KTR KOREA TESTING & RESEARCH INSTITUTE

2026 Critical Review Report

검토 의견서

■ 1차 ■ 2차 □ 3차

Final Critical Review Report

LCI DB 검토의견서

2026. 11. 11.

Korea Testing and Research Institute

작성기관 및 작성자		
작성기관:	㈜엔스타알앤씨	

Note 1: 이 문서는 2026년 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행한 연구 결과물로서, 국토교통분야 수소 기술의 LCI DB에 대한 정보를 포함하고 있습니다.

Note 2: 해당 문서에 기재된 사항은 외부에 공개할 수 없으며, 정밀검토 후 해당 자료는 폐기하여야 합니다.

1. LCI DB 보고서

Dataset Documentation 'electrolyzer balance of plant production, PEM'

** 참고: 이 문서는 데이터세트 정보의 일부만 발췌하여 제공합니다. 교환 속성, 수학적 관계, 매개변수, 저자 및 검토자의 연락처 정보에 대한 추가 데이터는 별도 파일 형식으로 제공되어야 합니다.*

1 데이터 세트 식별 정보

	구분	내용
1	데이터 이름	electrolyzer balance of plant production, PEM
2	지역	Korea (KR)
3	기간	2026-01-01 to 2028-12-31 – Valid for the entire period
4	참조 제품	balance of plant, proton exchange membrane electrolysis (1 unit)
5	데이터 세트 유형	Transforming activity
6	기술 수준	TRL(Technology Readiness Level 8)

지리적 위치를 나타낼 수 있는 사진 기입 (선택)

데이터의 지역적 범위: 대한민국(기술 대표 데이터, 한국 공급 배경 데이터 연결)

2 데이터 세트 작성자 정보

	구분	내용
1	Data entry	인하대학교
2	Data generator	이광원, ㈜엔스타알앤씨
3	Review (1st)	이름, 소속
4	Review (2nd)	이름, 소속
5	Review (3rd)	이름, 소속

3 물질 흐름(요약)

	Reference product	By-product classification	Amount
1	balance of plant, proton exchange membrane electrolysis		1 unit

	Inputs from technosphere	Amount
1	크롬강 18/8	8.69E-05 kg
2	저합금강 열연	1.68E-04 kg
3	FKM 가스켓	4.09E-07 kg
4	스테인리스강	3.24E-04 kg
5	알루미늄	1.52E-05 kg
6	폴리비닐플루오라이드	6.02E-06 kg
7	콘크리트(종류 · 밀도 미제공)	2.18E-07 m3
8	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)	1.60E-06 Item(s)

※ 위 목록은 BOP 집계 공정이 1 unit씩 받는 부품 단위공정 6개의 투입을 재료별로 펼친 것이며, openLCA 집계 공정 export(목록분석결과 엑셀 Inputs 시트)의 직접 투입은 부품 공정이다.

4 일반사항

(1) 데이터 개요

본 LCI DB의 대상은 양성자 교환막 수전해(PEM) 시스템에서 스택(STACK)을 제외한 주변설비(Balance of Plant, BOP)의 제조이다. BOP는 전력변환 · 펌프 · 기액분리 · 열교환 · 제어 · 구조물 등 스택의 운전을 뒷받침하는 설비군으로, 2차년도에 구축한 스택 부품 LCI DB와 결합하여 수전해 수소 생산 시스템을 구성한다.

BOP 설비는 수명 동안 생산하는 수소량으로 배분하여 수소 1 kg당 제조 부담으로 표현하였다. 즉 기준흐름 'PEM BOP 1 unit'은 수소 1 kg 생산에 배분된 장비 서비스이며, 실제 장비 1대를 의미하지 않는다.

양성자 교환막 수전해(PEM)는 고체 고분자막을 전해질로 쓰며 높은 전류 밀도, 빠른 부하 응답, 고순도 수소가 장점이다. 스택 차압으로 약 30 bar의 가압 수소를 인도하는 설계가 일반적이며, MW급 상용 설비가 보급 단계에 있다.

(2) 시장조사 및 대상업체 선정

현재 수전해 기술 시장은 상업화 초기 단계이며, 설비 제조사의 BOP 설비 목록(BOM)과 운전 데이터는 대부분 공개되지 않는다. 따라서 특정 제조업체의 시장 점유율이나 생산량을 기준으로 대표 기업을 선정하는 것은 현재 단계에서 불가능하다.

