



파일럿 규모 막 증발 공정 적용을 위한 직접 접촉식 모듈의 투과유속 및 열에너지 이동에 관한 연구

A Study on the Flux and Heat Transfer of Direct Contact Type Module Applied for a Pilot Scale Membrane Distillation Process

김승환¹·김세운¹·이동우²·조진우^{1*}

Kim Seung Hwan¹·Kim Se Woon¹·Lee Dong Woo²·Cho Jin Woo^{1*}

¹세종대학교 환경에너지공간융합학과, ²(주)EPS 솔루션

¹Department of Environment & Energy, Sejong University, ²EPS Solution Inc.

ABSTRACT

In this study, a direct contact membrane module was manufactured to be used in a pilot scale membrane distillation process to treat 3 m³/day of the digestate produced from anaerobic digestion of livestock manure. In order to investigate the performance of the membrane module, permeate flux was measured with and without spacer inside the module under various condition of temperature difference and cross flow velocity (CFV) through the membrane surfaces. Flux recovery rate after chemical cleaning was also investigated by applying three different cleaning methods. Additionally, thermal energy consumption was theoretically simulated based on actual pilot plant operation conditions. As results, we observed flux of the module with spacer was almost similar to the theoretically predicted value because the installation of spacer reduced the channeling effect inside the module. Under the same operating condition, the permeate flux also increased with increasing temperature difference and CFV. As a result of chemical in-line cleaning using NaOCl and citric acid for the fouled membranes, the recovery rate was 83.7% compared to the initial flux when NaOCl was used alone, and 87% recovery rate was observed when only citric acid was used. However, in the case of using only citric acid, the permeate flux was decreased at a rapid rate. It seemed that a cleaning by NaOCl was more effective to recover the flux of membrane contaminated by the organic matter as compared to a cleaning by citric acid. The total heat energy consumption increased with increasing CFV and temperature difference across the membrane. Thus, further studies should be intensively conducted to obtain a high permeate flux while keeping the energy consumption to a minimum for a practical application of membrane distillation process to treat wastewater.

Key words: Cross Flow Velocity, Chemical cleaning, Membrane distillation, Spacer, Fouling, Thermal energy

주제어: 막 표면 통과유속, 화학적세정, 막 증발법, 스페이서, 열에너지

1. 서 론

분리막 증발법(Membrane Distillation, 이하 MD)이란 압력을 구동력으로 하는 기존의 공정과 달리 온도를

구동력으로 하는 처리방법으로, 유입수(feed)와 처리수(permeate)의 온도 차이에 의해 발생하는 증기압(vapore pressure) 차이를 이용하여 유입수로부터 증기상태의 물만 추출하는 공정이다(Godino et al., 1996). 처리수에 비해 온도가 높은 유입수는 비교적 높은 증기압을 갖게 되어서 유입수와 처리수 사이에 압력구

Received 10 May 2017, revised 15 May 2017, accepted 2 June 2017

*Corresponding author: Cho Jin Woo(E-mail: jinwoocho@sejong.edu)

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

배가 생기게 된다. 이때 유입수와 처리수 사이에 소수성 표면을 갖는 다공성 분리막을 배치하여 액체 상태의 물은 이동하지 않고 증기상태의 물만 유입수에서 처리수로 이동하게 한다. 이동한 수증기는 유입수보다 낮은 온도의 처리수와 만나 응축되게 된다(Lawson and Lioyd, 1997; Alkhudhiri et al., 2012). 이처럼 증기상태의 물만 추출할 수 있기 때문에 염에 대한 제거율이 높고, 유입수와 처리수 사이에 일정한 온도차이만 유지해 주면 유입수의 염 농도에 관계없이 일정한 투과유속(flux)을 얻을 수 있어 압력구동식 분리막 공정에 비하여 막 오염(fouling)이 적다는 장점이 있다(Lagana et al., 2000). 이러한 점 때문에 해수 담수화 분야에서는 기존의 역삼투 공정을 대체하거나 처리 후 발생하는 농축수 처리에 분리막 증발법을 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다(Macedonio et al., 2008; Blanco Gálvez et al., 2009). 2006년 싱가포르에서 최초로 막증발법을 적용한 실규모 해수담수화 플랜트 운전을 시도하였고, 2013년 스페인에서 태양열을 결합한 solar MD pilot plant를 운전하는 등 pilot scale의 분리막 증발법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Guillen-Burrieza et al., 2014). 또한 식음료 농축, 의약품 생산 등의 분야에서도 연구되어 왔다(Khayet et al., 2011). 하지만 분리막 친수화 방지, 스케일로 인한 막 오염 제어, 투과유속 및 제거율의 안정성 확보, 높은 에너지소비율 극복 등 실제 대규모 수처리에 적용되기 위해서는 여전히 많은 연구가 필요하다(Gryta, 2008).

