

섹터커플링을 고려한 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 공정해석 및 경제성 평가 연구

조민철 · 나다을 · 장준호 · 노정훈[†]

고등기술연구원 기계융합시스템센터

Process Simulation and Techno-Economic Analysis of a Heat Pump-Integrated Alkaline Water Electrolysis System Considering Sector Coupling

MIN-CHEOL CHO, DAYUL NA, JUN-HO JANG, JUNG-HUN NOH[†]

Mechanical Convergence System Center, Institute for Advanced Engineering, 1175-28 Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin 17180, Korea

[†]Corresponding author :
junhunnoh@iae.re.kr

Received 22 July, 2026
Revised 13 August, 2026
Accepted 14 August, 2026

Abstract >> Conventional alkaline water electrolysis systems discharge most of their waste heat, reducing overall energy utilization. This study proposes a heat pump-integrated alkaline water electrolysis system to recover and utilize waste heat. A MATLAB/Simulink model was developed to evaluate energy and economic performance under five operating scenarios. As heat pump utilization increased, the overall energy efficiency improved by 22.3%p, effective heat supply ratio to waste heat reached 127.9%, and the exergy efficiency increased from 61.0% to 74.0%. The by-product-based LCOH (Levelized Cost of Hydrogen) decreased from 9,470 to 8,548 KRW/kg, while the payback period decreased from 11.5 to 9.9 years. These results demonstrate that the proposed system can improve both energy efficiency and economic evaluation.

Key words : Alkaline Water Electrolysis(알카라인 수전해), Heat Pump(히트펌프), Sector Coupling(섹터커플링), Process Analysis(공정해석), Economic Evaluation(경제성 평가)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 기후변화 대응과 탄소중립 목표 달성을 위한 에너지 전환이 가속화되면서 화석연료 기반의 에너지 시스템을 대체할 수 있는 친환경 에너지 기술에 대한 관심이 증가하고 있다¹⁾. 특히 재

생에너지 발전 비중이 확대됨에 따라 출력 변동성과 간헐성 문제가 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위한 에너지 저장 및 활용 기술의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 이러한 관점에서 수소는 재생에너지 전력을 화학에너지 형태로 저장하고 다양한 산업 및 수송 분야에 활용할 수 있는 대표적인 에너지 캐리어로

주목받고 있으며, 전력·열·가스·수송 등 다양한 에너지 부문을 연계하는 섹터커플링의 핵심 매개체로 활용되고 있다²⁾. 또한 수소는 탄소를 배출하지 않는 청정연료로서 국가 에너지 안보 확보와 산업 경쟁력 향상을 위한 미래 핵심 에너지원으로 인식되고 있어 수소경제 활성화를 위한 정책과 기술개발이 적극적으로 추진되고 있다.

그린수소 생산 기술 중 물 전기분해는 재생에너지 전력을 직접 이용하여 탄소 배출 없이 수소를 생산할 수 있는 대표적인 기술로 알려져 있다³⁾. 알카라인 수전해는 높은 기술 성숙도와 비교적 낮은 설비 투자비용 등의 장점을 바탕으로 현재 가장 널리 상용화된 수전해 기술로 활용되고 있다. 또한 대용량 시스템 구축이 가능하고 장시간 안정적인 운전이 가능하여 대규모 그린수소 생산의 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 그러나 기존 알카라인 수전해 시스템은 전기에너지를 이용하여 수소를 생산하는 과정에서 상당량의 열에너지가 발생함에도 불구하고 대부분 냉각탑을 통해 외부로 방출되고 있으며 부산물로 생성되는 산소 또한 활용도가 제한적이라는 한계를 갖는다⁴⁾. 따라서 수전해 공정에서 발생하는 폐열을 효과적으로 활용할 수 있는 기술은 시스템 효율 향상뿐만 아니라 운영비 절감 및 경제성 확보 측면에서도 중요하다.

히트펌프는 저온의 폐열을 고온의 유효 열원으로 승온시키는 대표적인 에너지 활용 기술로서 산업공정 및 건물 냉난방 분야에서 활용이 확대되고 있다⁵⁾. 수전해 시스템과 히트펌프를 연계할 경우 기존에 방출되던 저온 폐열을 난방, 온수 공급 및 산업공정 열원으로 활용할 수 있으며 이를 통해 전체 시스템의 에너지 이용 효율을 향상시킬 수 있다. 또한 수소 생산과 동시에 열에너지를 공급함으로써 전력과 열을 통합적으로 활용하는 섹터커플링 시스템으로 적용이 가능하다. 이러한 시스템은 재생에너지의 활용도를 높이고 에너지 시스템의 유연성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 다양한 에너지 부문의 통합 운영을 통해 탄소중립 사회 구현에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

현재까지의 선행연구는 수전해 시스템의 성능 향상과 효율 개선에 주로 집중되어 왔으며, 최근에는 수전해 공정에서 발생하는 폐열을 회수하여 히트펌프와 연계하는 연구도 수행되고 있다. 그러나 기존 연구는 주로 폐열 회수 효과 또는 지역난방 적용 가능성 평가에 초점을 두고 있으며 알카라인 수전해 시스템의 냉각을 위해 히트펌프와 칠러를 병렬로 구성하고 두 설비의 적용 비율을 변화시키면서 냉각 및 열회수 특성을 정량적으로 분석한 연구는 제한적이다. 또한 히트펌프 적용에 따른 에너지 성능뿐만 아니라 엑서지 효율과 경제성을 연계하여 종합적으로 평가한 연구 역시 충분하지 않다. 따라서 본 연구에서는 히트펌프와 칠러가 병렬로 구성된 알카라인 수전해 시스템의 공정해석 모델을 구축하고 히트펌프와 칠러의 냉각수 유량 분배비를 단계적으로 변화시킨 운전 시나리오를 설정하여 각 조건에서의 에너지 효율, 폐열 대비 유효 열공급비 및 엑서지 효율을 정량적으로 비교하였다. 특히 단일 히트펌프 적용에 따른 효과만을 평가하는 기존 연구와 달리 칠러와 히트펌프의 병렬운전 조건에서 적용 비율 변화가 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 아울러 히트펌프 적용에 따른 수소 생산단가, 순현재가치, 내부수익률, 투자비 회수기간을 함께 평가함으로써 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 기술적·경제적 타당성을 종합적으로 검토하였다.

Fig. 1은 섹터커플링의 개념도를 나타낸다. 섹터커플링은 전력, 열, 수소 및 연료 등 서로 다른 에너지 부문을 연계하여 에너지 이용 효율을 향상시키는 에너지

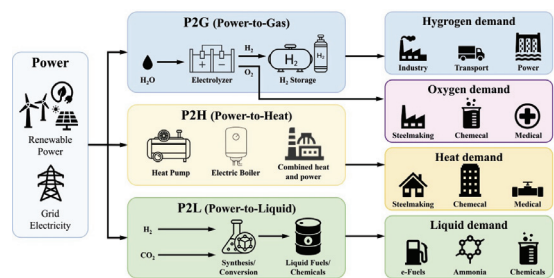


Fig. 1. Concept of sector coupling based on power-to-x technologies

지 통합 개념이다. P2G (Power-to-Gas), P2H (Power-to-Heat), P2L (Power-to-Liquid) 기술을 통해 전력을 수소, 열 및 액체연료 등의 에너지 매체로 변환하여 산업, 수송, 건물 및 발전 부문에서 활용함으로써 부문 간 에너지 연계를 강화하고 재생에너지 활용도를 높일 수 있다. 다만 본 연구는 전력 및 열수요의 시간 변동을 고려한 통합 운영 최적화는 고려하지 않고 수전해 폐열의 활용을 통해 전력-수소-열 연계의 적용 가능성과 기대 효과를 검토한 기초 연구로서 의의를 갖는다.

2. 수전해 시스템 공정해석 및 경제성 평가

2.1 알카라인 수전해 시스템 기본 원리

알카라인 수전해는 알칼리성 전해질 내에서 직류 전력을 공급하여 물을 수소와 산소로 분해하는 대표적인 수소 생산기술이다⁶⁾. 알카라인 수전해 시스템은 높은 기술 성숙도와 비교적 낮은 설비 투자비용, 대용량 시스템 구축의 용이성으로 인해 현재 상용 그린수소 생산 시스템에 가장 널리 적용되고 있다. 수전해 공정에서는 전기에너지의 일부가 열에너지로

전환되어 폐열로 방출된다. 따라서 이러한 폐열을 효과적으로 활용하는 것은 시스템 효율 향상을 위한 중요한 과제로 인식되고 있다. Fig. 2에 나타난 일반적인 알카라인 수전해 시스템은 수전해 스택, 전력공급 장치, 순환펌프, 기액분리기, 열교환기 등으로 구성되며 스택 내부에서 생성된 수소와 산소는 각각 분리 및 정제 과정을 거쳐 최종 생산물로 공급 된다⁷⁾.

그러나 수전해 반응 과정에서 발생하는 열과 시스템 내부 손실로 인해 스택의 운전온도가 상승하므로 안정적인 운전을 위해 냉각시스템을 이용한 열 제거가 필수적이다. 기존 알카라인 수전해 시스템에서는 이러한 폐열이 열교환기 및 칠러를 통해 외부로 방출되어 활용되지 못하는 경우가 대부분이다⁸⁾. 이로 인해 시스템 전체의 에너지 이용 효율이 저하되고 추가적인 냉각 전력이 요구되는 한계가 존재한다.