본 LCI 모듈은 특정 상용 제품이 아닌, 공개 학술 문헌 · 공공 보고서를 기반으로 한 '기술 대표' 목록을 구축하는 것을 목표로 하며, 향후 국내 설비 데이터가 확보되면 보완 · 개정될 기초 데이터베이스이다.

BOP 설비는 기술별로 재료 수준까지 분해된 인벤토리를 보고한 문헌 1건을 대표 문헌으로 선정하였다(여러 문헌의 설비를 섞으면 경계가 달라 이중계상 · 누락이 생기므로 혼합하지 않음).
선정 문헌: Gerhardt–M□rsdorf et al. 2024 (Adv. Energy Sustain. Res.)

5 MW PEM 수전해 플랜트의 전과정평가로, 보충자료(SI S1 · S2)에 설비별 재료 목록을 보고한다. 공개 문헌 중 BOP를 재료 수준까지 분해한 유일한 자료이므로 단일 대표 문헌으로 채택하였다. 원문은 제조 에너지와 폐기물을 자료 부족으로 제외하고 재료수지만 고려함을 명시한다.

(3) 기능단위 설정

	내용	
기능	국가 에너지 공급을 위한 수소 생산	
기능단위	수소 1kg 생산을 위한 PEM 기술의 BOP 생산	
기준흐름	수소 1kg 생산을 위한 PEM 기술의 BOP 1 unit	BOP 1 unit = 수소 1 kg에 배분된 장비 서비스(실제 장비 1대 아님).

(4) 시스템 경계

	원료채취	물질/제품 제조		사용		폐기		재활용
	Raw material extraction	Transportation	Product manufacturing	Use	Maintenance	Transportation	Final disposal	Transportation
공정	●	×	×	×	×	×	×	×

원료채취를 포함한다. 대표 문헌이 설비 가공 · 조립 에너지를 정량 보고하지 않고 재료수지만 경계로 삼아 제품 제조 단계는 포함하지 않았다(×, 가정 및 제한사항 참조). 원료 운송은 사용한 시장 데이터셋에 평균 운송이 포함되어 있어 전경에 별도로 추가하지 않았고(×), 제품 운송 · 설치는 설치 장소가 특정되지 않은 기술 대표 데이터이므로 제외하였다. 근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다. 스택은 2차년도 LCI DB에서 별도로 구축하였으므로 본 모듈에서 제외하였다.

(5) 제외 기준

대표 문헌이 보고한 모든 투입물과 산출물을 질량 · 에너지 기여도와 관계없이 포함하는 것을 원칙으로 하였다. 대표 문헌이 보고하지 않은 항목은 임의로 채우지 않았다(가정 및 제한사항 참조).
스택은 2차년도 LCI DB에서 별도로 구축하였으므로 본 모듈에서 제외하였다.
근로자 편의시설 · 사무공간 등 생산과 직접 관련 없는 활동은 제외하였다.

(6) 데이터 범주

	구분		물질명
투입	원료물질		크롬강 18/8, 저합금강 열연, FKM 가스켓, 스테인리스강, 알루미늄, 폴리비닐플루오라이드, 콘크리트(종류 · 밀도 미제공) 설비(완제품): 전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)
	보조물질		
	용수		
	에너지		
산출	제품		balance of plant, proton exchange membrane electrolysis
	부산물(할당)		
	잔여물	매립	
		소각	
		재활용	
	배출물	대기	
		수계	
		토양	

(7) 데이터 품질 평가 출처

	특정데이터	일반데이터
정밀도(P)		
시간적 대표성(TiR)		4.00
지역적 대표성(GeR)		2.00
기술적 대표성(TeR)		4.73
Total DQR		3.58 (보통)

