직까지 연구수준에 머물러 있다.

따라서 본 연구에서는 VMD 모듈의 상용화 및 400 m³/day VMD 모듈을 이용한 실증플랜트 구축에 앞서 PVDF 재질의 중공사막을 이용한 2 m³/day 용량의 VMD 모듈을 제작하였으며 VMD 모듈의 주요 운전조건인 공급수 온도와 공급수 유량 변화에 따른 여과 플럭스의 변화 및 열 성능 특성을 분석 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 VMD 모듈의 담수 생산 특성을 도출하기 위해 구축된 Lab Scale 규모의 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. VMD 모듈에 공급되는 열원은 전기히터를 사용하여 해수를 가열하도록 설계 및 제작 하였다. 전기히터를 통해 가열된 해수는 0.2 μm의 MF 필터를 통과하여 VMD 모듈로 공급된다. 이때 공급되는 해수의 온도, 압력 및 유량은 각각의 온도센서, 압력 트랜듀서 및 유량계를 통해 수집되며 밸브 및 바이패스 라인을 통해 유량 및 압력을 조절할 수 있도록 제작하였다. VMD 모듈을 통과한 해수는 전기 히터를 통해 재가열된 후 다시 해수 탱크로 환수된다(Joo et al 2016). VMD 모듈 내부에서 발생된 증기는 응축기를

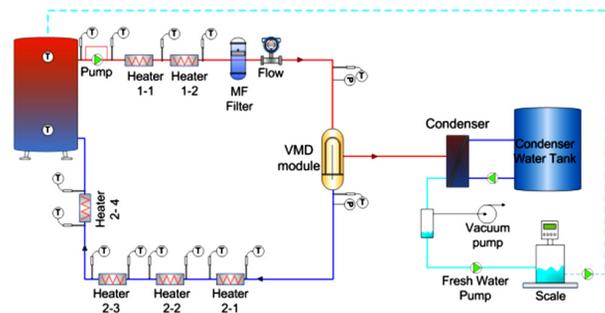


Fig. 1. The schematics of VMD experimental set-up



Fig. 2. The picture of the VMD set-up for the experiment

Table 1. Configuration of experimental system

Contents	Specification
Feed Tank	0.3m ³ , FRP
Electric Heater	32kW, Titanium
MF Pretreatment	0.2μm, Polypropylene
MF Filter Housing	20ℓ, Titanium
Feed Pump	13m ³ /h, E-CTFE
Flowmeter	1~45m ³ /h, Teflon
Condenser	47,120kcal/h, Titanium
Vacuum Pump	120LPM, 690mmHG
Pressure Transducer	1 to 20bar, Hastelloy
Vacuum Pressure Transducer	0 to 100kPa, SUS316L

통과하며 담수로 응축되며 응축된 담수는 담수 탱크에 저장된다. 담수탱크에 모아진 담수는 VMD 모듈에 공급되는 해수의 일정한 염도를 유지하기 위하여 무게 및 염도를 측정 후 다시 해수탱크로 환수 되도록 실험장치를 제작하였다. Fig. 2와 Table 1은 본 연구에서 사용된 VMD 모듈 열성능 실험장치의 사진 및 구성요소를 나타낸 것이다(Joo et al 2016).

2.2 VMD 모듈

본 연구에서 사용된 VMD 모듈은 대한민국의 Econity사에서 VMD 모듈의 상용화를 위해 제작된 VMD 모듈이며 VMD 모듈 내부에 삽입된 막은 소수성의 다공성 Polyvinylidene fluoride(PVDF) 재질의 중공사막을 사용하였다. 고온에 사용 가능한 CPVC(Chlorinated polyvinyl chloride) 재질의 원통형 용기 내에 PVDF 재

