

상용급 ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트 경제성 평가

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
(2025년 2월 27일 접수, 2025년 3월 10일 수정본 접수, 2025년 4월 15일 채택)

Economic Analysis of Commercial Scale Central Processing Facility 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, Gyeonggi-do, 10223, Korea
***Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Chonnam National University, 50, Daehak-ro, Yeosu-si, Jeollanam-do, 59626, Korea
(Received 27 February 2025; Received in revised from 10 March 2025; Accepted 15 April 2025)

요 약

석유 매장량이 한정되어 있다보니 생산 난이도가 낮은 전통 석유 뿐만 아니라 기술력이 필요한 비전통 석유에 대한 생산도 이루어 지고 있다. 비전통 석유 중 많은 비중을 차지하고 있는 오일샌드 개발이 활발히 진행됨에 따라, 투자비 산출 등 경제성 평가에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 연구에서는 탄화수소 용매를 함께 주입하는 솔벤트-증기주입중력배출(expanding solvent steam assisted gravity drainage, ES-SAGD) 방식의 중앙처리시설 공정계통을 공정모사도구 HYSYS 이용하여 모델링하고, 생산용량 625, 1250, 2500, 5000, 10000, 20000, 40000BPD 규모에서 열, 물질수지를 도출했다. 이 데이터를 바탕으로 경제성분석도구 APEA 이용하여 총 투자비용, 총 운전비용을 추산하고 분석했다. 생산용량 증가에 따라 유틸리티 비용, 장치비용 등 모든 비용이 전반적으로 증가했다. 다만, 총 투자비용은 비례적으로 증가했으나, 총 운전비용의 증가폭은 낮아지는 것으로 보인다. 그리고 공정시뮬레이션 결과값과 개략견적기법인 6/10 법칙으로 계산한 값을 비교함으로써 개략견적기법의 유용성을 확인했다.

Abstract – Due to its limited oil reserves, it produces both conventional and unconventional oil. Oil sands development, which represents a significant portion of unconventional oil, is actively pursued. As a result, there is increasing interest in economic evaluation, particularly in the calculation of investment costs. In this study, the ES-SAGD central processing facility process system, which involves the injection of steam and hydrocarbon solvent, was modeled using HYSYS. The heat and mass balance were calculated for production capacities of 625, 1250, 2500, 5000, 10000, 20000, and 40000 BPD. Using this data, the total investment cost and total operating cost were estimated with APEA, an economic analysis tool. As production capacity increased, all costs, including utility and equipment costs, showed an overall increase. While the total investment cost rose proportionally, the increase in total operating costs slowed down. By comparing the results of these process simulations with those calculated using the 6/10 factor rule from the rough estimation technique, the effectiveness of the rough estimation method was validated.

Key words: Oilsands, Bitumen, ES-SAGD, Process modeling, Economy analysis

† 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

석유는 세계 에너지에서 중요한 역할을 하며, 특히 대한민국의 일차에너지공급에서 석유는 41.6%로 가장 높은 비중을 차지하고 있다[1].

전통 석유의 고갈로 인해 비전통 석유 개발의 중요성이 점차 부각되고 있다. 그리고 비전통 석유 개발은 급변하는 유가 환경 속에서 에너지 안보를 확보하는데 중요한 역할을 한다. 국제에너지기구에 따르면 기술적으로 생산 가능한 전통석유 매장량은 약 2조 배럴인 반면에, 비전통 오일 매장량은 약 4.1조 배럴이다[2]. 비전통 석유 중 오일샌드 매장량은 1조 7,000억 배럴이다[3].

오일샌드를 채굴하는 방법은 노천채굴과 지하채굴이 있다. 노천 채굴은 오일샌드 위에 있는 토양을 걷어내고 오일샌드를 채굴하여 정제시설로 옮겨 오일을 생산하는 방식이다. 지하채굴은 오일샌드는 지표면에서 깊숙히 묻혀있을 때 증기 등을 이용해 지하에 열을 주입하고 점도가 낮아진 오일을 생산하는 방식이다.

오일샌드 지하채굴에 있어 대표적인 방법으로는 순환증기주입법(cyclic steam stimulation, CSS) 공법과 증기주입중력배출(steam assisted gravity drainage, SAGD) 방식이 있으며, 고온·고압의 증기를 이용하여 비투멘의 점성을 낮춰 생산하는 방식이다.

초기에는 하나의 시추공을 이용해 증기를 주입하고 일정 시간이 지난 후 점성이 낮아진 비투멘을 동일한 시추공을 통해 생산하는 CCS가 활용되었다. 이후 두개의 수평정을 이용해 상부 수평정에 증기를 넣고 하부 수평정으로 비투멘을 생산하는 SAGD는 2000년대 부터 상용화가 이루어졌다. 더 나아가 증기생산에 드는 에너지 비용과 온실가스 배출량 저감을 위한 연구가 수행되었으며, 최근들어 증기와 탄화수소 용매를 함께 주입하여 생산효율을 올리는 솔벤트-증기주입중력배출(expanding solvent-steam assisted gravity drainage, ES-SAGD)방식에 대한 연구가 활발해졌다.

SAGD 방식을 적용한 오일샌드플랜트에 ES-SAGD 방식을 적용할 수 있으며 상대적으로 낮은 농도의 증기와 솔벤트를 함께 주입한다. 용매는 주입된 물과 동일한 조건에서 기화 및 응축되는 방식으로 선택한다. 이러한 방식으로 주입된 용매는 증기 챔버의 경계에서 증기와 함께 응축되고 열과 함께 오일을 희석하여 비투멘의 점도를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 이를 통해 오일 회수율을 향상할 수 있다.

증기 또는 솔벤트 공정에 비해 증기 및 솔벤트 동시 주입의 이점은

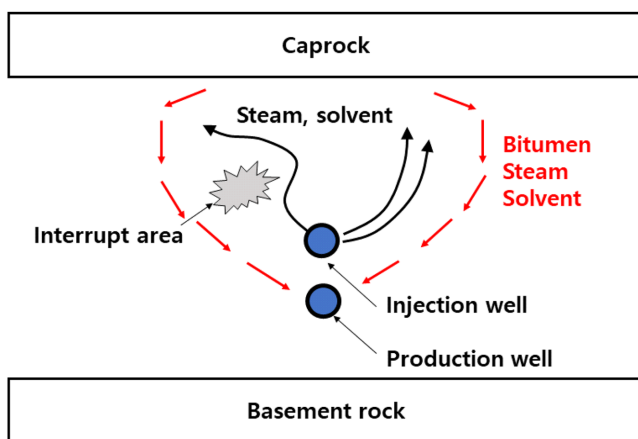


Fig. 1. Schematics of Expanding Solvent-SAGD (ES-SAGD).

