

Original Article

HYSYS 공정 설계를 통한 다중효용증발기 적용 해수담수 성능 해석

임승택¹ · 이호생^{2,†}

¹선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터 연구원
²선박해양플랜트연구소 해수에너지연구센터 책임연구원

Analysis of Seawater Desalination Performance by Applying Multi-effect Evaporator Using HYSYS

Seungtaek Lim¹ and Hoseang Lee^{2,†}

¹Researcher, Seawater Energy Plant Research Center Korea
Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea
²Principal Researcher, Seawater Energy Plant Research Center Korea
Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

요 약

인구 증가와 산업화에 따라 담수의 수요가 증가되고 있으며, 이를 확보하기 위한 담수화 플랜트의 연구 및 개발이 진행되고 있다. 또한, 담수화 기술 개발은 에너지 감소를 위해 막 기반의 RO가 60% 이상을 차지하고 있으며, 열에너지 기반의 MSF와 MED의 수요는 감소하고 있다. 그러나 산업 폐열의 확보를 통해 MED 기반의 담수화 수요가 꾸준히 발생하고 있으며, TVC를 적용함으로써 에너지 효율을 높이고 있다. 본 논문에서는 산업폐열 스팀과 TVC를 활용한 담수화 기술의 보급 최적화를 위하여 시뮬레이션을 통한 성능 비교를 수행하였으며, MED의 보급률이 높은 중동의 해수 온도 분포를 통해 20~28 °C의 온도데이터를 적용한 6단 증발 MED를 설계하여 6단 증발기에서 발생된 증기의 TVC와 해수 가열 비율을 변화를 통해 최대 담수 생산량과 GOR을 분석하였다. 이때 28 °C의 해수 온도조건에서 TVC와 해수 가열기 유입 비율을 4:6으로 공급할 경우 최대 1.696 kg/s의 담수 생산과 5.65의 GOR을 기록하였다. 이때 농축수의 염도는 최대 79,300 PPM를 기록하여 고도 농축을 위한 원수로 활용될 수 있다.

Abstract – Demands for fresh water are increasing due to industrialization and population increase. Therefore, research and developments on desalination plant are actively implemented. Currently, RO technique is dominant (over 60%) in desalination technology due to its energy saving benefit, while demands for MSF and MED are decreasing. Nonetheless, demands for MED desalination using waste heat are consistently emerging, and its energy efficiency is augmented by applying TVC. In this paper, performance characteristics of TVC and waste heat (steam) using desalination module are examined using simulation tool. 6 stage MED is designed with temperature data of 20 to 28 °C (seawater temperature in the middle east sea), Maximum concentrated water production and GOR are examined by comparing the rate of TVC and seawater heating rate by steam produced from 6 stage evaporator. For result, maximum desalinated water product was 1.696 kg/s with 5.65 GOR at 28 °C seawater, TVC and seawater heater input ratio of 4:6. In this case, salinity of concentrated water showed 79,300PPM at maximum. Such byproduct can be used as raw water for higher concentration.

Keywords: Multi Effect Distillation(다중효용담수화), Thermal Vapor Compression(열적 증기 압축기), Reverse osmosis(역삼투), Multi Stage Flash(다단 증발식), Salinity(염도)

1. 서 론

최근 몇 년 동안 인구가 급격한 증가와 산업이 확대 되면서, 담수의 수요가 증가하고 있다. 국제 담수화 협회(International

Desalination Association)는 현재 전 세계적으로 18,000개 이상의 담수화 플랜트가 운영되고 있으며 최대 생산 능력은 하루 약 9천 만 입방 미터(m³/d)의 담수라고 보고하였다(Seamonds[2016]).

또한 해수를 통한 물질 추출을 통해 다양한 광물질이 생산되고 있으며, 이와 같은 해수에서의 미네랄 추출은 고대부터 이어지고

†Corresponding author: hslee@kriso.re.kr

있다. 현재 가장 농축 된 네 가지 금속 인 Na, Mg, Ca 및 K는 상업적으로 해수에서 추출되고 있으며(Loganathan *et al.*[2017]), 2015년 미국에서 마그네슘 생산량의 63%는 바닷물과 염수로 부터 공급되었다(Campbell[2016]). 브롬은 또한 중국과 일본의 해수에서 생산되고 있으며, 바닷물에서 리튬 추출은 1970 년대에 시도되었지만 곧 중단되었다. 해수에서 우라늄을 추출하는 아이디어는 적어도 1960 년대부터 고려되어 왔지만 1990 년대 후반 일본에서 추출된 우라늄은 몇 그램에 불과하고 있다(Bardi[2008]).

이와 같은 담수 및 미네랄의 수요 증가에 따라서 담수화 시장이 급격히 성장하고 있으며, 현재 해수담수시장은 약 152억 달러 규모로서 12년 이전보다 약 380%가 증가한 규모이다. 기존에는 해수를 가열 증발시켜 담수를 생산하는 MSF(Multi Stage Flash) 담수화 장치가 주를 이루었으나 높은 전력소비량과 고온 해수의 부식 문제 등으로 현재는 약 20%의 산업을 차지하고 있으며, 60%이상의 담수화 시장이 RO(Reverse osmosis) 담수화 방식으로 전환되었고 그 규모 또한 증가하는 추세이다. 하지만 에너지의 활용과 산업 규모에 따라서 MED(Multi-effect distillation)과 같은 증발식 기반의 담수화 방식이 사용되고 있으며, 이를 개선하기 위한 연구가 진행되고 있다(Ophir and Lokiec[2005]). MED는 전체 담수화 설비의 10%를 차지하고 있으며, 대량의 미활용열이 발생하는 발전소 및 산업체와 연계하여 활용되고 있다.

이와 같이 MED는 시뮬레이션을 통한 공정 개발은 최근에도 연구되고 있으며, Hamad 등에 의해 MED와 TVC(Thermal Vapor Compression)를 활용한 MED-TVC 공정도 개발이 진행되고 있다(Hamad *et al.*[2018]; Elhassan *et al.*[2016]). 또한, 다양한 담수화 방식과의 연계를 통한 담수율 증가와 해수 농축율을 증가하는 방안에 대한 연구가 진행되었다. Dahdah는 MED와 MSF의 하이브리드 담수화 방식에 대한 연구를 수행하였으며, Mirko Skiborowski는

역 삼투압(RO) 및 정방향 공급 MED 하이브리드 시스템의 상부 구조를 최적화하였다.

