

## 스팀 절감량 예측을 위한 흑액 다중 효용 증발 공정 모델 개발

김유림\*\*\* · 임종훈\*\*\*\* · 최영렬\*\*\*\* · 김태복\*\*\*\* · 박한신\*\*\*\* · 조형태\*† · 김정환\*†

\*한국생산기술연구원 친환경재료공정연구그룹

44413 울산광역시 중구 중가로 55

\*\*동국대학교 화공생물공학과

04620 서울특별시 중구 필동로 1길 30

\*\*\*연세대학교 화공생명공학과

03722 서울특별시 서대문구 연세로 50

\*\*\*\*무림P&P(주) 프로젝트부

45011 울산광역시 울주군 온산읍 우봉강양로 3-36

(2021년 6월 4일 접수, 2021년 7월 21일 수정본 접수, 2021년 8월 30일 채택)

## Development of Black Liquor Multiple-effect-evaporation Process Model to Predict Steam Savings

Yurim Kim\*\*\*, Jonghun Lim\*\*\*\*, Yeongryeol Choi\*\*\*\*, Taebok Kim\*\*\*\*, Hansin Park\*\*\*\*, Hyungtae Cho\*† and Junghwan Kim\*†

\*Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, 55, Janga-ro, Ulsan, 44413, Korea

\*\*Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, 30, Pildong-ro 1-gil, Jung-gu, Seoul, 04620, Korea

\*\*\*Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, 50, Yonsei-ro, Seoul, 03722, Korea

\*\*\*\*Project Part, MOORIM P&P Co., 3-36, Ubonggangyang-ro, Ulsan, 45011, Korea

(Received 4 June 2021; Received in revised from 21 July 2021; Accepted 30 August 2021)

## 요 약

본 연구에서는 흑액 증발공정에 소비되는 스팀의 절감량을 예측하기 위해 증발기 수에 따른 다중 효용 증발공정 모델을 개발하였다. 개발한 공정 모델은 흑액의 예열 및 증발 과정으로 구성되어 있고, 스팀 사용량을 예측하기 위해 가상의 재비기가 추가되었다. 시뮬레이션 결과, 2중 효용 증발기에서 스팀 사용량은 48.9% 감소하였고, 증발기 수가 증가함에 따라 스팀 사용량이 감소하여 8중 효용 증발기에서 최대 76.5% 감소함을 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 증발기 수에 따른 포화증기의 잠열 회수량, 스팀 사용량, 각 증발기의 포화증기 생산량으로 분석하여 최적의 증발기 수 도출을 위한 방안을 제시하였다.

**Abstract** – This study developed the black liquor evaporation process models using the multiple-effect-evaporator according to the number of effects to predict steam consumption. The developed models were divided into the black liquor preheating and evaporation processes, and a virtual reboiler was added to predict steam consumption. In simulation results, the steam consumption in the double-effect-evaporator was decreased by 48.9 %, and as the number of effects increased, the steam consumption was decreased. Finally, the steam consumption in the octuple-effect-evaporator was decreased by 61.2 %. Also, this study suggests a strategy for deriving the optimal number of effects in the process by analyzing the latent heat recovered from the saturated vapor produced in the multiple-effect-evaporator and the amount of saturated vapor produced by each effect.

**Key words:** Black liquor, Evaporation process, Multiple-effect-evaporator (MEE), Process modeling

## 1. 서 론

펄프 및 제지 산업은 목재의 펄프화를 위해 많은 양의 화학첨가제와 산업용 에너지를 사용하고 있기 때문에, 일반적으로 크래프트 펄프 공정을 운전하여 공정에 필요한 화학 물질과 운전 과정에서 발생하는 열을 효율적으로 회수하고 있다[1].

† To whom correspondence should be addressed.

E-mail: htcho@kitech.re.kr, kjh31@kitech.re.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

크래프트 펄프 공정에서 주 원료인 목재칩은 수산화나트륨과 황화나트륨의 수용액인 백액에 의해 섬유소 내 리그닌이 분해되고 사용된 백액은 펄프세척수와 혼합되어 바이오매스인 흑액으로 전환된다. 생산된 흑액은 약 15~20 wt% 고형분 농도의 희흑액이고, 희흑액은 증발공정을 거쳐 79 wt%의 농흑액으로 전환된다. 농흑액은 회수보일러에서 연소되어 펄프화 공정에 필요한 에너지를 공급한 후 연소로 바닥에서 제련되어 녹액의 형태로 수집되고, 녹액은 가성과 공정을 거쳐 백액으로 전환된 후 펄프화 공정에 재사용된다[2,3].

현재 크래프트 펄프 공정 중 증발공정에서 소비되는 스팀 에너지를 줄이기 위해 다중 효용 증발기(Multiple-effect-evaporator)를 주로 사용하고 있고, 회수보일러 전력생산과정 중에 회수되는 저압 스팀 중 30~40%를 재활용하고 있다. 여기서, 다중 효용 증발기는 조건을 달린 증발기들을 연속적으로 배열하여 증발기에서 생산된 포화증기의 열을 효율적으로 활용해 공급물에 포함되어 있는 물을 증발시키는 장치이다[4]. 최근 다중 효용 증발기를 이용하여 증발공정에 필요한 스팀량을 최소화하는 것을 목표로 연구가 활발하게 진행되고 있다. V. Jaishree 등[5]은 장치 비용 및 운전 비용을 고려한 총비용을 절감하기 전, 운전 비용을 줄이기 위한 기존 증발공정의 개조에 대한 연구를 진행했다. 증발공정의 운전 비용을 줄이기 위해, 스팀 소비량을 최소화하고자 7중 효용 증발기의 최적의 압력 조건과 추가적으로 설치할 플래시탱크의 최적 조건을 수학적 모델링을 통해 찾았다. 그 결과 7개의 플래시 탱크를 추가적으로 설치하여 기존의 공정보다 5.77%의 스팀을 절약했다. Verma 등[6]은 수학적 모델링을 이용하여 희흑액의 예열 조건, 첫번째, 두번째 증발기에 들어가는 외부 스팀과 증발기에 유입되는 흑액의 분할 정도의 최적점을 찾았다. 그 결과 기존 7중 효용 증발 공정에서 소비되는 스팀을 11.6% 줄일 수 있었다. R. Bhargava 등[7]은 흑액을 원하는 농도로 농축하는데 소비되는 스팀을 최소화하기 위해 7중 효용 증발 시스템에서 흑액과 스팀의 최적 공급 흐름 조건을 수학적으로 모델링했다. 이를 통해 흑액과 스팀의 공급을 서로 역방향으로 흐르게 하는 것이 증발공정에 소비되는 스팀을 더 줄일 수 있다는 결과를 도출했다.

