

ES-SAGD 오일샌드플랜트 열교환망 분석

정 문* · 이홍철** · 황인주** · 변현수***†

*한영대학교 화공산업공학과
59720 전남 여주시 장군산길 18-43
**한국건설기술연구원 환경연구본부
10223 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283
***전남대학교 화공생명공학과
59626 전라남도 여주시 대학로 50
(2026년 1월 13일 접수, 2026년 1월 28일 수정본 접수, 2026년 2월 20일 채택)

Analysis of Heat Exchanger Network for ES-SAGD Oilsand Plant

Moon Jeong*, Hongcheol Lee**, Inju Hwang** and Hunsoo Byun***†

*Department of Chemical Engineering, Hanyeong University, 18-43, Janggunsan-gil, Yeosu-si, Jeollanam-do, 59720, Korea
**Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
***Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University,
50, Daehak-ro, Yeosu-si, Jeollanam-do, 59626, Korea
(Received 13 January 2026; Received in revised from 28 January 2026; Accepted 20 February 2026)

요 약

전통 석유 자원의 매장량이 감소함에 따라, 생산 난이도가 높은 비전통 석유자원의 개발이 확대되고 있다. 비전통 석유자원인 오일샌드 개발에서 ES-SAGD(Expanded Solvent-Steam Assisted Gravity Drainage) 공법 연구가 많아지고 있으며, ES-SAGD 공법의 에너지 효율 향상과 온실가스 저감이 중요한 과제로 대두되고 있다. 본 연구에서는 ES-SAGD CPF(Central Processing Facility) 공정을 대상으로 Aspen HYSYS를 이용한 공정 시뮬레이션을 수행했으며, 핀치 분석(Pinch Analysis) 기법을 적용하여 열교환망(Heat Exchanger Network)의 에너지 최적화 가능성을 정량적으로 평가하였다. 분석 결과, 열교환기 최소 접근 온도 15°C 기준으로 가열 유틸리티 6.7%, 냉각 유틸리티 42.6%를 절감할 수 있음을 확인했으며, 이를 통해 전체적으로 약 11.5%의 에너지 효율 개선이 가능함을 입증하였다. 또한, 이러한 열교환망 최적화는 시간당 약 2,830 kg의 이산화탄소 배출 저감 효과를 기대할 수 있다. 본 연구의 결과는 향후 상업적 규모의 ES-SAGD 플랜트의 열교환망 설계 및 경제성 향상을 위한 중요한 기술적 지표로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract – As conventional petroleum reserves decline, the development of unconventional resources like oil sands, which require advanced extraction technologies, is steadily increasing. In the development of oil sands, an unconventional petroleum resource, research on the Expanded Solvent-Steam Assisted Gravity Drainage (ES-SAGD) process has been increasing; consequently, enhancing energy efficiency and reducing greenhouse gas emissions have emerged as critical challenges in this field. This study performed process simulations of the ES-SAGD Central Processing Facility (CPF) using Aspen HYSYS and quantitatively evaluated the energy optimization potential of the Heat Exchanger Network (HEN) via Pinch Analysis. The results indicated that at an Exchanger Minimum Approach Temperature (EMAT) of 15°C, the heating and cooling utilities could be reduced by 6.7% and 42.6%, respectively, leading to an overall energy efficiency improvement of 11.5%. Furthermore, this optimization is estimated to reduce CO₂ emissions by approximately 2,830 kg/h. These findings provide critical technical insights for the design of energy-efficient heat exchanger networks and the enhancement of economic viability in commercial-scale ES-SAGD plants.

Key words: Oilsands, ES-SAGD, Process modeling, Pinch analysis, Energy targeting

† To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hsbyun@jnu.ac.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.

1. 서 론

국제에너지기구(IEA, 2023)에 따르면, 전 세계 석유 수요는 2022년 대비 2030년까지 3~10%, 2050년까지는 시나리오에 따라

최대 42%까지 증가할 것으로 전망된다. 석유 수요 증가는 대체 자원의 필요성을 부각시키며, 특히 비전통석유가 새로운 에너지 자원으로 주목받고 있다.

비전통석유에는 오일샌드, 중질유 등이 포함되며, 확인된 매장량은 약 4.023×10^{12} 배럴로 전 세계 석유 매장량의 약 65%를 차지한다[1]. 이 중 오일샌드과 중질유가 비전통석유의 약 54% 이상을 구성하며, 오일샌드는 원유와 유사하지만 밀도와 점도가 높아 생산 난이도가 높다[2].

캐나다는 베네수엘라와 사우디아라비아에 이어 세계 3위의 석유 매장량을 보유하고 있으며, 캐나다 앨버타 지역에 오일샌드가 많이 매장되어 있고, 일부 지역에는 중질유가 매장되어 있다[3]. 오일샌드로부터 비투멘을 회수하기 위해서는 노천채굴 또는 지중회수 기술을 사용한다.

지중회수 방식 중 대표적인 기술은 증기주입중력배출(Steam Assisted Gravity Drainage, SAGD)이다. 이 방법은 저류층 내에 상하 두 개의 수평정을 설치하여, 상부 수평정에는 고압 증기를 주입하고 하부 수평정을 통해 가열된 비투멘을 회수하는 방식이다. 주입된 증기는 챔버를 형성하며, 비투멘이 가열되어 점도가 낮아지면 중력에 의해 하부로 배출된다. SAGD는 비투멘 회수율이 50% 이상에 달할 수 있는 효율적인 방법이지만, 에너지 집약적이고 이산화탄소 배출량이 높다는 한계를 지닌다.

