

국외 분리막 소식

■ 통합된 정삼투와 역삼투를 사용한 농업을 위한 해수 담수화

전세계적으로 건조한 지역에서 물의 수급을 만족시키려는 농경지 관개를 위한 해수담수화가 중요한 역할을 하고 있다. 식량 생산을 위한 관개 농업이 세계적인 물 수요를 촉진시키고 있고, 이용할 수 있는 공급은 줄어드는 반면에 수요는 증가할 것으로 예상된다. 해수담수화를 위한 현재의 선도 기술인 역삼투(RO)는 부분적으로 제한되었고, 그 이유는 고비용과 이 프로세스를 사용하는데 있어서의 에너지 소비도 크기 때문이다. 농경을 위한 담수화는 음료를 위한 물의 담수화보다 에너지가 더 많이 소비되는데, 그 이유는 관개 용수에 적용되는 붕소와 염소의 엄격한 기준 때문이다. 또한 second-pass 역삼투같은 부가적인 후처리도 요구된다. 이러한 관점에서 이번 연구의 저자들은 해수 담수화를 위한 역삼투와 정삼투의 통합된 개념을 소개하였다. 프로세스 모델링 결과는 통합된 프로세스가 관개용수를 위한 붕소와 염소의 요구를 만족하고 반면에 기존의 two-pass 역삼투 프로세스보다 에너지 소비가 적었다. 통합된 정삼투와 역삼투 담수화 프로세스를 발전시킬 과제와 그것의 에너지 소비 절감을 넘어선 잠재적인 이익 또한 논의되었다.

■ 물 정수 막을 위한 막 오염 저항 표면 개질

순한 반응 조건에서 물 기반의 손쉬운 화학반응을 사용하여 만들어지는 폴리 도파민을 이용한 표면 개질은 RO, NF, UF, MF 막에 사용되어져 왔다. 이러한 표면 처리는 막 본래의 특성과 순수 물의 투과성을 유지하면서 향상된 polypropylene MF, poly (tetrafluoroethylene) MF, poly (vinylidene fluoride) MF, poly (arylene ether

sulfone) UF, polysulfone UF, polyamide (PA) NF 그리고 PA RO 막의 향상된 오염 저항을 보였다. 이러한 특성은 오일/물 에멀전 투과를 통해 측정되었다. 이러한 접근법의 확장을 증명하기 위해서, 폴리도파민이 막 모듈에 적용되었고, 막 오염 저항을 향상시켰다. 폴리도파민 개질을 통해서, 막을 poly (ethylene glycol) 같은 막오염 저항 고분자를 포함하는 그래프팅 프로세스를 통해 더 개질시켰다. 이것은 MF 막의 막오염 저항을 증가시키는데 사용되었다.

■ 두산이 영국 기반의 물과 폐수 처리 엔지니어링 회사를 인수했다

대한민국의 회사 두산 중공업이 최근에 영국 기반의 물과 폐수 처리 엔지니어링 회사인 Enpure의 주요 자산의 인수를 완료했다고 발표했다.

Enpure 테크놀러지와 특허는 2개의 전처리 과정인 용해된 공기의 뜨는 현상과 역삼투 담수화를 위한 이중 매질 필터링을 포함한다. 이것은 막 기반 시스템에 의해 처리되기 전에 포함된 물을 처리하기 위해 사용되어진다. 이러한 Enpure 자산의 인수를 통하여, 두산은 RO와 물과 폐수 처리에 있어서 그것의 기능의 경쟁력을 향상시킬 것으로 기대한다. 두산 수자원 사업 본부의 CEO인 윤석원씨는 담수화 산업이 현재 RO 기술의 발전을 통해 확장하고 있는 중이라고 말했다. Enpure의 인수로, 두산은 RO 기술의 경쟁력을 강화시켰고, 이에 더하여 회사의 장기 프로젝트 참조를 기반으로 한 엔지니어링 노하우를 통하여 물과 폐수 처리 시장에서 가속화된 성장을 위한 기반을 마련하였다. 참고로, Enpure는 1970년대 초반에 설립되었다. 2011년에, 이 회사는 250개의 프로젝트를 하였고, 160명이 넘는 고용인이 있다.