질의 중공사막을 다발형태로 삽입하였으며, 중공사막 내부로 공급되는 해수가 막의 관내를 통과할 때 발생하는 증기는 중공사막의 기공을 통과하여 막 외부로 배출된다. 배출된 증기는 압력차에 의해 응축기로 수집되며 수집된 증기는 응축기에서 냉각수와의 열교환을 통해 응축된다. 본 연구에서 사용된 VMD 모듈 내부에 설치된 중공사막의 전체 유효면적은 중공사막 내경 기준 5.3 m²이며 모듈 내부에 삽입된 총 막의 개수는 6,030가닥이다. 중공사막의 평균 Pore size는 0.1 μm 이며, 평균 Porosity 는 65~70%이다. Fig. 3과 4는 본 연구에서 사용된 Econity 사의 VMD 모듈사진 및 VMD 모듈의 개략도를 나타낸 것이며 Table 2는 본 연구에서 사용된 Econity사의 VMD 모듈 사양을 나타낸 것이다.



Fig. 3. The picture of the VMD module of Econity

Table 2. Hollow fiber VMD module specification

Item	Contents	Material
Membrane	Material	PVDF
	Type	Hollow Fiber
	Pore Structure	Asymmetric
	Average Porosity (%)	65~70
	Average Pore Size (μm)	0.1
	Diameter (Outside/Inside) (mm)	1.2/0.7
Module	Material	ABS
	Potting Material	Poly Urethane
	Length / Diameter (mm)	914 / 260
	Membrane Surface (m ²)	5.3
	Number of Membrane	6,030
	Packing density (%)	15
	Membrane length (mm)	450
	Type	VMD
	Filtration Flow	In-Out
Temperature (°C)	10 ~ 75	

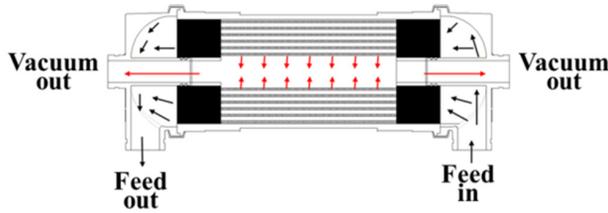


Fig. 4. The schematic of the VMD of Econity

2.3 실험조건 및 방법

VMD 모듈의 해수 공급 조건에 따른 담수 생산특성을 분석하기 위해서는 외부 환경이 각 실험 조건마다 동일한 환경에서 수행되어야 한다. VMD 모듈은 외기온도 보다 높은 해수를 공급하여 증기를 발생시키기 때문에 열손실에 의한 영향을 반드시 고려해야 한다. 따라서 각 실험 조건마다 동일한 외기온도 조건을 유지시켜 성능 평가를 수행하였다. 또한 실험의 오차를 최소화하기 위해서 VMD 모듈로 공급되는 해수의 염도, 공급온도, 유량 및 압력의 오차 범위를 $\pm 1\%$ 이내로 유지시켜 실험을 수행하였다(Joo et al 2016).

실험 조건으로는 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 염도는 해수와 유사한 성분을 갖기 위하여 천일염을 사용하여 TDS 기준 35,000 ppm을 유지하도록 하였으며 각 실험 마다 동일한 조건을 조성하기 위해 실험 시작 전, 후 TDS를 측정하여 공급수의 TDS 조건을 동일하게 유지시키며 성능실험을 수행하였다. 공급수의 온도 및 유량에 따른 성능 실험을 위해 공급수의 온도는 55 °C, 65 °C, 75 °C 3가지 조건으로 공급 하였으며, 공급수의 유량은 4 m³/h, 6 m³/h, 8 m³/h로 조건으로 공급 하였다. 또한 진공 상태에서 작동하는

VMD 모듈의 특성상 모듈 내부의 진공압력은 각 실험마다 절대압력 기준으로 15 kpa 이하의 동일한 조건에서 실험을 수행하였다. Table 3은 VMD 모듈의 성능 실험 조건을 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 실험결과 처리 방법