이러한 문제를 해결하기 위해 앨버타 연구위원회(Alberta research council)는 탄화수소 용매를 증기와 함께 주입하는 솔벤트-증기주입중력배출(Expanding Solvent - Steam Assisted Gravity Drainage, ES-SAGD)을 개발했으며, 오일샌드플랜트 파일럿 현장에서 탄화수소 용매를 증기와 함께 주입했을 때 비투멘 생산율이 17~24% 증가하는 실험결과를 보였다[4]. 그러나 부탄과 같이 휘발성이 너무 높은 용매는 오히려 생산성을 저하시켰고, 나프타처럼 휘발성이 낮은 용매는 증기 챔버에 축적되어 생산 효율을 떨어뜨리는 것으로 나타났다[5]. Amer 등은 다양한 용매 및 농도의 효과를 체계적으로 비교하여, 용매 선택 및 농도 조절이 비투멘-용매 혼합거동과 생산효율에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다[6]. 이러한 연구들은 ES-SAGD의 효율 향상과 탈탄소화를 위한 핵심 설계 변수로 용매 조성, 주입비율, 증기-기름 비율(Steam to Oil Ratio, SOR) 등이 중요함을 시사한다.

ES-SAGD 공법은 대규모 열에너지를 유정에 공급해 유정으로부터 비투멘을 생산하는데, 지상 설비인 중앙처리시설(Central Processing Facility, CPF) 내에서 발생하는 폐열을 효율적으로 관리하는 데 어려움이 있다. 특히, 고온의 비투멘 혼합물을 처리하고 증기를 재생산하는 과정에서 막대한 가열 유틸리티가 소모되며, 이 과정에서 발생하는 폐열이 적절히 회수되지 못하고 냉각수에 의해 폐기되는 에너지 손실이 빈번하게 발생한다. 따라서 단순한 개별 장치 위주의 효율 개선을 넘어, 전체 공정의 흐름을 통합적으로 분석하고 열교환망(Heat Exchanger Network, HEN)을 최적화하여 시스템 전체의 에너지 수지(Energy balance)를 개선하는 연구가 시급하다.

최근 강화되는 국제적 탄소 중립 규제와 에너지 가격 변동성은 오일샌드 플랜트의 경제적 환경적 지속 가능성에 큰 위협이 되고 있다. 이러한 환경 속에서 핀치 기법(Pinch Technology)을 활용한 에너지 타겟팅은 공정의 물리적 한계 내에서 달성 가능한 최대 에너지 절감 목표를 정량적으로 제시함으로써, 불필요한 설비 투자를 방지하고 운영비(OPEX)를 획기적으로 낮출 수 있는 검증된 도구

이다. 본 연구에서 시도하는 ES-SAGD CPF 공정의 핀치 분석은 단순히 에너지 사용량을 줄이는 것을 넘어, SOR 감소와 이산화탄소 배출 저감을 동시에 실현함으로써 비전통 석유 자원 개발의 친환경적 모델을 제시하는 데 그 의의가 있다.

본 연구에서는 이러한 기술적 배경을 토대로, 핀치기법을 활용하여 ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트 CPF에 대한 핀치분석을 통해 에너지 타겟팅을 수행하고자 한다. 핀치기법은 공정 내 열통합을 통해 에너지 사용을 최소화하고, 공정 효율을 극대화하는 검증된 방법으로서, ES-SAGD CPF의 열에너지 소비, SOR 감소, 이산화탄소 저감 효과를 동시에 달성할 수 있는 가능성을 제시한다. 본 연구의 목표는 ES-SAGD CPF의 HEN 최적화를 통해 에너지 소비와 온실가스 배출을 줄이고, 경제성을 향상시키는 것이다.

2. 이 론

2-1. 오일샌드플랜트 중앙처리시설

ES-SAGD는 비투멘을 효율적으로 생산하기 위해 개발한 열회수 기술 중 하나이며, 증기와 탄화수소 용매를 병용하여 점도를 낮추고 오일의 유동성을 향상시킨다. CPF는 현장에서 생산된 유체를 처리하여 원유, 가스, 물 등을 각각의 성분으로 분리·정제하는 설비로, ES-SAGD의 핵심적인 역할을 수행한다.

ES-SAGD CPF는 솔벤트회수공정(Solvent recovery process), 오일처리공정(Oil treatment process), 오일제거공정(De-oiling process), 수처리공정(Water treatment process), 증기생산공정(Steam generation process)으로 구성되어 있다.

솔벤트회수공정은 케이싱 가스와 오일처리공정에서 분리되는 가스에서 천연가스와 솔벤트를 분리시키는 공정이다. 유정패드에서 발생한 케이싱 가스는 슬러그캐처로 유입되어 기액이 분리된다. 분리된 응축물은 오일처리공정으로 보내고, 기체는 회수된 가스와 함께 냉각기로 이동하여 솔벤트의 끓는점 이하로 냉각된다. 이후 기액분리기에서 천연가스와 솔벤트로 분리되며, 천연가스는 황회수 장치를 거쳐 연료로 사용된다. 회수된 솔벤트는 보일러 응축수와 열교환을 통해 열을 회수한 후 증기와 혼합되어 유정패드로 재주입된다.

오일처리공정은 생산 유체로부터 오일, 물, 모래를 효율적으로 분리하는 공정이다. 이 단계에서는 불순물 제거 등을 통해 원유의 품질을 향상시키며, 가벼운 탄화수소계 희석체를 주입하여 점도를 낮추고 수송 및 저장 효율성을 높인다. 유정패드에서 생산된 비투멘 혼합물은 유수분리장치에서 오일, 물, 가스로 분리된다. 분리된 오일은 약 10%의 침전물과 물을 포함하므로 오일처리장치로 보내 침전물과 물을 0.5% 이하로 제거한다. 처리된 원유는 저장탱크로 이송하고, 분리된 물은 오일제거공정으로, 가스는 솔벤트회수공정으로 이송한다.