점도 감소가 더 높으며, 오일생산이 더 많고, 물소비가 더 적다는 것이다. 이로 인해 온실가스 배출은 더 낮아진다. Fig. 1를 보면 증기 및 솔벤트 동시 주입에서 비투멘 점도는 증기에 의해 제공되는 온도 상승과 솔벤트 용해에 의한 희석이라는 두 가지 메커니즘에 의해 점도를 보다 낮춤으로서 유동이 장애층이 우회하여 열전달이 보다 용이하고 이로 인해 생산량이 향상한다[4].

ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트 중앙처리시설(central processing facility, CPF)은 유정단지(well pads)에서 생산되는 기체에서 솔벤트를 분리하는 공정이 추가되어 있다. 유정단지에서 나오는 가스 파이프라인에 슬러그 캐처에서 설치하고 파이프라인에 존재하는 액체를 수집한다. 그리고 이를 냉각하여 온도를 낮춘 다음 기액분리기에서 천연가스와 솔벤트를 분리시킨다. 액체 상태로 분리된 솔벤트는 연소기에 농축된 보일러수와 열교환하여 가열시킨 다음 증기와 혼합시켜 유정단지로 주입한다.

Nguyen-Le 등은 SAGD, ES-SAGD, SAGD와 ES-SAGD연계 공정의 시뮬레이션을 통해 유전의 품질에 따른 성능을 비교, 분석했다. 그 결과 ES-SAGD 방식이 가장 우수한 결과를 보여주었고, 펜테인(pentane)이 최적의 용매로 확인되었다[5].

이러한 연구들은 ES-SAGD 공정이 에너지 효율과 경제성 측면에서 기존의 SAGD 공정보다 에너지 소비와 물 사용량을 줄이면서도 높은 생산량을 유지할 가능성을 입증하였다.

이러한 발전에도 불구하고, 상업 규모 ES-SAGD 플랜트의 중앙처리 시설을 중점적으로 다룬 포괄적인 경제 분석 연구는 아직 제한적이다. CPF는 자본 및 운영 비용에서 상당한 비중을 차지하기 때문에, 그 설계 및 운영 최적화는 ES-SAGD 프로젝트의 전체 수익성에 있어 매우 중요하다. 이 연구는 상업 규모 ES-SAGD 오일샌드 플랜트의 CPF의 경제적 타당성을 평가하고자 한다. 연구에서는 자본 투자, 운영 비용, 에너지 효율성 및 규제 준수 등의 요소를 고려하여 비용-편익 분석과 민감도 분석을 수행한다. 이를 통해 오일샌드 개발의 투자 의사 결정에 필요한 근거를 제공하고, 더 나아가 ES-SAGD 방식의 CPF에 대한 경제성분석을 통해 6/10(Six-tenth) 법칙의 유용성을 검토하고자 한다.

2. 이 론

오일샌드는 혼합물이며 비투멘 10%, 물 5%, 모래 및 미세점토 85%로 구성되어 있다[6]. 비투멘은 상온에서 고체상태로 존재하며, 세투레이트 34.7%, 방향족 26.8%, 레진 19%, 아스팔텐 19.5%로 구성되어 있다[7]. 오일샌드 층이 지표에서 75 m 이내로 얇은 곳에 있으면 채굴방식으로 생산하며, 200 m 이상으로 깊은 곳에 있으면 증기를 이용한 인시추 방식으로 생산한다.

오일샌드를 생산하는 SAGD 방식은 비투멘이 있는 지층에 위아래로 한 쌍의 수평배관을 시공한다. 상부에 있는 배관으로 증기를 주입하고 그 증기가 주변 지층에 열을 주면 비투멘은 점성이 낮아지고 유동성을 가지게 되어 중력에 의해 아래에 있는 배관으로 빠져나간다. 그리고 증기압력과 생산가스의 부양력에 의해 비투멘이 혼합되어 있는 오일샌드를 지상으로 배출하는 방식이다. 선행 프로젝트에서 증기-기름 비율(steam to oil ratio, SOR)이 평균 약 2~4 정도이며, 최종 비투멘 회수율은 약 50 % 내외이다[8].