■ 고분자 막에서 분자 규모 기공의 Nano-probe 이미징

현미경에서 오랜 목표는 나노미터 해상도에서 나노 기공의 고분자막을 이미징 하는 것이다. 이 연구의 저자는 0.5~2 nm 치수의 나노 기공을 볼 수 있는 기술이 개발되지 않았다고 말한다. 이러한 기공은 분자 수준의 분리 과정에서 사용되는 NF 막의 기능적 성능에 중요하다. 이러한 스케일에서 이미징에 연관된 주요 문제점은 고분자의 불충분한 전자 대비이고, 이것은 구조를 분간하는 것을 어렵게 만든다. 이 논문에서 저자는 활성 기공의 크기를 측정하기 위한 제자리-물리 화학적 특성화 방법을 기술한다. 비대칭, 유기 용매 나노필터 막에서 나노 기공은 높은 대비의 OsO₂ 나노입자로 채워져있고, 그것의 공간적인 배열은 TEM으로 특성화되었다. 이러한 탐침의 작은 크기 때문에, 막의 표면층의 나노기공을 측정할 수 있다. 이러한 방식으로 기공 크기 분포와 심지어 고분자 체인 구조 또한 평가할 수 있다. 기공 크기는 막의 분리 성능과도 잘 연관되어지며, NF P84 폴리이미드계 막의 분자 분리 메커니즘이 큰 나노 입자들의 크기 배제와도 연관지어지는 것을 알 수 있다.

■ 식수에서 제약과 개인 케어 제품의 마이크로 오염 물질 제거를 위한 NF 막

제약 및 개인 케어 제품(PPCPs)은 도시 폐수 유출, 농지 유출수, 제약 및 관련 화학 산업의 배출을 통해 주로 환경에 유입된다. 이번 연구는 두가지 다른 고분자 첨가제를 포함하는 NF 막을 사용하여 PPCPs의 제거를 조사하기 위해서 연구되었다. 첫 번째 첨가제는 반응성있는 diisocyanate 그리고 dihydroxy naphthalene disulfonate로부터 합성된 표면 개질된 고분자(CSMM)이다. 두 번째 첨가제는 poly (ethylene glycol)을 말단기로 가지고 있는 친수성의 표면 개질된 고분자(LSMM)이다. 3%의 CSMM 또는 LSMM을 포함 또는 포함하지 않는 셀룰로오스 아세테이트 막을 상전이 방법을 사용해

준비하였다. 막은 접촉각 측정장비와 XPS, SEM 그리고 AFM 장비를 이용해 평가되었다. NF 필터 특성은 150 psig와 400 psig의 다른 두 가동 압력에서 측정되었다. 그것은 유량 테스트, NaCl 분리 테스트를 포함한다. Ibuprofen 제거를 위한 NF의 장기적인 성능도 역시 평가되었다. Ibuprofen 분리 성능에 대한 CSMM의 중요한 효과 역시 관찰 되었다.

■ AWC가 인산염과 실리카 스케일 방지제를 개발했다

고객들에게 막과 관련된 수처리 프로그램과 운영 서비스의 사용을 위한 기술을 제공하는 국제적인 회사인 American water chemicals Inc (AWC)는 인산염과 실리카 스케일링의 방지제를 개발하였다. 지난 2년 동안의 연구 결과를 기반으로, AWC A-110은 세계에서 가장 큰 폐수 MF/RO 공장 중 하나로서 지난 11개월 동안 성공적으로 파일럿 규모 단계에 있다. 다른 유명한 스케일링 방지제 회사는 이미 이 지역에서 그들의 제품을 테스트 중에 있고, pH 6.7에서 어떠한 것도 3개월 이상의 성능을 보이지 않았다고 AWC관계자는 말했다. 실리카 오염은 공장이 실리카 스케일링을 제거하기 위해 위험한 물질인 ammonium bifluoride를 사용하게 만들었다. AWC는 pH 6.8에서 6개월간의 테스트를 마쳤으며, 투과액 흐름의 어떠한 감소 징조 없이 pH 6.9에서 5개월간의 테스트를 마쳤다. 다음 단계의 piloting인 pH 7.0 조건에서도 곧 시작될 것이다. 회사의 공장에 대한 목표는 실리카 오염을 제거하는 동시에 완전히 산을 제거하는 것이다.

■ Ethylene Glycol의 탈수를 위해 Pervaporation을 이용하는 복합막

Polyvinylamine(PVAm)-poly(vinylalcohol)(PVA)의 분리층으로 구성되고 Pervaporation을 이용하는 복합막이 ethylene glycol의 탈수를 위해 제조되었다. 이 막은 미세기공을 지닌 polysulfone 기질에 의해 지지되었고 CNT가 결합되었다. CNT가 분자간 인력

에 미치는 효과, 결정화도, 표면의 친수성질, 표면 수축 특성, PVAm-PVA/CNT 막의 팽창 정도를 알기 위해 PVAm-PVA/CNTs의 dense film를 사용하여 분리막의 물질적인 측면들이 분석되었다. 이를 위해 Fourier transform infrared (FTIR), Raman spectroscopy, X-ray diffraction (XRD) 방법이 사용되었다. 급수 농도, 온도와 CNT 함량이 분리 성능에 미치는 영향들이 조사되었다. CNT의 결합은 투과 플럭스와 분리계수를 증가시키는 것으로 나타났고 분리성능의 향상은 특히 낮은 급수 농도에서 두드러졌다. 70°C, 1 wt%의 급수 농도에서 2 wt% of CNTs을 포함하는 PVAm-PVA/CNT 막을 사용했을 때, 146 g/(m²h)의 투과 플럭스와 1160의 분리계수의 결과를 보였다.