본 연구에서는 기존 냉각계통에 히트펌프를 병렬로 연계하여 수전해 공정에서 발생하는 폐열을 회수하고 이를 유효 열원으로 활용할 수 있는 시스템을 제안하였다. 제안 시스템에서는 운전 조건에 따라 폐열의 일부는 기존 칠러를 통해 제거하고 나머지는 히트펌프에 공급하여 승온된 열에너지를 건물 난방 또는 산업공정의 열원으로 공급할 수 있도록 구성하였다. 또한 칠러와 히트펌프의 사용 비율을 변화시키면서 시스템의 에너지 효율 및 경제성을 비교 분석하여 히트펌프 연계 시스템의 적용 가능성을 검토하였다.

2.2 공정해석 모델 및 성능평가 방법

2.2.1 공정해석 모델

본 연구에서는 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 열적 거동과 에너지 소비 특성을 분석하기 위하여 MATLAB/Simulink를 이용하여 공정해석 모델을 구축하였다. 모델은 알카라인 수전해 시스템과 열관리 시스템을 통합하여 해석할 수 있도록 구성하였으며 각 구성요소 간의 질량 및 에너지 전달 과정을 모사하도록 구현하였다. Fig. 3은 Simulink를 이용하여 구축한 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 공정해석 모델을 나타낸다. 시스템은 알카

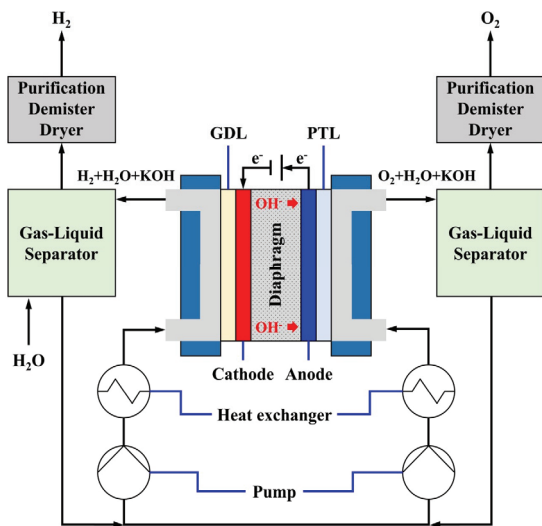


Fig. 2. Schematic diagram of an alkaline water electrolysis stack

라인 수전해부와 열관리부로 구성된다. 수전해부는 Electrolyzer Stack, 양극 및 음극 전해액 순환계통, 기액분리기 및 탈이온수 공급 시스템으로 구성하였으며 열관리부는 양극 및 음극 열교환기, 히트펌프, 직접식 칠러 및 냉각수 순환계통으로 구성하였다.

스택에서 발생하는 반응열은 전해액 순환계통을 통해 회수되어 양극 및 음극 열교환기에서 냉각수와 열교환이 이루어지도록 모델링하였다. 회수된 폐열은 히트펌프의 증발기 열원으로 활용하여 열회수를 수행하였으며 직접식 칠러를 병행 적용하여 각 운전 방식에 따른 시스템의 냉각성과 에너지 소비 특성을 비교할 수 있도록 하였다. 냉각수 유량은 히트펌프와 칠러 사이에서 제어되어 스택의 목표 운전온도를 유지하도록 구성하였다.

공정모델은 질량보존방정식과 에너지보존방정식을 기반으로 각 구성요소의 유량, 압력 및 온도 변화를 계산하도록 구현하였다. 또한 Simulink의 블록 기반 모델링 기법을 적용하여 각 장치를 모듈화함으로써 시스템의 특성을 해석하고 운전조건 변화에 따른 구성요소 간 상호작용을 효과적으로 분석할 수 있도록 하였다.

2.2.2 스택 전기화학 모델 구축

본 연구에서는 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 공정해석을 위해 스택의 전기화학 모델과 열에너지 모델을 구축하였다. 전기화학 모델은 운전 조건에 따른 셀 전압과 소비전력을 계산하기 위해 적용하였으며, 열에너지 모델은 스택 내부에서 발생하는 열과 외부로 방출되는 열손실을 계산하여 열평형을 해석하고, 이를 통해 스택의 에너지 전달 특성을 반영하였다. 스택의 전기화학 모델은 가역전압, 활성화 과전압 및 오믹 과전압의 합으로 셀 전압을 계산하는 방식으로 구성하였으며, 셀 전압은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다⁹⁾.

$$V_{cell} = V_{nst} + V_{act} + V_{ohm} \quad (1)$$

식 (1)에서 가역전압(V_{nst})은 전기화학반응이 열역학적으로 평형상태에서 진행될 때 필요한 최소 전압을 의미하며, 반응온도와 운전압력에 따라 변화한다. 본 연구에서는 Nernst 식을 이용하여 가역전압을 계산하였으며 그 관계식은 식 (2)와 같다¹⁰⁾.

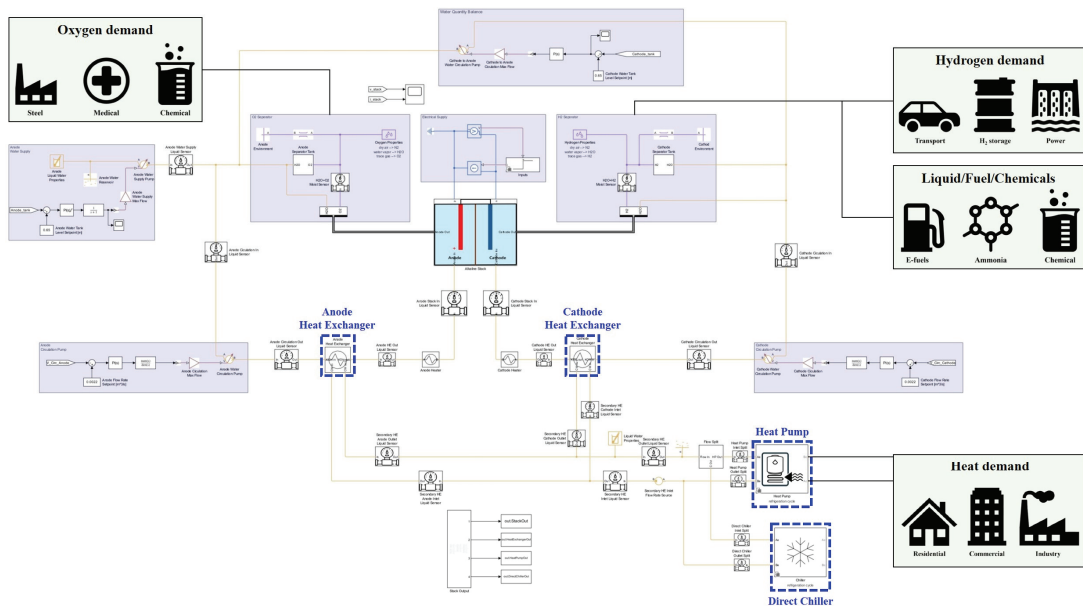


Fig. 3. Process flow diagram of the heat pump-integrated alkaline water electrolysis system with sector coupling

$$V_{Nst} = V_0 + \left(\frac{RT}{2F} \log \left(\frac{(P - P_{H_2O})^{1.5} P_{H_2O}^*}{P_{H_2O}} \right) \right) \quad (2)$$

여기서 기준전압 V_0 는 온도의 함수로 정의되며 다음 식 (3)을 적용하였다.

$$V_0 = 1.50324 - 9.956 \times 10^{-4} T + 2.5 \times 10^{-7} T^2 \quad (3)$$

실제 스택에서는 전극 반응의 활성화 에너지와 내부 저항으로 인해 추가적인 전압 손실이 발생한다. 활성화 과전압(V_{act})은 전극에서 수소 발생 반응과 산소 발생 반응을 촉진하기 위해 필요한 추가 전압으로, 전류밀도와 교환전류밀도의 함수로 표현된다. 또한 오믹 과전압(V_{ohm})은 전해질, 분리막 및 전극의 전기저항에 의해 발생하는 전압 강하를 의미하며, 각각 식 (4), 식 (5)와 같이 계산하였다¹¹⁾.

$$V_{Act} = \left(\frac{RT}{\alpha F} \right) \log \left(\frac{i}{i_0} \right) \quad (4)$$

$$V_{ohm} = i R_{ohm} \quad (5)$$

여기서 P 는 전해조의 운전압력, P_{H_2O} 는 전극 근처의 수증기 분압, $P_{H_2O}^*$ 는 물의 포화증기압을 의미한다. 또한 i 는 전류밀도, i_0 는 교환전류밀도, α 는 전하전달계수, R_{ohm} 는 스택의 등가 내부저항을 나타낸다. 본 연구에서는 전류밀도와 내부저항을 온도의 함수로 모델링하여 운전조건 변화에 따른 전압 특성을 공정해석 모델에 반영하였다.