하지만 MED를 통한 담수화의 제약은 다수 개의 배드를 통해 축적된 브라인의 염도가 80,000~150,000 ppm 이상을 초과할 경우 설비 내부에 부식을 야기하는 것은 물론이며 국가적 차원의 농축 해수 발생에 따른 배출 제한이 되기 때문이다. 따라서 다양한 하이브리드 담수화 방식은 설비 부식과 배출제한에 의해 일정 규모 이상의 농축은 제한되고 있다(Kaplan *et al.*[2017]).

본 논문에서 제시하고자하는 MED 담수화 시뮬레이션 모델은 다단의 증발 챔버를 통해 고도 농축된 해수를 흡착식 담수화(AD, Adsorption desalination) 설비와 연계하여 해수 담수 후의 배출수 발생을 최소화 하는 방안에 대한 것으로서 보다 친환경적인 담수화 모델을 개발함에 있다. MED와 TVC의 최적화 설계를 위한 성능 해석을 통해 AD에 공급하기 위한 농축수의 PPM을 산출하고 MED를 통해 생산되는 담수량을 확보하고 AD를 통해 공급된 냉열을 활용한 담수 응축을 적용하고자 한다. Fig. 1은 MED-TVC 기반 해수 담수화 플랜트 공정 개념도이다.

2. MED-TVC 공정 분석

2.1 증발기 분석

다단효용증발식 담수화 공정의 핵심 장치는 저압형성 후에 증기화된 담수를 생산하는 증발기이다. 증발기의 개수 및 형상에 따라 담수생산량과 GOR(Gained Output Ratio) 등 주요 성능에 영향을 미치며, 증발기 형상 개선이나 대수 조절을 통해 시스템의 최적화가 가능하다. 본 공정에서는 증발기의 대수 변화에 따른 시스템 영향만을 적용할 계획이며, 형상에 따른 최적화는 포함되지 않는다. 증발기의 물성 분석을 통해 에너지 및 물질 균형을 다음과 같이 계

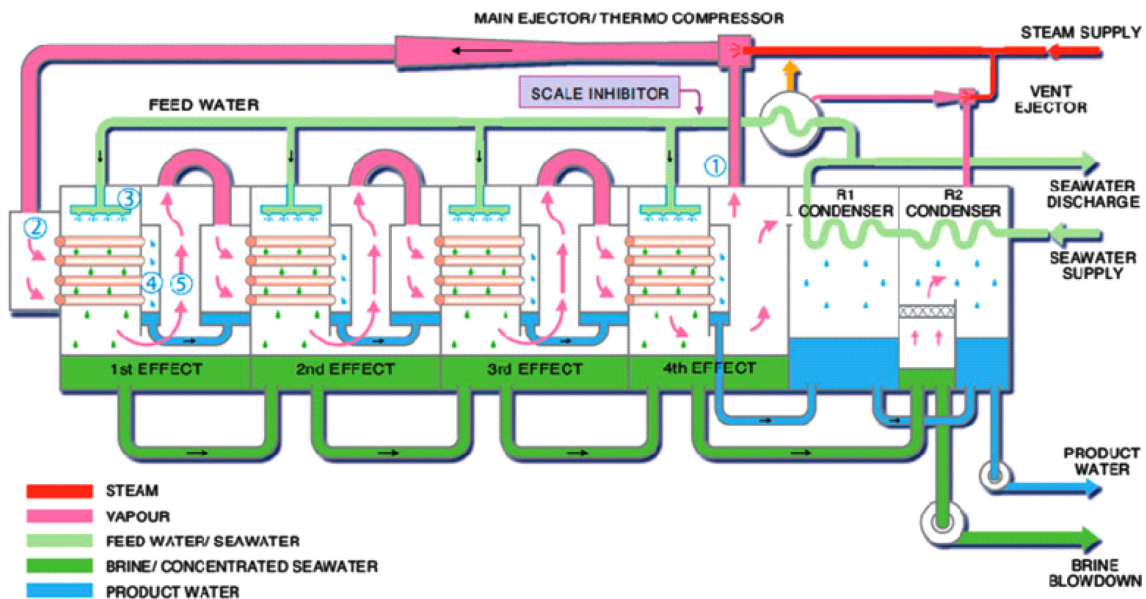


Fig. 1. Schematic diagram of MED-TVC based seawater desalination plant.

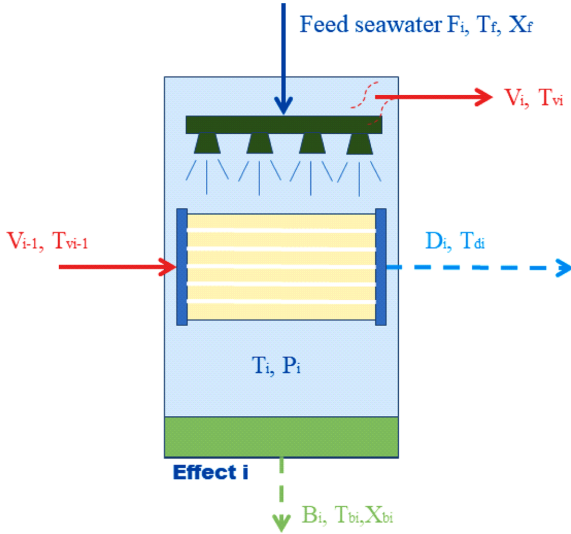


Fig. 2. Design of MED evaporator.

산하였다. Fig. 2는 MED 적용 증발기의 개념도이다.

식 1과 같이 공급되는 해수의 유량(F_i)은 증발이후의 브라인량(B_i)과 담수량(V_i)의 총 질량과 동일하며, 식 2에서와 같이 공급되는 해수의 염분량(X_f)은 배출된 브라인의 염분량(X_{di})과 동일하다. 또한, 식 3은 증발기에서 공급 증기의 잠열변화량은 해수의 온도감소에 따른 현열량과 증기 생산에 따른 잠열량의 총량을 나타낸다.