VMD 해수담수화 플랜트를 설계 하는데 있어서 VMD 공정에 필요한 열 에너지 사용량을 예측하는 것은 매우 중요한 설계 포인트이다. 일반적인 열 구동 방식의 해수담수화 시스템과 마찬가지로 VMD 해수담수화 시스템의 열 성능 역시 무차원 단위인 PR (Performance Ratio) 값을 사용하여 VMD 모듈의 열 성능을 평가한다. PR 값은 생산된 담수를 증발시키기 위해 필요한 잠열 에너지와 실제 담수 생산에 사용된 열 에너지 사용량으로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다(Lawson et al 1997, Guillén-Burrieza et al 2012, Abu-Zeid et al 2015, Joo et al 2016, Lee et al 2016).

$$PR = \frac{\dot{m}_{dist} \Delta h_v}{\dot{Q}_{heat}} \quad (1)$$

식 (1)에서 \dot{m}_{dist} 는 여과플럭스(Permeate flux) 즉 생산된 담수량이며, Δh_v 는 물 1 kg를 증발 시킬 때 필요한 증발잠열, \dot{Q}_{heat} 는 담수를 만들 때 공급된 열 에너지 사용량이다. \dot{Q}_{heat} 은 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 입·출구 온도차 및 유량을 통해 계산할 수 있으며

Table 3. The experimental conditions

Case		Feed water conditions		
		Inlet temperature (°C)	Inlet flow rate (m ³ /h)	Inlet TDS (ppm)
Case 1	Case 1-1	55	4	35,000
	Case 1-2	55	6	35,000
	Case 1-3	55	8	35,000
Case 2	Case 2-1	65	4	35,000
	Case 2-2	65	6	35,000
	Case 2-3	65	8	35,000
Case 3	Case 3-1	75	4	35,000
	Case 3-2	75	6	35,000
	Case 3-3	75	8	35,000



식 (2)와 같다(Lawson et al 1997, Guillén-Burrieza et al 2012, Abu-Zeid et al 2015, Joo et al 2016, Lee et al 2016).

$$\dot{Q}_{heat} = \dot{m}_{feed} C_p (T_{in} - T_{out}) \quad (2)$$

식 (2)에서 \dot{m}_{feed} 는 VMD 모듈에 공급되는 해수의 유량이며, C_p 는 해수의 비열, T_{in} 는 VMD 모듈 입구에서의 해수 온도 그리고 T_{out} 은 VMD 모듈 출구에서의 해수 온도이다. PR 값과 함께 VMD 공정에서 막 성능 지표로 사용되는 여과플럭스 값은 막 면적당 생산된 담수량으로 계산하며 식 (3)과 같다(Lawson et al 1997, Guillén-Burrieza et al 2012, Abu-Zeid et al 2015, Joo et al 2016, Lee et al 2016).

$$LMH = \frac{\dot{m}_{dist}}{A_m} \quad (3)$$

식 (3)에서 \dot{m}_{dist} 는 VMD 모듈을 통해 생산된 시간당 담수량이며, A_m 은 VMD 모듈 내부에 설치된 중공사막의 전체 면적이다. 또한 VMD 모듈로 공급된 공급수와 생산된 담수의 비율인 회수율 RR(Recovery Ratio) 값은 식 (4)와 같다(Lawson et al 1997, Guillén-Burrieza et al 2012, Joo et al 2016).

$$RR = \frac{\dot{m}_{dist}}{\dot{m}_{feed}} \quad (4)$$

3.2 운전조건에 따른 VMD 모듈의 담수 생산 특성

Fig. 5는 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 열 에너지 공급량에 따른 VMD 모듈의 여과플럭스 값을 나타낸 것이다. 기존 문헌에서 제시한 결과 값과 동일하게 PVDF 중공사막을 이용한 VMD 모듈의 여과플럭스 값은 공급수의 열 에너지 공급량이 증가할수록 비례하여 증가하는 것으로 나타났다(Lawson et al 1997, Joo et al 2016). 실험결과 본 연구에서 사용된 Ecomity 사의 중공사막 VMD 모듈의 경우 공급되는 해수의 공급 열량이 약 70 kW 일 경우 VMD 모듈의 여과플럭스 값은 18.25 LMH로 나타났으며, 실험 조건 중 가장 낮은 공급 열량인 30.6kW에서는 최소 7.92 LMH로 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 열량 공급 조건에 따라 여과 플럭스 값이 약 2배 이상 차이가 나는 것으로 분석되었다.