ES-SAGD 방식은 솔벤트회수공정, 오일처리공정, 오일제거공정, 수처리공정, 증기생산공정으로 구성되어 있다. 솔벤트 회수공정은

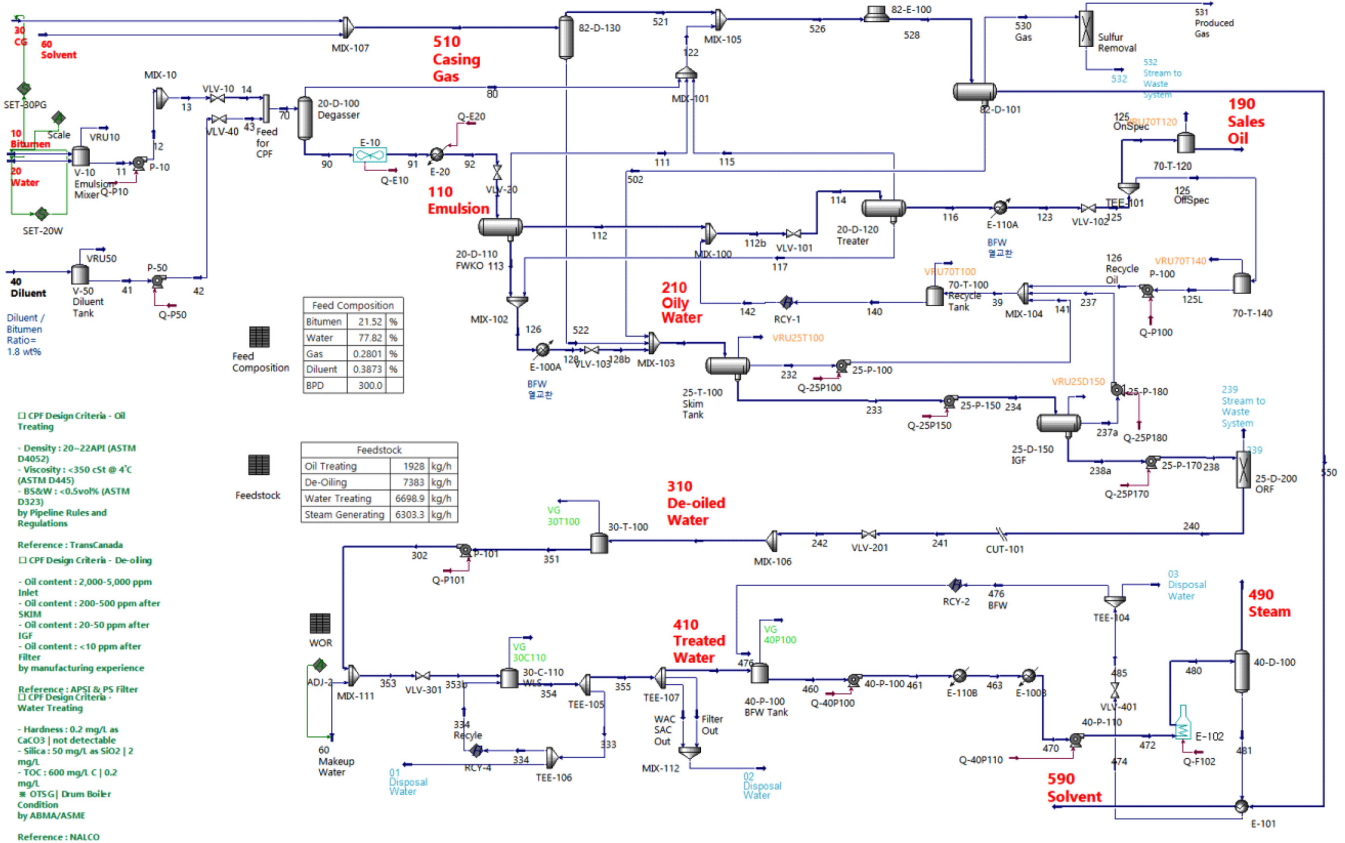


Fig. 2. The process flow diagram of the CPF in ES-SAGD Oilsands plant.

케이싱 가스 및 오일처리공정에서 분리되는 가스에서 천연가스 및 솔벤트를 분리시키는 공정이다. 오일처리공정은 주로 오일과 물, 모래를 분리하는 공정이며, 오일에서 에멀전, 이물질 등을 제거하여 오일의 품질을 향상하고, 가벼운 탄화수소 계열의 희석제를 투입하여 오일의 점도를 낮추어 유동성을 높인다. 오일제거공정은 오일처리공정에서 분리된 물에 녹아있는 오일을 제거하는 공정이다. 수처리공정은 보일러에서 스케일, 부식을 방지하고 효율성을 높이기 위하여 불순물을 제거하는 공정이며, 과망간산칼륨, 수산화나트륨 등 화학물질을 사용하여 살균, 유기물분해, pH조정 등을 한다. 증기재생공정은 폐열을 회수하고 보일러를 통해 비투먼 회수에 필요한 증기를 생산한다[9].

2-1. 솔벤트회수공정

유정팩드에서 나오는 케이싱 가스는 슬러그캐처로 들어간다. 여기에서 응축물은 오일처리공정으로 보내지고, 기체는 오일처리공정에서 회수한 기체와 함께 냉각기로 보내 솔벤트 끓는점 이하로 온도를 낮춘다. 그 다음 기액분리기에서 가벼운 탄화수소계열의 생산가스와 무거운 탄화수소계열의 솔벤트로 분리한다. 생산가스는 황회수장치(sulphur recovery unit, SRU)로 보내 탈황과정을 거치고 증기생산에 필요한 연료로 공급한다. 회수한 솔벤트는 보일러 응축수와 열교환을 통해 가열한 후 증기와 혼합하여 유정팩드에 넣어주는 방식으로 재사용한다.

2-2. 오일처리공정

유정팩드에서 나오는 비투먼 혼합물은 유수분리장치(free-water

knock out unit, FWKO)에서 분리된다. FWKO로 들어가는 에멀전에 항유화제와 부식억제제를 넣는다. FWKO에서 분리되는 오일은 약 10%의 침전물과 물(basic sediment and water, BS&W)을 포함하고 있으며, 에멀전 및 불순물을 제거하기 위해 오일처리장치로 보낸다. FWKO에서 분리되는 물은 오일제거공정으로 보내고, 기체는 솔벤트회수공정으로 보낸다.

오일처리장치로 들어가는 오일에 항유화제를 넣는다. 오일처리장치에서 생성되는 기체는 FWKO에서 생성되는 기체와 같이 솔벤트회수공정으로 보낸다. 오일은 BS&W가 0.5% 이하가 되도록 전기장용을 이용하여 처리한다. 불순물이 제거된 원유는 온도를 낮춘 후 저장탱크로 보낸다. 오일처리기에서 생성되는 물은 FWKO에서 생성된 물과 함께 오일제거공정으로 보낸다.

2-3. 오일제거공정

FWKO와 오일처리장치에서 분리되는 물은 다량의 유분을 포함하고 있으며, 이를 제거하기 위해 80°C로 온도를 내린 후 스킴탱크로 보낸다. 스킴탱크에서 시간이 경과함에 따라 탱크상부로 부유한 오일은 슬로프 오일 탱크로 들어간다. 스킴탱크 하부의 물은 유분을 추가적으로 제거하기 위해 기포주입장치(induced gas flotation unit, IGF)로 이동한다.

물의 하단에 탄화수소 기체를 넣어 작은 기포를 만들면 기포들이 상승하면서 물에 녹아있는 유분을 흡착한다. 유분을 흡착한 기포는 수면 위로 이동하고, 상부에 쌓인 유분거품은 슬로프 오일 탱크로 보낸다. 물 속 유분을 10 ppm 이하로 제거하기 위해 오일제거필터(oil removal filter, ORF)를 이용한다.

2-4. 수처리공정

수처리 계통은 관류형 증기발생기(once through steam generators, OTSG)에 공급할 양질의 보일러 급수(boiler feed water, BFW)를 생산한다. 수처리 계통은 여과, 탈기, 물의 경도 강하, 그리고 모래, 철, 산소를 제거하기 위한 연수화 및 화학적 개량 과정으로 구성된다.

그린샌드필터로 여과한 물은 용해 산소량 수준을 0.5 ppm 미만으로 낮추기 위하여 물속에 녹아있는 비응축성 가스를 제거하는 탈기기로 유입한다. 탈기된 물은 펌프를 통해 연수기로 들어간다. 이 장치에서 발생하는 기체와 작은 양의 수증기는 응축액 회수 압력용기를 통과한 후 대기로 배출된다.

탈기된 물에서 염소를 제거할 목적으로 아황산염 및 부식제를 주입한다. 적정시간 체류하면 탱크하부에 침전물이 가라앉는다. 연화처리된 물은 BFW 탱크로 보낸다.

2-5. 증기생산공정

BFW 탱크에 있는 물은 저압펌프에 의해 약 1000 kPag 까지 가압되고, 첫번째 열교환기로 보내져 약 56℃까지 가열된다. 가열된 물은 두번째 열교환기로 보내져서 125℃까지 가열된다. 여기에서 고압펌프를 통해 14,400 kPag 로 가압된 물은 세 번째 열교환기를 통해 약 165℃ 까지 추가 가열된 후, 보일러로 들어간다. 보일러에서 품질 80%의 증기를 생산하고, 증기분리기를 통해 100% 품질의 증기는 유정페드로 공급된다.

