Journal of Appropriate Technology
Vol. 9, No. 2, 89-94 (2023)
pISSN 2465-9169 • eISSN 2765-6551
https://doi.org/10.37675/jat.2023.00290

Article

Water Production and Desalination Technologies by Using the Solar Energy and Suggestions for Their Future Applications

Seongpil Jeong[1,2,†]

[1]*Center for Water Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology, 5, Hwarang-Ro 14-gil, Seongbuk-Gu, Seoul 02792, Republic of Korea*
[2]*Division of Energy & Environment Technology, KIST School, Korea University of Science and Technology, 5, Hwarang-Ro 14-gil, Seongbuk-Gu, Seoul 02792, Republic of Korea*

태양에너지 기반 물 생산과 담수화 기술 사례 분석 및 제언

정성필[1,2,†]

[1]한국과학기술연구원 물자원순환연구단, 서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792, 대한민국
[2]한국과학기술연합대학원대학교(UST), KIST 스쿨, 에너지-환경 전공, 서울시 성북구 화랑로 14길 5, 02792, 대한민국

전세계적으로 물이 부족하게 될 것으로 예상되고 있으며, 그 피해는 상대적으로 소득이 낮은 개발도상국과 저소득층에서 크게 발생할 수 있을 것으로 예측되고 있다. 급격한 기후 변동으로 빗물 기원의 담수 수자원들은 댐과 같은 이미 구축된 거대 인프라가 없는 경우, 안정적인 물 공급이 점점 어려워지고 있어, 대체 수자원에 대한 수요가 증대될 것으로 판단된다. 개발도상국에서 주로 수자원으로 활용하고 있는 지하수의 경우 지질학적 원인이나 해수침투로 인하여 중금속 또는 염분 오염이 발생하고 있다. 이를 대응하기 위한 이온 분리 기술이 요구되고 있으며, off-grid로 운영이 가능한 분산형 담수화 시스템이 개발되고 있다. 이 연구에서는 태양에너지에 대한 이론적 이해를 바탕으로, 기존에 수행된 태양에너지 기반 수처리 및 담수화 시스템 사례를 들어 그 특징을 소개하고자 한다. 또한, 실제 현지 설치 사례를 바탕으로 현장에서 물 공급 방안을 선택하거나 추진할 때 고려해야 할 사항 등을 바탕으로 개발도상국 또는 저소득 지역에 대한 물 공급 방안에 대한 제안을 하고자 한다.

Because global water scarcity is expected, the water shortage will occur significantly for the developing countries and vulnerable social group. It is expected that alternative water resource will be required to provide sustainable surface water supply for the areas where water infra-structure such as Dam is limited against the unexpected climate change. Groundwater which is the one of the main water sources for the developing countries is sometimes facing contaminations by heavy metals and salts from geological reason and seawater intrusion, respectively. In order to remove the contaminants, the decentralized and off-grid type ion separation technology is required. In this study, solar-power based water treatment and desalination case studies and theoretical study for solar energy were presented. Moreover, suggestions of water supply methods for developing countries and vulnerable social group were also showed considering the field conditions based on the case studies.

KEYWORDS: Appropriate technology, Water treatment, Desalination, Solar energy, Education

Introduction

기후 변화와 도시화 및 산업화와 같은 인류의 활동으로 인하여 전세계적인 물 부족 문제가 발생하고 있다. 특히, 전세계 인구의 2/3가 최소 1개월 이상 물 부족을 겪고 있다고

†To whom correspondence should be addressed.
E-mail: spjeong@kist.re.kr
Received: 18 Auguat 2023, Revised: 21 August 2023,
Accepted: 21 August 2023

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

예상되고 있어(Mekonnen and Hoekstra, 2016), 앞으로 안전하고 안정적인 물 공급 방안을 확보하는 것이 매우 중요하게 되었다. 예측하기 어려운 물 부족이 발생하게 되었을 때, 한국에서는 제한급수와 운반급수를 수행하고 있으나, 운반급수의 경우, 물 운반 비용이 크게 발생하기 때문에 상시적으로 활용하기 어려운 점이 있다(Nguyen *et al.*, 2021).