2.2.3 스택 열에너지 모델 구축

스택의 열에너지 모델은 입력된 전기에너지 중 전기화학반응에 사용되는 에너지를 제외한 나머지가 열에너지로 전환된다고 가정하여 구축하였다. 스택 내부에서 발생하는 열은 발열과 과전압에 의한 비가역 손실을 포함하며 발생한 열은 외부로의 열손실

및 냉각계통으로 전달되는 열을 고려하여 에너지 평형식을 구성하였다. 이에 따라 스택의 온도 변화는 식 (6)과 같은 열평형 방정식을 이용하여 계산하였다¹²⁾.

$$C_t \frac{dT}{dt} = \dot{Q}_{gen} - \dot{Q}_{loss} - \dot{Q}_{cool} \quad (6)$$

$\dot{Q}_{gen}$ 은 스택에서 발생하는 총발열량으로 입력 전력에서 수소 생성에 사용되는 전기화학적 에너지를 제외하여 계산하였다. $\dot{Q}_{loss}$ 는 스택과 외기 사이의 온도차에 의해 발생하는 자연대류 열손실이며 열저항을 이용하여 산정하였다. 또한 $\dot{Q}_{cool}$ 은 냉각시스템에 의해 제거되는 열량으로 정의하였으며 각 열량은 식 (7~9)와 같이 계산하였다¹³⁾.

$$\dot{Q}_{gen} = N_{cell} i_{cell} (V_{cell} - V_{tn}) \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{loss} = \frac{1}{R_t} (T_{stack} - T_{ambient}) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{cool} = constant \quad (9)$$

여기서 N_{cell} 은 셀의 개수, i_{cell} 은 전류밀도, V_{cell} 은 스택 운전전압, V_{tn} 은 열중성전압, R_t 는 스택과 외기 사이의 전체 열저항, T_{stack} 은 스택의 평균 온도, $T_{ambient}$ 는 외기 온도를 의미한다. 본 모델은 스택 내부의 에너지 수지를 기반으로 시간에 따른 온도 변화를 계산하였으며 계산된 스택 온도는 전기화학 모델의 온도 의존 파라미터와 연계하여 시스템의 성능을 예측하는 데 활용하였다.

2.2.4 공정모델 주요 구성 및 검증 결과

본 연구에서 구축한 공정모델은 알카라인 수전해 시스템과 열관리 시스템을 통합한 구조로 구성하였으며 주요 구성요소와 모델링 변수는 Table 1에 나타내었다. 양극과 음극에는 각각 독립적인 전해액 순

Table 1. Major components of the heat pump-integrated alkaline water electrolysis system

Component	Function	Major modeling variables
Electrolyzer Stack	Produces hydrogen and oxygen through water electrolysis	Current density, Cell voltage, Operating temperature
Circulation Pump	Circulates electrolyte through the system	Flow rate, Pump efficiency, Power consumption
Heat Exchanger	Transfer heat between process streams	Heat duty, Overall heat transfer coefficient
Gas-Liquid Separator	Separates generated gas from electrolyte	Separation efficiency, Pressure
Chiller	Removes excess waste heat from the electrolyzer	Cooling capacity, Outlet temperature, Power consumption
Heat Pump Evaporator	Recovers low-grade waste heat from the cooling loop	Heat recovery rate, Evaporation temperature
Heat Pump Compressor	Compresses refrigerant to increase temperature and pressure	Compressor power, Isentropic efficiency
Heat Pump Condenser	Supplies upgraded thermal energy to external heat demand	Heat output, Condensation temperature
Expansion Valve	Reduces refrigerant pressure before evaporation	Expansion pressure, Refrigerant state

환계통을 적용하였으며 순환펌프를 통해 전해액이 지속적으로 순환하도록 하였다. 순환되는 전해액은 스택 내부의 온도를 균일하게 유지하는 동시에 생성된 기체를 기액분리기로 이송하며 스택에서 발생한 열을 열관리 시스템으로 전달하는 열전달 매체의 역할도 수행한다. 양극의 O_2 - H_2O 기액분리기와 음극의 H_2 - H_2O 기액분리기에서는 생성된 산소와 수소를 전해액으로부터 분리하고 분리된 기체는 각각의 배출라인을 통해 이송되며 전해액은 순환계통으로 돌아온다.

스택에서 발생한 반응열은 양극 및 음극 순환라인에 설치된 열교환기를 통해 회수되며 회수된 저온 폐열은 히트펌프의 증발기 열원으로 공급된다. 히트펌프는 압축기, 응축기, 팽창밸브 및 증발기로 구성

되며 증발기에서 폐열을 흡수한 냉매는 압축기를 거치면서 온도와 압력이 상승한다. 이후 응축기에서 열을 방출하여 수요처에 유효 열에너지를 공급하고 팽창밸브를 통과한 냉매는 다시 증발기로 순환하는 사이클을 반복한다. 알카라인 수전해 시스템의 안정적인 운전을 위해 칠러를 냉각설비로 적용하였다. 칠러는 스택에서 발생하는 열을 제거하여 전해액의 목표 운전온도를 유지하고 스택의 과열을 방지하는 역할을 수행한다.

본 연구에서는 히트펌프와 칠러를 병렬로 연계한 열관리 시스템을 적용하여 두 설비로 공급되는 냉각수 유량 분배비에 따른 시스템 운전 특성을 분석하였다. 히트펌프는 폐열 회수와 열공급을 담당하고 칠러는 잔여 열제거를 담당하도록 구성하여 스택의 목표 운전온도를 유지하도록 하였다. 또한 히트펌프와 칠러의 냉각수 유량 분배 비율을 변화시키며 폐열 대비 유효 열공급비와 시스템의 주요 성능지표를 비교하여 수전해 시스템과 열에너지 시스템의 에너지 연계를 통한 섹터커플링 효과를 평가하였다.

아울러 구축된 공정해석 모델의 신뢰성을 검증하기 위해 정격 운전 조건에서 수전해 스택의 셀 전압 및 히트펌프 토출 온도 등의 주요 성능 변수를 공인 시험 성적서에 제시된 실험값과 비교하였다. 모델 검증에 적용한 주요 운전조건은 수전해 시스템의 운전 압력 5 bara (3.978 barg), 운전 온도 85°C 이하, 스택 전류밀도 0.5 A/cm²로 설정하였다. 해당 운전조건에서 수전해 스택의 셀 전압과 히트펌프 토출 온도를 실험값과 비교하여 모델의 예측 성능을 검증하였다. 수전해 스택의 셀 전압은 실험값 1.733 V, 해석값 1.721 V로 상대오차 0.69%를 나타냈으며, 히트펌프 토출 온도는 실험값 49.5°C, 해석값 49.9°C로 상대오차 0.81%를 나타냈다. 두 변수 모두 1% 이내의 오차를 보여 본 연구에서 구축한 MATLAB/Simulink 기반 공정해석 모델이 정격 운전조건에서 수전해 및 열관리 시스템의 주요 성능 특성을 양호하게 예측하는 것으로 확인하였다. 다만 본 검증은 제한된 성능 변수에 대해서만 수행되었으며 부분부하 운전이나 다양한 운전조건에 대한 검증은 포함하지 않았다.

2.2.5 공정해석 평가지표

히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 수소 생산율, 시스템 전체 에너지 효율, 폐열 대비 유효 열공급비 및 엑서지 효율을 주요 성능평가 지표로 선정하였다. 각 평가지표는 수소 생산 성능과 폐열 활용 효과뿐만 아니라 시스템의 에너지 및 열역학적 성능을 종합적으로 평가하기 위해 적용하였다.

(1) 수소 생산율(Hydrogen Production Rate, Q_{H_2})

수소 생산율은 수전해 시스템에서 단위시간당 생성되는 수소의 질량유량을 의미하며 패러데이 법칙을 이용하여 계산하였다. 수소 생산율은 인가전류, 셀 개수 및 패러데이 효율에 의해 결정되며 아래의 식 (10)으로 계산된다¹⁴⁾. 본 연구에서는 인가전류를 일정하게 가정하였으나 향후에는 신재생에너지 기반의 부하 변동에 따른 수소 생산율을 반영할 예정이다. 여기서 N_c 는 셀 개수, I_c 는 전류, F 는 패러데이 상수(= 96,485), η_f 는 패러데이 효율을 나타낸다.

$$Q_{H_2} = \eta_f \left(\frac{N_c I_c}{2F} \right) \quad (10)$$

(2) 시스템 전체 에너지 효율(Overall Energy Efficiency, η_{en})

시스템 전체 에너지 효율은 수소의 화학에너지와 히트펌프를 통해 수요처에 공급된 열에너지를 시스템의 총 소비전력으로 나눈 값으로 정의하였다¹⁵⁾. 이는 수소 생산뿐만 아니라 폐열 회수에 따른 유효 에너지 활용도를 동시에 고려할 수 있는 지표이며 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{en} = \frac{Q_{H_2} \times HHV_{H_2} + Q_{useful}}{W_{elec, total}} \times 100(\%) \quad (11)$$

여기서 HHV_{H_2} 는 수소의 고위발열량, Q_{useful} 는 히트펌프를 통해 수요처에 공급된 열량, $W_{elec, total}$ 은 시스템 전체 소비전력을 의미한다. 또한 수요처에 공급

된 열에너지에는 시스템 내부에서 발생한 폐열의 재활용 효과가 포함되어 있으므로 시스템 전체 에너지 효율의 증가는 추가적인 에너지 생성보다는 에너지 이용도 향상을 의미한다.

(3) 폐열 대비 유효 열공급비(Effective Heat Supply Ratio to Waste Heat, R_{EHS})

폐열 대비 유효 열공급비는 수전해 공정에서 발생한 전체 폐열 중 수요처에 공급된 유효 열량의 비율을 의미하며 히트펌프 연계 효과를 평가하기 위한 지표로 사용하였다¹⁶⁾. 다만 본 지표는 히트펌프 압축기 소비전력에 의해 추가된 열량을 포함하므로 엄밀한 의미의 폐열 회수율이 아닌 폐열 대비 유효 열공급 수준을 나타내는 지표이다.

$$R_{EHS} = \frac{Q_{useful}}{Q_{waste}} \times 100(\%) \quad (12)$$

여기서 Q_{waste} 는 수전해 시스템에서 발생한 총 폐열량을 의미한다.