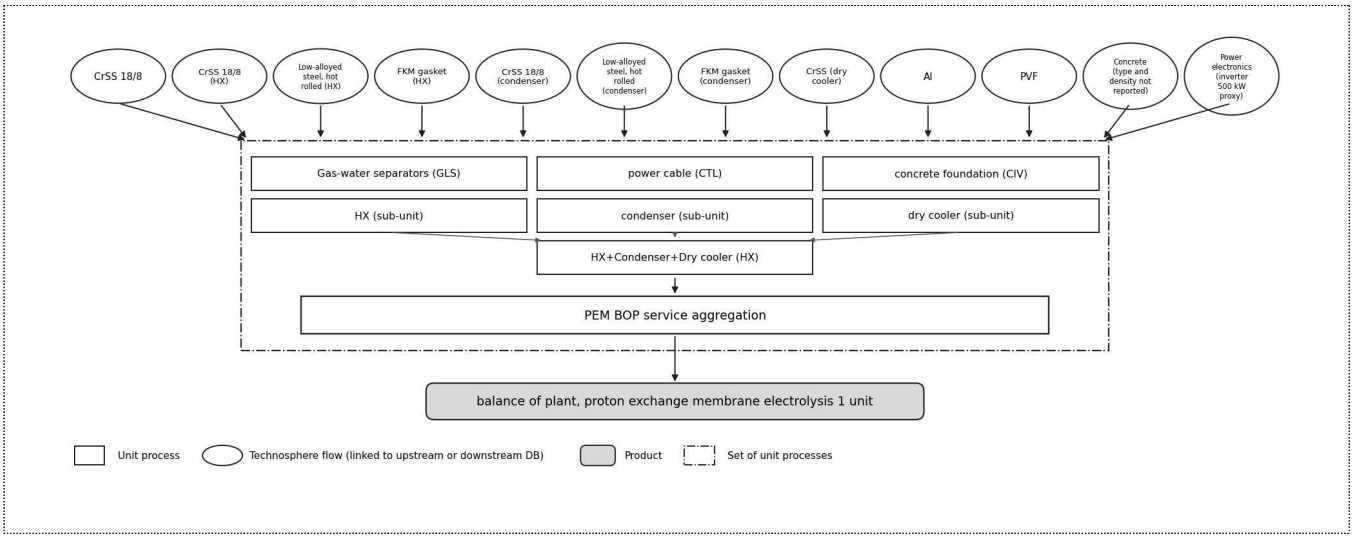
(8) 가정 및 제한사항

	내용
공통사항	• 대상제품 생산 활동데이터는 현장데이터 수집이 불가하여 공개 문헌데이터를 사용하였다. • 기술별로 단일 대표 문헌의 보고 범위를 따르며, 대표 문헌이 보고하지 않은 설비 · 투입물을 다른 문헌이나 다른 기술의 값으로 채우지 않았다. • 배경(상위흐름) 데이터는 ecoinvent 3.12 Cutoff System을 사용하고, 한국 공급 우선순위(KR → Asia → RoW → GLO)로 연결하였다. 한국 데이터셋이 없는 재료 · 가공은 GLO/RoW 시장 데이터셋을 사용하였다. • 원료 운송은 전경 공정에 별도로 추가하지 않았다. 사용한 ecoinvent 시장(market) 데이터셋에 평균 운송이 포함되어 있으며, 대표 문헌이 공급처 · 운송거리를 보고하지 않아 전경 운송을 추가하면 이중계상 또는 근거 없는 가정이 된다. KTR 「LCI DB 구축 가이드라인」 표 4는 자원/원료 수송을 필수 수집 범주로 두되, 데이터 수집이 어렵거나 영향이 미미한 경우 제외 물질과 사유를 보고서에 명시하도록 하므로(p.10~11) 이에 따라 제외 사유를 기재한다. • 제품 운송 · 설치는 설치 장소가 정해지지 않은 기술 대표 데이터셋이므로 제외하였다.