각 증발기에서 발생하는 증기의 열량은 식 4와 같으며, 식 5는 증기의 열량은 공급 해수와 냉각수의 온도차를 통해 발생하는 응축기 내부 증기의 응축 열량을 나타낸다.

$$F_i = V_i + B_i \quad (1)$$

$$X_f F_i = X_{di} B_i \quad (2)$$

$$V_{i-1} \lambda_{i-1} = F_i C_p (T_i - T_f) + V_i \lambda_i \quad (3)$$

$$Q_{ei} = V_i \lambda_i \quad (4)$$

$$V_c \lambda_i = (F_i + F_{cw}) C_p (T_f - T_{cw}) \quad (5)$$

- 여기서 F_i = 해수 유입량(Seawater inflow rate)
 V_i = 증기 발생량(Steam generation rate)
 B_i = 제 2 증발기 유입 브라인(2nd evaporator inlet brine)
 C_p = 해수 비열(Seawater specific heat)
 X_f = 해수의 염도(Salinity of seawater)
 X_{bi} = 브라인 염도(Salinity of brine)
 λ_i = 공급증기의 증발잠열(Latent heat of evaporation of supply steam)
 M_{cw} = 냉각수 유량(Coolant flow rate)
 Q_{ei} = 증발열량(Evaporation heat)
 T_f = 해수의 온도(Seawater temperature)
 T_i = 증발기 내부 온도(Temperature inside the evaporator)
 T_{cw} = 냉각수 온도(Coolant temperature)
 P_i = 증발기 내부 압력(Pressure inside the evaporator)
 D_i = 생산된 담수 유량(Produced water mass flow rate)

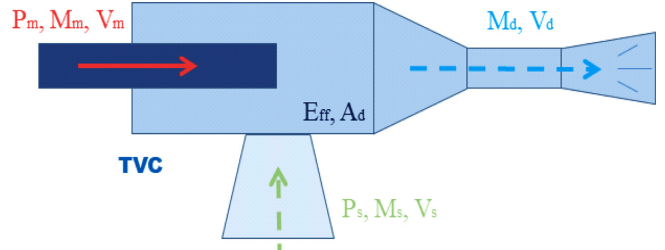


Fig. 3. Design of MED-TVC desalination ejector.

2.2 TVC 분석

증기 압축기는 공급되는 스팀의 압력을 감압하면서 모티브 스팀의 압력을 더 낮추게 되는 원리를 가지고 있으며, 이를 통해 MED 내부의 압력을 저감할 수 있게 된다. 이와 같은 TVC 압축 공정은 진공펌프 활용에 따른 전력 손실을 저감할 수 있어 공정 효율에 영향을 미친다. 이젝터를 구성하기 위한 다양한 해석 방안이 있으나 본 논문에서는 Perry에 의해 제안된 Gas to Gas 이젝터 이론을 착안하였고, 계산식은 아래와 같다(Green and Perry[1997]; Aerstn and Street[1978]). Fig. 3은 TVC 적용 이젝터의 개념도이다.

이때 사용된 이론은 공급 증기와 흡입 증기와의 압력차를 통한 유량값에 관한 것으로서 공급 증기와 흡입 증기, 토출 증기의 유량과 유속에 의해 결정된다. 공급 증기의 유량과 유속이 증가할수록 공급 증기와의 압력차가 증가하여 유입 압력을 낮추는 효과를 갖는다.

$$(P_m - P_s) A_m = M_m V_m E_{ff} - M_d V_d - M_s V_s \quad (6)$$

- 여기서 P_m = 공급 증기 압력(Motive Pressure)
 P_s = 흡입 증기 압력(Suction Pressure)
 A_d = 토출 노즐 면적(Area of Discharge Nozzle)
 M_d = 토출 증기 유량(Discharge Mass Flow rate)
 V_d = 토출 증기 유속(Discharge Velocity)
 M_m = 공급 증기 유량(Motive Mass Flow rate)
 V_m = 공급 증기 유속(Motive Velocity)
 M_s = 흡입 증기 유량(Suction Mass Flow rate)
 V_s = 흡입 증기 유속(Suction Velocity)
 E_{ff} = 이젝터 효율(Overall Efficiency of Ejector)

3. MED-TVC 사이클 설계

3.1 운전 조건

본 시뮬레이션에 적용된 해수 및 스팀 조건은 Table 1과 같다. MED의 활용이 높은 중동의 표층 해수의 경우 오만, 쿠웨이트 등 걸프 해안에 위치한 나라에서 평균 18~22 °C이며 사우디 서부와 이집트가 위치한 홍해 지역의 해수 온도 평균이 22~24 °C로 약 2~4 °C 가량 높게 나타나고 있다. 연간 온도 변화 등을 고려하여 해수의 적용온도는 20 °C에서 2 °C의 편차를 두고 28 °C까지 적용하여 비교하였다. 반면 공급되는 스팀은 산업 폐 스팀을 고려하였으며, 기존

Table 1. Specifications of MED and seawater components

적용 데이터	값
스팀 온도(°C)	170
스팀 압력(kPa)	500
스팀 유량(kg/s)	0.3
해수 온도(°C)	20, 22, 24, 26, 28
해수 압력(kPa)	101
해수 유량(kg/s)	3.7
증발기 온도변화(°C)	5
증발기 압력감소(kPa)	15
TVC 공급/해수 냉각기 스팀 공급 비율	4:6, 4.5:5.5, 5:5, 5.5:4.5 6:4
증발기 열손실(%)	0, 1, 2, 3, 4, 5
펌프 운전 설계	값
해수 펌프 효율	75%
담수 펌프 효율	75%
해수펌프 전압정	10
담수 펌프 전압정	10
해수 성분	비율
물(H ₂ O)	96.5%
염도	3.5%

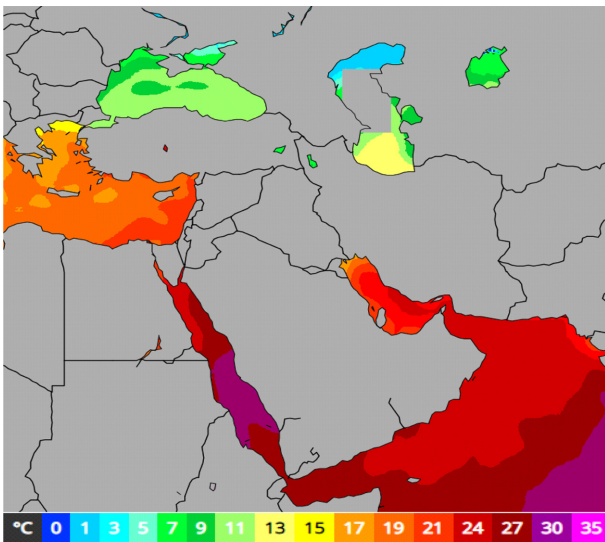


Fig. 4. Temperature distribution in the middle east sea.