■ MF Performance 최적화를 위한 Fouling 모델과 방법

Normal flow 필터막의 여과 작용은 종종 전통적인 필터 블로킹 법칙에 기반한 모델들에 의해 기술된다. 하지만 fouling의 속도가 유량에 의존할 때, bio-process 유체의 살균여과를 위해 세워진 이 모델들은 적합하지 않음이 보여졌다. 이 연구에서 이전부터 발전되어 온, 일정 압력이나 일정 flow mode에서 작용하는 필터의 행동을 시뮬레이션하기 위해 블로킹과 흡착 메커니즘이 결합된 fouling 모델들은 연속적으로 작용하는 듀얼 필터로 확장되었다. 일정한 입구 압력에서 연속적으로 작용하는 필터의 경우, 프리 필터나 파이널 필터와 같은 필터가 일반적으로 서로 다른 유속에서 fouling을 일으키는 것과 같이, 필터 트레인 속 각 필터는 일정한 압력이나 일정한 flow에서 작용하지 않을 것이다. 따라서 Fouling 속도에 대한 유속의 효과를 설명하지 않는 fouling model은 여과 작용을 적절하게 시뮬레이션할 수 없을 것이다. 저자들에 의해 세워진 모델은 개별적으로 작용하는 각 막 필터의 측정된 성능으로부터, 연속적으로 작용하는 microfiltration (MF)의 bio-process 유체 여과 성능 예측의 정확성을 높이기 위해 제시되었다. 게다가 이 모델과 방법은 프리 필터 대 파이널 필터의 면적비의 빠르고 효율적인 최적화를 가능하게 한다.

■ 중공사막을 이용한 폐수처리의 최적화

이 페이지는 wet textile 산업에서 재사용되는 방류수의 처리를 위한 ultrafiltration (UF)의 효율을 추정하는 연구의 결과를 제시하고 있다. 이것은 Italy Prato Baciacavallo의 폐수 처리 플랜트에서 pilotscale 시스템을 사용함으로써 얻어진 경험을 기반으로 하고 있다. 실험적인 시도를 통해 막 여과 과정은 운전시간, 역세, 화학물질의 첨가, 세척 과정, 운영 비용의 관점에서 최적화되었다. 막을 통해서 생기는 압력은 270 mbar이고 유압 투과성은 200 l/(h bar m²)임이 확인되었다. 실험 결과들에 의하면, 처리과정이 wet textile 산업에서의 폐수 재사용을 위한 목표값을 따르는 것이 확인되었다. 수학적 도구들은 프로세스 파라미터(여과 시간, 플럭스와 같은)를 변화시킴으로써 달라지는 필터의 행동을 보여주면서, 유압 특성의 효율을 시뮬레이션하기 위해 사용되었다. 이것은 최적 구성을 위한 선택이 빠르고 쉽게 이뤄지게 하기 위해서다. 이 과정은 막 성능을 향상시키기 위한 정확한 과정을 제공하면서, 처리수의 부피와 에너지 비용의 관점에서 최적화되었다. 이 응용의 예는 에너지 비용이 감소하면서 처리수의 부피가 43%나 증가했다고 보고되었다.

■ RO 시스템 Bio-fouling - 메커니즘, 모니터링, 컨트롤

역삼투(Reverse Osmosis, RO) 기술은 해수, 폐수, 지하수, 표면수와 같은 다양한 종류의 물을 처리하는 방법을 제공한다. 수처리를 위한 이 기술을 사용하는 데 있어 주요한 관심은 fouling 문제이며, 특히 bio-fouling이다. 이것은 RO 생성물의 품질에 부정적인 영향을 미치고 RO가 비싼 수처리 기술이 되게 만든다. RO 시스템의 bio-fouling의 위험을 감소시키는 핵심 방법은 적절한 bio-film 모니터링 기법과 효과적인 bio-fouling 조절 처리를 적용하면서, bio-fouling 형성과정을 이해하는 데 있다. 이 페이지에서는 RO 막에 대한 미생물의 흡착 메커니즘이 bio-fouling 형성과정에 영향을 미치는 중요 요인과 함께 제시되었다. 게다가 수류 시스템

탐의 biofilm 모니터링을 위한 공통의 전략이 검토되었고, 각 전략의 장점과 단점이 강조되었다. bio-fouling 형성을 줄이는 데 사용되는 공통의 전략들이 이 페이퍼에 제시되었고, 친환경적인 물리소독 기법의 적용 또한 제안되었다.