2-6. 6/10 법칙

6/10 법칙(Six-Tenth Rule)은 경험을 기반으로 만들어진 규칙이며, 프로젝트 규모별 투자비를 추정하는데 사용합니다. 장치크기 등 커지면서 발생하는 비용이 어떻게 변화하는지 예측하는 법칙이며, 프로젝트 규모가 커지는 비율보다 낮은 비율로 비용이 증가합니다. 6/10 법칙으로 계산하면 생산량이 10배 증가하면 생산량의 증가 대비 비용은 60%로 줄어든다는 개념입니다[10].

$$C_2 = C_1 \times \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^n \tag{1}$$

C₂ = cost of capacity S₂

C₁ = cost of capacity S₁

S₂ = new scale

S₁ = original scale

n = the exponent, which is typically 0.6

용량이 커질 때 비용은 용량이 증가하는 비율에 비례하여 증가하지 않고 보다 낮은 증감률로 증가함을 나타냅니다. 여기에서 지수는 규모의 경제 효과를 나타내는데, 생산량이 증가함에 따라 단위당 비용이 줄어드는 현상을 설명합니다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 공정설계 및 시뮬레이션 결과

오일샌드 생산에서 핵심매개변수는 SOR이며, SAGD 플랜트에서 SOR은 일반적으로 2.5에서 3.5로 알려져 있다[11]. SOR이 높을수록 생산에 필요한 증기의 양이 많아진다. 천연가스 연소는 온실가스(green house gas, GHG)인 이산화탄소를 생성하므로, SOR을 줄이는 것은 SAGD 생산에 있어 온실가스 양을 줄이는 방법이다.

증기는 일반적으로 천연가스를 연소하는 OTSG에 의해 생산된다. 스팀에 솔벤트를 섞어 웰패드에 공급하는 개선된 SAGD 방식을 이용하면 비투멘 생산에 필요한 증기사용량이 줄어들어 GHG 배출을 줄일 수 있다.

텍사스 대학교 연구진에 의해 ES-SAGD 플랜트에서 솔벤트-증기 비율(solvent to steam ratio, SSR) 최적값은 0.3임이 확인되었다[12]. 이를 바탕으로 ES-SAGD 모델링 및 시뮬레이션에서 SOR 2.5, SSR 0.3으로 설정했다.

비투멘의 물성은 실험데이터를 분석한 유사성분 데이터를 활용했다[13]. 솔벤트회수공정, 오일처리공정, 오일제거공정의 열물질수지를 계산하기 위해 팽-로빈슨 모델을 적용하였으며, 이 모델은 반데르발스 상태방정식을 확장한 것으로 탄화수소 계열에 대해 상평형과 액체의 밀도를 정확하게 추산하여 신뢰성이 높다. 그리고 수처리공정과 증기생산공정의 물과 증기에 대한 열물질수지를 계산하기 위해 ASME steam 열역학모델을 적용했다.

부탄보다 무거운 탄화수소가 오일회수와 열효율 향상에 도움이 된다는 선행연구결과에 따라 솔벤트는 헥세인으로 적용했다[14]. 오일-가스 산업에서 널리 받아들여지는 오일과 물의 요구사항은 Table 1과 같으며, 공정설계 제한조건으로 설정했다[15].

이러한 가정을 바탕으로 탄화수소 용매와 증기를 오일샌드 퇴적층에 공급하고 생산되는 물질에서 가스, 솔벤트, 오일, 물, 무기물을 분리하여 솔벤트와 물을 재생하는 중앙처리시설을 모델링하고 시뮬레이션했다.

ES-SAGD 오일샌드플랜트 중앙처리설비를 대상으로 공정설계를 통해 도출한 공정도는 Fig. 2과 같으며, 시뮬레이션을 통해 계산한 열 및 물질수지는 625, 1250, 2500, 5000, 10000, 20000, 40000BPD 규모로 도출했다.

3-2. 경제성평가

경제성을 검토하기 위해서 총 투자비용(total capital cost)과 총 운영비용(total operating cost)을 계산해야 한다. 총 투자비용은 공장을 설계하고 건설하는데 필요한 비용이며, 기자재비용과 설치비용에 의해 결정된다. 총 운영비용은 공장을 운전하는 동안 발생하는 연간비용이며, 운전비용과 유틸리티비용에 의해 결정된다. 운전비용은 일정하게 소비되며 노동비용과 유지보수비용을 포함한다. 노동비용은 연간운전시간과 노동자 수에 의해 결정되며 유지보수비용은 투자비용의 4%로 계산한다. 유틸리티비용은 유틸리티 소모량, 유틸리티 단가, 운전시간에 의해 결정된다.

Table 1. A design criteria of the oilsands plant

Oil		
- Density	20~22API	ASTM D4052
- Viscosity	350 cSt 이하	ASTM D445
- BS&W	0.5 vol% 이하	ASTM D323
Water		
- De-oiling	200-500 ppm	after Skim Tank
	20-50 ppm	after IGF
	10 ppm 이하	after Filter
- Water softening	ABMA	ASME
· Hardness	0.2 mg/L 이하	0 mg/L
· Silica	50 mg/L	2 mg/L
· TOC	600 mg/L	0.2 mg/L

Table 2. Economic evaluation via HYSYS by production scale

BPD	625	1250	2500	5000	10000	20000	40000
Total Capital Cost [USD]	8.87M	10.55M	13.68M	19.40M	30.49M	56.17M	116.06M
Total Operating Cost [USD/Year]	1.68M	2.33M	3.61M	6.18M	11.31M	21.67M	42.39M
Total Utilities Cost [USD/Year]	0.65M	1.22M	2.36M	4.65M	9.23M	18.51M	36.97M
Equipment Cost [USD]	1.39M	2.04M	3.30M	5.70M	10.23M	19.12M	37.56M
Total Installed Cost [USD]	3.96M	5.18M	7.44M	11.91M	20.67M	38.30M	80.24M

투자비를 추산하기 위해 경제성 평가 프로그램(Aspen process economic analyzers, APEA)을 활용했다. 각 장치에 대한 종류 및 크기를 정하여 장치비용을 산출하고, APEA에 내장된 파라미터를 적용하여 총투자비를 계산했으며, 총운영비는 고정비용, 운전비용 등을 합산하고, 총유틸리티 비용은 전기료, 냉각수 비용 등을 추산했다(Table 2).

Figure 3을 보면 생산용량이 두배 커질 때 총투자비용 증가폭은 625BPD → 1250BPD 119%, 1250BPD → 5000BPD 130%, 5000BPD → 10000BPD 142%, 10000BPD → 20000BPD 157%, 20000BPD → 40000BPD 207%로 2배 이하로 증가한다.