분리막 증발법 공정은 온도를 구동력으로 하는 공정이기 때문에 적절한 처리효율을 얻기 위해서는 유입수와 처리수 사이에 온도 차이를 일정하게 유지하는 것이 중요하다(Schofield et al., 1990). 하지만 잠열을 함유한 수증기의 이동과 분리막 모듈자체의 열전도로 인해 유입수에서 처리수로 열이 이동하게 되고, 이는 유입수의 온도 저하와 처리수의 온도 상승을 일으켜서 결국 투과유속의 저하로 이어진다. 따라서 일정한 투과유속을 유지하기 위해서는 원수에서 손실되는 열을 지속적으로 공급해주어야 하고, 처리수에 유입되는 열을 지속적으로 제거해 주어야 한다. 따라서 효율적인 막 증발 공정을 설계하기 위해서는 이러한 열 에너지 이동에 대한 계산과 예측이 필수적이다.

최근 가축분뇨 혐기 소화액을 재이용수 수준으로 처리하여 방류하기 위하여 직접 접촉식 분리막 증발

법(Direct Contact Membrane Distillation, 이하 DCMD)의 적용 가능성을 랩 규모 실험을 통하여 살펴본 사례가 있다(Kim et al., 2016). 본 연구에서는 선행 연구 결과를 바탕으로 3톤/일 규모의 실증 플랜트를 구축하기 위한 직접 접촉식 막 증발공정 모듈을 제작하고, 모듈 내 스페이서(spacer) 부착여부 및 유입수와 유출수의 온도차이에 따른 투과유속을 살펴보고자 하였다. 또한 분리막 오염(fouling) 발생 시 유지 관리 세정을 수행하고 이에 따른 초기 플럭스 회복률을 관측하였다. 최종적으로 제작된 분리막 모듈의 에너지 소비율을 평가하기 위하여 열에너지 이동에 관한 모델을 구축하고 다양한 운전조건하에서 열에너지 소비량을 예측하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험장치 개요

3톤/일 처리 규모의 막증발 공정 파일럿 플랜트 구축을 위한 DCMD 모듈을 제작하였다(Fig. 1). 모듈은 아크릴 소재를 이용하여 외부 하우징 및 유입수와 유출수가 통과하는 공간을 제작하였고 수밀성 확보를 위하여 실리콘 소재 개스킷(gasket)을 설치하였다. 모듈 내 장착되는 분리막으로는 PVDF(polyvinylidene fluoride) 소재의 소수성 막(Millipore GVHP, USA)를 재단하여 사용하였다. 분리막 유효면적은 0.24×0.24 m 이고, 주요 재원은 Table 1에 제시하였다.

제작된 DCMD모듈의 성능평가를 위한 실험장치 구성은 다음과 같다(Fig. 2). 분리막을 사이에 두고 한 쪽에는 water bath(Scilab SB-11)와 열교환기(DIC 193-11)를 통해 데워진 유입수가 흐르고, 반대편에는 열교환기를 통해 냉각된 처리수가 흐르게 된다. 이때 열교환기 반대편에는 차가운 수돗물을 계속 흘려주어 처리수를 냉각시켰다. 유입수와 처리수는 자력펌프

Table 1. Specification of Membrane used in DCMD module

Material	PVDF
Pore size (μm)	0.22
Porosity	0.75
Thickness (μm)	125
Effective area (m^2)	0.0576
Thermal conductivity (W/m/K)	0.041

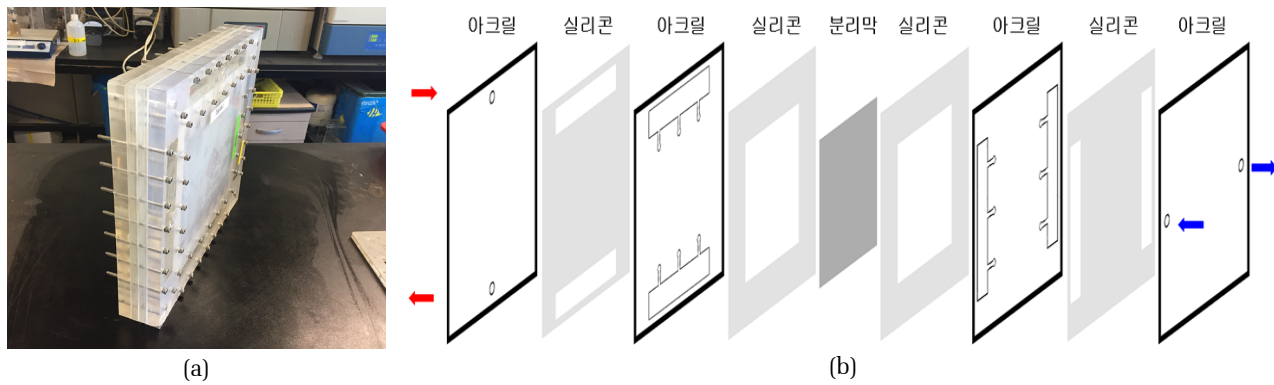


Fig. 1. DCMD module image (a) and schematic blueprint (b)