문헌을 참고하여 170 °C를 적용하였다(Snoussia *et al.*[2018]). Fig. 4는 중동의 표층해수 온도 조건이다.

적용되는 MED 증발기는 Ruth Kaplan에 의해 제안된 모델과 같이 6단을 적용하였다(Kaplan *et al.*[2017]). 각 단의 온도 변화는 설계 방식에 따라 다양하게 적용되며, Dastgerdi는 3 °C의 변화량을 고려하였고, Ruth Kaplan은 10 °C의 온도변화를 고려하였다(Dastgerdi *et al.*[2016]). 본 논문에서는 5 °C의 온도 변화를 적용하였으며, 압력 감소는 15 kPa를 적용하였다. 또한, 공급되는 해수 유량은 2.7 kg/s 이다. 6단 증발기에서 발생된 스팀의 60%는 TVC에 공급되며, 40%는 해수 냉각기로 공급되어 저온의 해수를 가열하는 용도로 활용된다. 하지만 TVC 공급 스팀의 비율을 변화하면서 발생하는 성능 변화를

고려하여 4:6, 4.5:5.5, 5:5, 5.5:4.5 6:4의 비율 변화를 적용하여 담수 생산량과 GOR을 비교하였다.

이때 소요되는 운영 전력은 공급 해수 취수를 위한 해수펌프와 생산된 담수를 저장탱크로 공급하기 위한 담수펌프가 있으며, 각 펌프의 효율은 75%를 적용하였으며, 해수의 취수와 담수 공급에 배관 손실을 고려하여 10 m의 수두 조건이 필요할 것으로 계산하였다.

Fig. 5는 6단 증발기가 적용된 MED-TVC 담수공정으로서 해수 펌프에 의해 취수 후 예열기(E-104)에서 가열된 고온의 해수가 제 1 증발기(V-100)로 유입되며, 증발기에서 발생된 증기는 제2 증발기로 유입되어 응축되면서 열을 제2증발기(V-101)로 공급하고 응축된 담수는 담수저장탱크(V-106)로 유입된다. 제 6 증발기(V-105)에서 발생된 증기 일부는 해수 예열기(E-104)로 유입되어 해수를 가열하며, 일부는 공급 스팀이 TVC(MIX-100)로 유입되므로 발생하는 압력감소에 의하여 증발기 내부의 잔류 증기가 TVC로 유입되어 도출증기의 유량을 증가시키게 된다. 담수저장탱크에 공급된 담수는 펌프로 활용처에 공급되며, 각 단에서 발생된 드레인 은 다음단의 공급 해수로 활용되다가 제 6 증발기에서 최종 농축되어 AD 또는 가스하이드레이트와 같이 고도 농축이 가능한 담수화 설비로 공급된다.

3.2 해수 성분 조건

해수에 용해 된 이온이 가장 많이 있는 것은 나트륨, 염화물, 마그네슘, 황산염 및 칼슘 이다(Michael[2010]). 그 밖에는 리터당 최대 2 마이크로그램의 질소 원자 농도의 아미노산을 포함하여 소량의 다른 물질이 발견되고 있다(Dickson and Goyet[1994]). 하지만 본 시뮬레이션에 적용되는 해수 조건은 염도기준 35,000 ppm을 적용하였다(Kaye and Laby[1995]).

3.3 해석 적용 방정식

해수 내에 용해되어 있는 소금 성분과 기타 광물성질을 시뮬레이션에 표현하기 위하여 다양한 물성 조건이 구현 가능한 해석식을 적용해야 한다. 이번 시뮬레이션에 적용된 UNIQUAC 모델은 상 평형(즉, 액체-고체, 액체-액체 또는 액체-증기 평형)의 모델 해석에 자주 적용된다. UNIQUAC과 같은 모델을 통해 화학 엔지니어링 분야에서 다 성분 화학 혼합물의 상 거동을 예측할 수 있으며, 본 해석에 활용된 Aspench HYSYS V10의 분리 장치 내부 및 주변의 질량 균형(Balance)을 계산하는데 사용되었다(Maurer and Prausnitz [1978]; Jiménez *et al.*[2000]; Muñoz *et al.*[2006]).

대부분의 지역 구성 모델과 마찬가지로 UNIQUAC은 초과 Gibbs 자유 에너지를 조합 및 잔류(Combinatorial and Residual) 기여로 분할한다.

$$G^E = (G^E)^C + (G^E)^R \tag{7}$$

또한, i 번째 구성 요소의 계산된 활동 계수(Activity Coefficients)는 다음과 같이 분할된다.