오일제거공정은 오일처리공정에서 분리된 물에 잔류하는 오일 성분을 제거하는 단계이다. 유수분리장치와 오일처리장치에서 분리된 물은 다량의 유분을 포함하고 있어, 80°C로 냉각한 후 스킴탱크로 보낸다. 시간이 경과함에 따라 탱크 상부로 부상한 오일은 슬로프 오일 탱크로 이송된다. 스킴탱크 하부의 물은 유분 제거를 위해 기포주입장치로 이동한다. 기포주입장치에서는 물의 하단에 공기 또는 탄화수소계 가스를 주입하여 미세기포를 형성하고, 기포가 상승하면서 물 속의 유분을 흡착한다. 흡착된 유분은 수면 위로 부

상하여 제거되며, 상부에 쌓인 유분거품은 슬로프 오일 탱크로 이송한다. 이후 오일제거필터를 이용해 물 속 유분 농도를 10 ppm 이하로 낮춘다.

수처리공정은 증기보일러의 운전 안정성과 효율성을 확보하기 위해 물 속의 불순물을 제거하는 공정이다. 본 공정에서는 스케일 형성 및 부식을 방지하기 위해 과망간산칼륨(KMnO₄), 수산화나트륨(NaOH) 등의 화학약품을 이용한 산화, 살균, 유기물 분해, pH 조정한다.

증기생산공정은 비투멘 회수에 필요한 고온·고압의 증기를 생산하는 단계이다. 보일러 급수 탱크의 물은 저압펌프로 약 1000 kPag 까지 가압되어 1차 열교환기에서 약 56 °C로 가열된다. 이후 2차 열교환기에서 125 °C까지 가열되고, 고압펌프를 통해 14,400 kPag로 가압한 후 3차 열교환기에서 약 165 °C까지 가열되어 보일러로 공급한다. 보일러에서는 품질 80%의 증기가 생성되며, 증기분리기를 통해 100% 품질의 증기만 유통패드로 공급한다[7].

2-2. 열역학모델

비투멘 물성은 실험 데이터를 기반으로 한 유사성분(pseudo-component) 데이터를 활용하여 해석하였다[8]. 본 연구에서는 솔벤트회수공정, 오일처리공정, 오일제거공정, 수처리공정, 증기생산공정의 열 및 물질수지를 계산하기 위해 팽-로빈슨 상태방정식(Peng-Robinson Equation of State)을 적용하였다.

팽-로빈슨 상태 방정식은 반데르발스(van der Waals) 방정식을 개량한 입방체 상태 방정식으로, 특히 고압 조건에서의 탄화수소 기-액 상평형(Vapor-Liquid Equilibrium) 예측에 탁월한 성능을 보인다[1]. PR 모델은 인력 항을 정밀하게 수정하여 액체의 밀도와 증기압을 실제에 가깝게 계산하며, 식은 다음과 같이 정의된다.

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V^2} \tag{1}$$

$$P = \frac{RT}{(V-b)} - \frac{a}{[V(V+b)+b(V-b)]} \tag{2}$$

여기서 a는 분자 간의 인력을, b는 분자가 차지하는 배척 부피를 나타낸다. 매개변수 a(식 3)와 b(식 4)는 각 물질의 특성 값을 이용하여 계산되는 값으로 a는 온도 T와 이십인자 ω의 함수이고, b는 임계온도 T_c와 임계압력 P_c의 함수이다. R은 기체상수이고, ω는 Pitzer가 제시한 매개변수인 이십인자이며, 순수성분의 증기압을 보다 정확히 계산하기 위한 기체의 비이상성 정도를 나타낸다. 2-매개변수 대응상태이론에 이십인자를 추가적인 매개변수로 도입하면 실험값에 보다 근사한 예측 값을 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{0.45724(RT_c)^2}{P_c} [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2 \tag{3}$$

$$b = 0.07780 \frac{RT_c}{P_c} \tag{4}$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \tag{5}$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \tag{6}$$

이 모델은 오일샌드 비투멘과 같은 중질유와 탄화수소 용매 혼합계의 상거동을 해석하는 데 있어 높은 신뢰성을 가지므로, 솔벤트

회수 및 오일 처리 공정의 열-물질 수지 계산에 적용되었다.

수처리 공정 및 증기 생산 공정과 같이 물과 수증기가 주성분인 시스템에서는 미국기계학회의 증기표를 기반으로 한 ASME Steam 열역학모델을 사용하였다. 이 모델을 물과 증기의 온도, 압력, 엔탈피, 엔트로피, 비체적 등을 광범위한 영역에서 매우 정확하게 예측할 수 있다. ES-SAGD 공정의 핵심인 고온·고압 증기 발생 시스템에서 에너지 수지를 정확히 산출하기 위해서는 단순 상태 방정식보다 수증기의 특성을 체계적으로 반영한 ASME Steam 모델이 필수적이며, 이를 통해 정확한 열물질수지를 도출할 수 있다.

2-3. 핀치기법

핀치기법은 공정 내의 에너지 효율을 극대화하기 위한 열통합(Heat integration) 설계 방법으로, 공정의 가열 및 냉각 요구를 체계적으로 분석하여 최소 유틸리티 사용량과 최적 열교환 구조를 도출한다.