앞에서 서술한 바와 같이 기존의 연구들은 흑액과 스팀의 흐름, 흑액의 온도와 압력, 스팀의 온도와 압력, 증발기의 압력 등을 조절하여 공정에 소비되는 스팀의 양을 최소화했다. 하지만 스팀소비량에 대한 주요 매개 변수인 증발기수를 조절하여 포화증기를 최대한 회수한다면, 결국 15~20 wt%의 희흑액을 79 wt%의 농흑액으로 농축시키는 과정에서 생성되는 포화증기를 모두 회수하는 것과 같아지고, 증발공정에 소비되는 스팀의 양을 단일 효용 증발기와 비교해 최대 약 84%까지 절약할 수 있다. 따라서 흑액 증발 공정에서, 증발기 수에 따른 스팀 절감량의 예측 및 결과 분석이 매우 중요하지만 이러한 연구는 거의 없다.

본 연구에서는 흑액 증발공정에 소비되는 스팀 절감량을 예측하기 위해 증발기 수에 따른 다중 효용 증발공정 모델을 개발하였다. 개발한 공정 모델의 시뮬레이션 결과를 통해 증발기 수가 포화증기의 잠열 회수량, 스팀 사용량, 각 증발기의 포화증기 생산량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하여 최적 증발기 수 도출을 위한 방안을 제시하였다.

## 2. 공정 개요

흑액 증발공정은 Fig. 1과 같이 목재 칩(Wood chips)이 증해(Cooking) 및 세척(Washing) 공정을 거쳐 생성된 희흑액(WBL)을 회수보일러(Recovery boiler)에서 연소하기 적합한 수준의 농흑액(SBL)으로 전환시키는 공정이다[8]. 증해 및 세척 공정을 거쳐 생성된 희흑액은 물과 유기 및 무기 고체 성분으로 구성되어 있고, 대표적인 유기 성분으로는 리그닌이, 무기 성분으로는 탄산 나트륨, 황화 나트륨, 수산화 나트륨이 있다[9]. 흑액을 농축시키기 위해서 주로 사용하는 다중 효용 증발기는 압력이 점차 감소되는 형태로 증발기들을 배열한 후, 이전 증발기에서 생산된 포화증기를 다음 증발기의 열매체로 재사용하여 전체 증발 공정에 소비되는 에너지를 효율적으로 활용할 수 있다. 희흑액(WBL)은 먼저 펌프와 예열기(Pre-heater)를 통해 압력과 온도가 높아진 상태로 첫번째 증발기(E1)에 들어가고, 이때 전력 생산과정에서 회수되는 저압스팀도 함께 첫번째 증발기

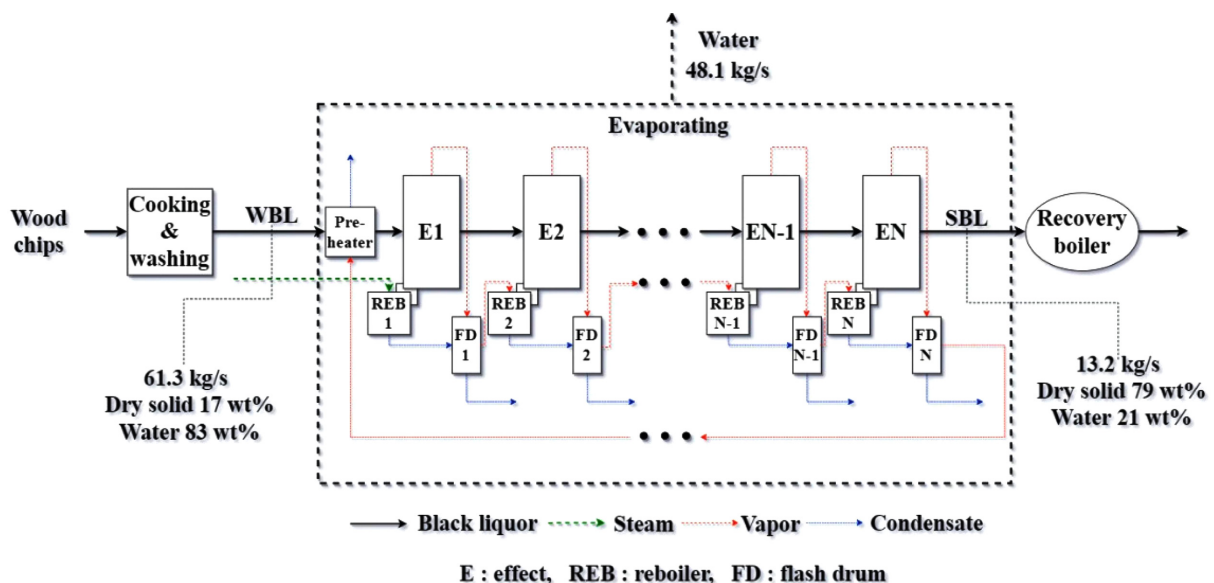


Fig. 1. Block diagram for process modeling of multiple-effect-evaporator (MEE) with pre-heater.

로 들어가게 된다. 들어간 스팀의 잠열은 흑액을 증발시키는데 사용되고, 응축수가 된 스팀은 버려진다. 첫번째 증발기(E1)에서 흑액을 증발시키며 생산된 포화증기는 두번째 증발기(E2)로 들어가, 흑액을 증발시키기 위한 열매체가 된다. 흑액은 일련의 증발기를 같은 메커니즘으로 거치며 농축되고, 마지막 증발기(EN)에서 생산된 포화증기는 흑액을 예열하는데 사용되어 다중 효용 증발기에 필요한 스팀의 양을 줄인다. 약 17 wt% 고형분 농도의 61.3 kg/s 유량의 희흑액(WBL)은 다중 효용 증발기를 거쳐 회수보일러에서 연소하기 적합한 수준인 약 79 wt%의 고형분 농도의 13.2 kg/s 유량의 농흑액(SBL)으로 전환된 후 회수보일러에서 연소되어 펄프화에 필요한 에너지를 생산하게 된다.