Fig. 6은 VMD 모듈로 공급되는 공급수의 입·출구 온도차에 따른 여과플럭스 값을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 Ecomity's 사의 VMD 모듈의 경우 해수 공급 온도 75 °C, 유량 4 m³/h의 실험 조건에서 VMD 모듈 입·출구 온도차는 최대 16.6°C로 나타났으며 해수 공급 온도 55°C, 유량 8 m³/h의 실험 조건의 경우 입출구 온도차는 8.42°C로 나타났다. VMD 모듈에 공급되는 공급수의 유량이 증가 할수록 동일한 공급 온도에서 입출구 온도차는 감소한다. 공급수의 유량이 증가할수록 여과 플럭스가 증가하는 이유는 온도분극 및 농도분극이 감소하여 유효 증기압 차가 증가했기 때문이다(Alsaadi et al 2014, Chiam et al 2013).

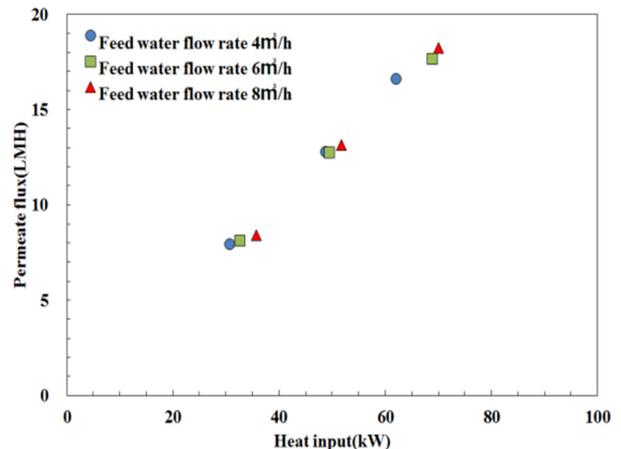


Fig. 5. The relationship between the Heat Input and the Permeate flux

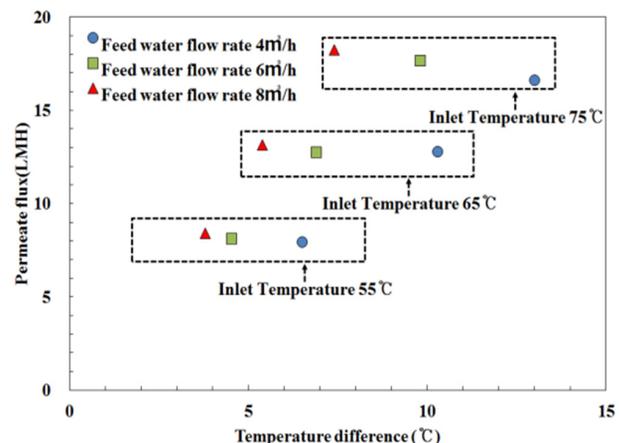


Fig. 6. The relationship between the Temperature difference and the Permeate flux

pp. 273-279

pp. 281-287

pp. 289-296

pp. 297-301

pp. 303-310

pp. 311-319

pp. 321-328

pp. 329-338

pp. 339-346

pp. 347-356

pp. 357-362

Fig. 7은 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 온도 및 유량에 따른 회수율을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 경우 최대 회수율은 공급수 온도 75℃, 공급수 유량 8 m³/h의 운전조건에서 2.349%로 나타났으며 최소 회수율은 공급수 온도 55℃, 공급수 유량 4 m³/h의 운전조건에서 1.03%로 나타났다.

Fig. 8은 각각의 실험 조건에서 생산된 여과플렉스 및 염도 값을 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용된 Econity 사의 VMD 모듈의 경우 각각의 공급수 조건에 상관없이 각 실험조건하에 생산된 여과플렉스의 염도는 모든 실험 조건 하에서 5ppm 이내로 측정되었다.