■ 담수화의 총 비용 - Segura River Basin의 사례 분석

담수화를 도시, 산업, 농업용수를 공급하기 위한 다른 기술들과 비교하고 구별하기 위해 사용되는 가장 적절한 관련 지표는 담수의 비용일 것이다(각각의 선택과 관련한 사회적이고 환경적인 측면은 물론이다). 물 부족 문제에 대한 가장 적절한 해답을 찾기 위해 필요한 첫 번째 단계는 정부와 일반 대중에게 부담되는, 각각의 기술과 관련된 담수화 비용을 정확하게 드러내는 것이다. 이 과정은 총 비용과 같은 경제적 관점으로 알려져 있다. 원칙적으로 담수 생산과 관련된 비용은 측정하기에 쉽다. 그러나 상세한 정보와 비용 측정을 위한 공통 방법의 부족으로 인해, 실용적인 관점에서 다양한 설비들의 비용을 비교하기 어렵다. 이 연구는 해수의 담수화 비용을 추정을 위한, 명확하고 쉬운 방법론을 제시하는 것을 목표로 삼고 있다. 사례 분석으로서, 이 방법은 Spain Segura River Basin에 위치한 seven large-size의 담수 플랜트들에 적용되었다.

■ LiCl 염을 기공 형성 첨가제로 사용하는 PSf/clay 나노 복합막의 준비

이 연구에서는 평평한 시트구조의 비대칭 polysulfone (PSf)막과 PSf/clay 나노 복합막이 clay의 함량을 다양하게 하여 준비되었다. 이 과정에서 비용매에 의한 상 전환 방법을 사용하였다. N, N-dimethyl acetamide, de-ionised water and lithium chloride (LiCl)이 각각 용매, 응고제, 기공 형성 물질로 사용되었다. 막의 구조와 형태는 scanning electron microscope, transmission electron microscope and X-ray dif-

fractometer을 사용하여 분석되었다. 막의 성능은 pure water flux (PWF), protein rejection, 기공도, 접촉각, 인장강도, 신장율의 관점에서 평가되었다. 이 결과는 clay가 PSf 매트릭스안에서 좋은 분산을 보임을 나타냈다. Clay의 첨가는 막의 유압 특성을 향상시켰고 skin layer의 큰 기공들의 비율을 증가시켰다. 막의 기공도와 PWF는 clay 함량의 증가에 따라 증가했다. Clay 함량이 0 wt%에서 6 wt%로 증가함에 따라, PWF는 $199 \text{ lm}^2\text{h}^{-1}$ 에서 $263 \text{ lm}^2\text{h}^{-1}$ 로 증가했다. Clay 함량이 3 wt%일 때 인장강도는 5.34 MPa의 최댓값을 나타냈다. Clay는 나노 복합막에서 매우 안정적인 모습을 보였다.

■ FO에서 붕소의 전달 - 측정, 메커니즘, 그리고 RO와의 비교를 수행하였다

Forward Osmosis (FO)에서 붕소의 flux 양상과 막 투과 메커니즘에 영향을 끼치는 물리적, 화학적 요소들은 이 연구에서 구조적으로 조사되었다. FO에서 붕소의 flux 양상은 같은 여과 조건에서 동일한 판과 구조의 셀들과 막들을 사용함으로써 reverse osmosis (RO)의 flux와 비교되었다. 붕소의 flux에서 유도용액의 pH, 타입, 그리고 막의 방향의 영향은 FO를 위해 조사되었고, 붕소의 flux에서 물의 flux, cross-flow 속도, 급수의 붕소 농도, 용액의 pH의 영향은 FO와 RO에서 모두 조사되었다. 그 결과는 역염 확산-FO의 독특한 특성-이 FO에서 붕소의 flux를 지배하는 중요한 메커니즘이라는 것을 보여주었다. FO 막을 통과하는 붕소 용질 flux는 급-용액에 의한 역염 확산의 정도에 반비례했다. RO의 리젝션과 비교해서 FO에서 관측된 더 높은 붕소의 리젝션은 또한 FO의 역염 확산에 기여하였다. 또한 FO의 막 방향은 중요한 역할을 한다는 것을 보여주었다-내부 농도의 편극의 다른 정도에 따른 붕소 용질 flux에 영향을 미치면서. FO와 RO에서 모두 붕소 용질의 flux는 물의 flux가 증가하자 함께 증가하였다. 그러나, 붕소 용질 flux에서 물의 flux의 영향은 RO에서 보다 FO에서 중요도가 떨어졌다. 더욱이, 중성의 붕소 염에서 음이온의 붕소 염으로 전환에 의한 급수의

pH가 증가함에 따라 붕소 용질 flux는 감소하였다. 이러한 발견은 메커니즘과, FO에서 붕소 용질을 제어하는 요소에 대한 통찰력을 제공하였다.