### 3. 모델 개발

본 연구에서는 열역학 및 수학적 이론에 기반한 공정 시뮬레이션 소프트웨어인 Aspen plus V10.0을 사용하여 흑액 예열 및 증발 과정으로 구성된 증발공정을 모사하였고, 모델링에 필요한 데이터는 문헌 값을 참고하였다[10,11]. Fig. 2는 개발한 증발기 수에 따른 다중 효용 증발기 모델의 단순화된 흐름도이다. 공정 모델링에서 증발기는 증류탑(EVAP), 가상의 재비기(REB) 및 플래시 드럼(FD)으로 나누어 모사하였고, 증류탑의 스팀 사용량을 예측하기 위해 가상의 재비기를 추가했다[12]. 가상의 재비기는 증발공정에 사용되는 스팀 및 증발기에서 생산된 포화증기의 잠열을 빼앗아 응축수로

만드는 열 교환기이다. 가상의 재비기에서 계산되는 열량이 증류탑에서 사용되는 열량과 같다고 설정하면 증류탑에 사용되는 스팀 사용량을 예측할 수 있다. Table 1은 공급물인 희흑액(WBL1)과 스팀(STM-IN1)의 조성 및 온도와 압력 조건, 예열기(HX1)에 입력된 specification이다. 흑액 관련 데이터는 무렵P&P(주) 울산 공장의 실제 운전 데이터를 참고하였다.

#### 3-1. 가정 및 열역학 모델

증발공정에 사용되는 다중 효용 증발 공정 모사를 위해 문헌 값을 참고하여 아래와 같이 가정해 주었다.

✓공정은 정상상태이다.

✓흑액 속 유기 고분자 물질은 리그닌의 대표 물질 중 하나인 sinapyl alcohol과 분자식이 같고 끓는 점이 비슷한 3-(3,4-dimethoxyphenyl) propionic acid로만 이루어져 있다[13].

✓각 증발기에서 생산된 포화증기의 온도 차가 일정하다.

✓각 증발기의 단 수는 9단이고, 공급물인 흑액은 증발기의 5단으로 유입된다.

✓흑액은 상온에서 7 kg/cm<sup>2</sup>g의 압력으로 증발기에 유입된다.

✓증발기 내 응축기의 압력 강하, 단 간 압력 강하 값은 각각 1 psia, 0.1 psi이다.

공정 모델에 고려된 열역학 방정식은 Non-random two-liquid (NRTL) interaction model을 사용하였고, 이 식은 증기-액체 평형 거동을 나타낼 수 있어 증발공정 모사에 일반적으로 사용되며 식은

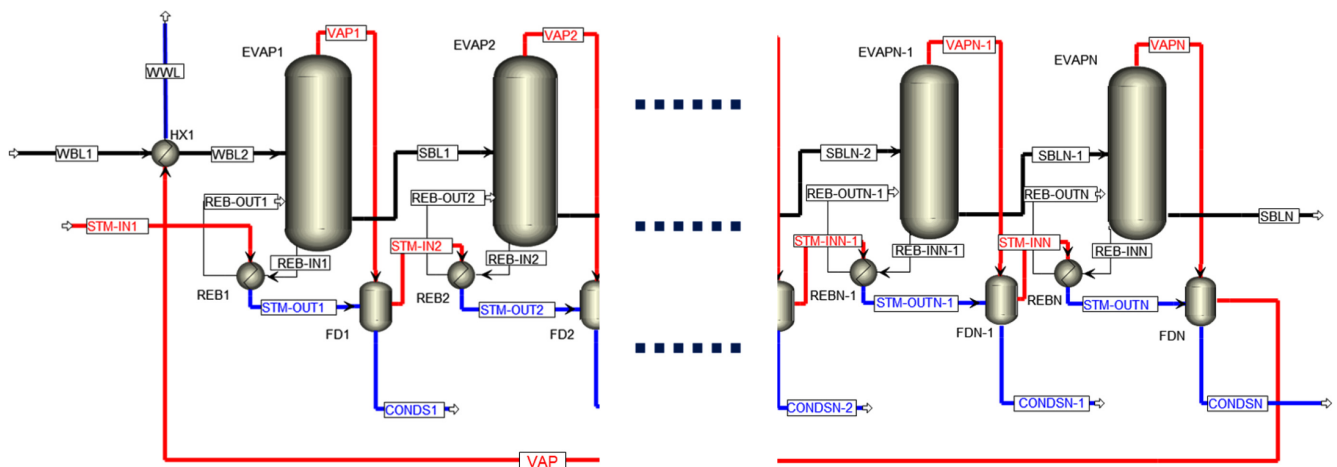


Fig. 2. Process model of multiple-effect-evaporator (MEE) with pre-heater.

Table 1. Specification of each stream and block in process model

Stream & Block	Description	Specification	Value	Unit
WBL1	Feed weak black liquor to pre-heater	Temperature	25	°C
		Pressure	7	kg/cm <sup>2</sup> g
		Flow rate	61.3	kg/s
		Composition	H <sub>2</sub> O (83), C <sub>11</sub> H <sub>14</sub> O <sub>4</sub> (17)	%
STM-IN1	Feed steam to 1 <sup>st</sup> evaporator	Temperature	172	°C
		Pressure	16[11]	kg/cm <sup>2</sup> g
		Composition	H <sub>2</sub> O (100)	%
HX1	Pre-heater before multi-effect evaporation section	Cold stream inlet temperature	25	°C
		Cold stream inlet pressure	7	kg/cm <sup>2</sup> g
		Hot stream inlet temperature	100	°C
		Hot / cold outlet temperature approach	5	°C

다음과 같다(식 1-4) [14,15].

$$\ln \gamma_1 = x_2^2 \left[ \tau_{21} \left( \frac{G_{21}}{x_1 + x_2 G_{21}} \right) + \frac{\tau_{21} G_{12}}{(x_2 + x_1 G_{12})} \right] \quad (1)$$

$$\ln \gamma_2 = x_1^2 \left[ \tau_{12} \left( \frac{G_{12}}{x_2 + x_1 G_{12}} \right) + \frac{\tau_{21} G_{21}}{(x_1 + x_2 G_{21})} \right] \quad (2)$$

$$G_{12} = \exp(-\alpha_{12} \tau_{12}), \quad G_{21} = \exp(-\alpha_{21} \tau_{21}) \quad (3)$$

$$\tau_{12} = \frac{g_{12} - g_{22}}{RT}, \quad \tau_{21} = \frac{g_{21} - g_{11}}{RT} \quad (4)$$

