

휴대용 정삼투 담수화 장치의 설계 및 평가에 관한 연구

박철우* · 강 호* · 정동호** · 차재철*** · 김대중*†

* 서강대학교 기계공학과, ** 현대중공업, *** 현대자동차

Design and Evaluation of Portable Forward Osmosis Desalination Device

Chul-Woo Park*, Ho Kang*, Dongho Jung**, Jaechul Cha*** and Daejoong Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

** Hyundai Motor Company

** Hyundai Heavy Industries

(Received August 14, 2012 ; Revised October 8, 2012 ; Accepted October 9, 2012)

Key Words: Desalination(담수화), Seawater(해수), Osmosis(삼투), Forward Osmosis(정삼투), Semi-Permeable Membrane(반투과성 막), Drinking Water(음용수), Ammonium Bicarbonate(중탄산암모늄), Portability(휴대성)

초록: 식수의 보급이 원활하지 않은 경우를 대비하여 저에너지, 자급형 휴대용 담수화 장치를 설계하고 실험하여 그 활용 가능성을 제시하였다. 장비 구성이 단순한 정삼투 현상을 이용하여 휴대용 담수화 장치를 설계하였으며 중탄산암모늄을 이용하여 적은 에너지를 이용한 담수화가 가능하도록 하였다. 여러 농도의 중탄산암모늄 수용액과 염화나트륨 수용액을 각기 사용하여 휴대용 담수화 장치의 담수화 성능을 조절할 수 있음을 확인하였다. 염 제거 실험을 통하여 음용 가능한 물을 확보하였고 온도를 증가 시킴에 따라 그 시간을 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract: This study aims to design a portable desalination device and discusses the feasibility of the device for overcoming a shortage of safe drinking water. A low-energy, self-supporting, and portable desalination device is designed based on forward osmosis (FO) using an ammonium bicarbonate solution. Experiments with various concentrations of ammonium bicarbonate solution and sodium chloride solution showed that the portable desalination device's performance such as volume and flow rate of desalting water and time required satisfied drinking water standards. The device performance is controlled by varying the concentration and temperature of the solution.

1. 서론

21 세기에 접어들면서 물부족 현상이 대두되고 이에 따라 대체 수자원 확보 문제를 해결하기 위한 많은 노력이 있어왔다.⁽¹⁾ 이러한 노력의 일환으로 각종 담수화에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며 그 중 해수의 담수화 공정에의 적용도 증가하고 있다.^(2,3) 해수담수화는 해수 중에 녹아있는 약 3.5% (35,000 ppm TDS)의 염분 및 이물질을 제거하여 이용 가능한 담수를 생산하는 것으로, 특히 해수담수화는 지구상에 무한정 존재하는 해수를 담수화하기 때문에 지하수나 빗물 등을 이용한

다른 담수화 방법들에 비해 수자원의 공급이 매우 용이하다.

해수담수화 기술은 상변화를 이용하는 증발법/냉동법과 분리막의 여과를 이용하는 방법으로 크게 분류할 수 있다. 증발법은 세부적으로 다중효용법 (MED; Multiple-effect distillation), 증기압축법 (VC; Vapor compression), 다단 프레쉬법 (MSF; Multi-stage flash distillation) 등⁽⁴⁾으로 구분되며 분리막을 이용하는 방법은 역삼투법 (RO; Reverse osmosis), 전기투석법 (ED; Electrodialysis) 및 정삼투법 (FO; Forward osmosis) 등^(5,6)으로 나누어진다.

그러나 도서지역이나 오지와 같이 전력설비나 상수도 시설이 부족한 저개발지역에서는 식수의 확보가 중요한 문제이지만 초기 구축비용, 운영비용, 보수 및 유지 인력 부족 등으로 담수화 설비의 운영이 사실상 불가능한 경우가 많다. 위에

† Corresponding Author, daejoong@sogang.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