■ **Bio-film과 NF/RO Flux 사이의 상호연관성이 연구되었다**

나노 여과/역삼투 막의 flux에 대한 Bio-film의 영향력은 최근 논문에서 널리 설명되어왔고 평가를 받아왔다. 이러한 발견들은 두 가지 주된 카테고리 나눌 수 있다. 먼저, 종적인 관점에서 bio-film은 concentration polarization (CP)와 fouling 막의 저항에 기여한다. 이것은 구조 상 침투 flux를 직접적으로 감소시킨다. 막의 저항과 flux에 규격화된 이러한 효과의 비교는, CP가 대개 flux 감소에 영향을 미치는 주요한 변수이고 급수의 이온강도가 증가함에 따라 훨씬 더 확연한 효과를 가져온다는 것을 보여주었다. 두 번째 카테고리에서, bio-film은 cross-flow에 수평적인 방해물로서 여겨지고, 축의 증가된 압력하강과 부정적 배치를 일으킨다. 두 카테고리의 연관성은 이 연구에서 저자들에 의해 논의된다. 위에서 언급된 두 카테고리에서 Bio-fouling 효과들은 어떠한 주어진 막의 설치에서 여과에 대한 혼합되고 분리된 효과를 가지고 있다. 그러나 이러한 효과의 상대적인 강도는 feed의 화학적인 구성과 주어진 압력에 의존할 것이다. 간단히, 막 channel에서 흐름에 대한 두 가지 구성 요소는 bio-film에 대한 영양소 통과에 기여할 수 있고, 이 기여도의 상대적인 강도는 bio-film의 제어에 대한 중요한 영향을 끼친다. Linear flow 속도, 기관의 농도, 여과 flux의 효과에 대한 최근의 발견은 이 두 방향의 틀 내에서 논의된다. Bio-film 제어에 대한 최근의 아이디어들은 또한 같은 틀 내에서 거론된다.

■ **Single Orifice Spinneret을 통해 Ultra-fine Hollow Fibre 막의 Phase-inversion Spinning이 거론되었다.**

이 논문은 single orifice spinneret을 통해 ultra-fine hollow-fibre 막을 제조하기 위해 사용되는 새로운

phase-inversion spinning method에 대해 보고한다. 오일 같은 첨가물은 bore를 생성하는 agent로써 고분자가 도핑된 용액에 미리 첨가된다. 빠른 용매 추출과 상 분리 과정을 통해, 오일은 중앙에서 섬유로 외부 용액에 의해 밀려난다. 속이 빈 섬유 막들은 오일을 제거해냄으로써 얻어진다. 이 새로운 방법을 설명하기 위해 매우 질이 좋은 poly sulfone과 yttria-stabilized zirconia hollow-fibre 막들이 간단한 orifice spinneret으로써 녹슬지 않는 강철 실린더 끝부분을 사용함으로써 제조되었다. 실린더 끝의 크기, 내용물, 사용된 오일 같은 첨가물의 타입에 포함하는 제조 조건은 조사되었다. 기체 투과 실험은 그 막이 큰 결함을 포함하고 있지 않다는 것을 나타낸다. 저자들은 또한 - 기계적 강도 성질의 측면에서 - 오일 방울에서 떠오르는 오목한 표면의 이점에 대해 논의한다.

■ **연속적인 In-situ 생산물 복원을 위한 역 방향의 Diafiltration 투과가 발표되었다**

In situ product recovery (ISPR)은 하류 공정에서 주요한 도전과제이다. 이것이 생성되고, 그에 따라 어떠한 반응에서 억제요소를 제거한 후에 바로 cell의 생산지 부근에서 그 생산물을 제거하기 때문에, ISPR은 생산물 억제 발효 공정에 대해 특히 이점이 있다. 이 연구는 reverse-flow diafiltration이라고 언급되는 기발한 ISPR 공정을 제안한다. 이것은 bioreactor에 통합된 침수된 hollow-fibre membranes을 사용한다. 그 공정은 역 흐름 작동 모드에서 같은 막을 넘어서 교대로 교환되는 두 가지의 액체 흐름을 다룬다. 하나는 배양액을 공급하고, 다른 하나는 생산품 용액을 추출한다. 결과적으로 막의 어떠한 net flux도 발생하지 않았고 cake-layer 생성물이 낮게 유지되었다. 두 단계 사이의 짧은 빈 구간은 각각 공기 혹은 여과물로 채워졌다. 이것들은 생산물의 복원 값을 증진시키기 위해 hollow-fibre lumen의 내부를 비웠다. 다른 농도의 효모 서스펜션을 이용한 실험은 안정적인 여과 성능이 일주일 정도의 주기 동안 유지될 수 있었다는 것을 드러내었다. 동시에 100%까지 생산물의 일정한 복원 값을 달성했다. 저자들은 역 흐름 diafiltration 공정이 연속적인 발효 공정으로 이끌면서 미래의 ISPR 적용에 대해 매우 유망하

다고 말한다. 이것은 특히 균류 서스펜션과 같은 더 복잡한 발효 서스펜션에 대해 맞는 말이다. - 매우 높은 점도와 filamentous organism에 의해 특징지어진다. - 평범한 공정과 비교하여, 이것은 더 긴 기간에 대해 안정적인 여과 성능과 생산물 복원 값의 결과를 가져올 수 있다.

