



# 온도와 압력 변화가 압력지연삼투 공정 성능에 미치는 영향

## Effect of the Temperature and Pressure on Pressure Retarded Osmosis Performance

심진우<sup>1,2</sup>·남숙현<sup>2</sup>·구재욱<sup>2</sup>·김은주<sup>2</sup>·윤영한<sup>2</sup>·황태문<sup>1,2\*</sup>

Sim, Jin-woo<sup>1</sup>·Nam, Sook-Hyun<sup>2</sup>·Koo, Jae-Wuk<sup>2</sup>·Kim, Eun-Ju<sup>2</sup>·Yoon, Young Han<sup>2</sup>·Hwang, Tae-Mun<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>과학기술연합대학원대학교, <sup>2</sup>한국건설기술연구원

<sup>1</sup>Korea University of Science & Technology, <sup>2</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

### ABSTRACT

The Pressure Retarded Osmosis (PRO) is the next generation desalination technique and is considered as a eco-friendly energy. This was conducted to evaluate the effect of the temperature and pressure on the PRO performance. The flux of the permeation was measured under different operating conditions and estimated the power density. An improvement of PRO performance is depend on increasing solution temperature and optimum pressure. The effect of increasing feed solution temperature has stronger impact on the PRO performance comparing to the draw solution temperature. The reason of the results was due to the change of osmotic power, viscosity, water permeability and structure parameter(s).

**Key words:** Desalination, Optimization, PRO performance, Pressure retarded osmosis

**주제어:** 담수화, 압력지연삼투, 압력지연삼투 성능, 최적화

## 1. 서 론

전세계적으로 경제발전과 지속적인 인구증가로 인해 많은 에너지가 요구 되고 있다(Chung et al., 2012). 화석연료에만 의존하던 기존의 기술들로 인해 불가피하게 한정된 에너지 자원의 고갈과 화석연료의 사용으로 인한 온실가스 문제가 발생함에 따라, 연구자들은 새로운 친환경 에너지 개발에 초점을 맞추고 있다(Post et al., 2007). 압력지연삼투(Pressure Retarded Osmosis; PRO) 기술은 친환경에너지 기술 중의 하나로 역전기투석(Reverse Electrodialysis; RED) 기술과 함께 염도차에 의한 에너지 발전 기술 중 대표적인 기술로 알려져 있다. 압력지연삼투기술은 두 용액의 삼투

투압 차에 의하여 저농도에서 고농도 방향으로 반투막을 통하여 용매만이 투과되고, 이때 증가된 유량이 터빈을 회전시키는 힘으로 변하여 에너지를 생산하는 기술이다(Achilli et al., 2010). 두 용액의 삼투압차이를 이용해 전력을 생산하는 기술은 새로운 기술이 아니다. 1954년도에 해수와 담수를 이용해 전기를 생산한다는 개념으로 연구 되었고, 이론적으로 1.0 m<sup>3</sup>의 담수와 해수가 만나면 최대 0.8 kW m<sup>3</sup>/d의 에너지를 얻을 수 있다. 세계적으로 보존된 삼투압 에너지는 약 2.5 TW 라고 알려져(Logan et al., 2012, Spiegler et al., 2001, Elimelech, et al., 2011, Fitzsimons et al., 2015) 해수담수화 공정에서 주로 사용되고 있는 역삼투(Reverse Osmosis; RO) 공정은 높은 전력비용을 소비한다. 따라서 전력비용 절감에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 현재 RO 공정의 기술적 한계를 나타내

Received 20 April 2016, revised 2 June 2016, accepted 3 June 2016

\*Corresponding author: Hwang, Tae-Mun (E-mail: taemun@kict.re.kr)

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 265-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350