(4) 엑서지 효율(Exergy Efficiency, η_{ex})

엑서지 효율은 시스템에 공급된 전기에너지 대비 수소와 수요처에 공급되는 열이 갖는 유효 에너지의 비율을 나타내는 지표로 정의하였다. 기존 에너지 효율이 에너지양만을 고려하는 반면 엑서지 효율은 에너지의 품질까지 고려할 수 있으므로 시스템의 열역학적 성능을 평가하는 데 활용된다. 본 연구에서는 수소 및 산소의 화학엑서지와 히트펌프를 통해 공급되는 열의 엑서지를 고려하여 다음과 같이 계산하였다¹⁷⁾.

$$\eta_{ex} = \frac{Q_{H_2} E_{H_2} + Q_{O_2} E_{O_2} + COP_{HP} W_{HP} (1 - \frac{T_0}{T_d})}{W_{elec, total}} \times 100(\%) \quad (13)$$

여기서 Q_{H_2} 와 Q_{O_2} 는 각각 수소 및 산소의 생산율(4.7012 kg/h 및 37.390 kg/h), E_{H_2} 와 E_{O_2} 는 각각 수소 및 산소의 화학엑서지(117,109 kJ/kg 및 124 kJ/kg)이다. COP_{HP} 는 히트펌프의 성적계수, W_{HP} 은 히트

펌프 압축기의 소비전력(kW), T_0 은 기준 환경온도 ($= 25^\circ\text{C}$), T_d 은 히트펌프 응축기에서 수요처로 공급 되는 열의 온도를 나타낸다. 각 항의 단위는 kW로 통일하여 엑서지 효율을 계산하였다.

2.3 경제성 평가 방법

2.3.1 경제성 평가 목적 및 범위

히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 경제적 타당성을 정량적으로 평가하기 위하여 경제성 평가를 수행하였다. 경제성 평가는 시스템 구축에 필요한 초기 투자비(Capital Expenditure, CAPEX)와 운영비(Operating Expenditure, OPEX), 수소 판매 수익과 부산물 활용에 따른 경제적 편익을 종합적으로 고려하였다. 특히 히트펌프를 통해 공급되는 열에너지와 수전해 과정에서 생산되는 산소의 경제적 가치를 함께 반영하여 기존 알카라인 수전해 시스템과의 경제성을 비교하였다.

경제성 분석의 범위는 알카라인 수전해 설비, 히트펌프 시스템 및 관련 부대설비를 포함한 전체 시스템으로 설정하였다. 또한 시스템 운영기간 동안 발생하는 전력비, 유지보수비 등 운영비용과 수소 판매 수익을 기반으로 경제성을 평가하였으며 히트펌프를 통해 회수된 열에너지의 활용 편익과 산소 부산물의 경제적 가치를 함께 고려하였다.

2.3.2 경제성 평가를 위한 입력 조건

경제성 평가에 적용한 주요 입력 조건은 Table 2에 나타내었다. 사업기간은 시스템의 일반적인 설비 수명을 고려하여 25년으로 설정하였으며 Lee 등²²⁾의 연구를 참고하여 할인율은 연 5%를 적용하였다. 시스템의 연간 운전시간은 4,000 h, 수전해 시스템의 정격용량은 250 kW로 설정하였다²³⁾. 또한 생산된 수소와 산소의 판매단가는 각각 10,310 원/kg과 115 원/kg으로 적용하여 부산물 판매에 따른 경제적 편익을 반영하였다. 전력단가는 산업용 전력요금을 기준으로 106 원/kWh, 공급용수 단가는 500 원/ton으로 설정하였다. 초기 투자비는 9.8억 원으로 설정하였으

Table 2. Input parameters for economic evaluation

Input parameters	Value	Unit
Project Lifetime	25	yr
Discount Rate	5	%
Annual Operating Hours	4,000	h/yr
Rated Power of Electrolyzer System	250	kW
Hydrogen Selling Price	10,310	KRW/kg
Oxygen Value	115	KRW/kg
Heat Value	126	KRW/kWh
Electricity Price	106	KRW/kWh
Water Supply Cost	500	KRW/ton
Initial Investment Cost of an Alkaline water electrolysis system	981,721,125	KRW
Initial Investment Cost of a Heat Pump	107,819,361	KRW
Annual Maintenance Cost of an Alkaline water electrolysis system	19,634,423	KRW/yr
Annual Maintenance Cost of a Heat Pump	1,211,250	KRW/yr

며, 연간 유지보수비는 1,963만 원으로 적용하였다. 히트펌프 초기 투자비와 연간 유지보수비용은 각각 약 1억 원, 121만 원으로 적용하였다²⁴⁻²⁶⁾. 회수열의 경제적 가치는 한국지역난방공사의 업무용 난방 단 일요금을 환산한 126 KRW/kWh로 설정하였다. 이는 수요처에서 회수열을 이용함으로써 절감되는 열비용을 의미한다. 경제성 평가에서는 공급가능 열량의 100%가 이용되는 것으로 가정하였으며 수요처까지의 장거리 배관과 별도 축열 설비는 시스템 경계에서 제외하였다. 따라서 본 연구의 경제성 분석 결과는 수전해 시스템 인근에 안정적인 열수요처가 존재하고 회수열 활용을 위한 열공급 인프라 구축 비용이 제한적인 조건을 가정한 결과이다. 실제 적용 시에는 열수요 특성, 회수열 이용률, 배관 거리 및 축열설비 구축 비용 등에 따라 경제성이 달라질 수 있으므로 본 연구의 결과는 히트펌프 연계형 알카라인

수전해 시스템의 잠재적 경제성을 평가하기 위한 기준 시나리오로 활용하였다. 초기 투자비는 사업 개시 시점인 0년 차에 일괄 반영하였고 운영비는 사업기간 동안 매년 동일하게 발생하는 것으로 가정하였다. 이상의 조건을 바탕으로 연간 현금흐름을 산정하였으며 이를 이용하여 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 경제성을 분석하였다.

2.3.3 경제성 평가지표

경제성 평가지표는 부산물 활용을 고려한 수소생산단가(Levelized Cost of Hydrogen, $LCOH_{net}$), 투자비 회수기간(Payback Period, PBP), 순현재가치(Net Present Value, NPV) 및 내부수익률(Internal Rate of Return, IRR)을 선정하였다. 각 평가지표는 초기 투자비와 운영비뿐만 아니라 시스템 운영을 통해 발생하는 수익을 종합적으로 반영할 수 있도록 구성하였다.

(1) 부산물 반영 수소생산단가($LCOH_{net}$)

부산물 활용을 고려한 수소생산단가는 시스템의 생애주기 동안 발생하는 총비용에서 산소 판매수익과 히트펌프를 통한 열판매 편익을 차감한 후 총 수소 생산량으로 나누어 산정하였다¹⁸⁾. 이를 통해 부산물 활용이 수소 생산단가 절감에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다.

$$LCOH_{net} = \frac{CAPEX + \sum_{n=1}^N \frac{OPEX_n - B_{O_2,n} - B_{heat,n}}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{M_{H_2,n}}{(1+i)^n}} \quad (14)$$

여기서 $CAPEX$ 는 초기 투자비, $OPEX_n$ 은 n 년차 운영비, $B_{O_2,n}$ 은 산소 판매수익, $B_{heat,n}$ 은 회수열의 판매 또는 활용에 따른 편익, $M_{H_2,n}$ 은 n 년차 수소 생산량, i 는 할인율을 의미한다.

(2) 투자비 회수기간(Payback Period, PBP)

투자비 회수기간은 초기 투자비를 연간 순수익으로 회수하는 데 소요되는 기간을 의미하며 경제성 확보 여부를 판단하기 위한 대표적인 지표이다¹⁹⁾. 본

연구에서는 누적현금흐름을 이용하여 투자비 회수시점을 산정하였으며 다음 식으로 계산하였다.

$$PBP = A + \frac{B}{C} \quad (15)$$

여기서 A 는 투자비 회수 직전까지의 경과연수, B 는 해당 시점의 미회수 투자금액, C 는 다음 연도의 순현금유입을 의미한다.

(3) 순현재가치(Net Present Value, NPV)

순현재가치는 사업기간 동안 발생하는 모든 현금흐름을 기준연도의 현재가치로 환산한 후 초기 투자비를 차감한 값으로 정의하였다^{20,21)}. 일반적으로 NPV 가 0보다 클 경우 경제성이 있는 것으로 판단하며 다음 식(16)으로 계산하였다.

$$NPV = -CAPEX + \sum_{n=1}^N \frac{B(n)}{(1+i)^n} \quad (16)$$

여기서 $B(n)$ 은 n 년차 순현금흐름, i 는 할인율, N 은 경제성 분석기간을 의미한다.

(4) 내부수익률(Internal Rate of Return, IRR)

내부수익률은 순현재가치를 0으로 만드는 할인율로 정의되며 투자사업의 수익성을 평가하는 대표적인 경제성 지표이다¹⁶⁾. 내부수익률이 목표 할인율보다 클 경우 경제성이 있는 것으로 판단하며 아래 식(17)을 이용하여 계산하였다.

$$0 = -CAPEX + \sum_{n=1}^N \frac{B(n)}{(1+IRR)^n} \quad (17)$$

여기서 $CAPEX$ 는 초기 투자비용, $B(n)$ 은 n 년차 순현금흐름, N 은 경제성 분석기간을 의미한다.