■ FO를 위한 독특한 Dual-layer Hollow-Fibre 막을 개발하였다.

독특한 dual-layer FO hollow-fibre 막이 설계되었고, triple orifice spinneret을 사용하여 제조되었다. Fibre는 두 층으로 이루어져 있다. 바깥 쪽 층은 polyamide-imide (PAI) 고분자로 만들어진다. 반면에 polyethersulfone (PES) 고분자는 porous한 내부 층을 형성하는데 사용된다. 특히, non-solvent에 의해 유도된 상 반전을 통해 비대칭의 마이크로 기공의 PAI/PES dual-layer hollow fibres를 얻은 후에, 바깥쪽 PAI layer의 PEI 고분자 전해질 변형은, PES porous 내부 layer은 PES가 PEI에 inert이기 때문에 온건하게 남아있는 동안에, 나노 여과 같은 얇은 layer을 생산하는데 사용되곤 했다. 그 막의 형태, 구조, 표면 성질은 고분자가 도핑된 조성 and spinning 조건을 조정함으로써 조심스럽게 맞추어졌다. 이러한 막은 그들의 구조, 투과성, 염 억제에 관점에서 standard protocol의 시리즈에 의해 나중에 특징지어졌고, FO 공정에서 사용되었다. 그 결과로 생긴 dual-layer nanofiltration (NF) hollow-fibre 막이 15.9l_m-2 h⁻¹ bar⁻¹의 순수한 물의 투과도와, 89%까지 2가의 양이온에 대한 강한 억제를 달성할 수 있다. FO 공정에서 fibre 급수 용액으로써의 0.5 M MgCl₂과 상온에서 feed로써 deionized water를 사용함으로써 feed water와 직면하는 활성 layer의 방향에서 27.5l_m-2 h⁻¹ 물 flux를 보여주었다. 새롭게 개발된 dual-layer hollow fibres은 모든 단일 layer을 능가하고, FO 적용을 위해 논문에 보고된 dual-layer NF hollow-fibres들은 이 연구에서 저자들이 주장한다.

■ 담가진 Hollow-fibre MBR에서의 투과도와 막힘 현상에 대한 연구를 진행하였다

도시의 폐수를 feed로 사용하여 중간규모의 hollow-fibre인 담가진 membrane bioreactor (HF iMBR)는 충고체에 의해 투과도에 막힘현상의 영향을 평가하기 위해서 full-scale로 존재하게 하는 조건하에서 작동하였다. 일반적인 back-flushing으로 각각 22시간의 주기를 가지고 다른 flux를 가진 2개의 실험을 가동함으로써, 연구를 진행하였다. Fibre 번들 내의 고체의 축적량은 기계적인 제거 후 중량 측정을 통해 결정되었다. Sludging이 일어나는 동안에 fouling rate와 함께, 완전한 "dclogging"으로부터 투과도의 회복은 chemically enhanced back-flushing (CEB)를 사용한 일반적인 유지 세척 작업으로부터 도출된 결과와 비교되었다. 그 결과는 declogging이 투과도 회복에 상당한 기여를 한다는 것을 보여주었지만, 오로지 CEB만의 비교할 만한 영향력은 또한 중요하다는 것을 나타내었다. 그러나, clogging의 역제는 HF iMBR unit가 작동하는 동안에 전체적인 투과도를 유지하는데에 중요하다는 것을 언급하면서, 일반적으로 "fouling rate"라고 불리는 trans-membrane pressure의 증가 속도는 축적된 고체의 질량과 깊게 연관되어 있다는 것이 발견되었다.

■ Fouling을 조절하기 위한 CNT 층으로 이루어진 저압 막 개발

이 연구에서는 다른 물리화학적 특성을 가진 CNT를 저압 막에 층으로 형성한 후 높은 부착물 포텐셜을 가진 천연 물 표면을 이용해서 오염도 방지 특성을 측정했다. 커다란 직경과 오염되지 않은 다중 벽의 CNTs로 개질된 막은 22 g/m²로 적재하였을 때 확연히 오염이 될 때까지 세배의 시간이 걸림으로써 막 오염을 조절하는데 가장 효과적이었다. CNT 층 구조에서의 차이점은 오염도 방지 특성에 기여하는 중요한 요인이었다. Scanning Electron Microscopy를 이용하여 관측한 이미지는 덜 효과적인 작은 직경의 MWCNTs가 혼합 층을 형성하는 것에 반하여 큰 직

경의 MWCNTs가 막 표면을 따라 동종의 다공성 막을 형성하는 것을 보여주었다. 수질을 위한 분석은 작은 직경의 CNTs로 구성된 막에 비해, 큰 직경의 CNTs로 구성된 CNT 막이 오염에 영향이 있는 커다란 유기 고분자를 급수로부터 제거하는 데 효과적임을 보여주었다. 이것은 PVDF 막에 도달하는 오염물질의 농도를 줄이고 오염을 줄이는 데 도움을 주었다. 막에 적재하는 CNTs의 증가한 적재량은 개질된 막의 깨끗한 물 투과성을 약간 줄이는 반면, 오염에 대한 저항은 증가시켰다. 전체적으로 CNT 층을 이용한 막은 오염에 높은 저항을 가지고 있는 것으로 보였고, 잠재적으로 지속가능한 수처리 장치에 사용될 수 있다.