고 있다. 또한, 현재 전 세계적으로 해수담수화를 위한 RO 공정시 발생하는 RO 농축수에 대한 환경규제가 심화되고 있어, 해양 투기에 대한 규제가 강화되고 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있으며, 그 중 RO-PRO 하이브리드 공정을 통해 발생하는 RO 농축수를 활용하여 전력을 생산하는 대안이 제시되고 있다. 이전 연구결과에 의하면 PRO 성능에 영향을 주는 요인으로는 적용 압력, 유도용액의 성상, 유입수의 성상, 유량조건의 범위에 따라 다양한 성능결과를 나타냈다. PRO 성능을 판단하는 인자는 플럭스(Flux), 전력밀도(Power Density)로 판단할 수 있다. PRO 공정에서 플럭스와 전력밀도는 유도용액과 유입수의 유량에 의해 많은 영향을 받고, 실 플랜트에서 두 용액의 양이 제한적이어서, PRO 공정에서 성능을 판단하는데 회수율도 중요한 인자로 활용하지만, 본 연구에서 진행한 실험실 규모의 장치에서는 온도와 압력 변화가 플럭스와 전력밀도에 미치는 영향에 대한 연구를 살펴 보았다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이, Lab-scale 규모의 PRO 장치를 제작하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서는 해수담수화를 위해 적용되는 역삼투 공정에서 발생하는 고농도의 RO 농축수 조건을 유도용액으로 활용하여 PRO 공정을 운전하였다. 운전모드는 Active Layer가 유도용액과 맞닿는 AL-DS(Active Layer-Draw Solution) 방식으로 운전하였으며, 막모듈 셀의 내부에서 유도용액 흐름과 유입수 흐름이 교차하여 흐르는 Counter-current Flow 방식으로 운전하였다. 실험에 사용된 평판형 장치는 스테인레스 스틸 재질로 제작하였으며, 유효 막면적은 0.0064 m<sup>2</sup>이다. PRO 전용의 분리막은 압력을 견디기 위해 지지층(Support Layer)이 FO(Forward Osmosis)막 보다 두껍게 제작된다. 두꺼운 지지층을 가진 막은 얇은 지지층을 가진 막보다 수투과율이 낮으며, 내부 농도분극(Internal Concentration Polarization; ICP) 현상이 더 잘 일어난다. 본 실험에서 PRO막보다 얇고 수투과율이 좋은 Hydration Technology Innovations(HTIinc)사에서 제조된 CTA(Cellulose Triacetate) 재질의 분리막을 사용하였다. 유도용액의 온도조건은 10, 20, 30, 40 °C, 공급용액의 온도 조건은 20, 30, 40°C의 범위로 실험을 실시하였다. 유도용액의 농도가 1.2 M NaCl인 PRO 운전모드 적용시

이론적으로 25~30 bar에서 최대 전력밀도를 얻을 수 있지만, 본 연구에서는 실험장치 펌프의 진동과 안정성 부분을 고려하여 유도용액측의 압력조건 5, 10, 15 bar와 공급수와 유도용액의 유속비는 각각 30 L/h와 60 L/h로 하여 실험하였다. 다양한 운전조건에서 PRO 장치의 성능을 평가하기 위해 유입수조에 전자저울(Ranger 7000, Ohausinc)을 설치하여 용액의 줄어드는 양을 측정하였으며, 일정한 온도를 유지하기 위해 온도조절용 칠러(Chiller, RW-0525G, Jeiotechinc)를 사용하였다. 특히, 실험실 규모의 PRO 분리막 평가시 유도용액측의 고압펌프를 통과한 용액의 경우 본래의 온도보다 3 °C 가량 상승할 수 있고, 가해진 압력에 5 bar 상승하기 때문에 실험 진행중에는 일정한 온도와 압력이 유지될 수 있도록 냉각장치의 조절기와 압력게이지를 지속적으로 보정하여 일정한 실험조건을 유지하였다. 유도용액측에는 역삼투막의 농축수 농도와 유사한 유도용액을 만들기 위해 NaCl(Sodium chloride, SAMCHUNinc)을 사용하여 조제하였다. 본 연구에서 수행된 실험조건은 Table 1과 같다.

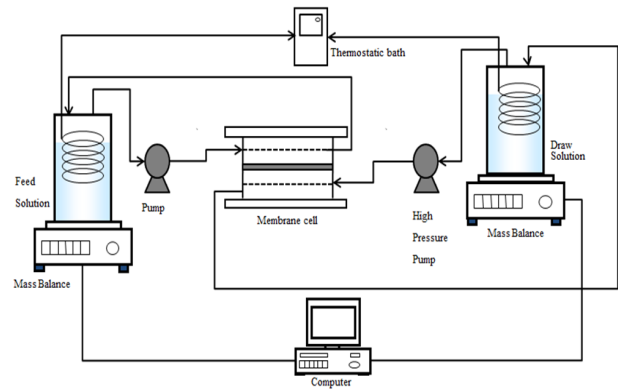


Fig. 1. Schematic of lab-scale PRO system.