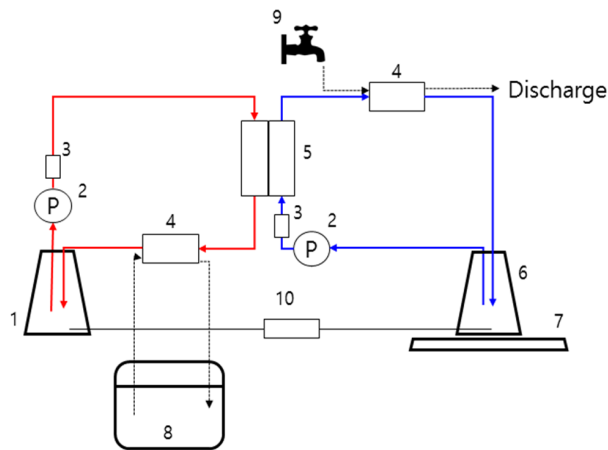


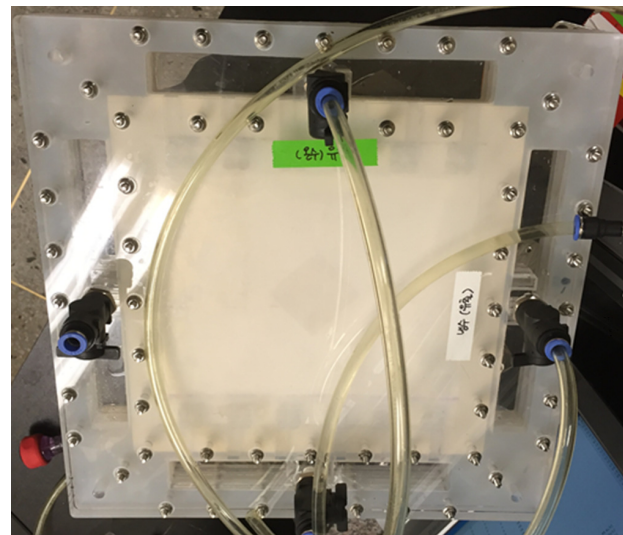
Fig. 2. Schematic diagram of DCMD performance test: (1) feed reservoir; (2) pump; (3) flow meter; (4) heat exchanger; (5) DCMD module; (6) permeate reservoir; (7) analytical balance; (8) water bath; (9) tap water; (10) thermometer

(Wilo PM-015NM)를 이용하여 일정한 유속으로 분리막 표면을 지나가도록 하였다. 유입수와 처리수의 온도 차이에 의해 증기압차이가 발생하게 되고, 분리막을 경계로 유입수에서 처리수로 수증기가 넘어가게 된다. 넘어간 수증기는 처리수에 의해 응축되어 처리수의 양을 증가시킨다. 증가한 처리수의 양을 전자저울(Ohaus arg4202)로 측정하여 투과유속(flux)을 산출하였다.

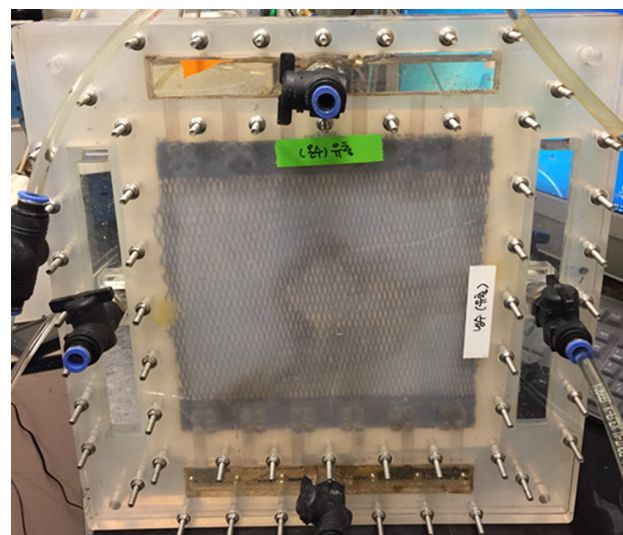
2.2 실험조건

2.2.1 투과유속 측정

제작한 모듈의 투과유속을 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 먼저 분리막 모듈 내 스페이서 존재 여부에 따른 투과유속 변화를 알아보기 위하여 막 표면 통과



(a)



(b)

Fig. 3. DCMD module without spacer(a) and with spacer(b)