2.4 운전 시나리오 선정

본 연구에서는 히트펌프 연계형 알카라인 수전해

시스템의 운전 특성과 경제성을 비교하기 위하여 폐열 처리 방식에 따른 운전조건을 설정하였다. 제안 시스템은 수전해 공정에서 발생한 폐열을 기존 칠러를 통해 제거하거나 히트펌프를 이용하여 회수할 수 있도록 구성하였으며, 칠러와 히트펌프로 유입되는 냉각수 유량의 분배 비율을 변화시켜 시스템 성능을 평가하였다. 운전 시나리오는 Table 3에 나타난 것과 같이 칠러와 히트펌프의 유량 분배 비율을 달리하여 총 5개의 Case를 구성하였다. Case 1은 기존 알카라인 수전해 시스템과 동일하게 냉각수 전량이 칠러로 공급되는 기준 조건이며, Case 5는 냉각수 전량이 히트펌프로 공급되어 유효 열공급량이 최대가 되는 조건이다. 또한 Case 2~4는 총 냉각수 유량을 칠러와 히트펌프에 각각 60:40, 50:50, 40:60의 비율로 분배하여 히트펌프 적용 수준에 따른 시스템 성능 변화를 분석하기 위한 조건으로 설정하였다. 각 운전 시나리오에 대하여 공정해석 평가지표와 경제성 평가지표를 분석하여 히트펌프 적용 비율에 따른 시스템의 성능 변화를 확인하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 공정해석 관련 지표 분석

3.1.1 수소 생산율

알카라인 수전해 시스템의 수소 생산율은 패러데이

Table 3. Operation scenarios for the heat pump-integrated alkaline water electrolysis system

Case	Chiller utilization	Heat pump utilization	Description
Case 1	100%	0%	Conventional system
Case 2	60%	40%	Partial waste heat recovery
Case 3	50%	50%	Equal load sharing
Case 4	40%	60%	Heat pump dominant operation
Case 5	0%	100%	Full waste heat recovery

이 법칙에 따라 스택에 인가되는 전류에 비례하여 결정된다. 본 연구에서는 모든 Case에 동일한 스택 운전 조건을 적용하였으므로 시간당 수소 생산율은 모든 조건에서 동일하게 산정되었다. 수소 생산을 계산에는 스택 셀 수 100개, 전류 1,250 A 및 패러데이 효율 1.0을 적용하였다. 시간당 수소 생산율은 4.7012 kg/h로 산정되었으며 이는 패러데이 법칙에 따른 이론 생산량과 일치하였다. 본 연구에서는 부반응에 따른 전류 손실과 가스 크로스오버에 의한 효율 저하를 고려하지 않은 이상적인 운전 조건을 가정하였다. 따라서 실제 수소 생산량은 본 연구 결과보다 감소할 수 있으며 경제성 지표 또한 제시한 결과보다 다소 보수적으로 평가될 수 있다. 또한, 모든 Case에서 수소 생산율이 동일하게 유지되므로 시스템 성능의 차이는 수소 생산량이 아닌 히트펌프 연계에 따른 회수열 공급량, 시스템 소비전력 및 에너지 효율의 변화에 의해 결정된다. 따라서 이후 절에서는 동일한 수소 생산율 조건에서 각 Case의 에너지 성능과 경제성을 비교하였다.

3.1.2 시스템 전체 에너지 효율

시스템 전체 에너지 효율은 수전해 시스템에서 생산된 수소의 화학적 에너지와 히트펌프를 통해 회수된 열에너지를 모두 유효 에너지로 고려하여 산정하였다. 이때 수소의 고위발열량은 39.4 kWh/kg을 적용하였으며 시스템 전체 소비전력은 수전해 스택, 칠러, 히트펌프 및 보조기기의 소비전력을 합산하여 산정하였다.

Fig. 4는 히트펌프 적용 비율에 따른 시스템 전체 에너지 효율을 나타낸다. 계산 결과, 히트펌프의 적용 비율이 증가할수록 에너지 효율도 함께 증가하는 경향을 보였다. 이는 히트펌프가 스택에서 발생한 폐열을 회수하여 유효한 열에너지로 활용함으로써 소비전력 증가보다 회수열 증가 효과가 크게 나타나 시스템의 총 에너지 생산량이 향상되었기 때문이다. 특히 Case 5의 에너지 효율은 Case 1 대비 약 22.3%p 향상된 것으로 나타났다. 이는 수전해 시스템에서 발생하는 저온 폐열이 단순 손실열이 아니라 활용 가

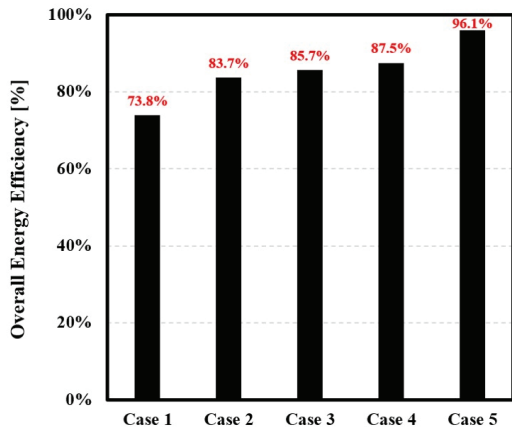


Fig. 4. Overall energy efficiency of the heat pump-integrated alkaline water electrolysis system

능한 에너지 자원임을 보여주는 결과로 폐열 회수 시스템의 중요성을 시사한다. Moradpoor 등²⁷⁾은 수전해 시스템에서 발생하는 폐열을 히트펌프를 통해 회수함으로써 시스템 효율을 향상시키고 냉각설비의 요구 용량을 감소시킬 수 있음을 제시하였다. 본 연구에서도 유사한 경향이 확인되었으며 수전해 시스템의 설계 시 수소 생산 효율뿐만 아니라 폐열 회수 설비와의 통합 운영 및 에너지 활용 방안을 함께 고려할 필요가 있음을 확인하였다.

3.1.3 폐열 대비 유효 열공급비

Fig. 5는 히트펌프 적용 비율에 따른 폐열 대비 유효 열공급비의 변화를 나타낸다. 히트펌프 적용 비율이 증가할수록 폐열 대비 유효 열공급비는 지속적으로 증가하는 경향을 보였으며 히트펌프를 적용하지 않은 Case 1에서는 폐열이 모두 외부로 방출되어 대비 유효 열공급비가 0%로 나타난 반면, 히트펌프만을 적용한 Case 5에서는 127.9%로 가장 높은 값을 나타냈다. 이는 히트펌프가 수전해 시스템에서 발생한 저온 폐열을 회수하여 수요처에 공급 가능한 열에너지로 전환함에 따라 폐열의 활용 수준이 향상되었기 때문이다. 본 연구에서 정의한 폐열 대비 유효 열공급비는 히트펌프 응축기에서 수요처로 공급되는 총열량을 기준으로 산정하였다. 따라서 공급 열량에

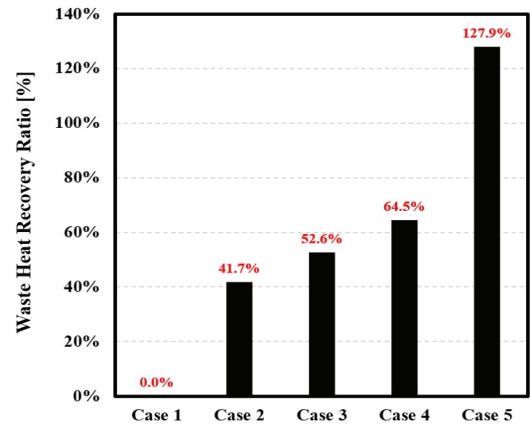


Fig. 5. Effective heat supply to waste heat ratio for different cases

는 증발기에서 회수된 폐열뿐만 아니라 압축기에 투입된 전력이 열에너지로 전환된 부분도 포함되므로 100%를 초과하는 값이 나타날 수 있다. 아울러 폐열 대비 유효 열공급비의 증가는 시스템 전체 에너지 효율 향상과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 이는 수전해 시스템의 성능 평가 및 설계 시 수소 생산 효율뿐만 아니라 폐열 회수 및 활용 전략을 함께 고려할 필요가 있음을 의미한다. 특히 히트펌프 연계는 단순한 냉각설비의 역할을 넘어 수전해 공정의 저온 폐열을 유용한 열에너지로 전환하는 수단으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.4 엑서지 효율

Fig. 6은 히트펌프 적용 비율에 따른 시스템의 엑서지 효율 변화를 나타낸다. 엑서지 효율은 에너지의 양뿐만 아니라 품질까지 고려하는 열역학적 성능 지표로 시스템에 투입된 에너지가 실제로 유용한 형태의 에너지로 전환되는 정도를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 수소 및 산소의 화학엑서지와 히트펌프를 통해 공급되는 열의 엑서지를 고려하여 엑서지 효율을 산정하였다. 이때 수소의 표준 화학엑서지는 117,109 kJ/kg을 적용하였으며 산소의 표준 화학엑서지는 124 kJ/kg, 공급열의 엑서지는 히트펌프 응축기에서 수요처로 공급되는 온도와 기준 환경온도를 이용하여 계산하였다. 각 Case별 히트펌프의 성적계수, 압

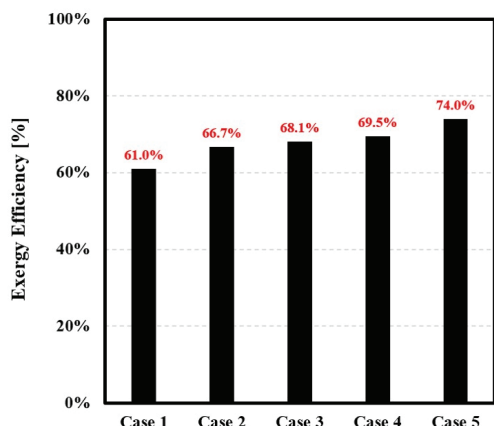


Fig. 6. Exergy efficiency of the proposed system under different cases

축기 소비전력 및 수요처 공급 온도는 Table 4에 제시하였다. 히트펌프 사용 비율이 증가할수록 엑서지 효율은 전반적으로 향상되는 경향을 보였다. 칠러만을 사용하는 Case 1에서 61.0%를 나타낸 반면, 히트펌프만을 적용한 Case 5에서는 74.0%까지 증가하여 약 13.0%p의 성능 향상이 확인되었다. 이는 수전해 과정에서 발생하는 저온 폐열을 단순히 제거하기보다 히트펌프를 통해 유용한 열에너지로 활용함으로써 시스템의 비가역 손실을 감소시키고 에너지 활용도를 높인 결과이다.