Fig. 9와 Fig. 10은 VMD 모듈에 공급되는 공급수의 온도 조건에 따른 여과플렉스 및 VMD 모듈의 열 성능 계수인 PR(Performance Ratio) 값을 나타낸 것이다.

본 연구에서 사용된 Econity 사의 VMD 모듈의 경우 VMD 모듈로 공급되는 공급수의 온도가 증가하면 여과플렉스 역시 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 공급수의 유량을 동일한 상태에서 10℃ 증가 시킬 경우 여과플렉스 값은 최대 55% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 또한 VMD 모듈의 열 성능 계수인 PR값의 경우 공급수 유량 8 m³/h, 공급수 온도 75℃ 조건에서 최대 0.904로 나타났으며 공급수 유량 4m³/h 온도 55℃ 조건에서는 최소 0.82로 나타났다. 이러한 실험결과는 VMD 모듈을 이용한 담수화 시스템의 경우 열 에너지 사용 측면에서 효율적인 운영을 위해서는 VMD 모듈로 공급되는 공급수의 온도를 높게 형성하는 것이 열 에너지 소비 측면에서 비교적 유리할 것으로 사료된다.

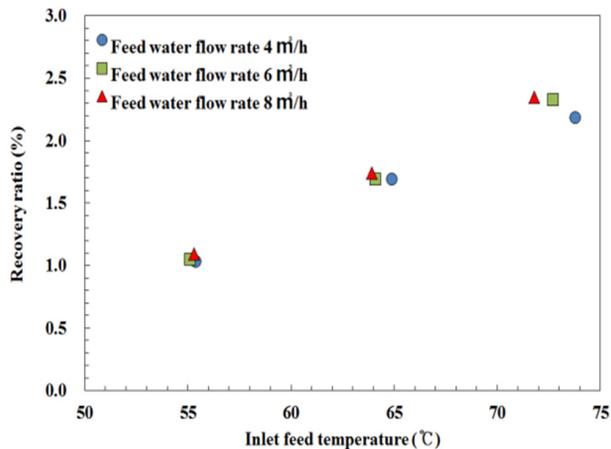


Fig. 7. The relationship between the Inlet feed temperature and the Recovery ratio

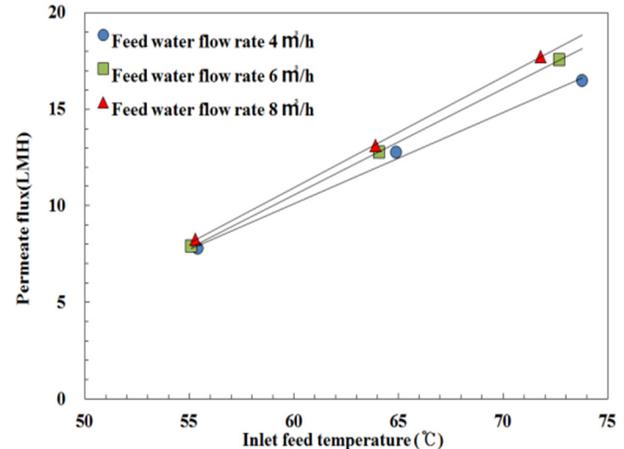


Fig. 9. The relationship between the Inlet feed temperature and the Permeate flux