생산용량 625BPD 기준으로 개략견적기법인 6/10 인자 법칙(six-tenths rules)을 적용하여 1250, 2500, 10000, 20000, 40000BPD에서 견적을 도출하고 Table 3에 정리했다. 지수에 기본값 0.6 적용시 많은 구간에서 오차가 50% 미만이었으나 일부 예측값에서는 오차가 78.7%로 확인되었다. 개략적인 견적 단계에서는 ±50% 범위가

지 합리적인 수준이라고 평가하므로 영역별로 6/10 법칙의 지수를 보정할 필요가 있다.

ES-SAGD 개략적인 견적에 있어 HYSYS 경제성 분석 결과에 맞춰 6/10 법칙의 계수와 지수를 보정했다(Table 4). 보정한 6/10 법칙으로 ES-SAGD 규모별 투자비용을 산출한 결과를 Table 5에 나타내고, HYSYS 이용한 경제성분석 결과와 6/10 법칙으로 도출한 결과의 오차를 Table 6에 기재했다.

Table 4. Six-tenth rule correction factor for ES-SAGD Plant

BPD	Exponent
Total Capital Cost	0.62
Total Operating Cost	0.78
Total Utilities Cost	0.97
Equipment Cost	0.79
Total Installed Cost	0.72

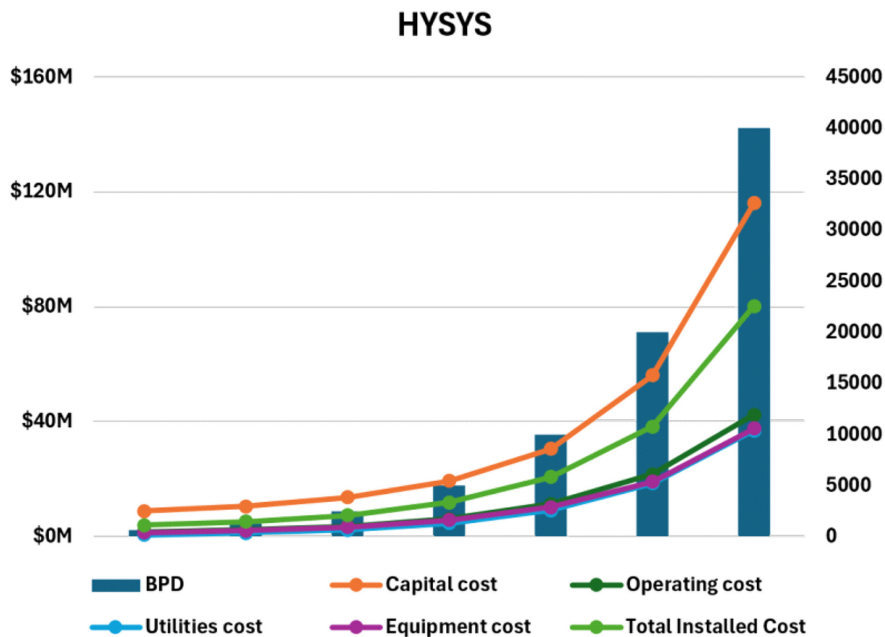


Fig. 3. Economic evaluation vis HYSYS by production scale.

Table 3. Economic evaluation via six-tenth rule by production scale

BPD	625	1250	2500	5000	10000	20000	40000
Total Capital Cost [USD]	8.9M	13.4M	20.4M	30.9M	46.8M	71.0M	107.6M
Total Operating Cost [USD/Year]	1.7M	2.6M	3.9M	5.9M	8.9M	13.5M	20.4M
Total Utilities Cost [USD/Year]	0.6M	1.0M	1.5M	2.3M	3.4M	5.2M	7.9M
Equipment Cost [USD]	1.4M	2.1M	3.2M	4.8M	7.3M	11.1M	16.9M
Total Installed Cost [USD]	4.0M	6.0M	9.1M	13.8M	20.9M	31.6M	48.0M

Table 5. Economic evaluation via six-tenth rule with correction factor by production scale

BPD	625	1250	2500	5000	10000	20000	40000
Total Capital Cost [USD]	8.9M	12.7M	18.2M	26.2M	37.5M	53.8M	77.1M
Total Operating Cost [USD/Year]	1.7M	2.8M	4.5M	7.4M	12.1M	19.7M	32.3M
Total Utilities Cost [USD/Year]	0.6M	1.3M	2.5M	4.8M	9.3M	18.1M	35.2M
Equipment Cost [USD]	1.4M	2.4M	4.2M	7.2M	12.4M	21.5M	37.2M
Total Installed Cost [USD]	4.0M	6.2M	9.6M	15.0M	23.3M	36.3M	56.6M

Table 6. Economic evaluation error rate: Comparing HYSYS and Six-tenth rule

BPD	625	1250	2500	5000	10000	20000	40000
Total Capital Cost	0.0%	20.6%	33.3%	34.8%	23.0%	4.3%	33.5%
Total Operating Cost	0.0%	18.5%	24.8%	19.2%	6.6%	8.9%	23.9%
Total Utilities Cost	0.0%	3.7%	4.1%	2.8%	0.7%	2.3%	4.9%
Equipment Cost	0.0%	17.8%	26.2%	26.2%	21.6%	12.5%	0.9%
Total Installed Cost	0.0%	18.9%	29.0%	25.6%	12.8%	5.1%	29.4%