Table 1. Summary of experimental conditions.

Item	Conditions	
Effective membrane area	0.0064 m <sup>2</sup> (0.08 m×0.08 m)	
Pressure	5, 10, 15 bar	
Operation time	2 hr	
Temperature	Feed	20, 30, 40 °C
	Draw	10, 20, 30, 40 °C
Flow rate	Feed	30 L/h
	Draw	60 L/h
Solution	Feed	D.I Water
	Draw	1.2 M NaCl



### 3. 연구결과 및 고찰

#### 3.1 유도용액의 온도변화에 따른 영향

Lab-scale 규모의 PRO 장치에서 유도용액의 온도조건에 따른 성능평가를 실시하였다. 공급수의 온도는 20 °C로 유지하였고, 유도용액의 운전압력 5, 10, 15 bar, 유도용액의 온도를 10, 20, 30, 40 °C의 다양한 범위에서 성능결과를 비교 분석하였다. 각각의 유도용액과 공급수의 온도는 냉각기 및 전기히터를 통해 온도를 유지하였다. 실험결과, Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 유도용액의 온도가 증가할 때, 플럭스가 증가하여 PRO의 성능이 향상되는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 유도용액의 온도를 증가시킴에 따라, 유도용액의 점도가 낮아지고, 투과계수가 증가하며, 삼투압이 변화함에 따라 나타낸 결과이다. 문헌에 의하면(Touati et al., 2014) 온도가 증

가하면 점도, 삼투압, 밀도, 확산계수 등의 변화로 인해 플럭스가 증가하게 되고, 이에 따라 전력밀도 생산에 영향을 줄 수 있다고 보고된바 있다.

#### 3.2 공급수의 온도변화에 따른 영향

공급수의 온도변화에 따른 PRO 성능의 변화를 파악하기 위해 실험을 실시하였다. 위의 조건과 반대로 유도용액의 온도는 20 °C로 유지하였고, 유도용액에 가해주는 운전압력은 5, 10, 15 bar, 공급수의 온도를 20, 30, 40 °C의 다양한 범위에서 성능결과를 비교 분석하였다. 마찬가지로 각각의 유도용액과 공급수의 온도는 냉각기 및 전기히터를 통해 온도를 유지하였다. 실험결과, Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 공급수의 온도가 증가할 때, 플럭스가 증가하여 PRO의 성능이 향상되는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 앞서 유도용

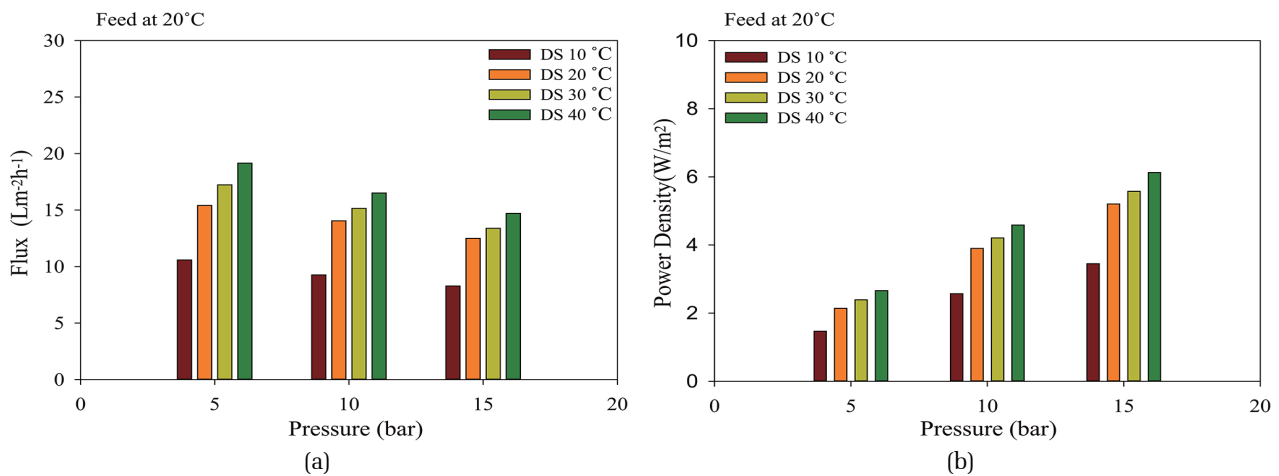


Fig. 2. Effect of draw solution temperature variation at feed solution 20°C. (a) Flux (b) Power Density