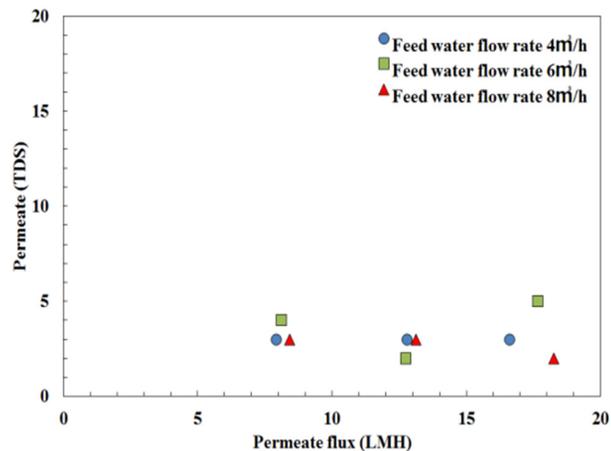


Fig. 8. The relationship between the Salinity and the Permeate flux

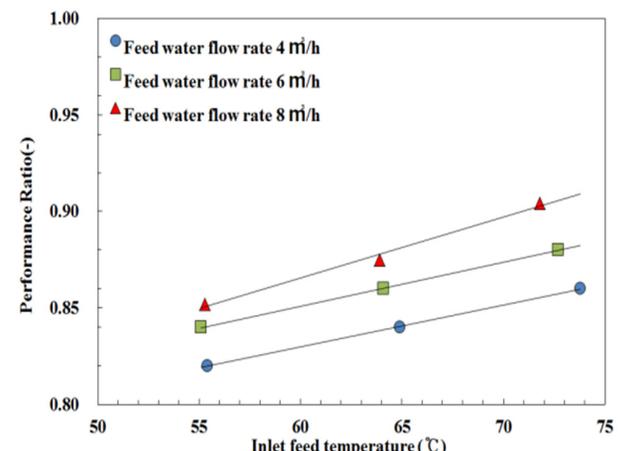


Fig. 10. The relationship between the Inlet feed temperature and the Performance Ratio



4. 결 론

본 연구에서는 VMD 모듈의 상용화 및 이를 이용한 400 m³/day 용량의 실증플랜트 구축에 앞서 VMD 모듈의 공급수 공급 조건에 따른 VMD 모듈의 열 성능 및 여과 플럭스의 특성을 분석하였다.

1) 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 경우 동일한 공급 유량 조건에서 공급수의 온도를 10 °C 증가 시킬 경우 여과플럭스 값은 최대 55%이상 증가하는 것으로 나타났으며 각각의 실험조건에서 생산된 여과 플럭스의 염 제거율은 99.99%이상으로 나타났다.

2) 공급수의 온도가 일정한 상태에서 공급수의 유량이 증가 할수록 회수율 RR(Recovery Ratio) 값은 소폭 증가하는 것으로 나타났다, 그러나 본 연구에서 사용된 VMD 모듈의 경우 공급수 유량 증가보다는 공급수의 온도 상승이 회수율 증가에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

3) VMD 모듈의 열 성능 계수인 PR값은 공급수 온도 75 °C, 유량 8 m³/h 조건에서 최대 0.904로 나타났으며 공급수 온도 55 °C, 유량 4 m³/h 조건에서 최소 0.82로 나타났다. 공급수의 온도 및 유량이 증가 할수록 VMD 모듈의 PR값은 증가하나 회수율과 동일하게 공급수 유량 증가 보다는 공급수 온도 상승이 PR 값에 미치는 영향이 더욱 큰 것으로 분석되었다. 따라서 효율적인 VMD 시스템의 운영을 위해서는 공급수의 온도를 높게 유지하고 공급수 펌프 소비동력을 고려하여 적정 유량을 형성하는 것이 필요하다.

기호설명

Nomenclature

A : area (m²)

C_p : specific heat (kJ/kg·°C)

LMH : permeate flux (ℓ/m²·h)

ΔH_v : latent heat (kJ/kg)

\dot{m} : flow rate (kg/s)

PR : performance ratio (-)

\dot{Q} : heating capacity (kW)

RR : recovery ratio(-)

T : temperature (°C)