물을 공급하는 데 있어 비용이 많이 소모되는 경우, 선진국에서는 짧은 기간 동안 대응할 수 있겠지만, 개도국에서는 실질적으로는 물 공급이 제한되는 일이 발생할 수 있다. 베트남 메콩델타(Mekong delta) 지역의 경우, 농업 및 수산업이 주요 산업인 저소득지역이다. 해당 지역에서 농업(쌀 재배)에 많은 물이 필요하지만, 건기와 우기가 명확하고 우기에 삼모작이 가능할 정도로 비가 많이 오며, 지하수 저장량도 컸기 때문에 많은 농산물 생산이 가능하였었다. 하지만 최근들어 중국에서부터 시작되어, 미얀마, 라오스, 태국, 캄보디아, 베트남으로 흐르는 메콩강의 상류 지역에 에너지 확보를 위한 댐이 들어서서 강물의 양이 줄어들고 있으며, 전 지구적 해수면 상승으로 인하여 해수가 지하수로 침투하게 되었다. 그에 따라 메콩 델타 지역의 강 하류 및 해안 지역에서는 메콩 델타 지역의 주요 수자원인 빗물과 지하수 중 지하수 사용을 하기 어려워진 실정이다.

메콩델타 지역의 경우 물 공급 방식이 생활용수와 식수로 이원화되어 있어, 주민들의 안전한 삶이 더 위협받을 수 있다. 메콩 델타 지역의 생활용수는 주변의 강 또는 지하수를 처리하여 공급하는 상수도가 있으며, 각 집 별 빗물을 모아 생활하고 있다. 상수도의 경우 해수침투, 주변의 오염 및 지질기원의 자연적 오염물질인 중금속 포함 등으로 인하여, 식수로 활용을 꺼리고 있어, 현지 주민들은 비용이 높은 생수를 구입하여 식수로 활용하고 있다. 하지만, 소득 격차에 따라 식수를 확보하는 양이 차이가 발생할 수밖에 없으며, 메콩 델타지역의 경우, 원조를 통하여 식수를 공급받는 사례도 있다.

베트남 메콩 델타 지역 뿐만 아니라 전 세계 상당수의 개발도상국과 선진국의 도서지역의 경우, 상수도 인프라 부족에 따른 물 부족 문제가 나타나고 있다. 하지만, 물 부족 지역 중 저소득 지역의 경우에는 에너지 공급에 있어서도 어려움이 있을 수 있다. 전세계적인 기온 상승을 억제하기 위하여 탄소중립적 기술 개발에 대한 수요가 증대되고 있으며, 그에 따라 화석 연료가 아닌 신재생에너지(태양, 풍력, 지열)와 산업 공정에서 발생하는 폐열을 활용하는 수처리 기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

또한, 사용하고자 하는 수자원에 이온 물질(염분 또는 중금속 등)에 의한 오염 물질이 포함되어 있는 경우, 일반적인 수돗물 생산 공정인 응집-침전-여과-소독 공정의 적용이 불가능하며, 흡착, 산화, 분리막, 전기화학 공정 등이 활용되어 왔다. 탄자니아 지역의 지하수에서 불소가 오염되어 있는 경우, 골탄 기반의 흡착제로 제거하는 연구가 수행되었으며(Maeng *et al.*, 2021), 비소의 경우는 현무암분말상에 결합된 Fe_2O_3 나노 입자를 이용하여 제거한 사례가 있었다(Sengeragchaa *et al.*, 2018). 비소 3가의 경우는 비소 5가에 비해 이동성이 크고 제거가 어렵기 때문에, 비소 3가를 영가철(Fe_0)을 이용하여 산화하여 침전 처리하는 연구도 수행된 바 있다(Leupin and Hug, 2005). 또한, 분리막 공정으로는 나노 여과(nanofiltration), 역삼투(reverse osmosis), 막증류(membrane distillation) 공정들을 이용하여 이온을 농축하고 순수한 담수를 얻는 기술이 사용되었다(Samavati *et al.*, 2023; Kunwar *et al.*, 2020; Choi *et al.*, 2021; Jeong *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2023). 또한, 해수침투로 인하여 지하수가 염분으로 오염된 지역(베트남, 캄보디아, 방글라데시 등)을 대상으로 전기화학적 탈염(Capacitive deionization) 기술이 활용된 연구 사례가 있었다(Kim and Yang, 2020).