특히 Table 4에서 확인할 수 있듯이 히트펌프 적용 비율이 증가함에 따라 압축기 소비전력은 증가하였으나, COP와 공급 온도는 비교적 일정한 범위를 유지하였다. 이러한 결과는 추가적인 전력 투입보다 폐열 회수를 통해 얻는 유효 에너지의 증가 효과가 더 크게 작용하였음을 의미한다. 따라서 히트펌프는 단순한 열 회수 장치가 아니라 시스템 전체의 열역학적 성능을 향상시키는 핵심 설비로 기능한 것으로 해석할 수 있다.

기존 수전해 시스템 관련 연구에서는 주로 전력 소비량 감소나 시스템 효율 향상에 초점을 맞추어 성능을 평가하는 경우가 많다²⁸⁾. 그러나 시스템 효율 만으로는 회수된 열에너지의 활용 가치와 품질을 충분히 반영하기 어렵다. 엑서지 효율 분석을 통해 히트펌프에 의한 폐열 회수가 단순한 에너지 절감 효

Table 4. Operating conditions and performance parameters of the heat pump for each case

Case	COP_{HP} [-]	W_{HP} [kW]	T_d [°C]
Case 1	0	0	0
Case 2	4.99	5.40	62.7
Case 3	4.54	7.26	66.4
Case 4	4.20	9.28	69.9
Case 5	4.36	14.79	64.3

과를 넘어 시스템의 엑서지 손실을 감소시키고 유효 에너지 생산 능력을 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 히트펌프 연계형 수전해 시스템의 성능 평가 시에는 에너지 효율과 함께 엑서지 효율을 주요 평가 지표로 고려할 필요가 있다.

또한 Fig. 5의 폐열 대비 유효 열공급비는 히트펌프 적용에 따라 큰 폭으로 증가한 반면, 엑서지 효율의 증가 폭은 상대적으로 완만하게 나타났다. 이는 폐열 대비 유효 열공급비는 회수된 열량 자체를 기준으로 평가하지만 엑서지 효율은 열의 온도 수준과 에너지 품질까지 반영하기 때문이다. 따라서 폐열 회수량을 단순히 증가시키는 것보다 회수 열의 온도를 높이고 활용처와의 열 수요 매칭을 최적화하는 것이 엑서지 관점에서 더욱 중요함을 시사한다. 향후 대규모 수전해 플랜트 설계 시 히트펌프 적용 비율과 공급 온도 조건을 최적화하여 에너지 효율과 엑서지 효율을 동시에 향상시키는 설계 전략이 필요하다.

3.2 경제성 평가 관련 지표 분석

3.2.1 부산물 반영 LCOH

수소생산단가는 수소 생산 시스템의 경제성을 평가하기 위해 가장 널리 사용되는 지표 중 하나로 산정된 값이 낮을수록 수소 생산 시스템의 경제성이 우수함을 의미한다. $LCOH_{net}$ 는 기존 LCOH 산정 시 고려되는 비용에서 산소 판매 수익과 회수된 폐열의 활용에 따른 열 판매 수익을 반영한 지표로 단순한 수소 생산 비용뿐만 아니라 시스템 운영 과정에서

발생하는 부가적인 경제적 가치를 반영할 수 있다. Fig. 7은 히트펌프 사용 비율 변화에 따른 LCOH 및 LCOH_{net}의 변화를 비교하여 나타낸 것이다. 기존 LCOH는 히트펌프 적용 비율 증가에 따라 증가하는 경향을 보였으며 이는 히트펌프 설치 및 운전에 따른 추가적인 전력 소비와 설비 투자 비용이 반영되기 때문이다.

반면 부산물 판매 수익을 고려한 LCOH는 히트펌프 적용 비율 증가와 함께 지속적으로 감소하였다. 이는 히트펌프 적용으로 인해 수전해 과정에서 발생하는 저온 폐열의 회수량이 증가하고 이를 외부 열 수요처에 공급함으로써 추가적인 수익을 확보할 수 있기 때문이다. 특히 히트펌프 적용 비율이 가장 높은 Case 5에서는 폐열 활용 효과가 극대화되어 8,548 KRW/kg으로 가장 낮게 나타났으며, LCOH인 11,194 KRW/kg 대비 약 23.6% 수준의 경제성 개선 효과를 확인하였다. 기존 수전해 경제성 평가 연구에서는 주로 전력 비용 절감과 설비 효율 향상에 따른 LCOH 감소 효과를 중심으로 분석이 수행되었으며 수전해 과정에서 발생하는 부산물의 활용 가치는 별도로 고려하지 않았다²⁹⁾. 그러나 LCOH_{net} 결과를 통해 수전해 시스템을 단순한 수소 생산 설비가 아닌 추가적인 경제적 가치를 확보할 수 있음을 확인하였다. 따라서 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템 설계 시에는 열수요처의 특성 및 부산물 활용 가능성을

종합적으로 고려하는 것이 중요하다. 특히 열 수요가 존재하는 산업단지 또는 지역 에너지 시스템과 연계할 경우 히트펌프 적용에 따른 경제성 향상 효과가 더욱 증대될 것으로 판단되며 부산물 반영 LCOH은 이러한 통합 에너지 시스템의 사업성을 평가하기 위한 적절한 경제성 지표로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

3.2.2 투자비 회수기간

투자비 회수기간은 초기 투자비를 시스템 운영으로부터 발생하는 순현금흐름을 통해 회수하는 데 소요되는 기간을 의미하며 경제성 평가에서 투자 위험도와 사업성을 판단하기 위해 널리 활용되는 지표이다. 일반적으로 회수기간이 짧을수록 투자 안정성이 높고 경제성이 우수한 것으로 평가된다.

Table 5에 제시된 연간 수소 생산량, 수소 판매수익, 산소 판매수익, 회수열 활용 편익, 유지보수비 등의 주요 현금흐름 자료를 활용하여 투자비 회수기간 및 순현재가치를 산정하였다. Fig. 8의 우측 y축은 히트펌프 사용 비율에 따른 투자비 회수기간 변화를 나타낸다. 분석 결과, 히트펌프 사용 비율이 증가할수록 투자비 회수기간은 점진적으로 감소하는 경향을 보였다. 칠러만을 사용하는 Case 1의 투자비 회수기간은 약 11.5년으로 산정되었으며, 히트펌프만을 사용하는 Case 5에서는 회수기간이 9.9년으로 가장 짧게 나타났다. 이는 약 1.6년 단축된 결과로 히트펌프 연계 운전이 초기 투자비 회수에 유리하게 작용함을 의미하며 히트펌프가 수전해 시스템에서 발생하는 저온 폐열의 활용도를 향상시켜 추가적인 열 판매 수익을 창출하기 때문이다. 비록 히트펌프 도입에 따른 초기 투자비 증가가 발생하지만 운전 기간 동안 확보되는 부가 수익이 이를 상회함에 따라 투자 회수 속도가 향상되는 것으로 분석되었다.

설계적 측면에서 히트펌프 연계는 단순한 에너지 효율 향상 기술이 아니라 투자 위험을 완화하고 사업성을 개선하는 경제성 확보 수단으로 활용될 수 있다. 따라서 향후 알카라인 수전해 시스템 설계 시에는 전력 소비량 저감뿐만 아니라 폐열 회수 설비

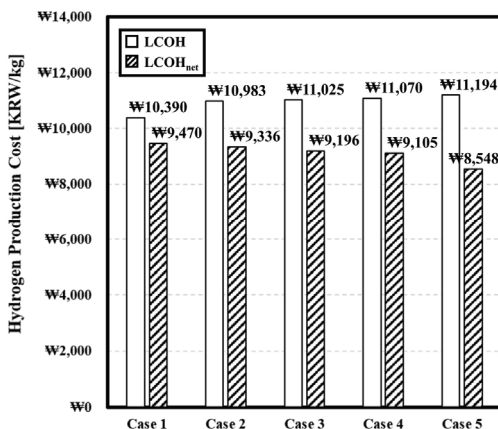


Fig. 7. Comparison of LCOH and LCOH_{net} for different cases

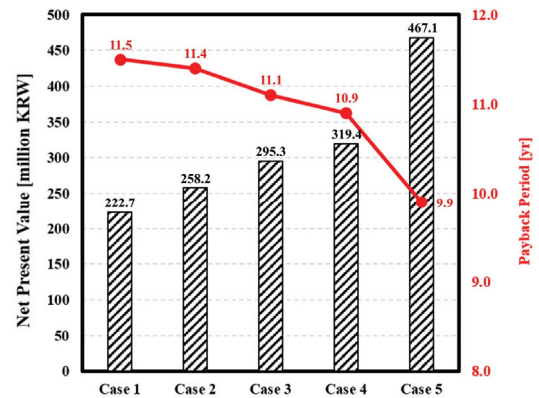
Table 5. Annual cash flow and economic evaluation results by case

Parameter	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Annual hydrogen production [kg/yr]	18,805				
Annual oxygen production [kg/yr]	150,438				
Hydrogen sales revenue [million KRW/yr]	193.9				
Oxygen utilization credit [million KRW/yr]	17.3				
Recovered heat utilization credit [million KRW/yr]	-	13.7	17.1	19.7	32.5
Total revenue [million KRW/yr]	211.2	224.8	228.3	230.8	243.7
Total OPEX [million KRW/yr]	125.7	129.2	130.0	130.9	133.2
Annual net cash flow [million KRW/yr]	85.5	95.6	98.3	100.0	110.5

의 최적 용량 선정과 열수요처 확보 전략을 함께 고려할 필요가 있다.