유속(Cross flow velocity, CFV)이 0.09 m/s로 동일한 조건에서 스페이서를 설치한 모듈과 설치하지 않은 모듈에 대하여 실험을 진행하였다. 이때 스페이서는 분리막 양면(유입수와 유출수 측면)에 각각 설치하였다(Fig. 3). 이후 스페이서가 설치된 모듈에 대하여 막 표면 통과유속(CFV)에 따른 투과유속 변화를 살펴보기 위하여 통과유속 0.09 m/s와 0.18 m/s의 두 가지 조건에 대하여 유입수 초기 온도를 65 °C로 동일하게 설정 후 운전하면서 투과유속을 관측하였다. 모든 실험에 있어서 유입수와 유출수 온도가 정상상태에 도달한 이후부터 생산되는 처리수에 대하여 투과유속을 측정하였다. 정상상태에서 유입수 온도는 조건에 따라 58~61.6 °C, 처리수 온도는 27~36.8 °C로 유지되었다. 유입수와 처리수 모두 초순수 제조장치(Human Corp. Human power)를 이용하여 생산한 de ionized water를 사용하였고, 온도는 휴대용 측정 장비(WTW multi 3420)를 이용하여 실시간으로 측정하였다.

2.2.2 분리막 세정에 의한 투과유속 회복률 관측

제작된 분리막 모듈에 대한 최적 세정 조건을 찾기 위하여 오염된 막에 대한 세정 실험을 수행하였다. 세정 시점은 가축분뇨 혐기 소화액을 유입수로 사용하여 막 증발공정을 운전하는 과정에서 관측 투과유속이 10 L/m²/hr 이하가 되었을 때 실시하였다. 유입수는 가축분뇨 혐기 소화액을 일정 온도까지 가열하여 사용하였으며, 성상은 Table 2에 나타내었다. 세정 실험을 위한 막 증발

Table 2. Composition of feed solution

Components	Concentration (mg/L)
SS	386.7±52.5
COD	1,611.6±115.5
TN	741.8±22.9
NH ₄ ⁺ -N	731.2±66.2
TP	31±3.3
PO ₄ ³⁻ -P	12.5±1.5
pH	8.5±0.1

Table 3. Condition of chemical cleaning experiment

Run	Main target of foulant to be cleaned	Cleaning agent	Cross Flow Velocity (m/s)	Cleaning time (hours)
1	Organic	3% NaOCl	0.2	5
2	Inorganic	3% Citric acid	0.2	5
3	Organic + Inorganic	3% NaOCl + 3% Citric acid	0.2	5 + 5

공정에서 유입수의 온도는 60~63 °C, 처리수의 온도는 23~25 °C, CFV는 0.2 m/s로 유지하였다.

막 세정 조건은 선행연구의 랩 규모 모듈을 이용한 세정실험 결과를 바탕으로 유기 오염물질과 무기 오염물질 제거를 위한 화학적 세정(chemical cleaning)을 시행하였다(Kim et al., 2016). 단, 선행 연구에서는 세정 시 분리막을 모듈에서 탈착하여 계외 세정을 수행한 반면, 본 연구에서는 분리막 탈착 없이 세정용액을 0.2 m/s의 속도로 원수 라인을 통해 모듈 내로 순환시켜 주는 in line 방법으로 수행하였다. 세정은 총 세 가지의 다른 방식으로 시행하였다. 첫 번째 방법에서는 3% sodium hypochlorite (NaOCl) 용액만을 이용하여 5 시간동안 세정하였으며 이는 주로 유기물 유래 막 오염물질의 제거를 목적으로 하였다. 두 번째 세정은 3% citric acid (C₆H₈O₇) 용액만을 이용하여 5 시간동안 세정하였고, 여기서는 무기물 유래 막 오염물질의 제거가 될 수 있도록 의도한 것이다. 세 번째 세정에서는 첫 번째와 두 번째 세정 방법을 각 5시간 동안 연속적으로 적용하였다. 자세한 세정실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

2.3 에너지 소비량 산출 모델

분리막 증발법 공정 중에 많은 양의 열이 분리막을 통해 유입수에서 처리수로 이동하게 되는데, 이는 분리막의 열전도에 의한 이동과 분리막 공극을 통해 투과된 수증기가 함유하고 있는 잠열의 이동으로 나눌 수 있으며, 다음 식(1)~(4)로 표현할 수 있다(Souhaimi and Matsuura, 2011).