Subscript

$dist$: distillate

$feed$: feed sea water

m : membrane

in : inlet

out : outlet

사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 17IFIP-B065893-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- McGinnis, R. L. and Elimelech, M. (2008). Global challenges in energy and water supply: the promise of engineered osmosis, *Environ Sci Technol*, 42, pp. 8625-8629.
- Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B. and P. Moulin, (2009). Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges *Water Res.*, 43, pp. 2317-2348
- Escobar, I.C. and Shafter, A. (2009) Sustainable Water for the Future: Water Recycling Versus Desalination, *Sustainability Science and Engineering*, Vol. 2, Elsevier, The Netherlands, pp. 444.
- Curcio, E. and Drioli, E. (2012) Membrane distillation and related operations-a review, *Sep. Purif. Rev.*, 34, pp. 35-86.
- Alkudhiri, A., Darwish, N., and Hial, N. (2012) Membrane distillation: a comprehensive review, *Desalination*, 287, pp. 2-18.
- Lawson, K.W. and Lloyd, D.R. (1997) Membrane distillation, *J. Membr. Sci.*, 124, pp. 1-25.
- Abu-Zeid, M. A. E. R., Zhang, Y., Dong, H., Zhang, L., Chen, H. L. and Hou, L. (2015) A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique, *Desalination*, 356, pp. 1-14.
- El-Bourawi, M. S., Ding, Z., Ma, R. and Khayet, M. (2006) A framework for better understanding membrane distillation separation process, *J. Membr. Sci.*, 285, pp. 4-29.
- Joo, H. J. and Kwak, H. Y. (2016) Experimental evaluation for the freshwater production characteristics according to the salinity conditions of vacuum membrane distillation module, *Desal. Wat. Treat.*, 57, pp. 10005-10011.

pp. 273-279

pp. 281-287

pp. 289-296

pp. 297-301

pp. 303-310

pp. 311-319

pp. 321-328

pp. 329-338

pp. 339-346

pp. 347-356

pp. 357-362

- Joo, H. J. and Kwak, H. Y. (2016) Freshwater production characteristics of vacuum membrane distillation module for seawater desalination using a solar thermal system by seawater feed conditions, *Desal. Wat. Treat.*, 57 (2016) 24645-24653.
- Joo, H. J. and Kwak, H. Y. (2016) Analysis of effect on freshwater production of vacuum membrane distillation module according to housing leak, *Journal of Korean Society of Water Wastewater*, Vol 30, No. 3, pp. 313-319.
- Sarbatly, R. and Chiam, C.K. (2013) Evaluation of geothermal energy in desalination by vacuum membrane distillation, *Appl. Energy*, 112, pp. 737-746.
- Guillén-Burrieza, E., Zaragoza, G., Miralles-Cuevas, S., and Blanco, J. (2012) Experimental evaluation of two pilot-scale membrane distillation modules used for solar desalination, *J. Membr. Sci.*, 409, pp. 264-275.
- Banat, F., Jwaied, N., Rommel, M., Koschikowski, J. and Wieghaus, M. (2007) Performance evaluation of the "large SMADES" autonomous desalination solar-driven membrane distillation plant in Aqaba, Jordan, *Desalination*, 217, pp. 17-28.
- Koschikowski, J., Wieghaus, M. and Rommel, M. (2003) Solar thermal-driven desalination plants based on membrane distillation, *Desalination*, 156, pp. 295-304.
- Sharqawy, M. H., Lienhard, J. H. and Zubair, S. M. (2013) Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data, *Desal. Wat. Treat.*, 16, pp. 354-380.
- Minglue, S., Teoh, M. M., Wang, K. Y., Su, J. and Chung, T. S. (2010) Effect of inner-layer thermal conductivity on flux enhancement of dual-layer hollow fiber membranes in direct contact membrane distillation, *J. Membr. Sci.*, 364, pp. 278-289.
- Guillén-Burrieza, E., Blanco, J., Zaragoza, G., Alarcón, D. C., Palenzuela, P., Ibarra, M. and Ibarra, W. (2011) Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system, *J. Membr. Sci.*, 379, pp. 386-396.
- Alsaadi, A. S., Francis, L., Amy, G. L. and Ghaffour, N. (2014) Experimental and theoretical analyses of temperature polarization effect in vacuum membrane distillation, *J. Membr. Sci.*, 471, pp. 138-148.
- Chiam, C. K. and Sarbatly, R. (2013) Vacuum membrane distillation processes for aqueous solution treatment-a review, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 74, pp. 27-54.
- Lee, J. G., Kim, W. S., Choi, J. S., Ghaffour, N. and Kim, Y. D. (2016) A novel multi-stage direct contact membrane distillation module: design, experimental and theoretical approaches, *Water Res.*, 107, pp. 47-56.