이 기법은 냉각이 필요한 흐름을 온류로 묶고, 가열이 필요한 흐름을 냉류로 묶어 온도변화에 따른 엔탈피 관계를 도식화한 온도-엔탈피 합성선도(Composite curve)를 기반으로 한다. 이를 통해 공정 내에서 에너지가 공급, 소비되는 구간을 시각적으로 파악할 수 있으며, 공급과 수요 간의 상호 보완적 관계를 분석할 수 있다.

Figure 1에 도시한 바와 같이 빨강색 온류 합성선도(Hot composite curve)와 파랑색 냉류 합성선도(Cold composite curve)의 가장 가까운 점을 핀치점(Pinch point)이라 하며, 이 점에서 나타나는 온도를 핀치온도라 한다. 핀치점을 기준으로 위 아래로 분리된 시스템에서 온류 및 냉류 합성선도 사이에서 에너지 타겟에 도달할 수 있는 최소접근온도를 결정해야 한다. Figure 1에서 온류 합성선도와 냉류 합성선도가 가장 가까운 부분의 최소접근온도가 0 °C가 될 때, 이론적으로 에너지 절감 가능한 최대치임을 의미한다.

핀치해석을 위해서는 먼저, 공정의 온류, 냉류, 유틸리티 흐름을 파악하고 각 흐름에 대한 온도와 비열, 그리고 엔탈피 데이터를 확보한다. 다음으로, 최소접근허용온도를 설정하여 합성선도를 작성한다. 작성된 선도와 확보된 데이터를 이용한 열교환기망 개선을 통해 접근할 수 있는 최소 에너지 비용을 계산하기 위한 에너지 타겟팅(Energy targeting)을 실시한다. 실현가능한 열교환기망 개선을 위해 열교환기 비용을 계산하여 초기비용과 에너지비용의 합이 최소가 되는 최소접근허용온도를 결정한다. 이 결과를 바탕으로 그리드 선도에 열교환기 망을 작성한 다음, 경제성을 검토하여 핀치기법을 기초한 열교환기 망을 개선한다.

또한, 공정 내의 전체 열수지 균형을 나타내는 그랜드합성선도(Grand composite curve)는 외부 유틸리티의 필요량과 내부 열회수 잠재량을 정량적으로 평가하는 데 활용한다. 이를 통해 공정 내 최소 온도 차를 기준으로 한 최적의 열교환기망 설계가 가능하다.

공정 내 유틸리티 흐름을 합성선도에 추가하여 구성한 밸런스 합성선도(Balance composite curve)는 외부 유틸리티와 공정 흐름 간 열교환량 확인이 가능하며, 증기, 냉각수 등 보조 유틸리티의 에너지 사용량을 최소화하기 위한 기준 정보를 제공한다[9].