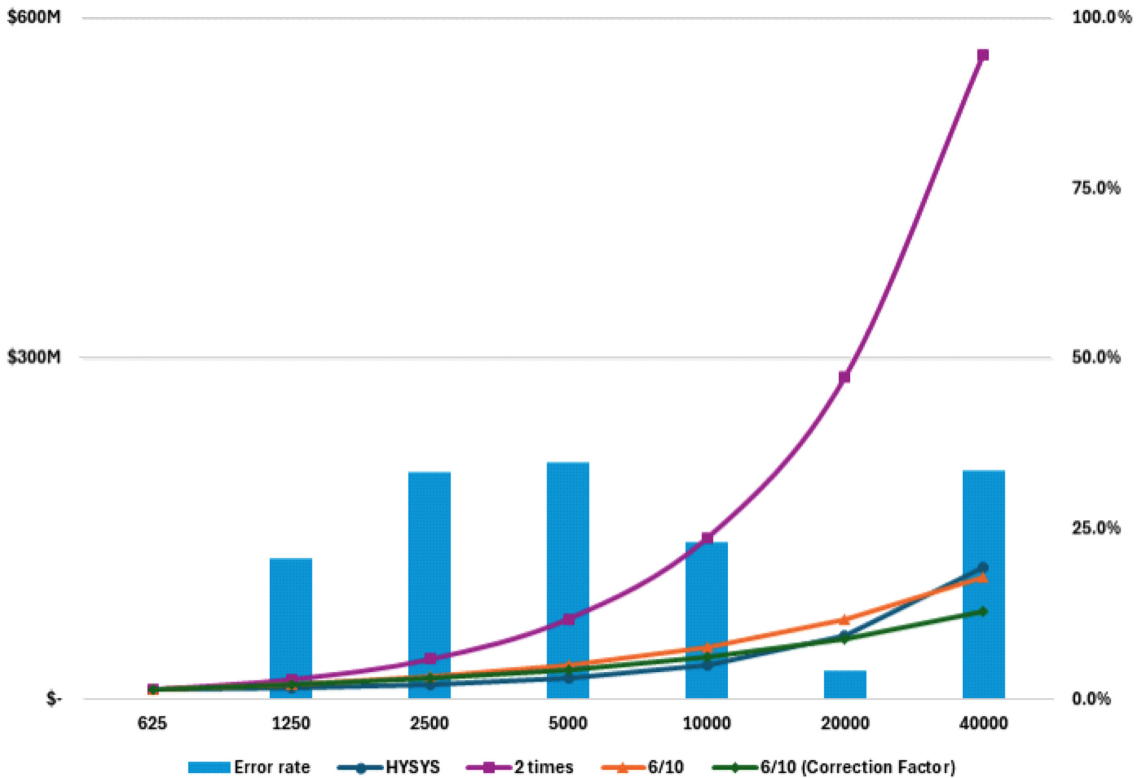


Fig. 4. Comparison of total capital cost: HYSYS, two times, six-tenth rule.

Table 6을 보면 경제성 분석에 있어 전 구간에서 오차율은 35% 이내임을 확인할 수 있다. 오차가 있더라도 모델링 및 시뮬레이션 대신 산술식으로 빠른 시간 내에 개략적인 견적이 가능하다는 점은 의미가 있다.

HYSYS 도구를 이용한 APEA 경제성 분석 결과(●)와 6/10 법칙의 기본인자(▲), 보정인자(◆)로 계산한 값의 오차율(막대그래프)을 영역별로 도식화하여 Figure 4~8에 나타내었다.

Figure 4를 보면 총 투자비용은 생산용량 증가비율에 비례하지 않으며 6/10법칙에 의한 예측값과 유사한 경향을 보인다. Figure 5를 보면 총 운영비용은 생산용량 증가비율과 비례하지 않으나 유사한 선형관계를 나타낸다. 생산용량이 16배 커지는 구간부터 HYSYS

경제성 분석값과 6/10법칙에 의한 예측값이 차이가 생기기 시작하여 6/10법칙 인자를 보정했다. Figure 6을 보면 총 유틸리티비용은 생산용량 증가비율에 비례하며, 6/10법칙과 다른 결과를 보였다. 이에 6/10법칙 인자를 보정했으며 유사한 결과를 도출했다. Figure 7을 보면 기자재 구입비용은 생산용량 증가비율에 비례하지 않으나 6/10 법칙과도 차이가 있었다. 6/10법칙의 인자를 보정하여 HYSYS 경제성 결과값에 맞추었다. Figure 8을 보면 기자재 설치비용은 6/10 법칙의 예측값과 유사한 경향을 보인다.

생산 용량이 64배 증가하는 구간까지 유틸리티 비용을 제외한 영역에서 HYSYS 경제성 분석값은 6/10 법칙에 의한 예측값과 유사한 경향을 보였다. 6/10 법칙의 인자를 보정한 결과, 전 구간에서

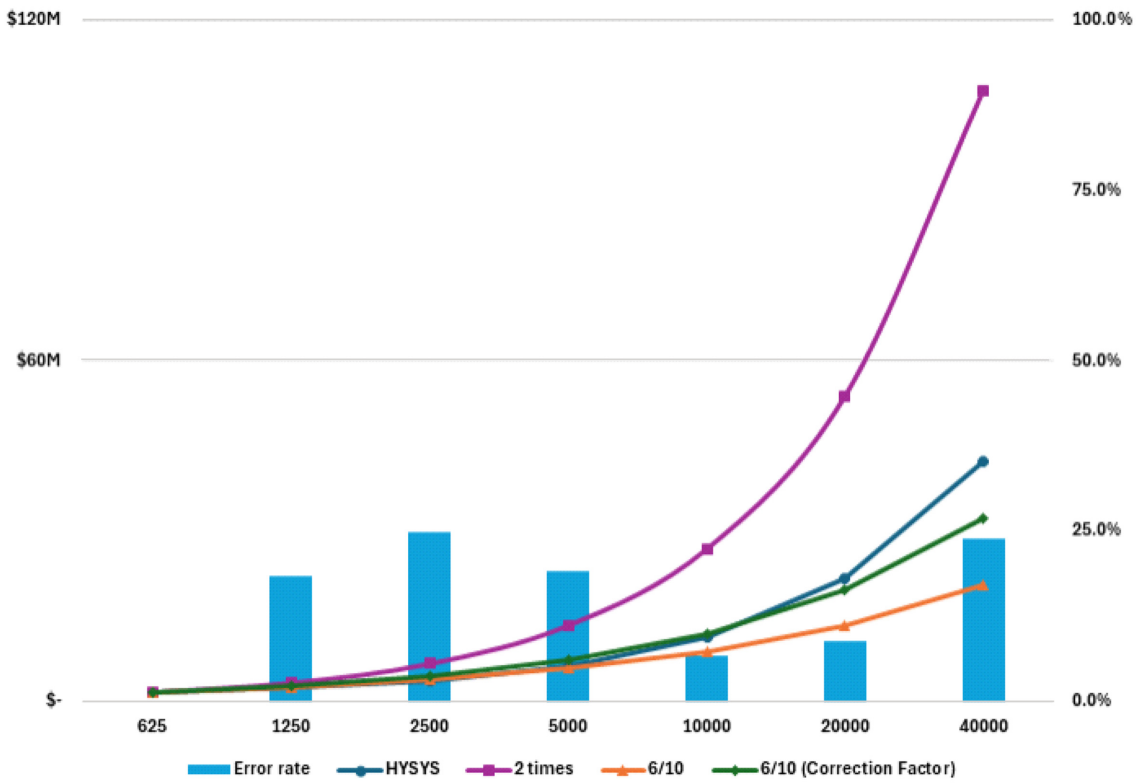


Fig. 5. Comparison of total operating cost: HYSYS, two times, six-tenth rule.