이 연구에서는 신재생에너지 중 태양에너지를 이용하여 이온 분리가 가능한 수처리 및 담수화 공정에 대하여 저자가 직접 참여하여 연구한 사례들을 모아 공유하고, 향후 개발도상국 또는 저소득 지역에 적용가능한 이온 분리 기반 시스템에 대하여 논의하고자 한다.

Theoretical Backgrounds

1. 태양에너지

태양에너지는 태양에서 발생하여 지구로 전달되는 복사에너지를 뜻하며, 지구 표면의 대기, 구름 및 지구 표면에서 일부 반사되고, 일부는 대기로 흡수되는 특성이 있다. 결과적으로 약 50% 정도의 에너지가 지구로 전달되어 땅과 바다로 흡수된다.

태양에너지는 파장에 따라 자외선(Ultraviolet (UV) irradiation), 가시광선(Visible irradiation) 및 적외선(Infrared irradiation)으로 구분될 수 있으며, 각 파장 중 일부는 앞서 언급한 바와 같이 대기에 흡수된다. 태양에너지 중에서, 자외선의 경우에는 산화 또는 소독 능력이 있으며, 적외선의 경우는 열원으로 활용될 수 있는 특징이 있다.

2. 태양에너지 기반 예시 기술

Table 1에 정리한 것처럼, 태양에너지를 활용하는 방법으로는 태양광(light)을 이용하는 방법과 태양열(heat)을 이용하는 방법이 있다. 태양광 패널을 이용하여 빛으로부터 전기를 생산하거나(photovoltaic reaction), 수전해 과정을 통해 수소생산(hydrogen production)이 가능하다. 특히, 최근 들어

This journal is ⓒ Academic Society for Appropriate Technology 2023

태양에너지 기반으로 수소를 생산하는 과정을 그린 수소라고 정의하기도 한다. 인공 광합성(artificial photosynthesis)을 통하여 이산화탄소와 물을 이용하여, 유용한 유기물을 생산할 수도 있다. 또한, 적절한 촉매가 있다면 가시광 또는 자외선을 활용하여 물 속에 존재하는 유기물을 분해하거나 미생물이 특정 파장(254 nm)의 자외선과 접촉하는 경우, 그 자외선 강도에 따라 비활성화 또는 사멸할 수도 있는 광화학 반응이 일어날 수 있다(photochemical reaction).

Table 1. Examples of solar energy applications

Light	
Electricity production	Light => e- (photovoltaic reaction)
Hydrogen production	H_2O + light => H_2
Artificial photosynthesis	CO_2 + H_2O + light => CO
Photochemical reaction	Organics + H_2O + catalyst + light => degraded organics Microbes + UV light => inactive or dead microbes (disinfection)
Heat	
Low-graded heat source	Electricity production, water treatment or desalination