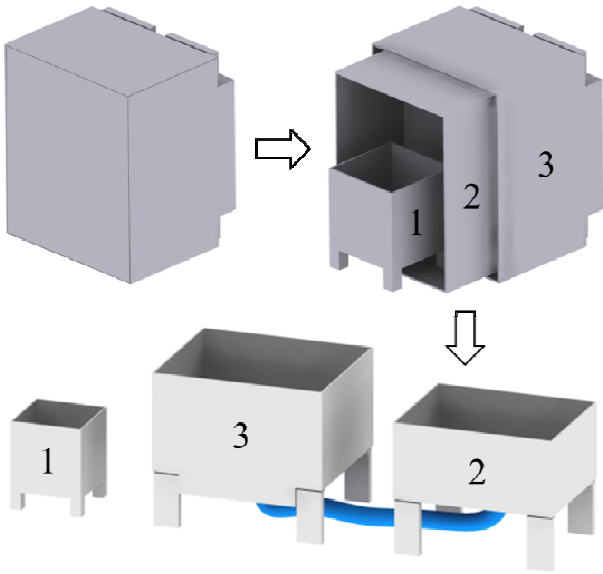


Fig. 1 Assembling schematic of portable desalination device. Each parts can be departed and rejoinable. Other parts can be stored in seawater reservoir when departed

서 언급된 담수화 방법들은 주로 대용량담수화 플랜트에 적용하는 기술 위주로 발전되어 왔으므로 특정 지역을 위한 소용량 담수화 기기로의 적용이 어렵다는 단점이 있다. 또한 위와 같은 기술들은 담수화에 많은 에너지원이 필요하게 되어 위급한 상황, 지속적인 에너지원의 조달이 어려운 상황에서 사용되기 어렵다.

따라서 이러한 지역 및 상황에 맞추어 유용하게 사용될 수 있는 자급형, 저에너지, 소용량 담수화 장치의 개발이 필요하다.⁽⁷⁾

기존의 소용량 담수화 기술로는 증기압축식, 태양열을 이용한 방식, 역삼투식 등이 있지만⁽⁸⁾ 담수화에 필요한 에너지원의 확보와 고압 펌프, 집열기와 집열된 열교환 매체 등의 현실적 문제들로 인한 단점이 존재한다.

역삼투 방식을 이용하기 위하여는 구동력으로서 삼투압보다 높은 압력이 필요하기 때문에 그를 위한 고압펌프가 필요하며, 증발법의 경우 물을 증발시킬 수 있는 열에너지가 필요하다. 특히 태양열을 이용하는 경우 집진기 등의 추가적인 장치가 필요하다.

서로 다른 농도를 갖는 용액과 반투과성 막이 존재할 때, 반투과성 막을 통해 낮은 농도의 용액에서 고농도를 갖는 액체 쪽으로 용매가 이동하는 현상을 삼투현상이라 말한다. 이 때, 용질은 반투과성 막에 의하여 제거되고 용매의 이동으로 인하여 압력이 발생하게 되는데, 이를 삼투압이라고

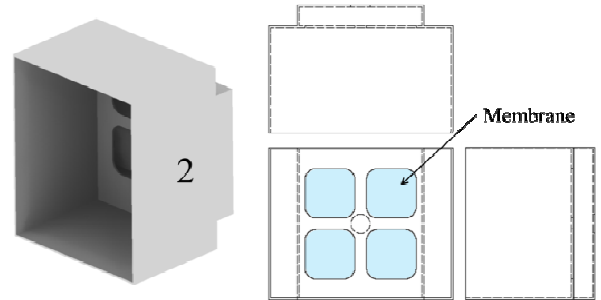


Fig. 2 Third angle drawing of membrane device. FO desalination occurs through 4 sheets of 15 x15cm FO membranes

지칭하며 정삼투 공정에서의 구동력이 된다.⁽⁹⁾ 정삼투 현상에서는 삼투압 자체가 구동력이 되기 때문에 역삼투 방식에서와 같이 장치 구동을 위한 고압 펌프가 필요하지 않으며 이는 장치의 휴대성을 높이고 에너지 소모량을 줄인다는 점에서 매우 효율적이다.