$\gamma_i = i$  성분의 액체 활성 계수

$x_i = i$  성분의 액체 몰분율

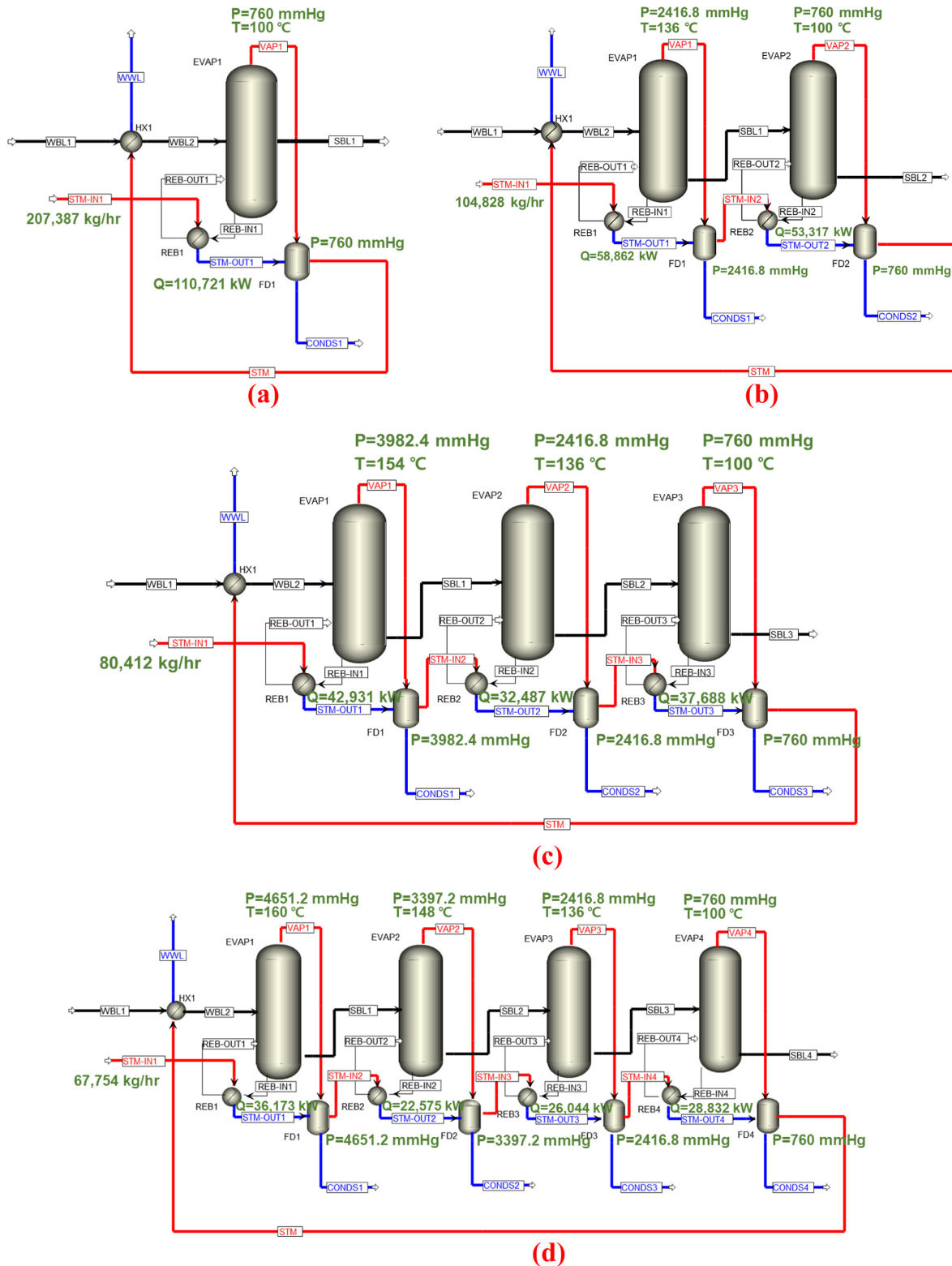


Fig. 3. Simulation results of multiple-effect-evaporation with (a) single effect; (b) double effect; (c) triple effect; (d) quadruple effect; (e) quintuple effect; (f) sextuple effect; (g) septuple effect; (h) octuple effect.