최근 들어, 태양열을 이용하여 대기 중 또는 바닷물에서 물을 회수할 수 있는 기술이 개발된 바 있었다. MIT 연구그룹에서 건조한 대기 조건(습도 20% 수준)에서 MOF (metal-organic frameworks) 소재를 이용하여 밤 동안에는 습기를 회수하고, 낮 동안 MOF에 태양열이 가해지는 경우, 수증기가 탈착 되어 회수 가능한 기술이 제안되었다(Kim *et al.*, 2017). 또한, 다른 MIT 그룹에서도 바닷물 위에 부표형으로 띄울 수 있는 태양 증류기(solar still) 기술을 제안하였으며, 태양 증류기를 플라스틱 빨대와 비닐, 그리고 바닷물로부터 상대적으로 순수한 물만 흡수할 수 있는 심지와 같은 소재로 구성하였다(Ni *et al.*, 2018). 그 결과 약 3 $/m^{2}의 생산비용으로 하루 동안 2.5L의 담수를 생산할 수 있었다(2.5 L/m^2 day). 가열판에서 흡수된 태양열과 주변 해수의 온도 차이를 이용하여 담수를 생산할 수 있는 부표형 다단 막증류(membrane distillation) 기술도 제안된 바 있었다(Chiavazzo *et al.*, 2018). 또한, 최근에는 앞서 가열판과 분리막으로 구성된 시스템을 단순화하고 성능 향상을 위한 목적으로 광열 소재가 부가된 막증류 분리막 기술들이 개발되고 있다(Yim *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2022). 여기서, 광열 소재는 가시광 또는 자외선을 이용하여 적외선 기반의 태양열 외에 추가로 열을 발생시킬 수 있는 소재다.

Case studies for Water Treatment and Desalination Technologies

1. Case studies of solar-powered membrane distillation (SPMD) process

1.1 Membrane distillation pilot coupled with the solar power collector and photovoltaic panel

중금속(비소)로 오염된 지하수를 수자원으로 활용하고 있

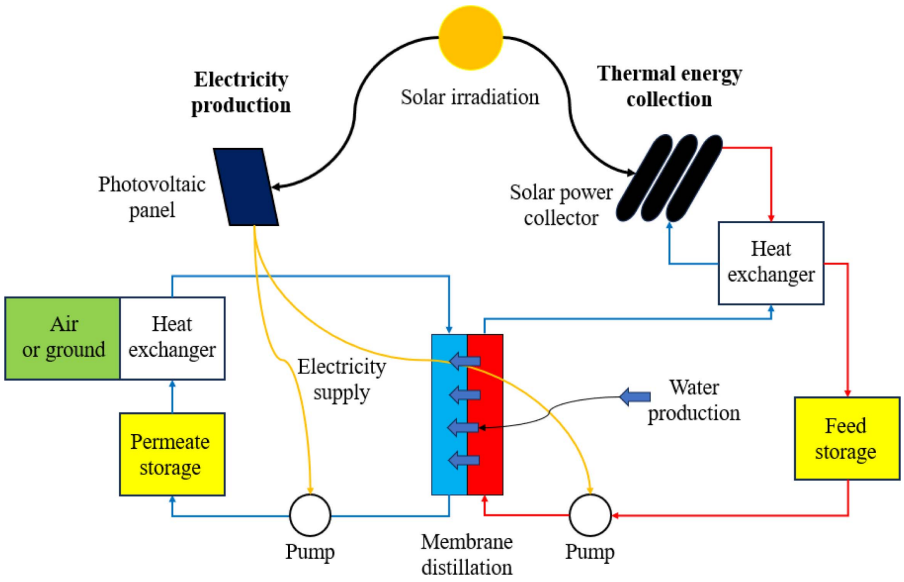

Figure 1. Conceptual diagram for membrane distillation pilot coupled with the solar power collector and photovoltaic panel.

This journal is ⓒ Academic Society for Appropriate Technology 2023

는 몽골 농촌 지역에 태양에너지 기반의 막증류 파일럿 연구가 수행된 바 있었다(Cho *et al.*, 2014). 인구 약 3000명이 살고 있고, 지하수가 유일 수자원이었던 해당 지역의 경우, 외부로부터 전기 공급 없이 태양광 패널을 통하여 마을 내 전기를 공급하고 있었다. 주민들에 대한 설문 결과, 배터리(에너지)에 대한 수요가 높았으며, 상대적으로 안전한 물에 대한 수요는 낮았다. 해당 지역에 태양열 수집기(solar power collector)로 태양열을 확보하고, 태양광 패널(photovoltaic panel)로 전기를 얻어 태양에너지 기반의 off-grid 형 막증류 시스템을 운영하였다. 해당 기술에 대한 일반적인 개념도를 Figure 1에 나타내었다. 그 결과, 비소 농도 기준은 WHO의 음용 기준인 10 μg/L를 만족하였으며, 하루 평균 5.5-24 L의 물을 생산할 수 있었다.