$$Q_m = Q_c + Q_v \quad (1)$$

$$Q_c = -k_m/\delta \times (T_{m,f} - T_{m,p}) \quad (2)$$

$$Q_v = J_w \times \Delta H_{V,w} \quad (3)$$

$$\Delta H_{V,w} = 1.7535 \times T + 2,024.3 \quad (4)$$



여기서, Q_m 은 분리막을 통해 이동한 총 열량 (W/m^2), Q_c 는 전도에 의한 이동 열량 (W/m^2), Q_v 는 수증기 투과에 의한 이동 열량 (W/m^2), k_m 은 분리막의 열전도도 (W/mK), δ 는 분리막의 두께(m), $T_{m,f}$ 와 $T_{m,p}$ 는 각각 분리막의 유입수 쪽 표면과 처리수 쪽 표면의 온도 (K), J_w 는 처리수의 투과유속 ($L/m^2/h$), $\Delta H_{v,w}$ 는 순수한 물의 잠열 (kJ/kg), T 는 유입수의 절대온도(K)이다. 분리막의 열전도도와 두께는 고유한 값을 가지며 본 연구에 사용된 분리막에 대해서는 각각 0.041 W/mK와 125 μm 를 적용하였다 (Souhaimi and Matsuura, 2011). 분리막 표면의 온도 ($T_{m,f}$ 와 $T_{m,p}$) 및 처리수 투과유속 (J_w)은 선행연구에서 개발한 투과유속 예측 모델을 이용하여 구할 수 있다(Kim, 2017; Lawson and Lloyd, 1997).

이러한 열에너지 이동에 의해 유입수의 온도는 감소하며 따라서 막 증발 공정 운전을 연속적으로 유지하기 위해서는 열에너지 이동량과 동일한 양의 에너지를 지속적으로 유입수에 공급해 줘야한다. 이때 일정한 온도의 처리수가 모듈 내부를 통과한다고 가정하면 여기서 산출되는 열에너지 이동량은 바로 열에너지 소비량과 동일하다.

열에너지 소비량 산정을 위한 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 처리수 온도 20 °C 및 유입수 온도는 50, 60, 70 °C의 3가지 조건으로 변화시키고, 이때 막 표면유속 (CFV)을 0.09, 0.18, 0.27 m/s로 다르게 하여 총 9가지 운전조건을 가정하였다. 시뮬레이션 대상 분리막 모듈은 가로 0.24 m, 세로 0.24 m의 분리막이 총 35장이 장착한 공정을 대상으로 하였으며 이는 3 m³/일 처리 규모의 파일렛 플랜트에 설치된 분리막과 동일한 개수이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 투과 유속

유입수와 유출수 온도변화가 없이 일정하게 유지되는 정상상태에 도달하였을 때의 각 운전조건 별 온도, 투과유속 실제 측정값, 투과유속 예측값을 Table 4에 제

시하였다. Run 1의 경우 스페이서를 설치하지 않은 상태에서 유입수 온도 61.6 °C, 처리수 온도 24.8 °C, CFV 0.09 m/s 의 정상상태 운전조건에 대하여 투과유속은 4.44 L/m²/hr 로 관측되었다. Run 2의 경우 스페이서를 설치한 후 유입수 온도 58.2 °C, 처리수 온도 27.3 °C, CFV 0.09 m/s 의 정상상태 운전조건에서 투과유속은 9.46 L/m²/hr로 측정되었다. 스페이서 설치 전(Run 1)과 후(Run 2)의 결과를 비교하면, 설치 후 유입수와 처리수의 정상상태 온도 차이는 설치 전에 비해 16% 낮게 유지되었지만 오히려 투과유속은 스페이서를 설치한 경우가 설치 전보다 113% 더 높게 관측되었다. 이는 스페이서를 설치하지 않은 경우 운전 중 모듈 내부를 통과하는 유입수와 처리수가 모듈 내부에서 막 전체 표면에 균일한 분포로 흐르지 못하고 특정 유로(pathway)를 형성하여 흐름으로써 분리막의 실제 유효면적(effective area)이 감소하게 되는 채널링(channeling) 현상이 발생하였기 때문이다. 반면, 스페이서가 설치된 Run 2의 경우는 스페이서로 인하여 채널링 현상을 최소화하여 유입수와 처리수가 막 전체를 균일하게 통과하게 함으로써 전체적으로 유효 막 면적 대비 통과하는 수증기의 양이 보다 많기 때문에 관측되는 투과유속값도 스페이서가 없는 모듈에 비하여 증가하게 된다.

한편, 동일한 조건에서 막 표면 통과유속(CFV)이 증가할수록 투과유속은 증가한다. 즉, 모두 스페이서가 설치된 모듈을 대상으로 한 Run 2와 Run 3의 결과를 비교하면, 정상상태에서 유입수와 유출수간의 온도차이가 크지 않음에도 불구하고 CFV를 0.09 m/s에서 0.18 m/s로 2배 증가시킬 때 투과유속은 9.46 12.18 L/m²/h 에서 12.18 L/m²/h로 약 29% 증가하였다. 이는 막 표면을 통과하는 유속(CFV)이 증가할수록 유체와 막 표면 사이에 형성되어 있는 열전달 경계층(heat transfer boundary layer)이 소산되어 유체의 온도가 막 표면으로 손실 없이 효과적으로 전달될 수 있도록 해주기 때문이다. 이러한 상태에서는 온도분극 현상이 최소화되면서 투과유속은 증가하게 된다(Liu et al., 2013).