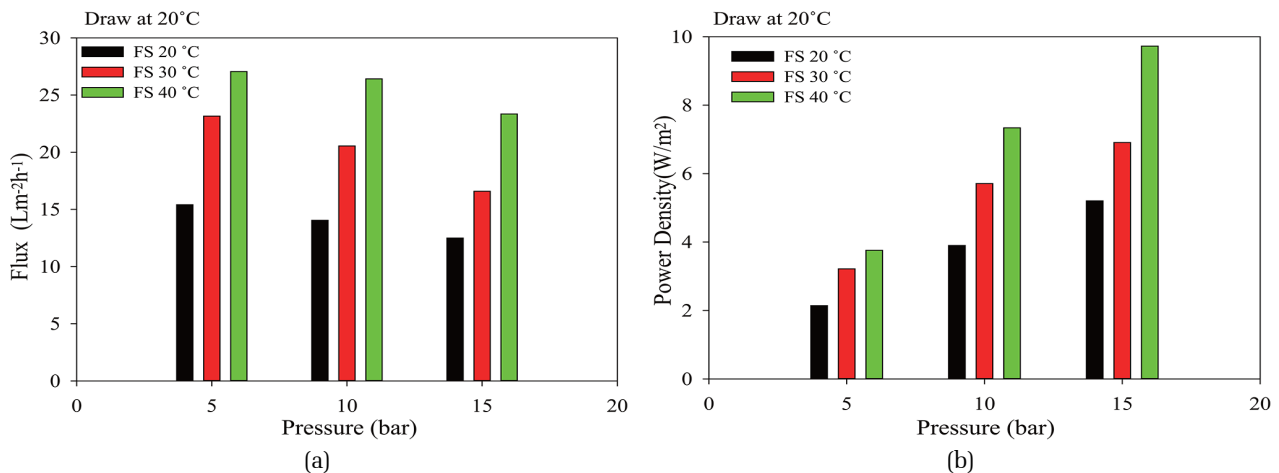


Fig. 3. Effect of feed solution temperature variation at draw solution 20°C. (a) Flux (b) Power Density

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 263-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350

액의 온도별 결과에서 분석한 바와 같이 마찬가지로 공급수의 온도를 증가시키기에 따라 공급수의 삼투압, 점도, 투과계수 등이 변화하게 되고 이에 따라 플럭스가 증가하며, 전력밀도가 상승하는 결과를 나타냈다.

하지만, Fig. 4에서 나타낸 것과 같이 앞서 분석한 유도용액의 온도변화에 따른 성능 결과보다, 공급수의 온도변화에 따른 성능변화 폭이 37% 높은 결과를 나타냈다 이러한 결과는, 각각의 유도용액과 공급수의 온도를 증가시키면 삼투압, 점도, 투수계수의 변화로 인해 플럭스가 증가하는 현상이 나타나지만, 반투과성 막을 통해 공급수에서 유도용액 방향으로 담수가 투과되기 때문에 공급수의 온도변화에 따른 영향이 더 증폭된 결과로 판단된다. 문헌에 의하면(Touati et al., 2015) 유도용액의 온도변화는 활성층(Active Layer)이 장벽이 되어서 직접적으로 지지층(Support Layer)에 영향을 주지는 않지만, 유입수의 온도가 상승하면 지지층의 두께를 감소시키고, 공극율을 증가시

키는데 영향을 주게되어, 결국 분리막의 S 변수를 감소시켜 내부농도분극을 감소시키도록 영향을 주는 것으로 보고한 바와 동일한 결과를 나타냈다. 또한 온도의 상승으로 용액의 점도가 낮아지며, 삼투압(Osmotic Power,  $\pi = CRT$ )이 증가하여 구동력이 높아지기 때문에 PRO 막의 투과 메커니즘이 변화되어 PRO 막 성능에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3 공급수와 유도용액의 동일한 온도조건에서의 영향