1.2 Development of photothermal membrane for the membrane distillation application

막증류 기술의 경우, 소수성 분리막 양측의 뜨거운 유입수와 차가운 처리수 사이의 온도 차이로 인하여 발생하는 수증기압 차이 때문에, 뜨거운 유입수 측에서 발생한 수증기가 소수성 분리막을 통과하여 차가운 처리수를 만나 응축되어 순수한 물이 형성되는 기작으로 운영이 된다. 이 과정에서 1.1 장에서 소개한 방식으로 막증류 공정을 운영하는 경우, 유입수 측 전체를 데워야 하기 때문에 배관 또는 막증류 모듈에서의 열손실이 발생할 수 있다. 따라서, 태양광 및 태양열을 직접 투명한 모듈에 공급하고 투명한 모듈을 통과한 태양광은 광열 분리막에 의하여 추가적으로 열로 전환되어 모듈 내에 존재하는 물을 가열하는 방식이 최근 제안되고 있다(Yim *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2022). 해당 방식에 대한 개념도를 Figure 2에 나타내었다. 광열 분리막의 소재 특성 및 막증류 공정의 운영 특징에 따라 유입수의 온도가 37-55℃까지 증가하는 것을 확인하였으며, 막오염 및 막젖음 문제없이 운영 가능함도 확인하였다. 광열 모듈을 적용하는 경우, 막증류 분리막을 태양 방향으로 배치하여야 하고, 태양에너지의 집광이 추가적으로 필요할 수 있을 것으로 판단된다.

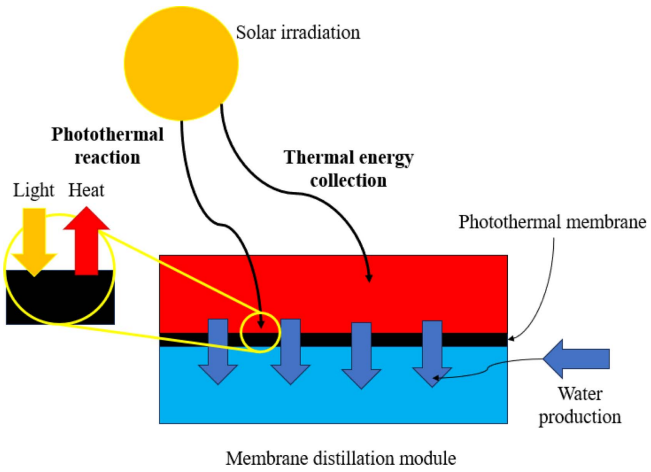

Figure 2. Conceptual diagram for photothermal membrane for the membrane distillation application.

1.3 Fouling and Wetting Monitoring on the Simulated SPMD System

막증류 공정의 운영과정에서 분리막 표면에 입자, 유기물, 무기물, 미생물과 같은 오염물질이 쌓이는 경우, 분리막의 막오염이 발생하여 물 생산 성능이 감소하거나, 일부 오염물질이 막증류 분리막 표면의 소수성을 감소시켜 유입수가 수증기 형태가 아닌 물의 형태로 분리막을 직접 통과하여 오염물질이 분리막을 통과하는 현상인 막젖음이 발생할 수 있다. 특히, 태양에너지 변동에 따라 간헐운영 되는 막증류 공정에서 더 심한 막오염과 막젖음 현상이 보고되었다(Kim *et al.*, 2023). 따라서, 막오염 및 막젖음이 언제 발생하는지 확인하기 위한 시스템을 개발하여 담수화 조건에서 적용하는 연구들이 진행되었으며(Kim *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2020), 그 개념도를 Figure 3에 나타내었다. 막오염과 막젖음을 확인할 수 있는 기술은 아직까지 모듈에 장착하여 현장에 직접 적용하기에는 분리막의 형상에 따라 한계가 있으나, 실험실에서 각종 조건을 사전에 모사하여 전처리 또는 세정 기술을 개발하는데 활용될 수 있다.