3. 결과 및 고찰

3-1. 공정모델링 및 열교환기망 분석

10,000BPD ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트를 대상으로 작성

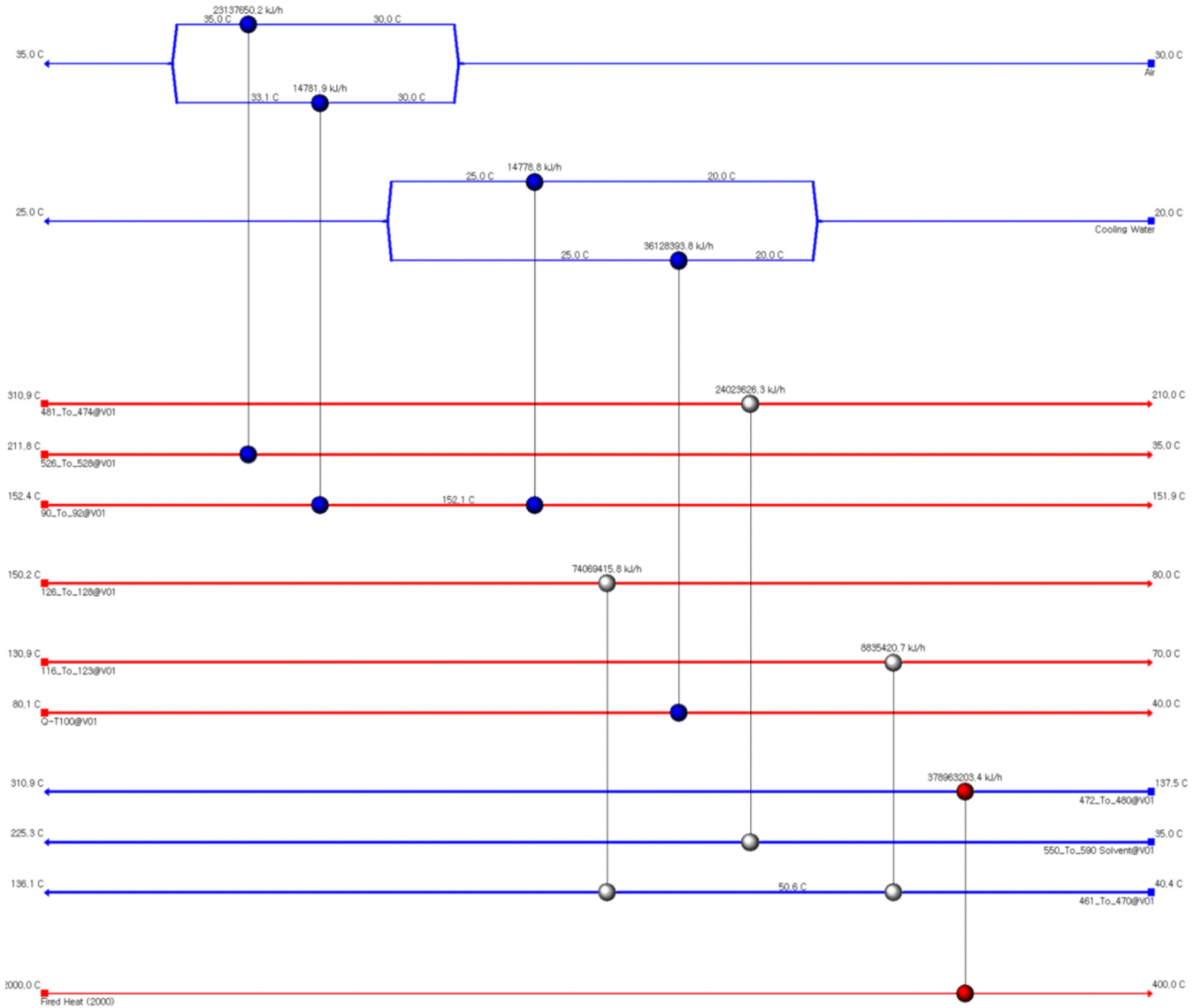


Fig. 3. The grid diagram of ES-SAGD CPF.

Table 1. Stream data for pinch analysis of the ES-SAGD CPF process

Stream	Inlet	Output	Description
481_To_474	310.9 °C	210.0 °C	High temperature hot stream
526_To_528	211.8 °C	35.0 °C	Intermediate temperature hot stream
90_To_92	152.4 °C	151.9 °C	Intermediate temperature hot stream
126_To_128	150.2 °C	80.0 °C	Intermediate temperature hot stream
116_To_123	130.9 °C	70.0 °C	Intermediate temperature hot stream
Q-T100	80.1 °C	40.0 °C	Low temperature hot stream
472_To_480	137.5 °C	310.9 °C	High temperature cold stream
550_To_590	35.0 °C	225.3 °C	Intermediate temperature cold stream
461_To_470	40.4 °C	136.1 °C	Low temperature cold stream

한 공정모델의 공정흐름도(Process Flow Diagram, PFD)는 Figure 2과 같다. 열교환망을 분석하기 위해 에너지분석도구(Aspen Energy Analyzer, AEA)를 도구를 이용했다. 열교환망 설계 시 최소 허용 접근온도(Exchanger Minimum Approach Temperature, EMAT)는 공정의 경제성과 기술적 타당성을 결정하는 핵심 변수이다.

EMAT가 작을수록 유틸리티 사용량이 줄어들지만 이로 인해 열

교환기 전열면적이 증가하므로 투자비가 올라간다. 반면 EMAT가 커질수록 열교환기 전열면적이 감소하고 그만큼 열회수량이 줄어들어 유틸리티 사용량이 증가하여 운전비용이 올라간다[10]. 전열면적 증가에 따른 투자비와 유틸리티 소비에 따른 운영비 사이의 총 비용 최적화 결과에 따른 설계관행으로서 10~20 °C 범위를 선택하는 경우가 많다[11]. AEA에서 EMAT 기본값은 10 °C이나 이

연구에서는 원통다관식 열교환기(Shell and tube heat exchanger)의 EMAT를 15 °C로 설정했다.

열교환망 분석을 위해 작성한 열교환망을 Figure 3에 나타내고, 흐름정보를 Table 1에 정리했다. Figure 3을 보면 481 to 474 온열 구간은 550 to 590 냉열 구간과 열교환 한다. 526 to 528, 90 to 92 그리고 Q-T100 온열 구간은 외부 유틸리티로부터 냉열을 공급받는다. 126 to 128과 116 to 123 온열 구간은 461 to 470 냉열 구간과 열교환하며, 472 to 480 냉열 구간은 가열기로부터 온열을 공급받는다. 많은 에너지가 증기 생산 단계에서 요구되며, 급수 예열

74,069,415.8 kJ/h, 증기 생산 378,963,203.4 kJ/h가 필요한 점을 확인했다.

3.2 핀치분석

오일샌드플랜트 ES-SAGD CPF 공정의 핀치분석을 위한 온도 엔탈피 합성선도(Composite curve)와 쉬프트 합성선도(Shift composite curve)를 작성하여 각각 Figure 4과 Figure 5에 나타냈다. Figure 4와 Figure 5에서 빨강색 온열 합성선도(Hot composite curve)는 냉각이 필요한 흐름이며, 파랑색 냉열 합성선도(Cold composite curve)는