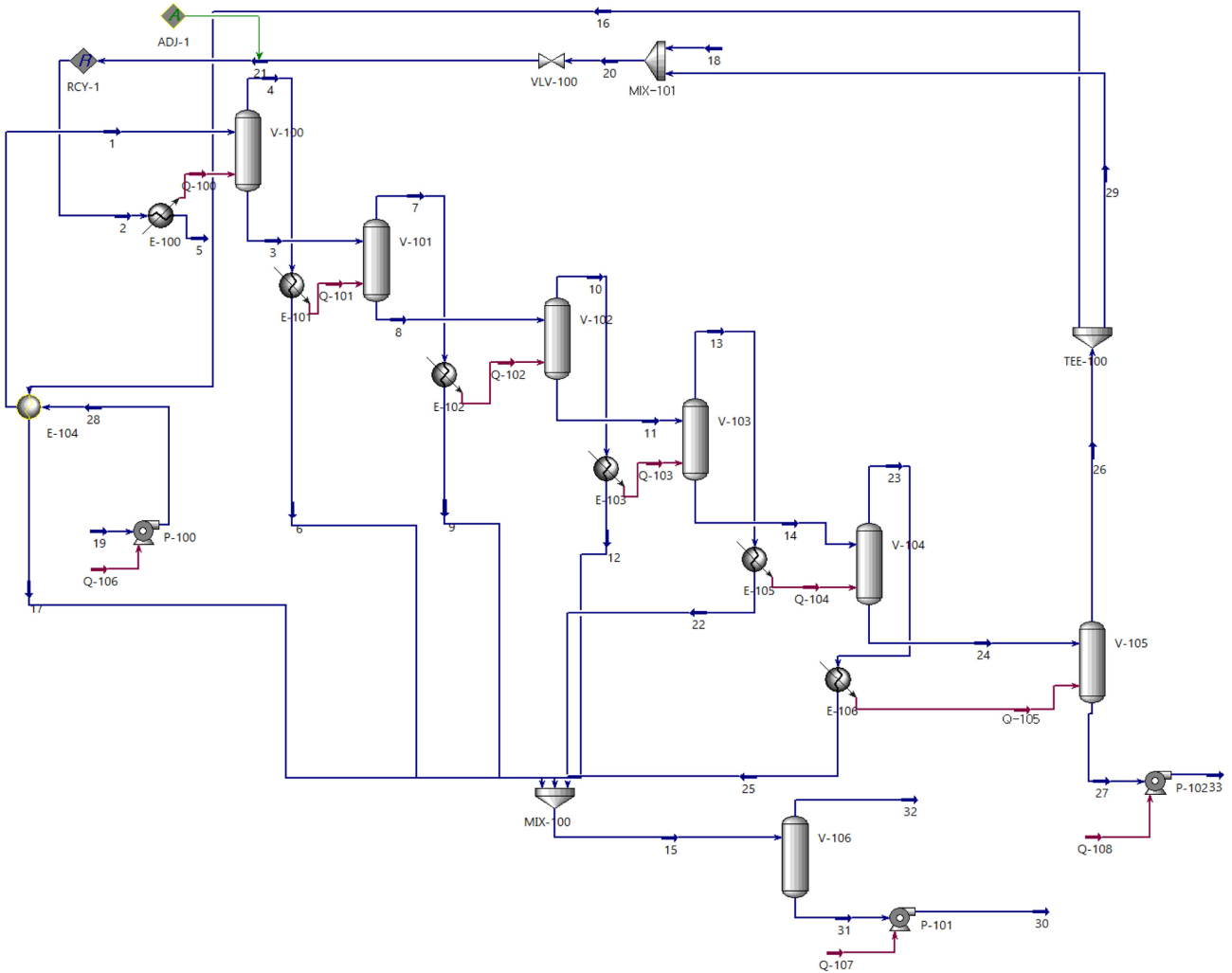


Fig. 5. Schematics of 6 stage MED model using HYSYS.

$$\ln r_i = \ln r_i^C + \ln r_i^R \quad (8)$$

본 식은 분자 모양의 차이로 인해 이상적인 용해도와의 편차를 정량화하는 엔트로피와 혼합시 서로 다른 분자 사이의 상호 작용력의 변화로 인한 엔탈피로 보정한 것이다.

4. MED-TVC 해석 결과

4.1 MED-TVC 모델의 성능평가

6단 MED-TVC 담수화설비에서 각 증발기에서 발생하는 담수와 염도는 MED의 단수가 증가할수록 생산량이 증가한다. 이와 같은 담수량 증가는 각 단에서의 증발압력이 감소되면서 증발온도가 감소되고 전단의 증발량보다 더 많은 증발이 발생하면서 이를 응축하기 위한 증발잠열이 증가됨에 있다. 하지만 6단에서 증발된 증기는 일부 TVC에 공급됨으로 담수 생산량이 감소되는 것으로 보이나, TVC에 0.105 kg/s의 증기가 공급되므로 총 0.263 kg/s이 발생하게

된다. 반면 해수의 염도는 각 단에서 염도가 상승하게 되다가 최종 79,300 ppm의 염도에 0.3663 kg/s로 배출된다. Fig. 6은 6단 MED의 각 단에서 발생하는 담수량과 염분량이며 담수생산은 각 단에서 점차 증가하다가 5단 증발기에서 0.3634 kg/s를 나타내었고 이때 염분량은 63,800 ppm을 나타내었다.

Fig. 7은 증발기에서의 열손실 비율에 따른 담수생산량과 농축량에 대한 영향으로서 각 증발기에서 최대 5%의 열손실이 발생할 경우 기존대비 29.8%의 농축물 감소와 33.6%의 담수 생산량 감소가 발생하였다.

Table 2는 MED-TVC 각 공정에서의 증기와 해수의 물성치이며, 15번은 최종 생산된 담수의 물성치고, 18은 공급되는 스팀의 물성을 의미한다. 6단 증발기에서 생산된 증기(16)의 일부가 해수(28)와 열 교환을 통해 액화(17)되어 담수탱크로 유입되고, 48 °C까지 가열된 해수(1)가 1단 증발기로 공급된다. 증기(16) 공급량이 변화에 따라서 해수의 온도 상승의 변화를 야기하며, 응축되는 증기(17)의 건조 변화에 영향을 미친다.

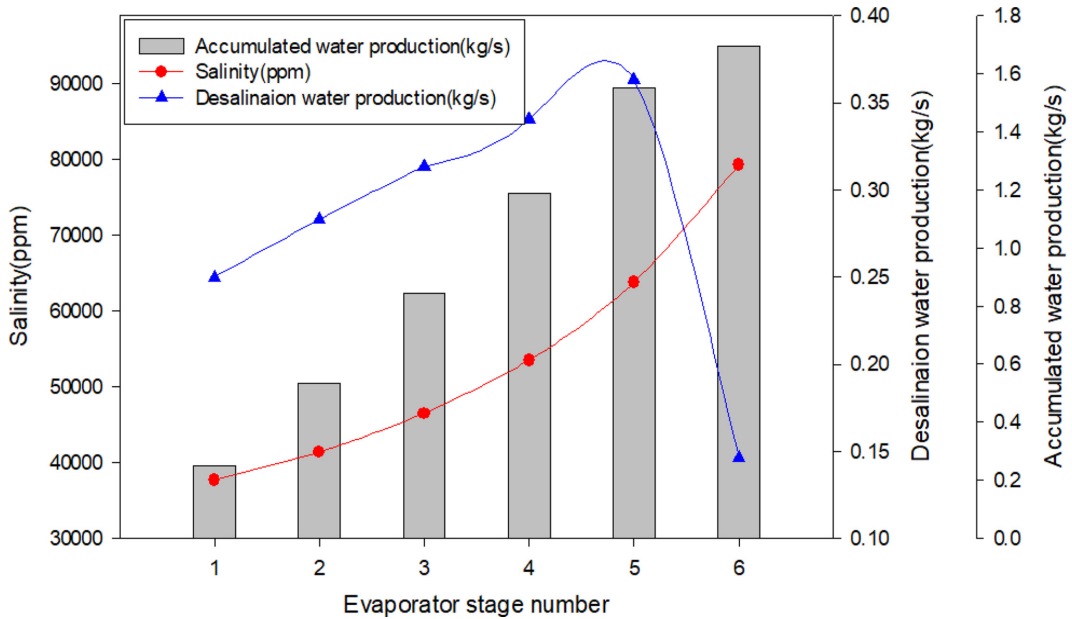


Fig. 6. Desalination water production and salinity in accordance to MED-TVC evaporator stage.