Table 4. Flux observed with various operating condition

Run	Feed temp. (°C)	Permeate temp. (°C)	Δ Temp. (°C)	Cross Flow Velocity (m/s)	Spacer	Observed flux (L/m ² /hr)	Predicted flux (L/m ² /hr)
1	61.6	24.8	36.8	0.09	X	4.44	12.27
2	58.2	27.3	30.9	0.09	O	9.46	10.14
3	58	31	27	0.18	O	12.18	12.93

pp. 197-204
pp. 205-217
pp. 219-228
pp. 229-236
pp. 237-248
pp. 249-256
pp. 257-262

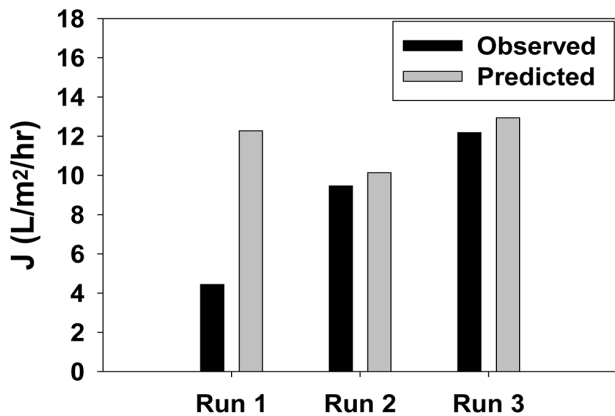


Fig. 4. Observed flux and predicted flux on Run 1(Spacer X, $\Delta T=36.8^{\circ}\text{C}$, $\text{CFV}=0.09\text{m/s}$), Run 2(Spacer O, $\Delta T=30.9^{\circ}\text{C}$, $\text{CFV}=0.09\text{m/s}$), Run 3(Spacer O, $\Delta T=27^{\circ}\text{C}$, $\text{CFV}=0.18\text{m/s}$)

한편, 선행연구에서 도출된 투과유속 예측 모델을 적용하여 Run 1, 2, 3의 조건에 해당하는 투과유속을 예측한 결과 각각 12.27, 10.14, 12.93 L/m²/hr 로 계산되었다 (Kim, 2017). Fig. 4. 에는 실제 투과유속 관측값과 모델에 의한 예측값을 비교하여 나타내었다. 투과유속 측정값에 대한 예측값의 오차율은 각각 63.8%, 6.7%, 5.8%로 스페이서를 설치하지 않은 Run 1의 경우를 제외하면 관측값과 예측값에 큰 차이는 없었다. 이는 앞서 논의한대로 스페이서가 설치되지 않은 경우 채널링 현상에 의해 실제 유효 막 면적이 감소하여 투과유속이 낮게 관측되는 반면, 투과유속 예측 모델은 이러한 효과를 반영하지 못하며 따라서 관측 값보다 높은 투과유속 값을 도출하기 때문이다.

3.2 분리막 세정에 의한 투과유속 회복률

Fig. 5는 세정실험에 따른 막 증발공정의 투과유속 변화를 나타내고 있다. 운전초기 투과유속은 16.48 L/m²/hr 였으며 이후 점차 감소하여 24시간이 지난 후 10 L/m²/hr 이하의 투과유속을 나타내었다. 이 시점에서 Table. 3의 Run 1 에 해당하는 세정을 수행하였고 그 결과 투과유속이 13.48 L/m²/hr 로 회복되었다. 이후 5시간 동안 평균 13.23 L/m²/hr 를 유지하다가 다시 감소하기 시작하여 12시간 이후 투과유속이 10 L/m²/hr 이하로 감소하였고 이 때 Table. 3의 Run 2 에 해당하는 세정을 수행하였다. 세정 이후 투과유속은 14.34 L/m²/hr 까지 회복되었지만 회복된 투과유속이 일정시간 유지되지 못하고 곧 바로 선형적으로 감소하기