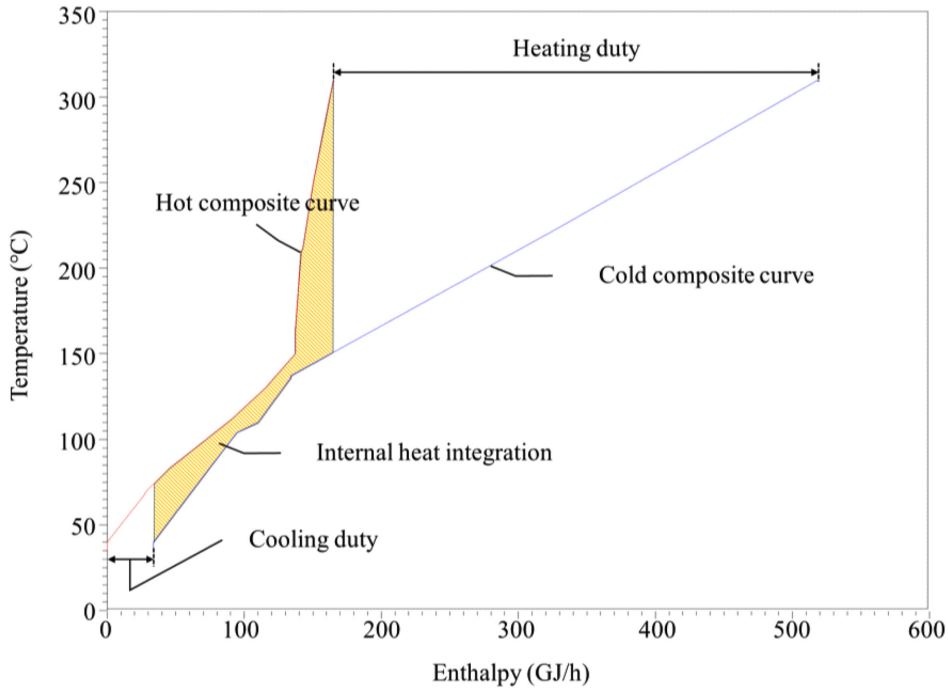


Fig. 4. Composite curves of ES-SAGD CPF.

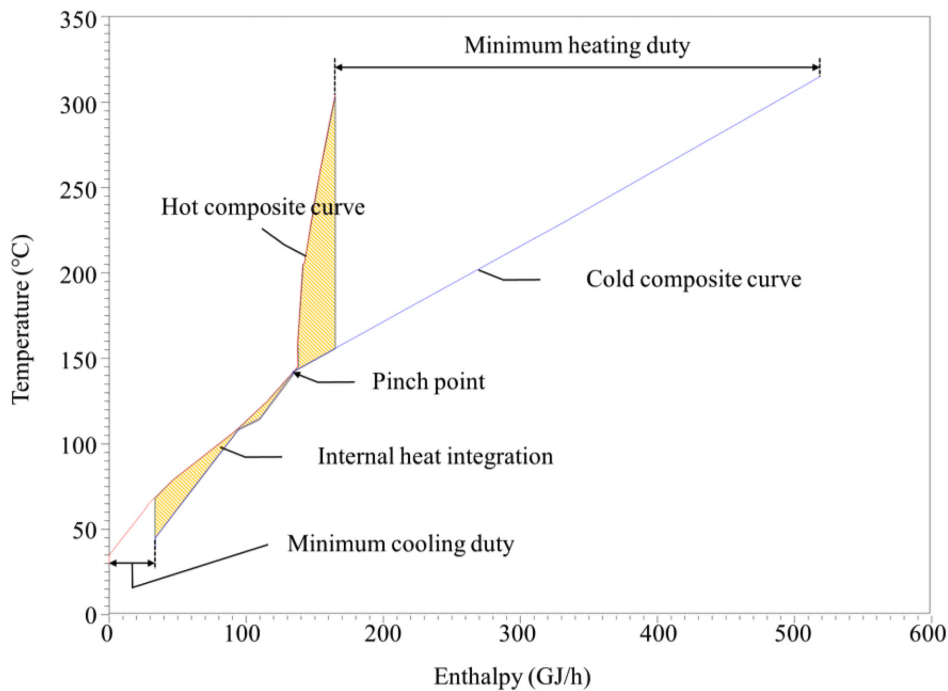


Fig. 5. Shifted composite curves of ES-SAGD CPF.

가열이 필요한 흐름이다.

Figure 4와 Figure 5 보면 빨강색 온류 합성선도와 파랑색 냉류 합성선도 사이의 빗금영역은 공정흐름의 온류(Hot stream)와 냉류(Cold stream) 간 열 교환 통해 가열되거나 냉각되는 영역을 나타낸 것으로 공정 내 열교환(Internal heat integration)을 의미한다. 내부 공정흐름과 열교환되지 않는 부분은 외부 유틸리티와 열교환 통해 열을 공급받거나 빼앗기는 부분이다.

Figure 4에서 외부 유틸리티와 열교환이 필요한 가열부하(Heating duty)는 378,999,203 kJ/h이고, 냉각부하(Cooling duty)는

59,331,605 kJ/h이다.

Figure 5는 EMAT를 0 °C로 설정한 것이며, 에너지 절감이 가능한 최대 목표값을 구할 수 있다. 여기에서 외부 유틸리티 공급이 필요한 가열부하 353,728,197 kJ/h, 냉각부하 34,060,598 kJ/h 임을 알 수 있다.

Figure 5 보면 공정의 핀치 온도는 약 150 °C에서 형성된다. 이는 비투멘 분리 공정의 고온 흐름과 보일러 급수 예열 흐름 간의 열교환이 집중되는 구간으로, 이 지점에서의 열교환 효율을 극대화하는 것이 전체 유틸리티 절감의 핵심이다.