해수담수화방법으로써 정삼투 현상을 사용할 경우 저농도 용액으로서 해수가 사용되고 고농도의 용액이 희석되기 때문에 정삼투 공정이 일어난 후 희석된 고농도 용액에서 용질을 분리하여야 하지만 용질 선정을 통해 타 방식에 비해 효율을 높일 수 있는 장점이 있어 많은 연구가 진행되고 있으며⁽¹⁰⁻¹²⁾ 본 연구에서 사용된 중탄산암모늄(NH₄HCO₃)은 자연적으로 이산화탄소와 암모니아 기체로 분해되지만 섭씨 60 도 이상에서 그 분해 및 승화가 가속화된다. 따라서 섭씨 100 도 이상의 고온 및 잠열량까지 고려하여 가열해야 하는 증발식에 비해 높은 효율을 가지고 있다.

이러한 이유로 높은 에너지원과 유지가 어려운 추가 장치들을 필요로 하지 않는 정삼투식 담수화 장치에 대한 연구 및 담수화 장치의 개발이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 도서지역, 저개발 지역 등에서 사용할 수 있는 Fig. 1 과 같은 자급형 소용량 담수화 장치로서 정삼투방식을 이용한 휴대용 담수화 장치를 고안하고 그에 대한 실험을 수행하였다. 그로부터 단순한 구조와 저에너지원으로 구동이 가능한 소용량 정삼투식 담수화 장치의 적용 가능성을 제시하고자 한다.

2. 휴대용 정삼투 담수화 장치 설계

정삼투 방식으로 담수를 생산하기 위해서는 정삼투 장비와 탈염 장비가 필수적이다. 정삼투 장비는 저농도 용액인 해수를 위한 용기 (2 번 용기)

와 고농도 용액인 중탄산암모늄 수용액을 위한 용기(3 번 용기)의 두 가지로 이루어져 있으며 탈염 장비는 별도로 1 번 용기를 사용한다. 이 때, 정삼투 장비에 포함된 3 번 용기는 Fig. 2 와 같이 4 장의 반투과성 막과 배관으로 구분 및 연결되어 있다.

담수화 장치를 휴대용으로 만들기 위해서 담수화 장치 전체의 부피가 매우 중요하다. 따라서 담수화 장치의 전체 부피를 최소화하기 위하여 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 정삼투 장비와 탈염 장비를 포개어 수납할 수 있도록 고안하였다. 장치 전체를 한번에 휴대할 수 있도록 하기 위해 정삼투 장비의 두 용기를 연결하는 배관 등을 조립 및 분리가 가능하도록 설계하고 탈염 장비의 열원으로는 별도의 고체 연료를 사용한다. 이와 같은 방법으로 최소화된 휴대용 담수화 장치는 40 cm x 48 cm x 28 cm 의 크기로 약 54 L 의 해수를 담수화한다.

HTI 사의 정삼투용 반투과성 막을 사용하였으며 막은 가로, 세로 각 15 cm 의 크기를 가진다. 담수화량을 늘이기 위하여 4 장의 막을 사용하였고 이를 이용하여 설계된 정삼투 장비는 16 mL/min 의 성능을 보여준다.

실험에 사용된 중탄산암모늄은 상온에서 17.8 wt% 의 용해도를 가진다. 중탄산암모늄은 자연적으로 암모니아와 이산화탄소 기체로 분해/승화되는 성질을 가지지만 섭씨 60 도 이상에서 그 빠르기가 더욱 가속화되는 특성이 있다.

실험에는 염화나트륨 수용액과 중탄산암모늄 수용액을 사용하였다. 35,000 ppm 염화나트륨 수용액을 사용하여 해수를 대체하도록 하였으며 고농도 용액으로서 17.8 wt%의 염화나트륨 수용액, 17.8 wt% 중탄산암모늄 수용액 및 과포화 중탄산암모늄 수용액을 각 실험에 따라 사용하였다.

이러한 휴대용 담수화 장치에 대하여 염의 종류에 따른 담수화 실험, 중탄산암모늄 과포화 수용액의 담수화 실험, 온도에 따른 염 제거 실험을 진행하였으며 Fig. 3-5 의 그래프에 추세선(실선)과 함께 표시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 염의 종류에 따른 담수화 실험

담수화 실험 수행에 있어 정삼투 현상의 저농도 용액으로서 해수 대신 35,000 ppm 염화나트륨 수용액을 사용하였으며, 고농도 용액으로서 17.8 wt%의 염화나트륨 수용액과 중탄산암모늄 수용액을 각기

실험하여 결과를 비교하였다.