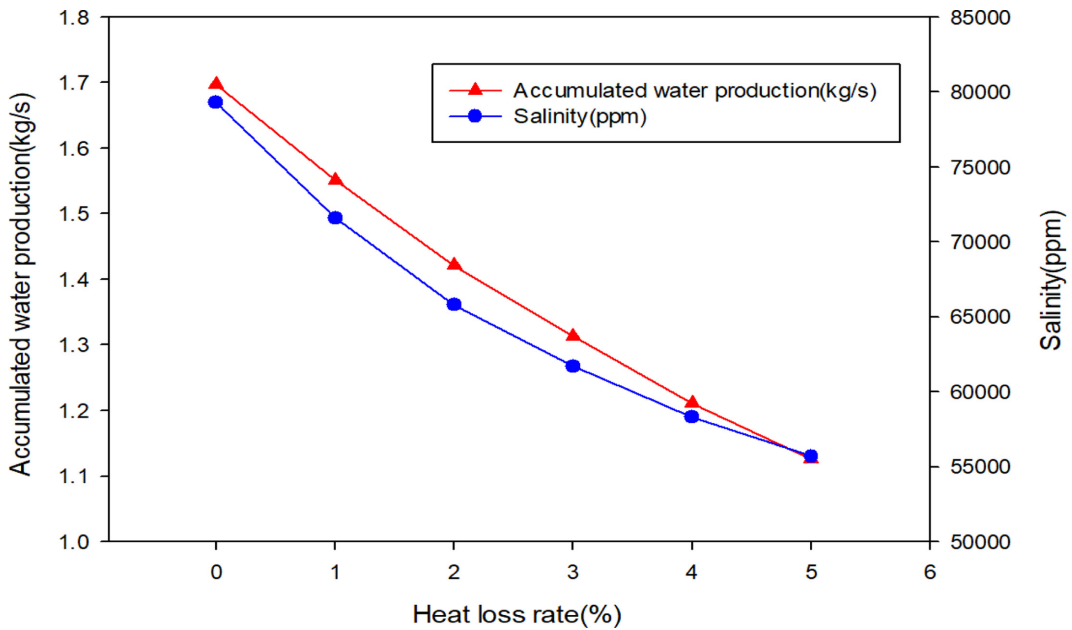


Fig. 7. Desalination water production and salinity in according to the evaporator heat loss.

4.2 해수 및 유량 변화에 따른 성능평가

4.2.1 담수 생산량

Fig. 8과 같이 해수 온도 및 TVC 유량비 변화에 따른 담수 생산량 변화를 비교하였으며, TVC 공급량이 40%이며, 해수 온도가 28 °C 이 시점에서 최대 담수생산량인 1.696 kg/s가 발생하며, 동일 해수 조건에서는 TVC 공급량이 60%일 때 최소 1.125 kg/s의 담수가 생산되었다. 20 °C의 최저 해수온도 조건에서는 TVC 공급량에 따라 최대 1.104 kg/s에서 최소 0.699 kg/s까지 감소되었다. 해수온도 및 TVC 변화에 따라 최대 142.6%의 담수량 상승이 발생하는 것을 확인 하였다.

이때, TVC 공급량이 감소될수록 예열기에서의 열 회수량이 증가하게 되며, 초기 해수 열원이 높은 28 °C의 경우 1차 증발기로 유입되는 고온해수의 현열량이 증가되므로 담수 생산량을 증가시킨다.

4.2.2 농축수의 염도 변화량

Fig. 9와 같이 해수 온도 및 TVC 유량 변화에 따른 농축수 염도 변화는 담수생산과 동일하게 28°C해수 조건과 4:6의 TVC 공급 조건에서 최대 79,300 ppm의 염분이 농축되었으며, 20 °C의 해수온도조건과 6:4의 TVC 공급 유량 조건에서는 45,200 ppm으로 급격한 감소가 발생하였다. 이때 농축수 농도의 변화는 75.4%의 증가

Table 2. Data of 6 stage MED model using HYSYS (at 28 °C seawater)

Name	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Vapour Fraction	0.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.2
Temperature [C]	48.0	129.9	95.6	95.6	73.4	90.6	90.4	90.4	85.4	85.1	85.1	80.1	79.7	79.7	73.4	74.6	73.4
Pressure [kPa]	201.0	36.1	84.0	84.0	36.1	84.0	69.0	69.0	69.0	56.0	56.0	56.0	45.0	45.0	36.0	36.0	36.0
Molar Flow [kgmole/h]	685.5	103.9	635.6	49.9	103.9	49.9	56.5	579.1	56.5	62.6	516.5	62.6	68.0	448.4	339.0	29.3	29.3
Mass Flow [kg/s]	3.7	0.5	3.5	0.2	0.5	0.2	0.3	3.2	0.3	0.3	2.9	0.3	0.3	2.5	1.7	0.1	0.1
Liquid Volume Flow [m ³ /h]	12.7	1.9	11.8	0.9	1.9	0.9	1.0	10.7	1.0	1.1	9.6	1.1	1.2	8.4	6.1	0.5	0.5
Heat Flow [MW]	54.5	6.9	50.0	3.3	8.1	3.9	3.8	45.6	4.4	4.2	40.8	4.9	4.5	35.5	26.5	2.0	2.2
Name	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	
Vapour Fraction	1.0	0.0	1.0	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	
Temperature [C]	170.0	28.0	129.9	129.9	74.7	74.4	74.4	69.4	74.6	74.6	28.0	74.6	73.4	73.4	73.4	74.6	
Pressure [kPa]	500.0	101.0	36.0	36.0	45.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	201.0	36.0	136.0	36.0	36.0	136.0	
Molar Flow [kgmole/h]	59.9	685.5	103.9	103.9	68.0	72.6	375.8	72.6	73.2	302.6	685.5	43.9	330.5	330.5	8.5	302.6	
Mass Flow [kg/s]	0.3	3.7	0.5	0.5	0.3	0.4	2.2	0.4	0.4	1.8	3.7	0.2	1.7	1.7	0.0	1.8	
Liquid Volume Flow [m ³ /h]	1.1	12.7	1.9	1.9	1.2	1.3	7.1	1.3	1.3	5.8	12.7	0.8	6.0	6.0	0.2	5.8	
Heat Flow [kW]	3.9	54.8	6.9	6.9	1.2	1.3	7.1	1.3	1.3	5.8	12.7	0.8	6.0	6.0	0.2	5.8	