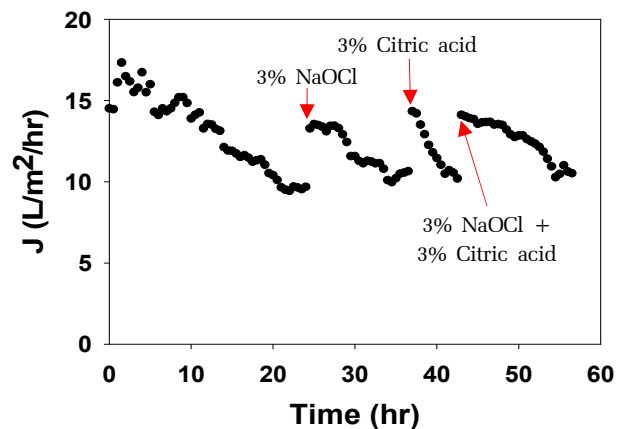


Fig. 5. Variation of permeate flux after chemical cleaning

시작하여 6시간 이후에 10 L/m²/hr 까지 감소하였다. 이후 오염된 분리막을 대상으로 다시 Run 3의 방법에 따른 세정을 수행하였다. 그 결과 투과유속은 14.12 L/m²/hr까지 회복되었고, 이후 Run 1의 방법으로 세정한 이후 투과유속 감소 경향과 유사하게 12시간이 지난 후 다시 10 L/m²/hr 이하에 도달하였다.

세정 직후 초기 투과유속 16.48 L/m²/hr 대비 투과유속 회복률은 Run 1, Run 2, Run 3 각각 81.8, 87, 85.7%로 세 가지 조건 모두 비슷한 결과를 나타내었다. 하지만 유기 오염물질에 대한 세정(3% NaOCl)을 수행한 Run 1과 Run 3에서는 회복된 투과유속이 5시간 이상 유지되었고 10 L/m²/hr에 도달하기까지 12시간가량 유지된 반면, 무기 오염물질에 대한 세정(3% Citric acid)만을 수행한 Run 2에서는 세정 이후 회복된 투과유속이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Citric acid 만으로는 분리막 표면 및 공극 내부에 쌓인 유기 오염물질을 효과적으로 제거하지 못했기 때문이며, 따라서 가축분뇨 혐기 소화액을 대상으로 한 분리막 증발법 공정에서는 분리막 세정 시 NaOCl을 이용한 세정을 주로 수행하고 아울러 무기 오염물질에 의한 스케일 방지를 위해 추가적으로 Citric acid에 의한 세정을 수행하는 것이 막 오염 제어에 효과적일 것으로 판단된다.

3.3 열에너지 소비량

상기 식(2)와 식(3)을 이용하여 계산된 전도에 의한 열 에너지 이동량과 수증기 투과에 의한 잠열 에너지 이동량을 Table 5에 제시하였다. 동일한 온도 차이에서는



Table 5. Heat energy consumption in Membrane Distillation

Feed temp. (°C)	Permeate temp. (°C)	Cross Flow Velocity (m/s)	Predicted flux (L/m ² /hr)	Heat flow rate (kcal/hr)		
				Convection	Conduction	Total (Heat Energy consumption)
50	20	0.09	7.51	9,328	10,052	19,380
		0.18	10	12,450	13,021	22,502
		0.27	11.13	13,870	14,302	23,922
60	20	0.09	12.03	15,017	12,717	27,734
		0.18	16.55	20,725	16,795	33,443
		0.27	18.74	23,487	18,623	36,205
70	20	0.09	17.73	22,236	14,975	37,211
		0.18	25.25	31,777	20,189	46,752
		0.27	29.11	36,700	22,623	51,676

막 표면 통과 유속(CFV)이 증가할수록 그에 비례하여 수증기 투과에 의한 잠열 이동량(convection)과 열전도에 의한 이동량(conduction) 모두 증가하는 양상을 보였다. 막 표면 통과 유속(CFV)이 증가할수록 온도분극 현상을 최소화함으로써 투과유속이 증가하고, 식(3)에서 제시된 바와 같이 수증기 투과에 의한 잠열 이동량은 투과유속에 비례하므로 결국 CFV증가에 따라 잠열 이동량도 증가하게 된다 (Liu et al., 2013). 열전도에 의한 이동량의 경우는 식(2)와 같이 유입수와 처리수의 온도 차이에 비례하고 이 온도 차이 역시 CFV가 증가할수록 온도분극 현상을 감소시켜 보다 높은 온도 차이를 유지시킬 수 있으므로 전도에 의한 열 이동량 역시 증가하게 된다. 동일한 CFV조건에서는 유입수와 유출수의 온도차이가 클수록 수증기 투과유속과 막 표면 간 온도차이가 증가하므로 열전도 이동량 및 잠열 이동량이 증가한다. 결론적으로 CFV를 증가시키거나 유입수와 유출수의 온도 차이를 높게 유지하는 것 모두 투과유속을 증가시키며, 투과유속이 증가할수록 전체 열에너지 이동량은 증가하게 된다. 따라서 투과유속의 증가는 열에너지 총 소비량의 증가를 초래한다.