Fig. 3 은 고농도 용액으로서 염화나트륨 수용액을 사용한 실험의 결과이며 Fig. 4 는 고농도 용액

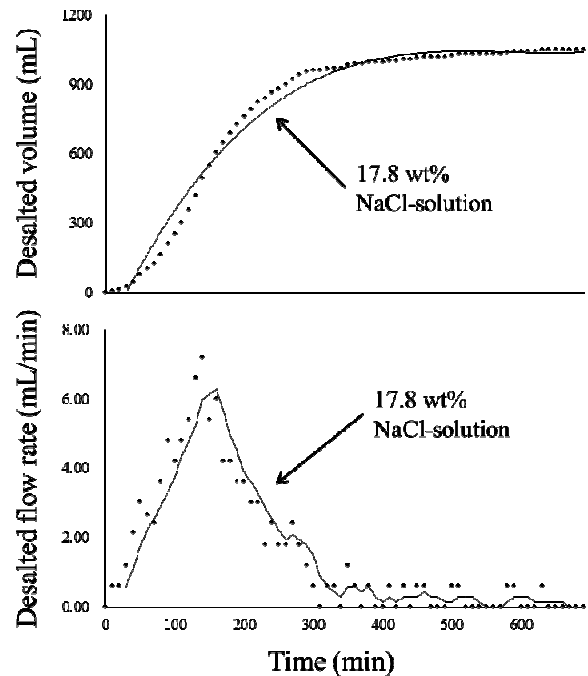


Fig. 3 Sodium chloride solution desalting experiment. Desalted volume saturates near 1000mL after 500 minutes. Desalted flow rate shows peak near 150 minutes

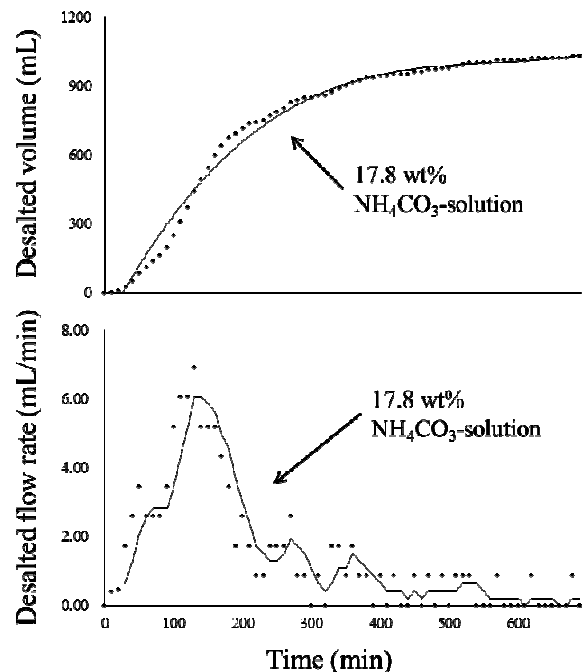


Fig. 4 Ammonium Bicarbonate solution desalting experiment. Desalted volume saturates near 1000mL. Desalted flow rate shows peak near 150 minutes and is higher than the case using NaCl after 240 minutes

으로 17.8 wt% 중탄산암모늄 수용액을 사용한 실험의 결과이다. 상단에는 반투과성 막 1 장당 총 담수화량이 시간에 따른 그래프로 나타나고 하단에는 시간에 따른 담수화 유량을 표시하였다. 그 결과 전반적인 담수화의 경향은 동일하지만 약 240 분 부근에서 담수화량의 적은 차이가 관찰되었다. 반투과성 막을 기준으로 같은 물질을 염으로 사용한 경우보다 염의 종류가 다를 경우 담수화량이 줄어든 것으로 보인다. 그러나 충분한 시간이 경과하면 고농도용액의 종류와 관계없이 담수화량이 1000 mL 에 수렴하며 동일해졌다.

3.2 중탄산암모늄 과포화 수용액의 담수화 실험

본 실험에서는 휴대용 담수화 장치의 단위시간당 담수화량을 조절하기 위하여 염으로 사용된 중탄산암모늄을 용매인 물에 대한 용해도 이상으로 혼합하였다. 중탄산암모늄이 용매에 최대한 용해되고 잔여량이 침전되도록 혼합하여 충분한 시간이 지난 뒤에도 여전히 최대담수화가 일어나도록 준비하였다.