3.2.3 순현재가치

순현재가치는 사업 기간 동안 발생하는 미래 현금 흐름을 현재가치로 환산한 후 초기 투자비를 차감하여 산정하는 대표적인 경제성 평가 지표이다. 일반적

**Fig. 8.** Economic performance indicators: net present value and payback period for different cases

으로 NPV가 0보다 크면 사업성이 있는 것으로 평가되며 값이 클수록 투자에 대한 경제적 타당성이 높은 것으로 판단한다.

Fig. 8의 좌측 y축은 각 운전 조건에 대한 NPV 산정 결과이며, 모든 Case의 NPV는 양수로 나타났다. 히트펌프 운전부하가 증가함에 따라 회수열 활용편익이 확대되어 NPV는 지속적으로 증가하였으며, Case 5에서 467.1백만 원으로 가장 높게 나타났다. 이는 히트펌프 도입에 따른 추가 투자비와 소비전력 증가에도 불구하고 회수열 활용에 따른 경제적 편익이 이를 상쇄하기 때문으로 분석된다. 기존 알카라인 수전해 시스템은 대부분 수소 판매 수익에 의존하기 때문에 전력 가격 변동에 따른 경제성 민감도가 높은 한계가 있다. 반면 본 연구에서 제안한 히트펌프 연계형 시스템은 수소 외에도 열과 산소를 활용한 다중 수익구조를 형성함으로써 수익원을 다변화할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 최근 섹터 커플링 기반 에너지 시스템 연구에서 강조되고 있는 에너지 다중 활용 개념과도 일치하는 결과이다. 특히 NPV가 크게 증가한 결과는 단순한 에너지 효율 향상 이상의 의미를 갖는다. 이는 수전해 시스템을 수소 생산 설비에 국한하지 않고 열 공급 설비와 통합적으로 운영할 경우 사업 전체의 경제적 가치가 크게 향상될 수 있음을 시사한다. 따라서 향후 대규모 수전해 플랜트 설계 시에는 수소 생산 성능뿐만 아

나라 폐열 활용 가능성, 열수요처와의 연계성 및 부산물 활용 전략을 함께 고려하는 것이 경제성 확보를 위한 핵심 설계 요소가 될 것으로 판단된다.

3.2.4 열 이용률에 따른 민감도 분석

Fig. 9는 알카라인 수전해 시스템의 열 이용률 변화에 따른 순현재가치를 나타낸다. 기준 경제성 평가에서는 히트펌프를 통해 공급 가능한 열량이 수요처에서 전량 활용되는 것으로 가정하였으나 실제 운전 환경에서는 계절별·시간대별 열수요 변동에 따라 회수열의 활용도가 달라질 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 열 이용률을 변화시켜 경제성 민감도 분석을 수행하였다.

회수열을 활용하지 않는 Case 1은 열 이용률 변화에 따른 경제성 변화가 나타나지 않았다. 반면 히트펌프를 적용한 Case 2~5는 열 이용률이 증가할수록 NPV가 지속적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 회수열 활용을 통해 추가적인 경제적 편익이 발생하기 때문이며 히트펌프 연계의 경제성이 단순히 수소 생산뿐만 아니라 회수열의 활용 수준에 크게 의존함을 의미한다. 특히 모든 히트펌프 적용 조건에서 열 이용률이 낮은 경우에도 양의 NPV가 유지되어 경제적 타당성이 확보되는 것으로 나타났다. 이는 회수열을 100% 활용할 수 없는 실제 운전 조건에서도 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템이 경제성을 가

질 수 있음을 의미한다.

3.2.5 연간 가동시간에 따른 민감도 분석

Fig. 10은 알카라인 수전해 시스템의 연간 가동시간 변화에 따른 NPV를 나타낸다. 기준 경제성 평가에서는 수전해 시스템의 연간 가동시간을 4,000 h/yr로 설정하였다. 수전해 설비 이용률 변화가 경제성에 미치는 영향을 검토하기 위해 연간 가동시간을 2,000~6,000 h/yr 범위에서 1,000 h/yr 간격으로 변화시켜 민감도 분석을 수행하였다. 연간 가동시간이 2,000 h/yr인 경우 모든 Case에서 NPV가 0 미만으로 나타났으며, Case별 NPV는 -518백만 원에서 -458백만 원 범위로 분석되었다. 이는 낮은 설비 이용률로 인해 연간 수소/산소 생산량과 회수열 활용수익이 제한되면서 사업기간 내 발생하는 할인 현금흐름만으로 초기 투자비를 회수하기 어려운 조건임을 의미한다.

연간 가동시간이 3,000 h/yr로 증가하면 NPV가 전반적으로 개선되지만 Case 1~4에서는 여전히 음의 값이 나타났다. 반면 회수열 활용량이 가장 큰 Case 5에서는 NPV가 4.47백만 원으로 양의 값으로 전환되었다. 따라서 해당 조건에서는 히트펌프를 통한 열회수 및 부산물 활용을 최대화한 경우에만 제한적으로 경제성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 가동시간이 4,000 h/yr 이상으로 증가하면 모든 Case에서 NPV가 양수로 나타났다. 특히 6,000 h/yr

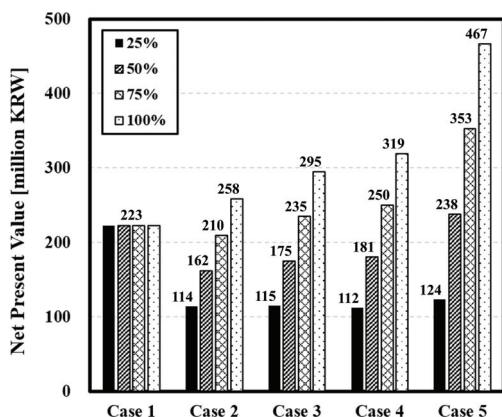


Fig. 9. Comparison of net present value according to heat utilization rate

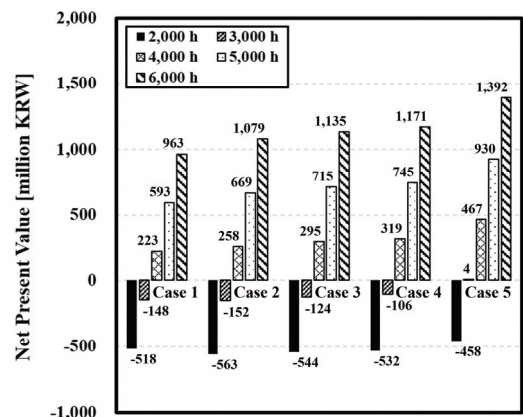


Fig. 10. Comparison of net present value according to annual operating hours

조건에서는 Case 1~5의 NPV가 963.32~1,392.28 백만 원으로 크게 증가하였다. 이는 가동시간 증가에 따라 수소와 산소 생산량, 회수열 활용량 및 연간 현금유입이 확대되는 반면 초기 투자비는 일정하게 유지되기 때문이다. 또한 동일한 가동시간에서는 히트펌프의 운전 비율이 높은 조건일수록 NPV가 크게 나타났으며 Case 5에서 가장 높은 경제성이 확인되었다. 따라서 수전해 시스템의 경제성을 확보하기 위해서는 회수열의 안정적인 활용뿐만 아니라 재생전력 또는 계통연계를 통한 충분한 연간 가동시간 확보가 중요한 것으로 판단된다.

3.2.6 내부수익률

내부수익률은 투자로부터 발생하는 미래 현금흐름의 현재가치 합과 초기 투자비가 같아지도록 하는 할인율을 의미한다. IRR이 기준 할인율 또는 요구수익률보다 클 경우 투자 타당성이 있는 것으로 평가하며 투자의 수익성을 판단하는 대표적인 경제성 지표로 활용된다.

Fig. 11은 히트펌프 사용 비율에 따른 내부수익률 변화를 나타낸다. 모든 Case에서 기준 할인율인 5% 이상인 것으로 나타났고 히트펌프 사용 비율이 증가함에 따라 IRR도 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 히트펌프만을 이용하는 Case 5의 경우 앞서 분석한 투자비 회수기간 단축 및 순현재가치 증가와 동일한 경향을 나타내며 투자 수익성 측면에서 가장 우수한 운전 조건으로 평가되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 히트펌프 연계형 알카라인 수전해 시스템의 공정해석 모델을 구축하고 히트펌프 적용 비율에 따른 공정 성능 및 경제성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 히트펌프를 통해 수전해 공정의 저온 폐열을 회수 및 활용한 결과, 시스템 전체 에너지 효율은 22.3%p 향상되었으며, 폐열 대비 유효 열공급비는 0%에서 127.9%까지 증가하였다. 또한

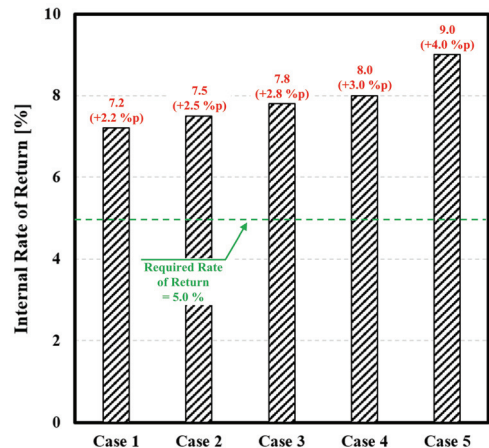


Fig. 11. Variation of the internal rate of return with heat pump utilization ratio

엑서지 효율은 61.0%에서 74.0%로 약 13.0%p 향상되어 히트펌프 연계가 시스템의 에너지 및 열역학적 성능 개선에 효과적인 것으로 확인되었다.