4. 결 론

본 연구에서는 가축분뇨 혐기소화액 처리를 위한 파일렛 규모(3m³/일) 막 증발 장치를 구축하기 위한 분리막 모듈을 자체 제작하였다. 제작된 분리막 모듈의 성능을 살펴보기 위하여 다양한 조건에서 투과유속 및 세정

후 투과유속 회복률을 조사하였고, 실제 파일렛 장치 운전 조건에 기반하여 열에너지 이동량 및 열에너지 소비량을 시뮬레이션 하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 모듈 내부에 스페이서를 설치한 경우에는 채널링 효과를 감소시켜 이론적인 예측치와 유사한 수준의 투과유속이 관측되었으며 이때 온도차이가 높을수록, 막 표면 통과유속(CFV)가 증가할수록 관측되는 투과유속은 증가하였다. 오염된 분리막에 대하여 NaOCl과 Citric acid를 이용하여 화학적 in-line세정을 수행한 결과, NaOCl만을 사용한 경우 회복률은 초기 투과유속 대비 83.7% 였고, Citric acid만을 사용한 경우 회복률은 87% 수준이다. 하지만 Citric acid만을 사용하는 경우에는 회복 투과유속을 유지하지 못하고 빠른 속도로 투과유속의 감소가 일어났으며 이는 NaOCl에 비하여 유기물에서 기인하는 막 오염 유발물질의 제거가 원활히 수행되지 못했기 때문으로 판단된다. 열에너지 소비량의 경우 투과유속이 증가할수록 전체 열에너지 이동량이 증가함에 따라 열에너지 소비량 역시 증가하게 된다. 막 증발법을 이용한 하폐수 처리의 경우 실제 현장에서의 적용성을 확보하기 위해서는 이러한 에너지 소비량을 최소한으로 유지하면서도 높은 투과유속을 얻을 수 있어야 할 것이다. 따라서 향후 연구에서는 열에너지를 효율적으로 활용하고 소비량을 줄이기 위한 연구가 이루어져야 한다. 즉, 분리막 재질을 개선하거나 모듈 디자인을 최적화하여 분리막 모듈의 열 전도성을 낮추거나 수증기 투과에 따라 처리수로 이동하는 잠열을 열교환기를 통해 회수하여 유입수로 순환시키는 방법 등이 고려될 수 있다.

pp. 197-204

pp. 205-217

pp. 219-228

pp. 229-236

pp. 237-248

pp. 249-256

pp. 257-262

사 사

본 연구는 환경부 환경산업선진화기술개발사업(ARQ 201403220)의 지원을 받아 수행되었음

References

- Godino, P., Peña, L. and Mengual, J.I. (1996) Membrane distillation: theory and experiments, *Journal of Membrane Science*, 121(1), pp. 83-93.
- Alkhudhiri, A., Darwish, N., Hial, N. (2012) Membrane distillation: a comprehensive review, *Desalination*, 287, pp. 2-18.
- Lawson, K.W., and Lloyd, D.R. (1997) Membrane distillation, *Journal of Membrane Science*, 124, pp. 1-25.
- Lagana, F., Barbien, G., Drioli, E. (2000) Direct contact membrane distillation: modelling and concentration experiments, *Journal of Membrane Science*, 166, pp. 1-11.
- Macedonio, F., and Drioli, E. (2008) Pressure-driven membrane operations and membrane distillation technology integration for water purification, *Desalination*, 223, pp. 396-409.
- Blanco Gálvez, J., García-Rodríguez, L. and Martín-Mateos, I. (2009) Seawater desalination by an innovative solar-powered membrane distillation system: the MEDESOL project, *Desalination*, 246(1), pp. 567-576.
- Guillen-Burrieza, E., Ruiz-Aguirre, A., Zaragoza, G. and Arafat, H.A. (2014) Membrane fouling and cleaning in long term plant-scale membrane distillation operations. *Journal of Membrane Science*, 468, pp. 360-372.
- Gryta, M. (2008) Fouling in direct contact membrane distillation process. *Journal of Membrane Science*, 325(1), pp. 383-394.
- Khayet, M., and Matsuura, T. (2011) *Membrane distillation: principles and applications*, Elsevier, Oxford, pp.5.
- Schofield, R., Fane, A., Fell, C. and Macoun, R. (1990) Factors affecting flux in membrane distillation. *Desalination*, 77, pp. 279-294.
- Kim, S., Lee, D.W. and Cho, J. (2016) Application of direct contact membrane distillation process to treat anaerobic digestate. *Journal of Membrane Science*, 511, pp. 20-28.
- Souhaimi, M.K. and Matsuura, T. (2011) *Membrane distillation: principles and applications*, Elsevier.
- Kim, S.H. (2017) Flux model development for a membrane distillation with the effect of suspended solids in anaerobic digestate of livestock wastewater, M.S Thesis, Sejong University.
- Liu, H., and Wang, J. (2013) Treatment of radioactive wastewater using direct contact membrane distillation, *Journal of Hazardous Materials*, 261, pp. 307-315.