■ 삼투압 중공사막의 유무기 복합적 오염

이 연구는 유무기 복합적 오염과 삼투압 막의 명확한 연구에 초점을 맞췄다. Sodium alginate, Bovine Serum Albumin (BSA), 실리카 나노 입자와 같은 다양한 유무기 오염 물질 모델들이 연구실에서 합성한 Polyamide-Polyethersulfone 삼투압 중공사막에 적용되었다. 모든 가능한 상호작용을 이해하기 위해서 실험은 단일 오염물질과 혼합된 오염물질로 진행되었다.

실험 결과는 삼투압 막 오염의 정도가 오염물질, 2가 양이온의 존재, 낮은 직교류 속도 그리고 높은 침투 항력이 시너지 효과를 통해 증진됨을 보여주었다.

오염된 삼투압 중공사막에서의 물의 유량은 간단하고 물리적인 정확에 의해 완전히 회복될 수 있었다. 또한, 유체역학적 상태가 삼투압 중공사막의 유무기 복합적 오염에서 중요한 역할을 한다는 사실을 알 수 있었다.

■ 복합 중공사 Nano Filtration (NF) 박막을 이용한 수용성 염료 용액의 처리

Polysulfone ultrafiltration (UF) 막 위에 Poly(mphenylene-trimesamide) 활성화 막을 가지고 있는 중공사 NF 박막들을 계면 중합 방법을 통해 다른 조건에서 준비하였다. NF 막은 490~730 g/mole의 값을 갖

는 분자를 배출시켰다. 이 막들은 400~2000 ppm의 염료를 담은 수급 용액을 25psi, 10~35 ml/m²h의 유량 조건에서 반응성을 가진 Black-5와 Rhodamine-B를 60~97%를 배출하였다. 수급 용액의 염료 농도를 400ppm에서 2500 ppm으로 올리는 동안 유량은 조금 감소하였지만 배출은 거의 같게 유지되었다. 염료와 나트륨 (10000 ppm까지)의 혼합물을 담고 있는 수급 용액으로 테스트 하였을 때 염료 배출과 막의 유량은 2~5% 떨어졌다. 이러한 결과는 Donnan's exclusion effect 에서의 감소, 염 배출이나 기공 팽창 효과에 의한 막의 기공구조의 변화에 의해 기인된 것으로 보인다. 막은 Scanning Electron Microscopy와 Atomic Force Microscopy를 통해 표면 형태가 관측되었다. 표면의 조도는 Polyamide 준비 조건에 따라서 20~40 nm 였으며, 이는 Atomic Force Microscopy에 의해서 관측되었다.

■ 고농도 산업 폐수를 처리하기 위한 MBR 기술의 사용

이 연구는 Membrane Bioreactor (MBR) 기술을 이용하여 고농도 산업폐수를 처리하는 방법을 검토하고 있다. 연구는 시스템의 작동, 제한요소와 보완을 다루고 있다. 고농도 산업 폐수는 산업 폐수의 종류와 특성과 함께 MBR 파라미터와 제어에 따라 다른 조건에서의 MBR을 사용하여 완전히 처리될 수 있었다. 이러한 종류의 폐수는 공급원에 따라 잠재적으로 많은 양으로 존재하는 지방, 기름, 그리스나 다른 유무기 물질을 포함하고 있었다. Hydraulic Retention time (HRT), Solid Retention Time (SRT), Mix Liquor Suspended Solid (MLSS), Trans-Membrane Pressure (TMP)와 같은 몇몇 요인은 시스템의 작동 중에 고려될 필요가 있었으며, 오염 요인은 MBR의 성능과 폐수의 질에 영향을 끼치는 큰 문제를 일으키기 때문에 심각하게 고려될 필요가 있었다. 특정 방법들이 오염의 심각함에 따라 막을 환원하고 깨끗하게 하기 위하여 이용되었고, 수용성 유기 폐기물을 제거하기 위한 MBR의 능력은 Powdered Activated Carbon (PAC) 과 같은 오염 환원 물질을 첨가함으로써 강화되었다.