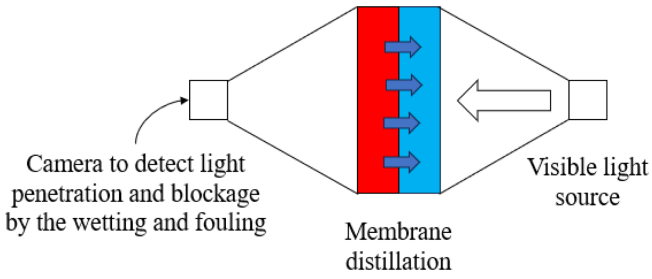

Figure 3. Conceptual diagram for fouling and wetting monitoring on the simulated SPMD system.

2. Case studies of reverse osmosis process coupled with photovoltaic panel

역삼투 공정을 전기 인프라가 없는 외딴 지역이나 도서 지역 등에서 운영하기 위해 태양광 패널과 연계하여 사용되고 있으며, 해당 기술은 상용화 단계에 있다. 하지만, 해당 기술이 개발도상국이나 저소득 지역에 맞게 최적화되는 연구들이 지속적으로 수행되고 있다. 역삼투기술의 경우, 유입수 내 이온 농도가 상대적으로 낮은 중금속이 포함된 지

This journal is ⓒ Academic Society for Appropriate Technology 2023

하수나 해수침투가 발생한 지역의 지하수를 유입 원수로 하는 경우, 담수를 생산하는데 큰 에너지가 요구되지 않는다. 특히, 태양광 패널을 이용하여 얻을 수 있는 전기에너지의 전압과 전류로 구동이 가능해야 추가 전력 공급 없이 안정적으로 운영되기 때문에, 지역 조건에 맞는 시스템 구성이 필수적이다. 메콩 델타 지역의 초등학교에 태양에너지 기반 역삼투 공정(5 m^3/일 규모)을 설치한 사례의 경우, 기본적인 전력 공급은 가능한 지역이었으나 전기 공급의 안정성이 떨어져 순간 정전으로 인한 역삼투 시스템의 충격에 대한 대응이 필요하였다(Jeong *et al.*, 2022). 또한, 초등학교의 경우 대부분 낮 동안에만 물 수요가 있기 때문에 전기 비용을 절약할 수 있는 방안이 필요했다. 따라서, 태양광 패널과 상용 전기를 모두 사용할 수 있는 역삼투 시스템이 현장에 적용되었으며, 안정적으로 운영이 되고 있다.

3. Suggestions of ion separation process for the developing country and vulnerable social group

막증류 시스템의 경우, 아직까지 전 세계적으로 대규모로 검증된 바가 없으며, 국내 과제로 진행된 GMVP 연구단에서 400 m^3/일 규모의 세계 최대규모 막증류 파일럿이 시험운행된 바 있다. 그에 비해, 역삼투 공정의 경우, 수 m^3/일 규모의 소규모 시스템으로부터 수십만 m^3/일 규모(Taweelah RO plant: 900,000 m^3/일)의 대규모 집중형 시스템까지 모두 상용화가 되어 있어, 어느 현장에 적용하여도 안정적으로 물을 공급할 수 있다는 특징이 있다. 수처리 및 담수화 공정의 경우, 처리 용량이 적을수록 1 m^3당 물 생산 비용이 증가하는 경향이 있다. 이것은 소규모의 장치를 운영하더라도 인건비와 설계비 등은 비율적으로 줄일 수 없기 때문이다. 또한, 소규모로 운영되는 시설의 경우 물이 필요할 때만 장치를 켜서 사용하는 방식으로 간헐 운영되는 특징이 있어, 분리막 표면에 막오염이 심하게 발생할 수 있고, 그에 따라 분리막의 수명이 감소하거나, 잦은 세척으로 인한 운영비가 크게 발생하고 있다(Nguyen *et al.*, 2021).