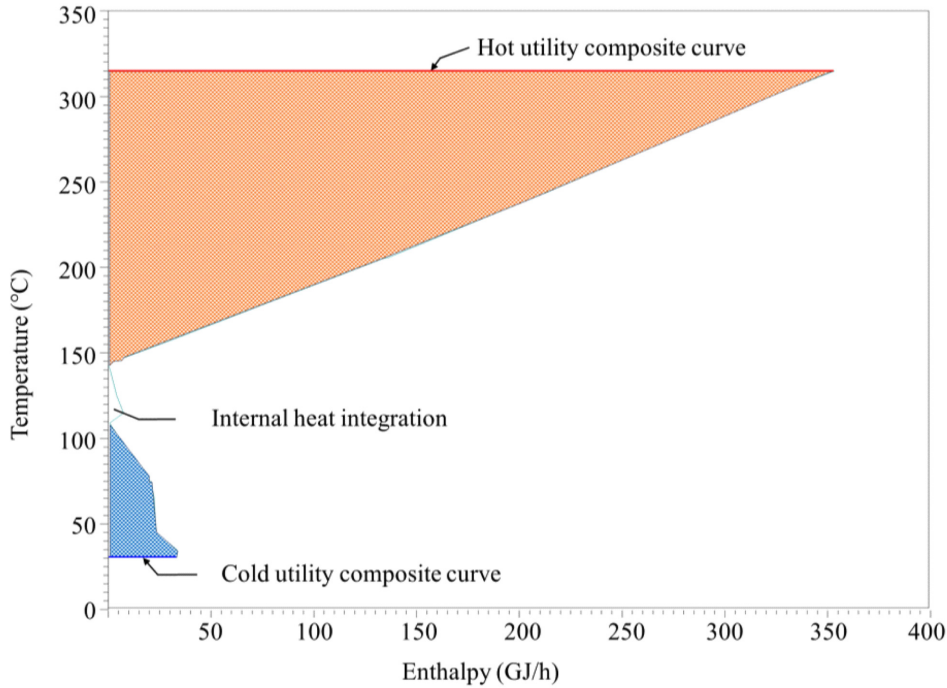


Fig. 6. Grand composite curve of ES-SAGD CPF.

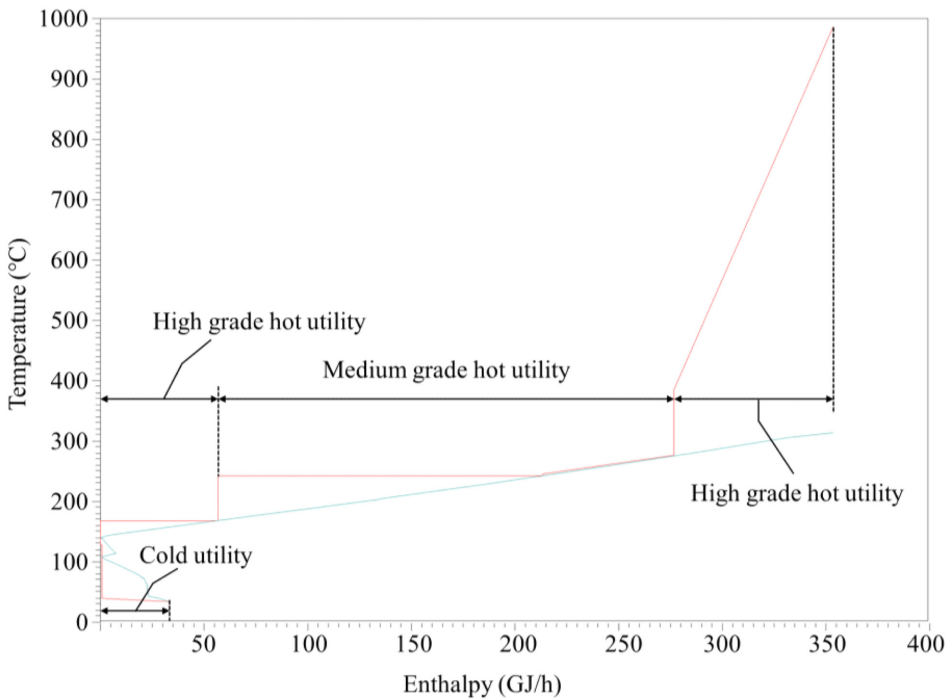


Fig. 7. Utility composite curve of ES-SAGD CPF.

Table 2. Energy targeting of ES-SAGD CPF

Utility	Simulation result	Energy target	Target for saving
Total Utilities [GJ/h]	438.3	387.8	11.53%
Heating Utilities [GJ/h]	379.0	353.7	6.67%
Cooling Utilities [GJ/h]	59.3	34.1	42.59%
Carbon Emissions [tonne/h]	24.5	21.7	11.52%

그랜드 합성선도 Figure 6는 온도-엔탈피 선도 상에 Figure 4의 온류 합성선도 및 냉류 합성선도를 결합하여 나타낸 그림이다. 그랜드 합성선도 Figure 6는 온류와 냉류 간 열 교환되는 영역, 유틸리티와 열 교환되는 영역 및 열 교환량을 도식적(음영부분)으로 확인 가능하며 유틸리티 선정의 판단 근거가 된다. 유틸리티 준위를 검토해 작성한 유틸리티 그랜드 합성선도는 Figure 7와 같다.

Figure 7을 도식적으로 분석한 결과 핀치점 하부에 필요한 냉각 유틸리티는 약 34,060,598 kJ/hr 이며 핀치점 상부에 필요한 가열 유틸리티가 약 353,728,197 kJ/hr 필요하다는 것을 확인하였다. 가열 유틸리티는 400 °C 이상의 고준위 유틸리티, 약 300 °C의 중준위 유틸리티, 200 °C의 저준위 유틸리티로 나누어 공급할 수 있으며, 낮은 준위의 유틸리티를 공급하는 만큼 에너지 비용을 절감할 수 있다.

3-3. 에너지타겟팅

Table 2에 현재 공정의 시뮬레이션 결과(Simulation result)와 에너지 목표값(Energy target)을 정리했다. EMAT 0 °C 일 때 최대 절감가능한 에너지 목표값을 시뮬레이션 결과값과 비교하고, 이를 에너지 절감량(Target for saving)으로 나타내었다.