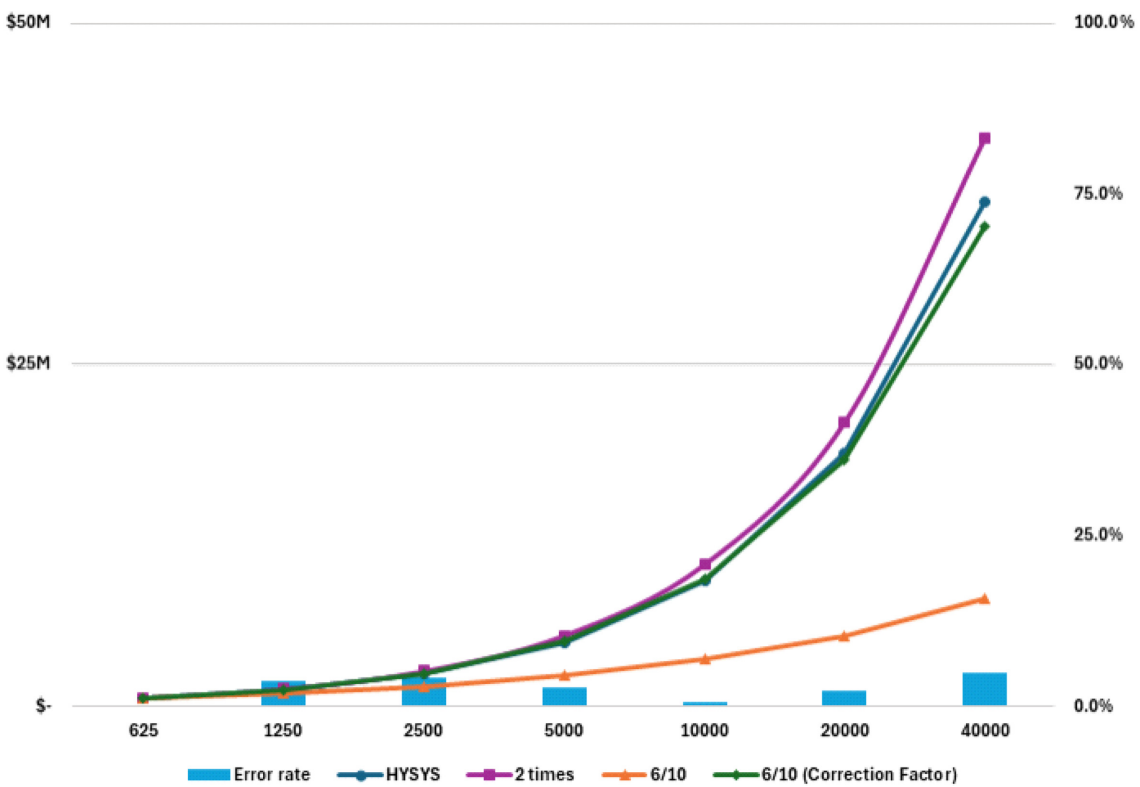


Fig. 6. Comparison of total utilities cost: HYSYS, two times, six-tenth rule.

오차율은 총 투자비용 35% 이하, 총 운영비용 24% 이하, 총 유틸리티 비용 5% 이하, 기자재 구입비용은 27% 이하, 기자재 설치비용은 30% 이하를 보이며 경제성 분석을 수행할 수 있었다. 단순 산

술식을 이용한 계산을 통해 경제성 분석 도구에서 도출한 결과와 유사한 값을 얻을 수 있었다.

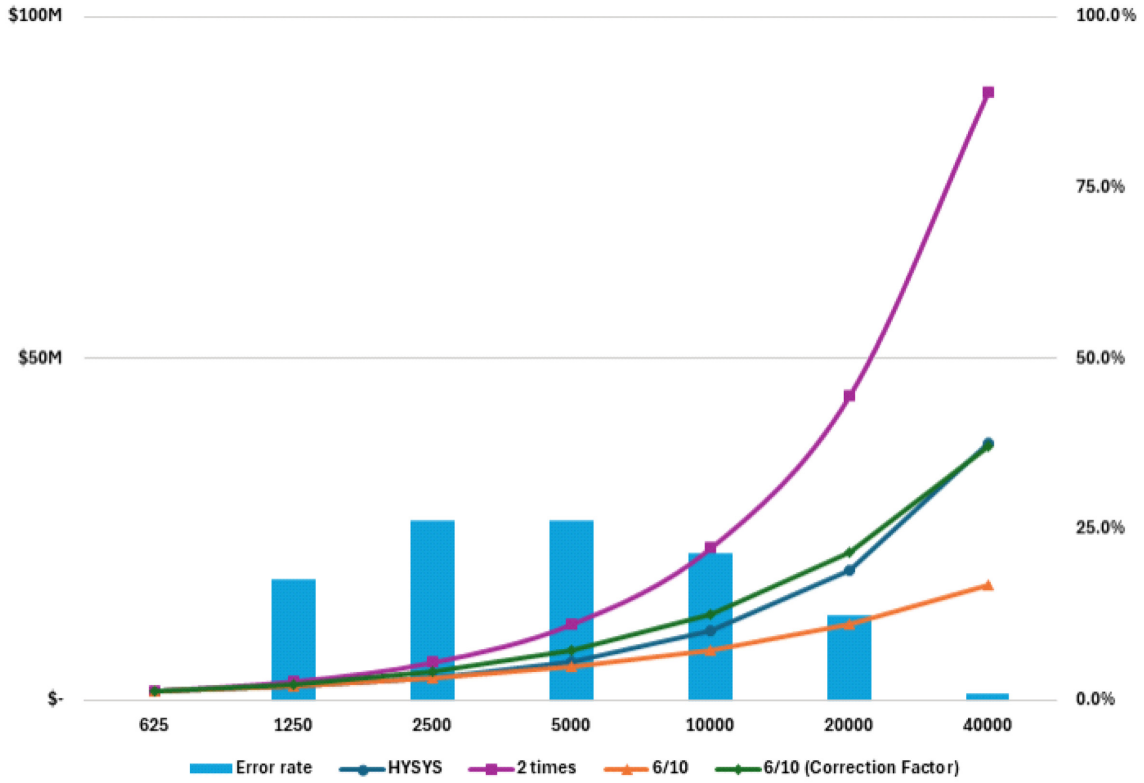


Fig. 7. Comparison of equipment cost: HYSYS, two times, six-tenth rule.