따라서, 현지 주민들의 물 사용 특성을 파악하고, 그 목적에 따라 서로 다른 방식의 물 공급 방안을 제시해야 할 필요가 있다. 1.1 장에서 몽골에서 수행하였던 연구에서, 주민들은 안전한 물에 대한 수요가 낮았으며, 현지 물 판매 단가가 너무 낮았기 때문에 중금속을 제거할 수 있는 새로운 장치나 시설을 당시에 공급하는 것은 현실적으로 어려운 것으로 판단되었다. 하지만, 주민들의 건강에 대한 관심이 증가하여, 생활용수와 식수를 구분하여 사용하는 경우, 생수 가격에 비해 담수화를 적용하더라도 공공 수도의 비용은 매우 저렴하기 때문에(Jeong *et al.*, 2022), 경제적으로는 쉽게 대체가 될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 실제로 담수화 시설을 적용하여 물을 공급하는 과정에서 주민들의 동의가 없다면 실질적으로는 적용이 불가능 할 수 있다. 따라서, 미국 캘리포니아 지역, 싱가포르 등에서 추진하고 있는 주민에 대한 지속적인 물 위기 및 안전에 대한 교육을 바탕으로 어느 특정한 수처리 방안이 아니라 물 공급 방식의 다양성과 현지에서 적용 가능한 최적 방안 등을 설명하고 논의하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

Conclusions

태양광, 태양열 및 광열 기반의 태양에너지를 에너지원으로 하여 수처리 및 담수화 연구에 적용 사례들이 증가하고 있으며, 하루 중 태양에너지 변화로부터 발생할 수 있는 간헐운영과 같은 조건을 이해해야 독립적이고 off-grid로 운영되는 시설을 개발할 수 있을 것으로 판단된다. 이 연구에서는 태양에너지를 이용하는 수처리 및 담수화 사례로서 1) 막증류 공정을 몽골의 중금속 오염 지하수 처리 적용(5.5~24 L/day), 2) 태양열 만으로 가동 될 수 있는 부표형 막증류 모듈에 적용 가능한 37-55 ℃의 온도를 얻을 수 있는 광열 분리막 연구, 3) 하루 중 변동하는 태양에너지의 모사를 바탕으로 하는 막오염 및 막젖음 모니터링 연구, 4) 몽골 메콩 델타 지역 초등학교에 5 m^3/일 규모 해수 침투된 지하수를 처리하는 시설 설치 및 운영 사례 연구들을 소개하였다. 상기 기술이 실제로 적용되기 위해서는 장치 용량에 따른 경제성과 물 수요자의 특징을 이해할 필요가 있을 것으로 판단된다. 그리고 안정적으로 물 공급 방안을 도출하기 위하여 장기적으로 주민의 동의를 얻을 수 있는 물 위기 및 안전에 대한 교육을 바탕으로 적절한 대상 기술의 선정과 조합에 대한 설명과 논의가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgements

This work was supported by Korea Institute of Science and Technology (2E32442).

References

Chiavazzo, E., Morciano, M., Viglino, F., Fasano, M., and Asinari, P. (2018). Passive solar high-yield seawater desalination by modular and low-cost distillation, Nature Sustainability, 1, 763-772.

Cho, E.S., No, T.H., Park, J.H., and Kang, H.N. (2014). Transfer and Diffusion of Appropriate Technology for Securing Safe Drinking Water in Developing Countries (III) - Scale-up Test

This journal is ⓒ Academic Society for Appropriate Technology 2023

of Membrane Distillation Using Solar Energy. Korea Environment Institute Report 2014-10-02.

Choi, M.-Y., Ji, H., Lee, H.-S., Moon, D.-S., and Kim, H.-J. (2021). Application of Seawater Plant Technology for supporting the Achievement of SDGs in Tarawa, Kiribati, Journal of Appropriate Technology, 7(2), 136-143.

Jeong, S., Kim, H.-Y., Cho, K., Yang, D., Kim, S.-R., and Park, S.-H. (2022). Installation of the Brackish Water Reverse Osmosis System Coupled with Solar Power for Drinking Water Production in Ben Tre, Vietnam Considering Water Usage and Cost, Journal of Appropriate Technology, 8(2), 75-84.