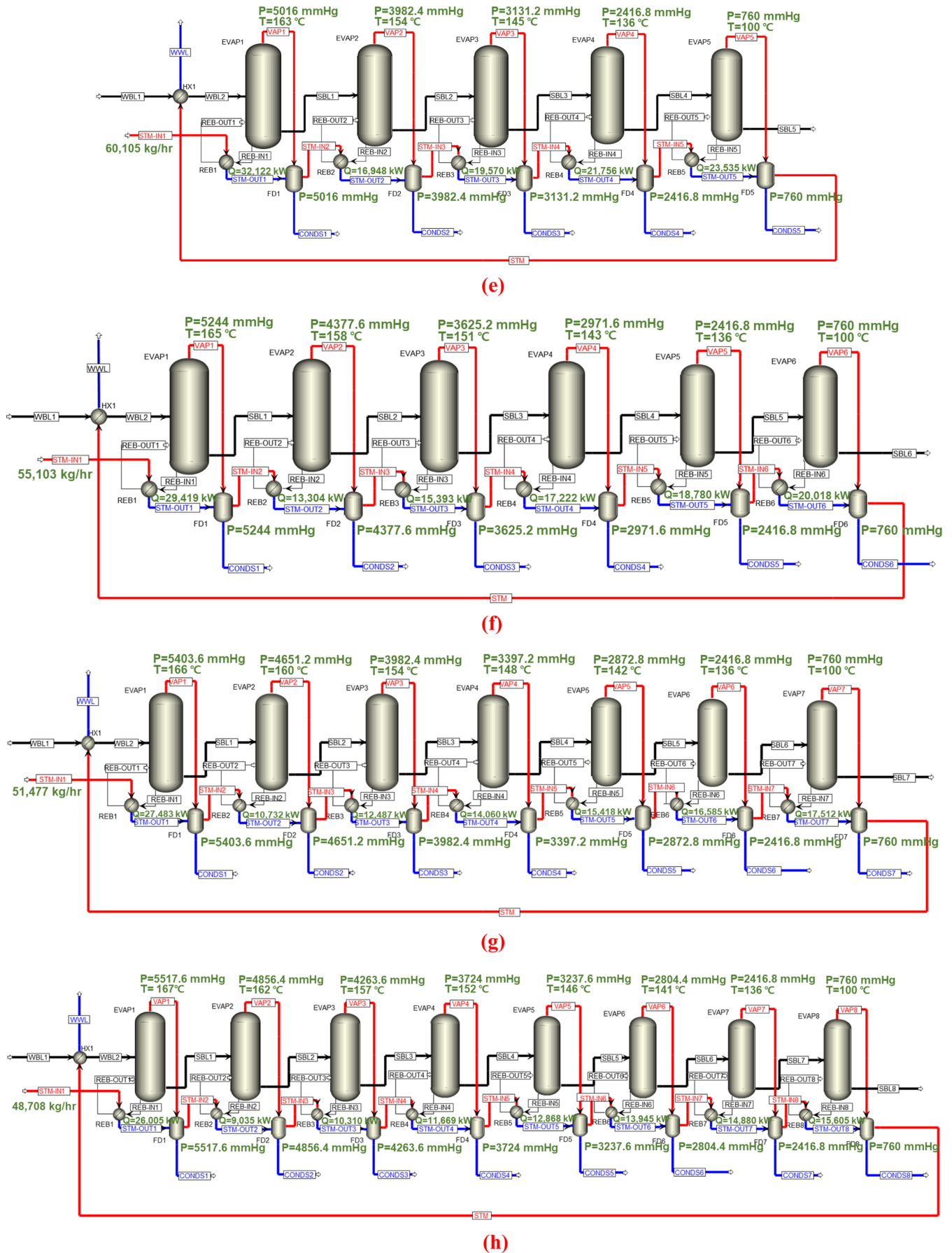


Fig. 3. (continued)



$\tau_{ij}$  =  $i$ - $j$  성분의 2성분계 상호작용 파라미터

$G_{ij}$  =  $i$ - $j$  성분의 국부 조성 인자

$\alpha_{ij}$  = 혼합물의 비무작위성 파라미터

$g_{ij}$  =  $i$ - $j$  성분의 상호작용 파라미터

$R$  = 이상 기체 상수(8.314 J/K-mol)

$T$  = 절대 온도

NRTL 식은 부분 용해와 완전 용해의 개념을 고려하여 유도된 식으로 혼합물의 비무작위성을 보정하고 계의 성질을 고려하는  $\alpha_{ij}$ 를 적절히 선택한다면 비 이상성 혼합물 및 부분 혼합 계에서 사용할 수 있다[16].

### 3-2. 결과 및 분석

개발한 모델을 통해 도출한 결과를 크게 증발기 수에 따른 포화증기의 잠열 회수량, 스팀 사용량, 각 증발기의 포화증기 생산량으로 나누어 분석했다. Fig. 3(a)~(h)는 개발한 모델을 통해 도출한 다중 효용 증발 시스템의 각 증발기에 사용된 열량(Q) 및 증발공정을 위한 유입 스팀량에 대한 시뮬레이션 결과이다.

#### 3-2-1. 포화증기의 잠열 회수량

Table 2는 증발기 수에 따라 개발한 공정 모델을 통해 회수된 포화증기의 잠열이다. Table 2에서 같은 양의 회색을 농축하는데 회수된 포화증기 잠열의 총 합( $\sum_{n=1}^N Q_n$ )은 증발기 수(Number of effects, N)가 1개일 때 16,772 kJ/s, 2개일 때 70,089 kJ/s로 약 53,317 kJ/s 증가하였다. 또한 증발기 수가 증가함에 따라 회수되는 포화증기 잠열의 총 합은 계속 증가하여 8중 효용 증발기에서 총 105,085 kJ/s가 회수되어 단일 효용 증발기에 비해 88,313 kJ/s의 에너지를 더 회수할 수 있었다. 도출된 결과를 통해 증발기의 수가 늘어날수록 포화증기의 열에너지를 더 많이 회수할 수 있다는 것을 알 수 있다. 하지만 회수할 수 있는 포화증기의 잠열의 증가량( $\sum_{n=1}^N Q_n - \sum_{n=1}^{N-1} Q_n$ )은 증발기의 수가 증가할수록 53,317 kJ/s에서 1,519 kJ/s로 점점 줄어들는데 이는 원료에서 증발시킬 수 있는 포화증기의 양이 고정되어 회수할 수 있는 에너지가 한정되기 때문이다.

#### 3-2-2. 스팀 사용량

증발기 수에 따라 개발한 다중 효용 증발기 모델을 이용해 예측한 스팀 사용량은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 전체 증발공정에 소비되는 스팀의 양은 단일 효용 증발기에서 207,387 kg/h, 8중 효용 증

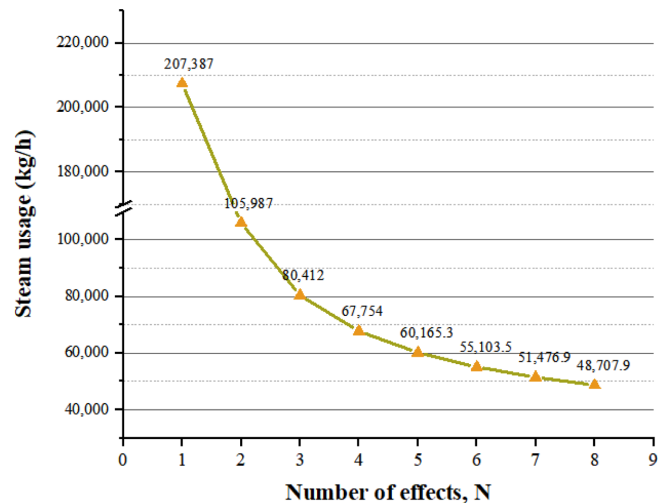


Fig. 4. Steam usage according to number of effects.

발기에서 48,707.9 kg/h으로 증발기의 수가 늘어날수록 줄어들었다. 이는 증발기의 수가 늘어날수록 이전 증발기에서 흑액을 농축시키며 생산되는 포화증기를 다음 증발기의 열 매체로 재사용하는 횟수가 늘어나 증발공정에 생산되는 포화증기의 열을 더 효율적으로 활용할 수 있기 때문이다. 하지만 증발기수 증가에 따른 스팀의 절감량은 점점 감소하는데, 이는 다중 효용 증발기를 사용해 원료에서 증발시킬 수 있는 전체 포화증기의 양은 변화가 없기 때문이다. 따라서 회수되는 에너지가 한정되기 때문에 증발기수의 증가에 따른 스팀 절감량은 감소된다.