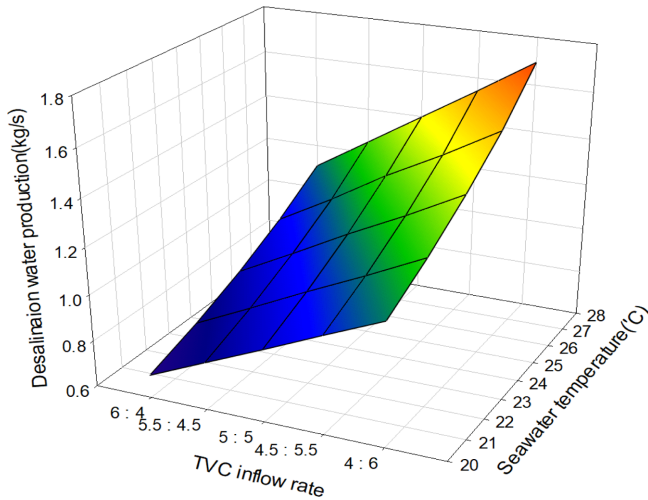


Fig. 8. Desalination water production rate in accordance to seawater temperature and TVC inflow rate.

량이 발생하며, 28 °C 해수조건에서는 TVC 변화에 따라 염도의 변화가 45.4%가 차이가 발생하고 4:6의 TVC 공급 유량 조건에서는 해수 온도 변화에 따라 22.3%의 차이가 발생하였다.

담수생산량과 같이 TVC 공급량이 감소될수록 예열기에서의 열 회수량이 증가하게 되며, 해수 염분이 높은 경우 1차 증발기로 유입되는 고온해수의 현열량이 증가되므로 최종 염분도가 상승하게 된다.

4.2.3 GOR 변화량

Fig. 10과 같이 GOR의 변화량은 공급 스팀 대비 담수 생산량을 의미하며, 0.3 kg/s로 일정하게 공급되는 스팀량을 고려하면 MED-TVC 모델의 최대 GOR은 5.65에 달하였다. 반면 최저 담수량을 보인 20 °C 조건에서는 GOR 또한 2.33으로 감소하였다.

담수량 및 염분도의 변화량과 마찬가지로 예열열량과 해수온도의 영향으로 담수효율을 나타내는 GOR이 증가하게 된다.

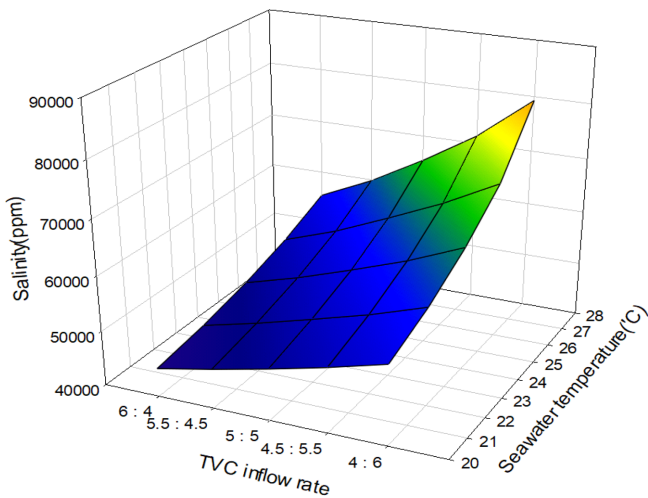


Fig. 9. Salinity gradient of concentrated water in accordance to seawater temperature and TVC inflow rate.

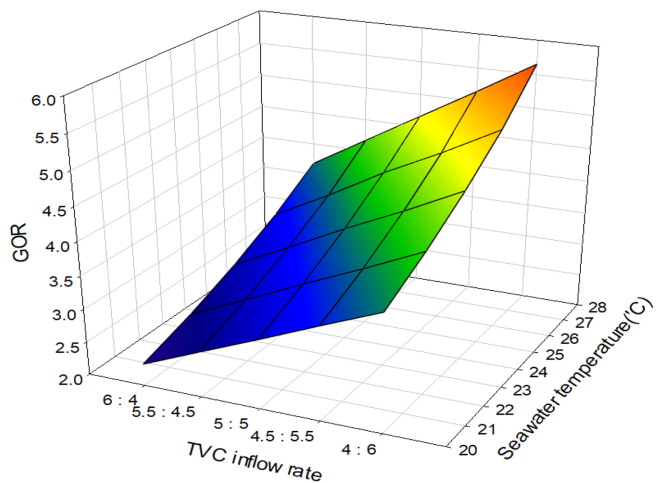


Fig. 10. GOR gradient in accordance to seawater temperature and TVC inflow rate change.

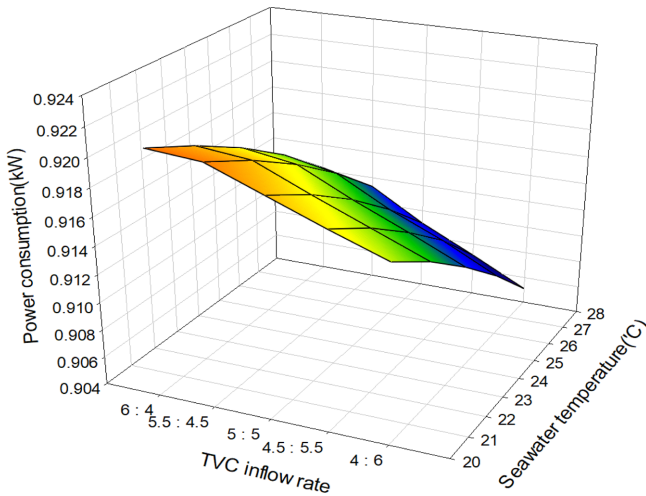


Fig. 11. Power consumption in accordance to seawater temperature and TVC inflow rate change.

4.2.4 에너지 소비량 변화량

MED 설비의 에너지 소비량은 공급되는 해수와 생산된 담수, 브라인의 이송을 위한 펌프의 소요 전력이 총량과 같다. Fig. 11과 같이 해수의 온도 증가와 TVC 공급 비율 감소에 따라 소요 전력은 최소값인 0.905 kW이며 이와 같은 이유는 담수 생산의 증가에 따라 브라인 유량이 감소하게 되면서 소요 전력은 감소하게 되었으며, 해수 온도 감소와 TVC 공급 비율 증가에 따라 최대 0.921 kW 까지 증가하게 되면서 1.8%의 소요 전력의 차이가 발생하였다.