Kim, B., and Yang, D. (2020). Evaluation of Electrical Conductivity Reduction of CDI and RO for Salt Removal in Developing Countries, Journal of Appropriate Technology, 6(2), 183-189.

Kim, H., Yang, S., Rao, S.R., Narayanan, S., Kapustin, E.A., Furukawa, H., Umans, A.S., Yaghi, O.M., and Wang, E.N. (2017). Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight, Science 356, 430-434.

Kim, H.-W., Jang, A., and Jeong, S. (2023). Operational strategy preventing scaling and wetting in an intermittent membrane distillation process, npj Clean Water, 6, 50.

Kim, H.-W., Lee, S., Jeong, S., and Byun, J. (2022). Hydrophilic/Hydrophobic Dual Surface Coatings for Membrane Distillation Desalination, Journal of Korean Society on Water Environment, 38(3), 143-149.

Kim, H.-W., Yun, T., Hong, S., Lee, S., and Jeong, S. (2020). Retardation of wetting for membrane distillation by adjusting major components of seawater, Water Research, 175, 115677.

Kim, H.-W., Yun, T., Kang, P.K., Hong, S., Jeong, S., and Lee, S. (2019). Evaluation of a real-time visualization system for scaling detection during DCMD, and its correlation with wetting, Desalination, 454, 59-70.

Kunwar, P., Ahn, J., Baek, Y., and Yoon, J. (2020). Technical and Economical Assessment of Adsorption and Reverse Osmosis for Removal of Ammonia from Groundwater of Kathmandu, Nepal, Journal of Appropriate Technology, 6(2), 174-182.

Lee, S., Bayarkhuu, B., Han, Y., Kim, H.-W., Jeong, S., Boo, C., and Byun, J. (2022). Multifunctional photo-fenton-active membrane for solar-driven water purification, Journal of Membrane Science, 660, 120832.

Leupin, O.X., and Hug, S.J. (2005). Oxidation and removal of arsenic (III) from aerated groundwater by filtration through sand and zero-valent iron, Water Research, 39(9), 1729-1740.

Maeng, M.-S., Lee, H.I., Byun, J.-S., Park, H.-J., and Shin, G.-A. (2021). Sustainable Business Model of Water Purification Equipment and Local Manufacturing Technology Transfer of High Adsorption Bone Char to Remove Fluoride from Groundwater, Journal of Appropriate Technology, 7(1), 41-50.

Mekonnen, M.M., and Hoekstra, A.Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity, Science Advances, 2(2), e1500323.

Ni, G., Zandavi, S.H., Javid, S.M., Boriskina, S.V., Cooper, T.A., and Chen, G. (2018). A salt-rejecting floating solar still for low-cost desalination, Energy and Environmental Science, 11, 1510-1519.

Nguyen, H.T., Cho, K., Jang, A., and Jeong, S. (2021). Cost analysis and scheduling of the desalination vessel using reverse osmosis technology, Membrane and Water Treatment, 12(4), 177-185.

Samavati, Z., Samavati, A., Goh, P.S., Ismail, A.F., and Abdullah, M.S. (2023). A comprehensive review of recent advances in nanofiltration membranes for heavy metal removal from wastewater, Chemical Engineering Research and Design, 189, 530-571.

Sengeragchaa, B., Ngoc, N.H., Kim, H.J., Sunil Babu, E., Choi, D., Jeong, S.-W., and Kim, S. (2018). Synthesis and its Application of Fe_2O_3 Nanoparticles on Basalt Powders for Removal of Arsenic from Water, Journal of Appropriate Technology, 4(2), 149-153.

Yim, J.E., Lee, S.H., Jeong, S., Zhang, K.A.I., and Byun, J. (2021). Controllable porous membrane actuator by infiltration coating of conducting polymers, Journal of Materials Chemistry A, 9, 5007-5015.

This journal is © Academic Society for Appropriate Technology 2023