공급수와 유도용액의 동일한 온도조건 변화에 따른 PRO 성능의 변화를 파악하기 위해 실험을 실시하였다. 각각의 유도용액과 공급수의 온도를 20, 30, 40 °C로 변화하여 실험을 실시하였고, 유도용액에 가해주는 운전압력은 5, 10, 15 bar로 운전하였다. 실험결과, Fig. 5에 나타낸 바와 같이, 공급수와 유도용액을 동일한 온도조건에서 증가시키기에 따라 플럭스가 증가하고 이에 따라 전력밀도가 상승하는 결과를 나타냈다.

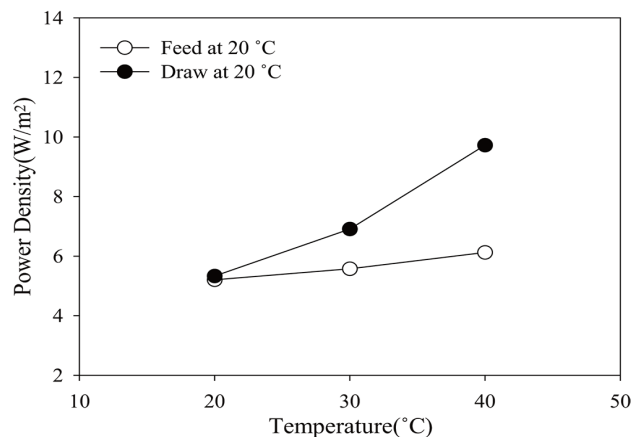
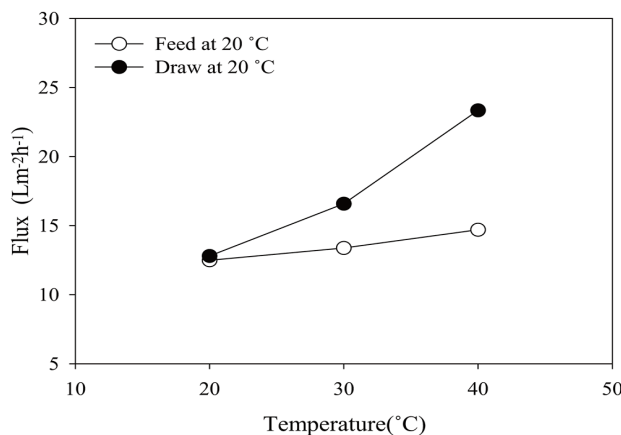


Fig. 4. Comparison of feed and draw solution temperature variation. (a) Flux (b) Power Density

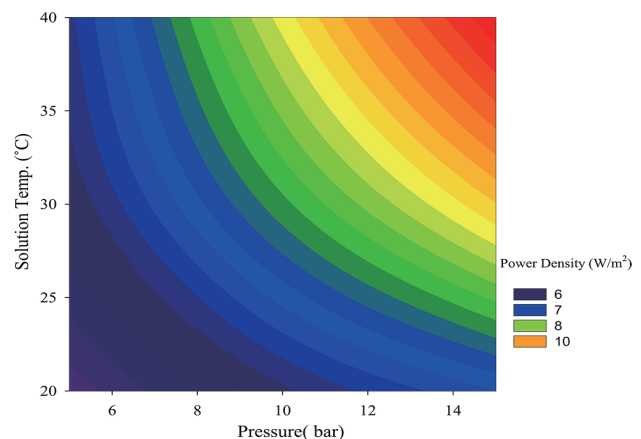
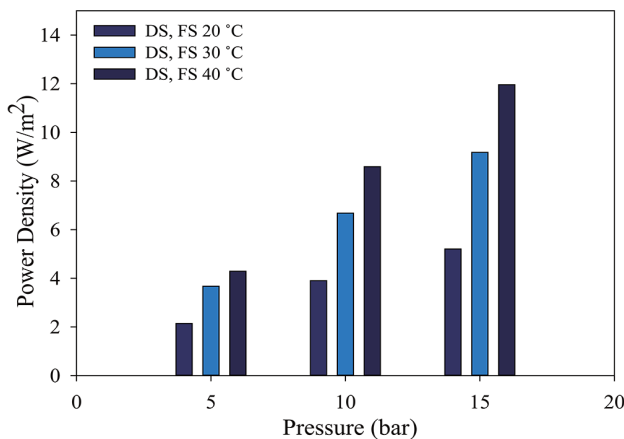


Fig. 5. Power density of the same temperature. (a) Power Density (b) 3D data



공급수의 온도만 증가시킨 결과와 비교해 봤을 때, 약 19 % 높은 결과를 나타냈다.