#### 3-2-3. 각 증발기의 포화증기 생산량

개발한 다중 효용 증발기 모델을 이용해 도출한 각 증발기에서 빠져나오는 흑액의 고형분 농도와 포화증기의 양은 Table 3, 4와 같다. 증발기의 수가 늘어날수록 각 증발기에서 빠져나가는 포화증기의 양이 줄어들는 것을 Table 3에서 확인할 수 있다. 이는 증발기의 수가 늘어날수록 각 증발기에서 흑액 속 증발시켜야 하는 물의 양이 줄어들기 때문이다. 따라서 증발기의 수가 늘어날수록 흑액 속 증발시키는 물의 양이 줄어들어 Table 4와 같이 흑액이 농축되는 정도가 감소하게 된다[17]. 결국, 증발기의 수를 늘릴수록 각 증발기에서 빠져나가는 포화증기의 양이 줄어들어 다음 증발기에 흑액을 농축하기 위한 열 매체가 줄어들기 때문에, 증발기의 수를 계속 늘리는 것은 한계가 있다.

Table 2. Total latent heat(Q) used in multiple-effect-evaporation [kJ/s]

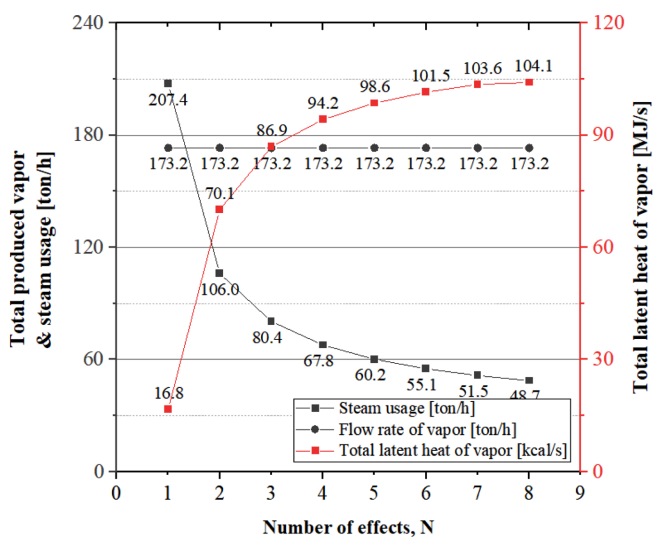
Number of effects, N	n <sup>th</sup> effect, n									$\sum_{n=1}^N Q_n$	$\sum_{n=1}^N Q_n - \sum_{n=1}^{N-1} Q_n$
	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	Q <sub>4</sub>	Q <sub>5</sub>	Q <sub>6</sub>	Q <sub>7</sub>	Q <sub>8</sub>			
1	16,772	-	-	-	-	-	-	-		16,772	-
2	53,317	16,772	-	-	-	-	-	-		70,089	53,317
3	32,487	37,688	16,772	-	-	-	-	-		86,947	16,858
4	22,575	26,044	28,832	16,772	-	-	-	-		94,223	7,276
5	16,948	19,570	21,756	23,535	16,772	-	-	-		98,581	4,358
6	13,304	15,393	17,222	18,780	20,018	16,772	-	-		101,489	2,908
7	10,732	12,487	14,060	15,418	16,585	17,512	16,772	-		103,566	2,077
8	9,035	10,310	11,669	12,868	13,945	14,880	15,606	16,772		105,085	1,519

**Table 3. The flow rate of vapor output from the evaporator [kg/h]**

Number of effects, N	n <sup>th</sup> effect, n								
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>8</sub>	$\sum_{n=1}^N V_n$
1	173,192	-	-	-	-	-	-	-	173,192
2	79,480	93,712	-	-	-	-	-	-	173,192
3	45,759	60,616	66,817	-	-	-	-	-	173,192
4	31,547	43,150	46,911	51,583	-	-	-	-	173,192
5	23,164	32,922	36,104	38,526	42,477	-	-	-	173,192
6	17,622	26,146	28,919	31,185	32,895	36,424	-	-	173,192
7	13,661	21,345	23,799	25,861	27,562	28,850	32,113	-	173,192
8	11,082	17,698	19,874	21,786	23,417	24,745	25,756	28,835	173,192

**Table 4. The concentration of black liquor output from the evaporator [Dry solid wt%]**

Number of effects, N	n <sup>th</sup> effect, n								
	in	1	2	3	4	5	6	7	8
1	17	79							
2	17	26.57	79						
3	17	21.45	32.82	79					
4	17	19.84	25.70	37.87	79				
5	17	18.99	22.79	29.20	41.70	79			
6	17	18.48	21.21	25.35	32.12	44.71	79		
7	17	18.12	20.21	23.18	27.58	34.59	47.13	79	
8	17	17.85	19.50	21.75	24.90	29.51	36.66	49.07	79



**Fig. 5. Total latent heat, total produced vapor and steam usage according to the number of effects.**

Table 3에 제시된 바와 같이 전체 증발 공정에서 생산된 포화증기의 양은 173,192 kg/h으로 일정하지만, 증발기수가 늘어날수록 회수되는 포화증기의 잠열이 증가하고 증발 공정에 소비되는 스팀량이 줄어드는 것을 Fig. 5에서 확인할 수 있었다. 이는 증발기수가 증가할수록 포화증기의 잠열을 더 효율적으로 사용할 수 있기 때문이다. 하지만 증발기수의 증가는 포화증기의 잠열 회수 증가량 및 스팀 절감량, 그리고 각 증발기에서 생산되는 포화증기량의 감소를 야기한다. 이는 원료에서 증발시킬 수 있는 포화증기의 양이 정해져 있어 회수할 수 있는 에너지가 한정되기 때문이며, 이러한 이유로 전체 증발공정에서 늘릴 수 있는 증발기의 수가 한정된다. 또한,

증발기 수가 증가함에 따라 장치 비용과 같은 설치 자본 비용이 증가하여 증발기의 수는 한정될 수밖에 없다. 따라서 경제성 평가를 통해 증발기 수에 따라 줄일 수 있는 최대 스팀의 양 그리고 증발공정의 운전 비용 및 자본 비용을 고려한 최적 증발기수 도출이 필요하다.