Fig. 5 는 Fig. 3, 4 와 같이 반투과성 막 1 장당 총 담수화량과 시간에 따른 담수화 유량을 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 5 에서 관찰된 것과 같이 충분한 시간이 지난 뒤에도 단위시간당 담수화량은 큰 변화없이 선형성을 유지하였다. 이를 이용하면 휴대용 담수화 장치를 사용함에 있어 주어진 시간 안에 필요한 담수화량을 만족하도록 하는 중탄산암모늄의 양을 알 수 있다.

따라서 과포화 수용액의 담수화 실험을 통하여 휴대용 담수화 장치를 이용한 해수담수화에서 용매에 혼합시키는 중탄산암모늄의 양을 이용하여 단위시간당 담수화량 및 총 담수화량을 조절할 수 있음을 확인하였다.

3.3 온도에 따른 염 제거 실험

온도에 따른 중탄산암모늄의 분해/승화를 확인하기 위하여 가열 실험을 수행하였다.

Fig. 3 의 실험으로부터 얻어진 희석된 중탄산암모늄 수용액을 섭씨 60 도로 가열하여 염의 제거를 확인하였으며 온도에 따른 중탄산암모늄 분해량을 관찰하기 위해 섭씨 80 도로 가열한 실험과 비교하였다. Fig. 6 는 이와 같은 가열 실험의 결과를 시간에 따른 그래프로 나타낸 것이다.

가열 실험 수행에 있어 수용액 내 중탄산암모늄 농도의 직접적인 측정이 불가능하여 수용액의 전기전도도를 측정하여 염 분해에 관한 경향성을 파악하였다.

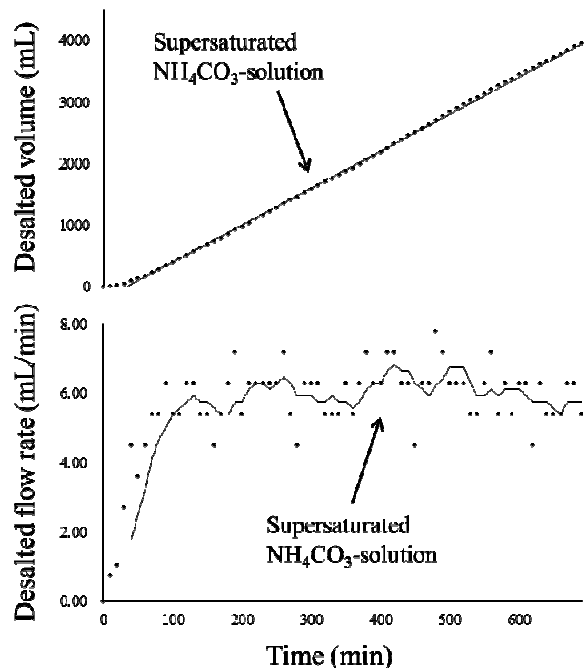


Fig. 5 Supersaturated ammonium bicarbonate solution desalting experiment. Desalted volume shows monotonic increase with increasing time. Desalted flow rate retains near 6 mL/min after 100 minutes

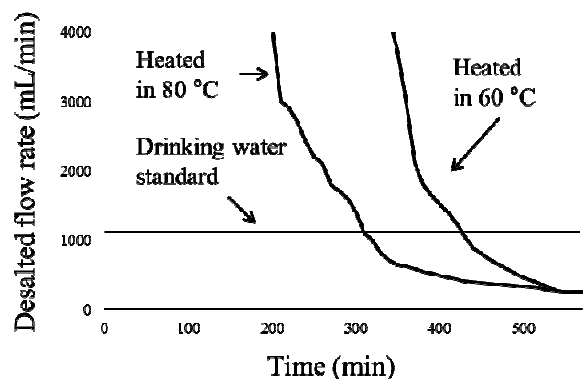


Fig. 6 Solute-removing experiment. With higher temperature, solution concentration reaches to the drinking water standard faster

전반적으로 수용액의 농도가 낮아짐에 따라 단위시간 내 분해되는 염의 양이 줄어들었으며 섭씨 60 도로 가열된 실험보다 섭씨 80 도로 가열된 실험에서 더욱 빠른 염 분해가 관찰되었다.