앞서 소개한 GOR, 담수량, 염도 증가량과 같은 시뮬레이션 결과는 예열량의 증가와 해수 온도 상승에 비례하며, 최대 염분치를 초과하지 않는 범위에서 운전되도록 하였다.

5. 결 론

TVC를 적용한 MED 담수화 설비의 해수 온도 및 TVC 공급량에 따른 담수 생산과 GOR 변화를 분석하였다. 중동 지역의 해안을 끼고 있는 국가에서는 평균 26°C 내외의 해수온도를 보이고 있어 일일 319.7톤의 해수를 취수하여 약 133.5톤의 담수 생산이 가능할 것으로 여겨지며, 해수의 담수 전환율이 약 77.4%에 달하는 것을 확인하였다. 이때, 소요되는 에너지는 해수, 담수, 농축수 이송을 위한 펌프 소요 전력이 발생하며, 28°C 해수 기준으로 일일 최대 16.44 kWh의 전력 소모가 발생하였다.

또한, 6단 증발기에서 나온 증기를 TVC의 공급과 해수가열기 공급 조건에 따른 담수 생산량 변화는 해수 가열기 공급량이 가장 적은 4:6 비율에서 가장 높은 담수 생산량인 1.696 kg/s가 발생하였으며, 비율 변화에 따라 최소 1.125 kg/s까지 감소하는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과는 일정하게 공급되는 증기에 6단 증발 증기가 포함되면서 전체 공급 에너지량이 증가된 것으로 판단된다.

마지막으로 6단 증발기에서 최종 농축된 농축수의 염도는 28°C 해수온도조건에서 약 79,300 ppm에 달하며, 최대 허용 농축도인

80,000 ppm에 99.1%에 달한다. 이와 같은 농축수는 환경 문제를 야기하여 AD 또는 가스하이드레이트 기반의 고도 농축이 가능한 담수화 설비를 통해 2차 농축되어 미네랄 추출 및 추가 담수 확보에 활용 될 예정이다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “미활용 열 이용 신형식 해수담수-냉방 복합플랜트 핵심기술 개발(3/5)”에 의해 수행되었습니다(PES3970).

References

- [1] Aerstin, F. and Street, G., 1978, “Steam Ejectors for Vacuum Service”, Ch. 15 in Appl. Chem. Proc. Des., Plenum Press, New York, NY.
- [2] Bardi, U., Mining the Oceans: Can We Extract Minerals from Seawater?, 2008 <http://theoil drum.com/node/4558> (accessed 2020.02.23.)
- [3] Campbell, K., Over 40 minerals and metals contained in seawater, their extraction likely to increase in the future, https://www.miningweekly.com/article/over-40-minerals-and-metals-contained-in-seawater-their-extraction-likely-to-increase-in-the-future-2016-04-01/rep_id:365_0, 2016 (accessed 2020.02.14.)
- [4] Dastgerdi, H.R., Chua, H.T. and Whittaker, P.B., 2016, “New MED based desalination process for low grade waste heat”, Desalination, 395, 57-71.
- [5] Dickson, A.G. and Goyet, C., 1994, Handbook of methods for the analysis of the various parameters of the carbon dioxide system in sea water. In Dickson A.G. and Goyet C.(Eds.). 2. ORNL/CDIAC-74.
- [6] Elhassan, A.E., Ali, E., Mustafa, H.M., Abdelrhman Alyas, O.H., 2016, “Design Configuration And Simulation Of A Multi Effects Evaporator For A Desalination Plant”, Int. J.of Sci. & Tech. Res., 5(9), 118-121.
- [7] Green and Perry, 1997, “Perry’s Chemical Engineers Handbook”, 7th Ed., McGraw-Hill, NY, 6-8.
- [8] Hamad, M.B., Femenia, R.R., Snoussia, A., Brahimia, A.B. and Caballero, J.A., 2018, “Minimizing the total annualized cost of “SIDEM” seawater desalination unit”, Desalination and Water Treat. 115, 181-193.
- [9] Jiménez, L., Basualdo, M., Toselli, L. and Rosa, M., 2000, “Dynamic modeling of batch distillation: comparison between commercial software”, Computer Aided Chem. Eng., 8, 1153-1158. ISSN 1570-7946, [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(00\)80194-7](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(00)80194-7).
- [10] Kaplan, R., Mamrosh, D., Salih, H.H. and Dastghei, S.A., 2017, “Assessment of desalination technologies for treatment of a highly saline brine from a potential CO₂ storage site”, Desalination, 404(17), 87-101.
- [11] Kaye, G.W.C. and Laby, T.H., “Physical properties of sea water”.

- Tables of Phys. and Chem. constants (16th ed.). https://web.archive.org/web/20190508003610/http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_7/2_7_9.html, 1995 (accessed 2020.02.14.)
- [12] Loganathan, P., Naidu, G, and Vigneswaran, S., 2017, Mining valuable minerals from seawater: a critical review, *Environ. Sci.: Water Res. & Technol.*, 3, 37-53
- [13] Maurer, G. and Prausnitz, J.M., 1978, "On the derivation and extension of the uniquac equation", *Fluid Ph. Equilib.*, 2(2), 91-99. doi:10.1016/0378-3812(78)85002-X. ISSN 0378-3812.
- [14] Michael, H.C., 2010, Calcium. eds. Jorgensen A. and Cleveland C. *Encyclopedia of Earth*. Natl. Council for Sci. and the Environ.
- [15] Muñoz, R., Montón, J.B., Burguet, M.C. and de la Torre, J., 2006, "Separation of isobutyl alcohol and isobutyl acetate by extractive distillation and pressure-swing distillation: Simulation and optimization", *Sep. and Purif. Tech.*, 50(2), 175-183. ISSN 1383-5866, <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.11.022>.
- [16] Ophir, A. and Lokiec, F., 2005, Advanced MED process for most economical sea water desalination, *Desalination*, 182(1-3), 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.026>.
- [17] Seamonds, A., International Desalination Association (IDA): IDA Desalination Yearbook 2016-2017, USA: Topsfield, M.A., 2016. Available from: <http://idadesal.org/wp-content/>.

Received 22 March 2021

1st Revised 7 May 2021, 2nd Revised 9 August 2021

Accepted 9 August 2021