■ 작은 규모의 MD 시스템을 이용하여 물을 제조하는 비용

Membrane distillation (MD)는 담수화 공정으로 잠재력을 보여왔다. 상대적으로 낮은 압력에서 가동되고 높은 염분 수급을 견딜 수 있는 열 구동 막 기술로써 MD는 담수화 공정에서 역삼투 방법을 채택하지 못할 때, 매우 쓸모 있을 것이다. 그러나 MD 시스템을 사용했을 때, 증가하는 에너지의 사용량과 물 제조 비용의 축소는 여전히 중요한 기술적 과제로 남아있다. 이 연구에서 저자는 MD 막의 열 전달, 물질 전달 특성의 최적화가 어떻게 물의 유량을 증가시키고 단위 에너지 소비량을 감소시키는 지 설명하고 있다. 수많은 모델링 도구들과 요인적 분석들은 다공성, 비틀림, 열 전도도, 기공 직경과 두께와 같은 5개의 MD 막 특성의 효과를 설명하는데 사용된다. 물 제조 비용은 폐열로 가동되는 작은 규모와 단일 단계를 거친 MD 공정의 파라미터를 이용한 함수에 의해 계산되었다. Direct Contact MD (DCMD), Air Gap MD (AGMD)와 같은 두 가지 MD 설정 방법이 주로 고려된다. 비록, 효과의 규모가 MD 설정 방법에 크게 의존하지만, 설명한 5가지의 막 특성은 물 제조 비용에 확연한 효과를 나타내는 것으로 보여진다.

■ Multiple-feed와 Multiple-product를 가진 역삼투 시스템

이 연구의 주요 쟁점은 Multiple-feed와 Multiple-product를 가진 역삼투(RO) 담화 공정이다. 저자에 따르면, 합성에 기반한 최적화 기술의 공정은 RO의 설계를 위해 발전해왔다. 이러한 접근의 채택은 경제적으로 매력력을 가진 담화 계획을 제공하였다. 나선형으로 감긴 형태의 RO 요소를 채택한 막 분리 단위는 막 통로에서의 농도 변화와 압력 강하를 고려한 이 연구에서 보여준 Pressure vessel model에 의해서 유추하였다. 담화 공정에서의 문제점의 해결을 위한, 모든 실현 가능한 설계요소를 가지고 있는 간단한 상부구조 또한 나타내었다.

이러한 구조적 묘사를 위하여 Stream Split Ratio와 Stream Mixing에 대한 논리적인 표현들이 사용되었고, 이것들은 수학적인 모델을 다루기 쉽게 만들어주었다. 최고의 설계 문제는 역삼투 시스템의 전체 연간 비

용의 최소화를 위한 Mixed-Integer, Non-Linear Programming (MINLP) 문제로써 만들어졌다.

설계와 구조의 변수에 따른 자본과 작동 비용에 관련한 비용 방정식은 목적 함수로 도입되었다. 이러한 문제의 해결법은 최적화 시스템 구조와 작동 조건, 그리고 최적화된 흐름의 분산을 포함하고 있다. 또한, 설계 방법은 각 단계에서 사용되는 막 성분의 유형의 선택과 각 Pressure Vessel에 포함되어 있는 막 요소의 적절한 숫자를 선택하는데 사용되었다. 이러한 설계 방법론의 효율은 특정한 담화 공정의 예시를 해결함으로써 설명되었다. 몇몇 대안 계획들의 비교는 흐름의 수급 위치와 시스템의 배출구가 역삼투 시스템의 설계에서 최적화되어야 할 중요한 변수라는 사실을 알려주었다.

■ 직접적인 식수 처리를 위한 나선 형태의 UF 성능의 강화

이 연구는 Brazil, Metropolitan 지역의 Sao Paulo에 위치해 있는 Guarapiranga의 저수지에 설치되어 있는 직접적인 식수 처리를 위한 나선 형태의 UF 파일럿 플랜트의 성능에 대한 특정 기능 조건의 영향을 평가하는 것을 목적으로 하고 있다. 기능 테스트의 결과는 세척과 이 공정을 사용하지 않았을 때, 얻어진 것보다 49% 높은 Chlorine 사용량의 결합을 통한 주기적인 완화로 만들어진 투과량을 보여주고 있다. 2년 동안의 지속적인 작동은 파일럿 플랜트가 높은 투과 흐름의 제조와 화학적 정화 빈도의 감소에 따라 가을과 겨울에 더 잘 작동한다는 사실을 보여주고 있다. 이것은 Chlorophyll-a 분석 결과에 의해 확인한 봄과 여름에 저수지에서 가장 자주 발생하는 조류 발생과 연관된 것으로 관측되었다. Ferric chloride를 사용한 정화는 UF 수급 탱크의 재순환을 가능하게 하면서 자연의 유기 물질과 혼탁을 제거하는데 큰 효과가 있다. 이 과정은 단일 54시간의 재순환 사이클을 통해 거의 99%의 물 정화에 도달하게 만들어준다. 관측된 수질은 UF 파일럿 플랜트가 아주 효과적이고, 잠재적인 병원균 조직인 Escherichia coli뿐만 아니라 대장균, 혼탁도 그리고 오염에 의한 색깔을 각각 100%, 95.1%, 91.5%를 제거한다는 사실을 설명하고 있다.