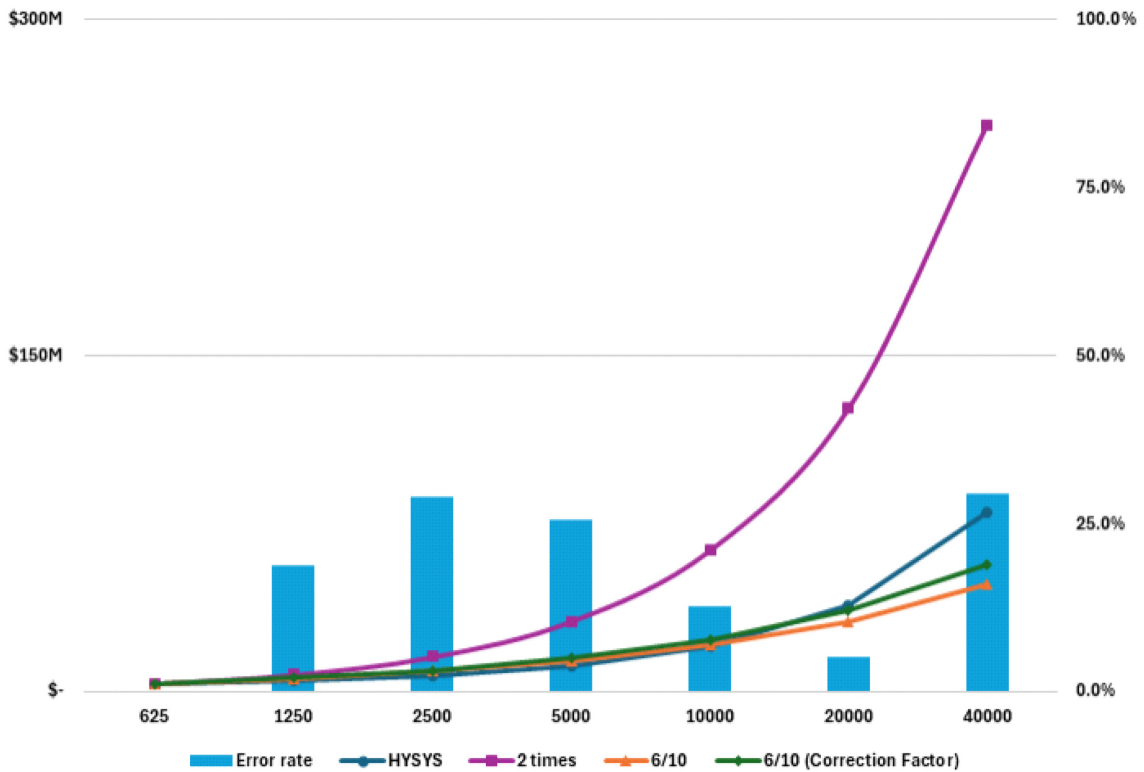


Fig. 8. Comparison of total installed cost: HYSYS, two times, six-tenth rule.

4. 결 론

본 연구에서는 상용급 ES-SAGD 방식의 오일샌드플랜트 CPF의 용량별 투자비용과 운전비용의 변화를 확인하고자 했다. 생산용량

625배럴, 1250배럴, 2500배럴, 5000배럴, 10000배럴, 20000배럴, 40000배럴 규모의 ES-SAGD 오일샌드플랜트 CPF를 공정모델링 하고 시뮬레이션 통해 차이를 분석했으며, 그 결과는 다음과 같다. ES-SAGD 오일샌드플랜트 CPF 처리용량이 증가할 때 HYSYS를

이용해서 ES-SAGD 오일샌드플랜트 경제성을 분석한 결과

(1) 투자비용, 운전비용, 장치비용, 설치비용은 용량의 증가율보다 더 낮은 비율로 증가한다.

6/10 법칙을 적용해서 비용산출한 결과

(2) 기본설정값($n=0.6$) 적용시 일부 구간에서 오차는 78.7%로 허용가능한 범위 벗어났으나 지수를 보정한 결과 오차율은 모든 영역, 모든 구간에서 35% 미만이었다.

개략적으로 견적을 도출하는 단계에서 $\pm 50\%$ 범위까지 타당한 수준으로 평가하므로 6/10 법칙의 유용성을 확인할 수 있었다.

장치 제조사에 따라 장치별 처리용량의 한계에 따라 장치의 단일 구성이 아닌 2개 이상 배치해야 하므로, 장치구성에 따른 경제성 검토가 필요하다. 용량 증가율보다 비용 증가율이 낮다는 점은 6/10 법칙의 개념과 일치한다. 다만 유틸리티 비용에 있어 생산용량에 비례하여 커진다는 점에서 6/10 법칙의 사용은 제한적이어야 한다.

감 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 플랜트 연구사업을 통해 수행한 연구 과제이며(과제번호: 21IFIP-C146546-04), 또한 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구임(RS-2021-NR059190).

References

1. Kim, H., Monthly Energy Statistics, Korea Energy Economics Institute, Ulsan(2025).
2. International Energy Agency, World Energy Outlook 2024, International Energy Agency, Paris(2024).
3. <https://www.oilsandsmagazine.com/news/2023/9/7/a-brief-history-of-the-alberta-oil-sands>.
4. Min, B., Kannan, K. and Srinivasan, S., "Quick Screening of Pareto-Optimal Operating Conditions for Expanding Solvent-Steam Assisted Gravity Drainage Using Hybrid Multi-Objective Optimization Approach," *Energies*, **10**(7), 966(2017).
5. Nguyen-Le, V., Kim, N. and Shin, H., "Optimization of the Operating Strategy for the ES-SAGD Process in different Oil sands Reservoir Quality," *GeoConvention*, Calgary(2024).
6. <https://www.oilsandsmagazine.com/technical/properties>.
7. Liu, Y., Qiu, Z., Zhao, C., Nie, Z., Zhong, H., Zhao, X., Liu, S. and

Xing, X., "Characterization of Bitumen and a Novel Multiple Synergistic Method for Reducing Bitumen Viscosity with Nanoparticles and Surfactants," *The Royal Society of Chemistry*, **10**, 10471-10481(2020).

8. Lee, H., Hwang, I. and Jeong, M., "A Study on the Process Modeling and Economy Assessment of Central Processing Facility for ES-SAGD (Expanding Solvent-Steam Assisted Gravity Drainage) of Oilsand Plant," *The Society of Convergence Knowledge Transactions*, **10**(1), 13-21(2022).
9. <https://open.alberta.ca/publications/eia-cold-lake-expansion-project>.
10. Perry, R. H. and Green, D. W., "Perry's Chemical Engineers' Handbook" 9th ed. McGraw-Hill(2018).
11. McCormack, M. E., Design of Steam-Hexane Injection Wells For Gravity Drainage Systems, Journal of Canadian Petroleum Technology, Texas(2009).
12. KrupaKannan, B. E., Predicting and Optimizing the Performance of the Expanding Solvent Steam Assisted Gravity Drainage (ES-SAGD) Process Using an Improved Semi-Analytical Proxy Model, The University of Texas at Austin, Texas(2014).
13. 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).
14. Ardali, M., Mamora, D. D. and Barrufet, M., "A Comparative Simulation Study of Addition of Solvents to Steam in SAGD Process," Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary(2010).
15. Jeong, M., Central Processing Facility for SAGD Oil Sand, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Seoul(2017).

Authors

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

Hongcheol Lee: Research Fellow, 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