- 2) 인접 열수요처 존재 및 장거리 배관, 축열설비 비용 미반영 조건에서 부산물 반영 수소생산단가는 9,470 KRW/kg에서 8,548 KRW/kg으로 약 9.7% 감소하였다. 또한 투자비 회수기간은 11.5년에서 9.9년으로 단축되었으며 순현재가치는 223백만 원에서 467백만 원, 내부수익률은 7.2%에서 8.9%로 증가하였다.
- 3) 제안한 시스템은 기존 알카라인 수전해 시스템과 달리 수소 생산 과정에서 발생하는 폐열을 난방, 온수 및 산업공정 열원으로 활용할 수 있는 섹터커플링 기술로서의 적용 가능성을 확인하였다. 다만 실제 적용 시에는 열수요 특성, 회수열 이용률, 배관 거리 및 축열설비 구축 비용 등에 따라 경제성이 달라질 수 있으므로 본 연구의 경제성 결과는 특정 경제조건에 기반한 사례 분석 결과로 해석할 필요가 있다.

향후에는 실증 규모 시스템을 대상으로 공정 모델을 검증하고 실제 열수요와 인프라 구축 비용을 반영한 경제성 평가 및 히트펌프 최적 운전 제어 전략에 관한 연구를 추가적으로 수행할 계획이다.

후 기

이 연구는 2025년도 산업통상부 및 한국산업기술 기획평가원 연구비 지원에 의한 연구이다(RS-2025-16 193010).

References

1. J. DeAngelo, I. Azevedo, J. Bistline, L. Clarke, G. Luderer, E. Byers, and S. J. Davis, "Energy systems in scenarios at net-zero CO₂ emissions", *Nature Communications*, Vol. 12, No. 1, 2021, pp. 6096, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26356-y>.
2. G. He, D. S. Mallapragada, A. Bose, C. F. Heuberger-Austin, and E. Gençer, "Sector coupling via hydrogen to lower the cost of energy system decarbonization", *Energy & Environmental Science*, Vol. 14, No. 9, 2021, pp. 4635-4646, doi: <https://doi.org/10.1039/D1EE00627D>.
3. M. Nasser, T. F. Megahed, S. Ookawara, and H. Hassan, "A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 29, 2022, pp. 86994-87018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23323-y>.
4. A. Meriläinen, A. Kosonen, J. Jokisalo, R. Kosonen, P. Kauranen, and J. Ahola, "Techno-economic evaluation of waste heat recovery from an off-grid alkaline water electrolyzer plant and its application in a district heating network in Finland", *Energy*, Vol. 306, 2024, pp. 132181, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132181>.
5. F. Schlosser, M. Jesper, J. Vogelsang, T. G. Walmsley, C. Arpagaus, and J. Hesselbach, "Large-scale heat pumps: applications, performance, economic feasibility and industrial integration", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 133, 2020, pp. 110219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110219>.
6. J. Baek and S. H. Kim, "Current status of water electrolysis technology and large-scale demonstration projects in Korea and overseas", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 35, No. 1, 2024, pp. 14-26, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2024.35.1.14>.
7. J. Brauns and T. Turek, "Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: a review", *Processes*, Vol. 8, No. 2, 2020, pp. 248, doi: <https://doi.org/10.3390/pr8020248>.
8. S. Ding, B. Guo, S. Hu, Z. Tian, J. Gu, T. Zhang, F. Yang, and M. Ouyang, "Experimental and modeling study on energy flow of 250 kW alkaline water electrolysis system under steady state conditions and cold start process", *Fuel*, Vol. 350, 2023, pp. 128799, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128799>.
9. S. Luo, T. Zhang, H. Xu, J. Zhang, H. Zhao, J. Yun, and H. Zhao, "Optimizing alkaline water electrolysis: a dual-model approach for enhanced hydrogen production efficiency", *Energies*, Vol. 17, No. 21, 2024, pp. 5512, doi: <https://doi.org/10.3390/en17215512>.
10. M. Liu, X. Zheng, Y. Jia, G. Shao, J. Shi, S. Zeng, K. Wang, Y. Li, and C. Gu, "Mathematical modeling and experimental validation for a 50 kW alkaline water electrolyzer", *Processes*, Vol. 12, No. 12, 2024, pp. 2616, doi: <https://doi.org/10.3390/pr12122616>.
11. A. H. Abdol Rahim, A. S. Tijani, S. K. Kamarudin, and S. Hanapi, "An overview of polymer electrolyte membrane electrolyzer for hydrogen production: modeling and mass transport", *Journal of Power Sources*, Vol. 309, 2016, pp. 56-65, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.012>.
12. J. Yang, J. Zhang, M. Liu, J. Sun, and Z. Shangguan, "Dynamic simulation and performance analysis of alkaline water electrolyzers for renewable energy-powered hydrogen production", *Energies*, Vol. 17, No. 19, 2024, pp. 4915, doi: <https://doi.org/10.3390/en17194915>.
13. Ø. Ulleberg, "Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, No. 1, 2003, pp. 21-33, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00033-2).
14. Q. Hassan, A. Z. Sameen, H. M. Salman, and M. Jaszczur, "Large-scale green hydrogen production via alkaline water electrolysis using solar and wind energy", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 48, No. 88, 2023, pp. 34299-34315, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.126>.
15. M. Gómez-de-Arteche-Botas, J. Iturralde-Iñarga, and C. Fúnez-Guerra, "Heat pump integration for waste heat recovery from a 20 MWe green hydrogen plant to increase global efficiency", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 142, 2025, pp. 777-783, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.202>.
16. D. Pashchenko, "A heat recovery rate of the thermochemical waste-heat recuperation systems based on experimental prediction", *Energy*, Vol. 198, 2020, pp. 117395, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117395>.
17. S. Ding, B. Guo, S. Hu, J. Gu, F. Yang, Y. Li, J. Dang, B. Liu, and J. Ma, "Analysis of the effect of characteristic parameters and operating conditions on exergy efficiency of alkaline water electrolyzer", *Journal of Power Sources*, Vol. 537, 2022, pp. 231532, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231532>.
18. P. Dogliani, A. Nolan Ruas Rego Canha, A. M. Elberry, and

- J. Thakur, "Multi-option analytical modeling of levelized costs across various hydrogen supply chain nodes", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 70, 2024, pp. 737-755, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.142>.
19. S. Baral and J. Šebo, "Techno-economic assessment of green hydrogen production integrated with hybrid and organic Rankine cycle (ORC) systems", *Heliyon*, Vol. 10, No. 4, 2024, pp. e25742, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25742>.
20. A. Abánades and J. Frias, "Economic evaluation of implementation of power-to-gas: application to the case of Spain", *Energies*, Vol. 15, No. 7, 2022, pp. 2523, doi: <https://doi.org/10.3390/en15072523>.
21. C. Czipf, "The impact of changing energy prices, interest rates, and investment costs on the net present value and internal rate of return for alternative energy projects", *Discover Sustainability*, Vol. 6, 2025, pp. 161, <https://doi.org/10.1007/s43621-025-00921-7>.
22. Y. Lee, G. Kim, S. Ki, and J. Seo, "Development of conceptual cost estimation model for an economic analysis of steam methane reforming based hydrogen production", *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, Vol. 59, No. 2, 2022, pp. 193-204, doi: <https://doi.org/10.32390/ksmer.2022.59.2.193>.
23. C. Loschan, D. Schwabeneder, M. Maltet, G. Lettner, and H. Auer, "Hydrogen as short-term flexibility and seasonal storage in a sector-coupled electricity market", *Energies*, Vol. 16, No. 14, 2023, pp. 5333, doi: <https://doi.org/10.3390/en16145333>.
24. J. Park, C. H. Kim, H. S. Cho, S. K. Kim, and W. C. Cho, "Techno-economic analysis of green hydrogen production system based on renewable energy sources", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 31, No. 4, 2020, pp. 337-344, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2020.31.4.337>.
25. M. Nasser and H. Hassan, "Techno-enviro-economic analysis of hydrogen production via low and high temperature electrolyzers powered by PV/wind turbines/waste heat", *Energy Conversion and Management*, Vol. 278, 2023, pp. 116693, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.116693>.
26. European Hydrogen Observatory, "The European hydrogen market landscape", *Clean Hydrogen Joint Undertaking*, Belgium, 2025, Retrieved from https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/sites/default/files/2025-11/The%20European%20hydrogen%20market%20landscape_November%202025.pdf.
27. I. Moradpoor, O. Himanen, K. Nikiforow, and S. Syri, "Techno-economic assessment of heat recovery from a PEME stack to district heating systems", *Energy Conversion and Management*, Vol. 356, 2026, pp. 121392, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2026.121392>.
28. S. A. Park, E. K. Lee, J. W. Lee, S. K. Lee, J. S. Moon, T. W. Kim, and Y. K. Cheon, "A study on performance characteristic and safety of alkaline water electrolysis system", *Transactions of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 28, No. 6, 2017, pp. 601-609, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2017.28.6.601>.
29. J. Kang and J. An, "Economic and environmental feasibility of hydrogen production from seawater desalination and electrolysis", *Journal of Hydrogen and New Energy*, Vol. 37, No. 1, 2026, pp. 66-75, doi: <https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.1.66>.