## 4. 결 론

본 연구는 PRO 공정의 운전변수인 압력과 온도 변화가 PRO 성능에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 실험결과, 공급수와 유도용액의 온도를 증가시키는 경우 막의 표면과 내부에 온도변화에 따른 투과메커니즘이 변화하였다. 이는 용액의 온도가 상승하면 삼투압( $\pi = CRT$ )이 증가하여 구동력이 높아지며, 용액의 점도가 낮아짐으로 인해 투과매개 변수가 높아지게 된다. 그 결과 외부농도분극과 염배제율이 낮아지고 내부농도분극 현상이 감소하게 된다. 특히, 지지층의 공급수의 온도 상승은 지지층의 두께를 감소시키고, 공극율을 증가시키는데 영향을 주게되어, 결국 분리막의 S 변수를 감소시켜 내부농도분극을 감소시키도록 영향을 주어 유도용액의 온도변화보다 PRO 분리막의 플럭스와 전력밀도에 더 큰 영향을 주었다. 향후, 모듈 단위의 PRO 연속시스템에서 유입수 온도 및 압력 변화에 따른 공정성능에 미치는 영향을 장기적으로 모니터링할 계획이다.

## 사 사

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 13IFIP-B065893-03)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Achilli, A., Childress, A.E. (2010) Pressure retarded osmosis: from the vision of Sidney Loeb to the first prototype installation—review, *Desalination*, 261(3), pp. 205-211.
- Logan, B. E., Elimelech, M. (2012) Membrane-based processes for sustainable power generation using water and wastewater, *Nature*, 488, pp. 313-319.
- Chung, T.S., Li, X., Ong, R.C., Ge, Q.C., Wang, H. L., Han, G. (2012) Emerging forward osmosis(FO) technologies and challenges ahead for clean water and clean energy applications, *Curr. Opin. Chem. Eng.* 1, pp. 246-257.
- Post, J.W., Veerman, J., Hamelers, H.-V.M., Euverink, G.-J.W., Metz, S.J., Nymeyjerc, K., Buisman, J.N.C. (2007) Salinity-gradient power: evaluation of pressure-retarded osmosis and reverse electrodialysis, *J. Membr. Sci.* 288, pp. 218-230.
- Spiegler, K.S., El-Sayed, Y.M. (2001) The energetics of desalination processes, *Desalination*, 134, 109-128.
- Elimelech, M., Phillip, W.A. (2011) The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment, *Science*, 333, pp. 712-717.
- Fitzsimons, L., Corcoran, B., Young, P., Foley, G. (2015) Energy analysis of water purification and desalination: a study of energy model approaches, *Desalination*, 359, pp. 212-224.
- Danoun, R. (2007) Desalination plants: potential impacts of brine discharge on marine life, Technical Report, The University of Sidney.
- Herron, J. (2012) Two-layer membrane. U.S. patent, 12 July.
- Touati, K., Hanel, C., Tadeo, F., Schiestel, T. (2015) Effect of the feed and draw solution temperatures on PRO performance: Theoretical and experimental study, *Desalination*, 365, pp. 182-195.
- Touati, K., Calle, A. D., Tadeo, F., Roca, L., Schiestel, T., Alarcon-Padilla, D. C. (2014) Energy recovery using salinity differences in a multi-effect distillation system, *Desalin. Water Treat.* pp. 1-8.

pp. 225-231

pp. 233-240

pp. 241-251

pp. 253-261

pp. 263-270

pp. 271-278

pp. 279-284

pp. 285-291

pp. 293-297

pp. 299-312

pp. 313-319

pp. 321-325

pp. 327-334

pp. 335-341

pp. 343-350