### 3-3. 경제성 평가

흑액의 증발 공정에 소모되는 전체 비용을 줄이기 위해서는 장치비용과 운전비용을 동시에 고려해 가장 경제적으로 최적인 증발기 수를 도출하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 Capital expenditures (CAPEX), Operational expense (OPEX)를 고려하여 Total annualized cost (TAC)를 계산하는 방식으로 경제성 평가를 수행했다. CAPEX는 미래의 이윤 창출을 위해 지출된 총 투자 비용으로, 장비비용, 장비의 건설 및 설치 비용, 토지비용, 노동력 등을 포함한다. OPEX는 갖춰진 설비의 운영비용으로, 에너지 비용, 수선유지비용 등을 포함한다. TAC는 해당 구성 요소에 대해 필요한 총 연간 비용을 의미하고, 이는 Equivalent annual cost (EAC)와 TPC의 합이다. EAC는 전체 수명 동안 구성요소를 소유, 운영 및 유지하는 연간 비용이고, TCI를 연금현재가계수( $A_{t,r}$ )로 나누어 계산할 수 있다[18].

$$EAC = \frac{TCI}{A_{t,r}}, \quad A_{t,r} = \frac{1 - \left[ \frac{1}{(1+r)^t} \right]}{r} \quad (5)$$

여기서,  $r$ 은 경제적 감가상각,  $t$ 는 Number of periods로, 본 연구에서는 각각 10%, 10 년으로 가정했다.

본 연구에서는 Aspen Process Economic Analyzer (APEA)를 이용하여 경제성 평가를 진행했다. 계산한 CAPEX, OPEX 및 TAC는

**Table 5. The CAPEX of multiple-effect-evaporator (MEE) according to the number of effects**

		% of FCI	Number of effects, N							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Fixed capital investment (FCI)	Direct cost	80%	\$ 10,606,748	\$ 8,193,236	\$ 8,041,484	\$ 8,206,812	\$ 8,527,287	\$ 8,940,368	\$ 9,323,388	\$ 9,774,768
	Equipment & Installation	20%	\$ 2,651,687	\$ 2,048,309	\$ 2,010,371	\$ 2,051,703	\$ 2,131,822	\$ 2,235,092	\$ 2,330,847	\$ 2,443,692
	Instrumentation & Control	20%	\$ 2,651,687	\$ 2,048,309	\$ 2,010,371	\$ 2,051,703	\$ 2,131,822	\$ 2,235,092	\$ 2,330,847	\$ 2,443,692
	Electrical equipment & Material	5%	\$ 662,922	\$ 512,077	\$ 502,593	\$ 512,926	\$ 532,955	\$ 558,773	\$ 582,712	\$ 610,923
	Piping	15%	\$ 1,988,765	\$ 1,536,232	\$ 1,507,778	\$ 1,538,777	\$ 1,598,866	\$ 1,676,319	\$ 1,748,135	\$ 1,832,769
	Buildings, Land, Facilities	20%	\$ 2,651,687	\$ 2,048,309	\$ 2,010,371	\$ 2,051,703	\$ 2,131,822	\$ 2,235,092	\$ 2,330,847	\$ 2,443,692
	Indirect cost	20%	\$ 2,651,687	\$ 2,048,309	\$ 2,010,371	\$ 2,051,703	\$ 2,131,822	\$ 2,235,092	\$ 2,330,847	\$ 2,443,692
Working capital (WCI)		20%	\$ 2,651,687	\$ 2,048,309	\$ 2,010,371	\$ 2,051,703	\$ 2,131,822	\$ 2,235,092	\$ 2,330,847	\$ 2,443,692
Start-up cost (SUC)		20%	\$ 2,651,687	\$ 2,048,309	\$ 2,010,371	\$ 2,051,703	\$ 2,131,822	\$ 2,235,092	\$ 2,330,847	\$ 2,443,692
Capital expenditures (CAPEX)			\$ 18,561,807	\$ 14,338,163	\$ 14,072,594	\$ 14,361,920	\$ 14,922,753	\$ 15,645,643	\$ 16,315,928	\$ 17,105,846
Equivalent annual cost (EAC)			\$ 3,020,849	\$ 2,333,470	\$ 2,290,250	\$ 2,337,336	\$ 2,428,609	\$ 2,546,256	\$ 2,655,342	\$ 2,783,898

**Table 6. The OPEX of multiple-effect-evaporator (MEE) according to the number of effects**

			Number of effects, N							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Utility cost	LP steam	\$ 5.5/ton [18]	\$ 9,083,551	\$ 4,642,231	\$ 3,522,046	\$ 2,967,625	\$ 2,635,240	\$ 2,413,533	\$ 2,254,688	\$ 2,133,406
	Electricity	APEA	\$ 35,647	\$ 35,647	\$ 35,710	\$ 35,773	\$ 50,093	\$ 50,157	\$ 50,220	\$ 53,542
Fixed charge		5% of FCI	\$ 662,922	\$ 512,077	\$ 502,593	\$ 512,926	\$ 532,955	\$ 558,773	\$ 582,712	\$ 610,923
Maintenance and repairs		10% of FCI	\$ 1,325,843	\$ 1,024,154	\$ 1,005,185	\$ 1,025,851	\$ 1,065,911	\$ 1,117,546	\$ 1,165,423	\$ 1,221,846
Operating supplies		2% of FCI	\$ 265,169	\$ 204,831	\$ 201,037	\$ 205,170	\$ 213,182	\$ 223,509	\$ 233,085	\$ 244,369
Plant overhead cost		7% of FCI	\$ 928,090	\$ 716,908	\$ 703,630	\$ 718,096	\$ 746,138	\$ 782,282	\$ 815,796	\$ 855,292
Total product cost (TPC)			\$ 12,301,222	\$ 7,135,848	\$ 5,970,200	\$ 5,465,442	\$ 5,243,520	\$ 5,145,801	\$ 5,101,925	\$ 5,119,379

**Table 7. TPC, EAC, and TAC of MVR-assisted evaporation process**

			Number of effects, N							
			1	2	3	4	5	6	7	8
TPC			\$ 12,301,222	\$ 7,135,848	\$ 5,970,200	\$ 5,465,442	\$ 5,243,520	\$ 5,145,801	\$ 5,101,925	\$ 5,119,379
EAC			\$ 3,020,849	\$ 2,333,470	\$ 2,290,250	\$ 2,337,336	\$ 2,428,609	\$ 2,546,256	\$ 2,655,342	\$ 2,783,898
TAC			\$ 15,322,070	\$ 9,469,318	\$ 8,260,450	\$ 7,802,778	\$ 7,672,129	\$ 7,692,057	\$ 7,757,267	\$ 7,903,277

Table 5-7과 같다[14,18]. 경제성 평가를 통해, 5중 효용 증발기가 단일 효용 증발기의 TAC를 약 50% 줄일 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 증발공정에 사용되는 에너지를 절감하기 위해 증발기 수에 따라 8가지 사례의 공정 모델을 개발하였고, 개발한 모델을 활용하여 각 사례의 스팀 소비량을 예측하였다. 시뮬레이션 결과, 2중 효용 증발기에서 스팀 사용량은 48.9% 감소하였고, 증발기 수가 증가함에 따라 스팀 사용량이 감소하여 8중 효용 증발기에서 최대 76.5% 감소함을 확인하였다. 하지만 증발기의 수가 늘수록 설치 자본 비용이 늘어날 뿐만 아니라 공정에서 줄일 수 있는 스팀의 양이 한정되기 때문에 증발기의 수를 늘려 운전 비용을 줄이는 것은 한계가 있다. 따라서 경제성 평가를 통해 증발기 수에 따라 줄일 수 있는 스팀의 양과 증발공정의 운전 비용 및 자본 비용을 고려한 최적 증발기수 도출이 필요하다. 경제성 평가 결과, 5중 효용 증발기가 단일 효용 증발기에 비해 TAC가 약 50% 작아, 가장 경제적이었다.