현재 음용 수질 기준인 1055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 만족시키기 위하여 약 300 분의 가열이 필요하지만 가열 온도의 변화를 통하여 이 시간 역시 단축시킬 수 있다.

4. 결론

상하수도 시설이 보편적이지 않고 대규모 담수

화 장치가 구비되어 있지 않는 등 식수의 보급이 원활하지 않은 경우를 대비하여 저에너지, 자급형 휴대용 담수화 장치를 설계하고 실험하여 그 활용 가능성을 제시하였다.

유지 및 보수가 쉽고 많은 장비가 필요하지 않은 정삼투 현상을 이용하여 휴대용 담수화 장치를 설계하였으며 고농도 수용액의 염으로서 중탄산암모늄을 선택하여 증발법을 이용한 경우보다 적은 에너지를 이용한 담수화가 가능하도록 하였다.

고농도 용액으로서 17.8 wt%의 염화나트륨 수용액과 중탄산암모늄 수용액을 각기 사용하여 충분한 시간이 흐른 후에는 염의 종류가 담수화량에 미치는 영향이 미비한 것을 확인하였다.

중탄산암모늄 과포화 수용액을 사용하여 시간이 지남에 따라 단위시간당 담수화량이 감소하지 않는 것을 관찰하였고 이를 통하여 휴대용 담수화 장치의 담수화 성능을 조절할 수 있음을 확인하였다.

다양한 온도에 따른 염 제거 실험을 통하여 약 300 분의 가열 후 음용 가능한 물을 확보함을 알 수 있었으며 가열 온도를 증가시킴에 따라 그 시간을 단축시킬 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 서강대학교 교내연구비(SRF-20124007)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Kim, S., Kang, J. W., Lee, S. H. and Lee, M. Y., 2006, "Water Shortage Risk Management," *Korean Society of Civil Engineers Civil Expo 2006*, pp. 218~221.
- (2) Ko, E. O., Moon, J. D. and Park, J. M., 2010, "Status-of-arts of Desalination Technology," *Membrane Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 185~196.
- (3) Moon, D. S., Jung, D. H., Kim, H. J. and Shin, P. K., 2005, "Efficiency Estimation for Desalination System of Seawater Using Reverse Osmosis Membrane," *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol. 8, No. 2, pp. 60~66.
- (4) Joo, H. J., Hwang, I. S. and Kwak, H. Y., 2011, "Development of Multi Effect Distillation for Solar Thermal Seawater Desalination System," *Journal of Korean Solar Energy Society*, Vol. 31, No. 1, pp 1~7.
- (5) Choi, K. H., 1993, "Desalination of Seawater Using Membrane Separation Processes," *Membrane Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 51~59.
- (6) Cho, B. Y., 2005, "A Study on Seawater Desalination Using Electrodialysis Reversal," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 3B, pp. 393~399.
- (7) Park, C. D., Lim, B. J. and Tanaka, Hiroshi, 2010, "Development of Seawater Distiller Utilizing Waste Heat of Portable Electric Generators," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 6, pp. 607~613.
- (8) Park, S. J. and Kim, J. Y., 1998, "Research Summary of Seawater Desalination Apparatus for Remote Island," *Machinery and Materials*, Vol. 10, No. 1, pp. 61~76.
- (9) Cath, T. Y., Childress, A. E. and Elimelech, M., 2006, "Forward Osmosis: Principles, Applications, and Recent Developments," *Journal of Membrane Science*, Vol. 281, p. 70.
- (10) Kravath, R. E. and Davis, J. A., 1975, "Desalination of Sea-water by Direct Osmosis," *Desalination*, Vol. 16, p. 151.
- (11) Kessler, J. O. and Moody, C. D., 1976, "Drinking-water from Sea-water by Forward Osmosis," *Desalination*, Vol. 18, p. 297.
- (12) McCutcheon, J. R. and Elimelech, M., 2006, "Desalination by Ammonia-carbon Dioxide Forward Osmosis: Influence of Draw and Feed Solution Concentrations on Process Performance," *Journal of Membrane Science*, Vol. 278, p. 114.