Aspen HYSYS 공정해석도구로부터 계산한 현재 에너지 사용량은 가열부하(Heating duty) 378,999,203 kJ/h이고, 냉각부하(Cooling duty) 59,331,605 kJ/h이다. Aspen energy analyzer 에너지 분석 도구를 이용하여 핀치해석 통해 확인한 가열계통 에너지 사용량 목표값은 353,728,197 kJ/h으로, 기존 대비 약 6.7% 절감 가능하다. 이는 고온의 보일러 블로우다운이나 오일의 폐열을 회수하여 보일러 급수 예열에 활용할 수 있음을 시사한다. 냉각계통 목표값은 34,060,598 kJ/h이며, 약 42.6%의 높은 절감율을 보였다. 이는 오일제거공정 및 솔벤트회수공정에서 발생하는 저온 폐열들이 적절히 사용되지 못하고 냉각수에 의해 폐기되고 있음을 의미한다.

열교환망 최적화를 통해 전체 유틸리티 사용량을 절감할 경우, 탄소 배출량은 기존 24,500 kg/h에서 21,670 kg/h로 약 11.5% 감소하는 것으로 분석되었다. 에너지 소비량 11.5% 저감은 운영비 절감뿐만 아니라, 강화되는 환경 규제에 따른 탄소세 부담을 직접적으로 완화할 수 있는 수단이 된다. 이는 ES-SAGD 공법의 상업적 경쟁력을 확보하는 데 필수적인 요소이다.

4. 결 론

본 연구에서는 상용급 ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트 CPF의 공정시뮬레이션 결과인 열/물질수지로부터 합성선도, 그랜드 합성선도, 밸런스 합성선도, 유틸리티 합성선도를 도식화하였으며, 이를 바탕으로 핀치 해석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 열교환망 분석: ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트 에너지 사

용량은 가열 유틸리티 378,999,203 kJ/h이고, 냉각 유틸리티 59,331,605 kJ/h으로 확인되었다.

(2) 에너지 절감 잠재력 확인: 핀치 분석 결과, 열교환망 최적화 통해 에너지 사용량은 가열 유틸리티 6.7%, 냉각 유틸리티 42.6%의 절감이 가능한 것으로 나타났다. 특히 냉각 계통의 높은 절감율은 공정 내 저온부 열통합의 필요성을 뒷받침한다.

(3) 환경적 기여: 열교환망 최적화로 시간당 약 2,830 kg의 이산화탄소 배출을 저감할 수 있으며, 이는 ES-SAGD 공법의 고질적인 문제인 높은 에너지 집약도를 완화하는 데 기여할 것이다.

본 연구에서 도출된 에너지 절감가능한 목표값은 이론적 최대치이다. 이를 달성할 경우 연간 약 11.5%의 탄소 배출량 저감이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구에서는 실제 열교환기 배치 및 배관 비용을 고려한 열교환망 설계 단계와 경제성 평가가 병행되어야 한다.

감 사

This research was funded by a grant from the National Research Foundation of Korea (NRF), supported by the Korean government (MSIT) (RS-2021-NR059190). Also, This work is supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA) grant funded by the Ministry of Land, Infrastructure and Transport (Grant RS-2022-00143541).

Reference

1. Unconventional Oil Ores Around the World: A Review (2021).
2. An Innovative In Situ Solvent Generation Enhanced SAGD Technique (2024).
3. <https://www.capp.ca/en/oil-natural-gas-you/oil-natural-gas-canada/oil-sands/>
4. Nasr, T., Beaulieu, G., Golbeck, H. and Heck, G., "Novel expanding solvent-SAGD process (ES-SAGD)," Proceedings of the Canadian International Petroleum Conference, Calgary, AB, Canada, Jun. 11-13(2002).
5. Orr, B., "ES-SAGD: Past, Present and Future," in Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, LA, USA, 4-7 Oct. 2009, Paper SPE 129518-STU.
6. Amer, H., Sheng, K., Okuno, R., Al-Gawfi, A. and Nakutnyy, P., "A Systematic Comparison of Solvents and Their Concentrations in Bitumen Gravity Drainage Under Controlled Thermodynamic Conditions," *Fuel*, **357**, 129723(2024).
7. Jeong, M., Lee, H., Hwang, I. and Byun, H., "Economic Analysis of Commercial Scale Central Processing Facility for ES-SAGD Oilsand Plant," *Korean Chemical Engineering Research*, **63**(3),

- 105127(2025).
8. Jeong, M., Lee, S., Shin, H., Cho, E., Hwang, I. and Kang, C., "Design and Assessment of An Oil-treatment Process for Bitumen Separation," *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, **19**(3), 5-9(2016).
 9. Jeong, M., Rho, S., Kang, C. and Hwang, I., "Optimization of Heat Exchanger Network in the Dehydration Process Using Utility Pinch Analysis," *Korean Journal of Chemical Engineering*, **37**, 1565-1572(2020).
 10. Towler, G. and Sinnott, R. K., *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, Oxford (2021).
 11. Yaxian, Z., Yingjie, Z., Yi, H., Jiancheng, W., Weiren, B., Liping, C., Lijuan, S. and Qun, Y., "Pinch Analysis for Heat Integration of Pulverized Coke Chemical Looping Gasification Coupled with Coke-oven Gas to Methanol and Ammonia," *Processes*, **10**(9), 1879(2022).

Authors

Moon Jeong: Professor, Department of Chemical Engineering, Hanyeong University, Yeosu 59720, Korea; moon@hanyeong.ac.kr

Hongcheol Lee: Senior Researcher, Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 10223, Korea; hclee@kict.re.kr

Inju Hwang: Senior Research Fellow, Department of Environmental Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 10223, Korea; ijhwang@kict.re.kr

Hun-Soo Byun: Professor, Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea; hsbyun@jnu.ac.kr