증발기의 수를 늘리는 것 이외로 증발공정 내 스팀 소비량을 추가적으로 줄이기 위해, 증발기에서 발생한 포화증기를 원심 압축기로

압축시켜 온도와 압력을 상승시킨 후 이를 다시 증발기의 열원으로 재사용하는 기계적 증기 재압축법을 증발공정에 적용할 수 있다. 기계적 증기 재압축법은 증발공정에 소비되는 스팀의 일부를 전기로 대체하므로 스팀 소비량을 줄일 수 있다. 따라서 추후 운전 비용 및 자본 비용을 고려하여 기계적 증기 재압축법을 적용한 최적의 증발공정 모델 도출이 필요하다.

#### 감 사

본 논문은 한국생산기술연구원 “발전용 회수보일러 ash 제거 시스템 실시간 최적화를 위한 지능화 모델 및 실증화 기술 개발(JH-21-0006)” 및 “기업체 에너지공정 최적화 지원사업(EM-21-0022, IR-21-0029, IZ-21-0052)”의 지원으로 수행한 연구입니다.

#### References

- Kim, C., Lee, J., Park, S., and Moon, S., “Global Trends and Prospects of Black Liquor as Bioenergy,” *J. of Korea TAPPLI*, **51**(5), 3-15(2019).
- Ek, M., Gellerstedt, G. and Henriksson, G., *Pulp and Paper Chem-*



- istry and Technology, 2nd Ed., De Gruyter, **121-149**, 429-460 (2017).
3. Maakala, V., Järvinen, M. and Vuorinen, V., "Computational Fluid Dynamics Modeling and Experimental Validation of Heat Transfer and Fluid Flow in the Recovery Boiler Superheater Region," *Appl. Therm. Eng.*, **139**, 222-238(2018).
  4. Singh, R. and Heldman, D., *Introduction to Food Engineering*, 5th ed., 1-861(2014).
  5. Jaishree, V., "Optimization of a Multiple Effect Evaporator System," Ph.D. Dissertation, Department of Chemical Engineering National Institute of Technology, Rourkela (2010).
  6. Verma, O. P., Mohammed, T. H., Mangal S. and Manik G., "Minimization of Energy Consumption in Multi-stage Evaporator System of Kraft Recovery Process Using Interior-point Method," *Energy*, **129**, 148-157(2017).
  7. Bhargava, R., Khanam, S., Mohanty, B. and Ray, A. K., "Simulation of Flat Falling Film Evaporator System for Concentration of Black Liquor," *J. Compchemeng.*, **32**(12), 3213-3223(2008).
  8. Ren, W., "Development of a Free Lime Monitoring System for the Kraft Recovery Process Development of a Free Lime Monitoring System for the Kraft," Master Dissertation, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry University of Toronto (2014).
  9. Tran, H. and Vakkilainen, E. K., "The Kraft Chemical Recovery Process," TAPPI Kraft Recovery Course, 1-8(2012).
  10. Choi, Y., An, N., Moon, I. and Kim, J., "Energy Optimization via Process Modification To Maximize Economic Feasibility of the Butane Gas-Splitting Process," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **59**(40), 18019-18027(2020).
  11. Systems, C., *Duke University Construction & Design Standards*, Duke university, 1-6 (2017).
  12. Lim, J., Choi, Y., Kim, G. and Kim, J., "Modeling of the Wet Flue Gas Desulfurization System to Utilize Low-grade Limestone," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **37**, 2085-2093 (2020).
  13. Rowell, R. M., *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*, 2nd ed., CRC Press (2012).
  14. Lim, J. and Kim, J., "Optimization of a Wet Flue Gas Desulfurization System Considering Low-grade Limestone and Waste Oyster Shell," *J. Korea Soc. Waste Manag.*, **37**(4), 263-274(2020).
  15. Choi, Y., Kim, J. and Moon, I., "Simulation and Economic Assessment of Using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Solution in Wet Scrubber for Large Marine Vessels," *Energy*, 194(2020).
  16. Gebreyohannes, S., Neely, B. and Gasem, K., "Generalized Non-random Two-Liquid (NRTL) Interaction Model Parameters for Predicting Liquid-Liquid Equilibrium Behavior," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **53**(31), 12445-12454(2014).
  17. Joo, H., Hwang, I. and Kwak, H., "Development of Multi Effect Distillation for Solar Thermal Seawater Desalination System," *J. Korean Sol. Energy Soc.*, **31**(1), 1-7(2011).
  18. Jeong, Y., Jung, J., Lee, U., Yang, C. and Han, C., "Techno-economic Analysis of Mechanical Vapor Recompression for Process Integration of Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture with Downstream Compression," *Chem. Eng. Res. Des.*, **104**, 247-255(2015).

#### Authors

**Yurim Kim:** Undergraduate student, Department of Chemical and Biochemical Engineering, Dongguk University, Seoul 44413, Korea; kimyulim123@kitech.re.kr

**Jonghun Lim:** Graduate student (Master degree), Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Seoul 04620, Korea; ljh94@kitech.re.kr

**Yeongryeol Choi:** Graduate student (Doctor degree), Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei University, Seoul 04620, Korea; cyr94@kitech.re.kr

**Taebock Kim:** Director, Project Part, MOORIM P&P Co., Ulsan 45011, Korea; pbs0121@moorim.co.kr

**Hansin Park:** Assistant Manager, Project Part, MOORIM P&P Co., Ulsan 45011, Korea; bok5911@moorim.co.kr

**Hyungtae Cho:** Ph.D., Chief researcher, Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan 44413, Korea; htcho@kitech.re.kr

**Junghwan Kim:** Ph.D., Chief researcher, Green Materials and Processes R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Ulsan 44413, Korea; kjh31@kitech.re.kr