PEM BOP	• 원문(Gerhardt-M□rsdorf 2024)이 제조 에너지 · 폐기물을 자료 부족으로 제외하여 재료 투입만 반영하였다(제품 제조 단계 미포함). 제조 에너지가 0이라는 뜻은 아니다. • 보충자료 S2(Construction 시트)는 기액분리기(metal working, 크롬강) · 전력케이블(구리 인발 · 파이프 압출) · 열교환기 가스켓(압출, 재료 1.18 kg당 제품 1 kg) 등 일부 부품에만 ecoinvent 가공 공정을 연결하고 있다. 제조 에너지 · 폐기물 자료 없이 일부 부품에만 적용된 값이므로, 원문 본문(S1)이 밝힌 '재료수지만 고려' 경계에 맞춰 반영하지 않았다. • 이 제외로 BOP 영향은 과소평가될 수 있다. 참고로 금속 부품에 ecoinvent 금속가공(metal working, average for steel/chromium steel product manufacturing)을 재료 질량과 1:1로 연결하면 해당 강재의 GWP가 저합금강 약 72%, 크롬강 약 44% 증가한다(ecoinvent 3.12 Cutoff 단위 GWP 비교, IPCC 2021 GWP100). • 제품 제조(가공 · 조립) 단계의 반영 수준은 대표 문헌의 보고 범위를 따르므로 기술마다 다르다. AWE · PEM은 재료만 반영하였고(제품 제조 ×), AEM은 NEWELY가 보고한 금속가공 · 성형과 변압기 proxy의 제조 전력 · 열을, SOEC는 가공 공정 19행과 추가 제조(조립) 전력을 반영하였다. 기술 간 BOP 결과를 비교할 때 이 차이에 유의해야 한다. • 전력전자는 대표 문헌대로 ecoinvent 'market for inverter, 500 kW'(GLO) 22대를 proxy로 포함하였다(LCI-128, 1.60E-06대/kg H_2 , 본 데이터셋 GWP의 약 89 %). 이 데이터셋에 포함된 사용 후 폐기(폐기물 처리 교환)는 cradle-to-gate 경계에 맞춰 제외하였다(인버터 1대 1.67E+04 → 1.34E+04 kg CO_2 -eq, LRQA 2611CSY01 반영). 원저자는 MW급 설비에 500 kW 단위를 반복 적용하면 크게 과대평가된다고 지적하였으므로, MW급 정류기 자료가 확보되면 교체한다. 포함하면 PEM BOP(2.42E-02 kg CO_2 -eq)가 다른 기술(AWE 7.59E-03, AEM 4.42E-02, SOEC 5.17E-02)과 비슷한 수준이 되며, 포함하지 않으면 2.77E-03이다. 이 proxy는 다른 기술(태양광 DC→AC)용 데이터셋이라 기술 대표성 점수가 낮아, 본 데이터셋 Total DQR은 3.58(보통)로 미포함 시(2.88)보다 나빠진다. 변압기는 대표 문헌의 설비 목록에 없어 포함하지 않았다. AEM BOP도 같은 인버터 데이터셋을 기능 proxy로 포함하였다. • 펌프 · 구조물 · 배관 · 압축기 · 가스 정제 설비는 원문이 대수만 보고하거나 명시적으로 제외하여 포함하지 않았다. 용수 정제 설비는 원문이 상위 용수 공급에 포함된다고 보아 제외하였다. 이 포함 여부는 과거 ecoinvent 탈이온수 공급에 대해 검토한 것이며, 현재 연결한 국가 LCI DB 탈이온수(LCI-2022-118)에 정제시설 건설 · 운영이 포함되는지는 확인하지 않았다. • FKM 가스켓 2행은 불소계 고무 데이터셋이 없어 일반 합성고무(synthetic rubber) proxy를 사용하였다. • 응축기 질량은 원문 보충자료 S2(Construction 시트)의 재료별 투입값 합계(가스켓 0.269 + 크롬강 2.03 + 저합금강 열연 1,160 = 1,162.299 kg, S2 합계와 같음)를 사용하였다. 원문 본문 Table 6(1,157.7 kg)보다 4.6 kg(0.4 %) 많다. 기존 보고서의 '원문 총량 1,160 kg'은 S2 저합금강 한 행 값을 총량으로 잘못 적은 것이어서

5 물질 흐름(상세 정보)

(1) 공정흐름도 작성



(2) 데이터 수집 및 계산

본 데이터셋은 BOP 집계 공정이 부품 단위공정 6개를 1 unit씩 받는 단위공정 집합이며, 5절의 투입물은 부품 단위공정의 투입을 합한 단위공정 집합 전체의 투입이다. 집계 공정에 직접 들어가는 전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)도 포함한다.

[1] 데이터 수집

구분			물질명	데이터 구분				LCI DB		
				실측	계산	추정	일반	명칭	출처	연도
투입	원료물질		크롬강 18/8				●	market for steel, chromium steel 18/8 (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	원료물질		저합금강 열연				●	market for steel, low-alloyed, hot rolled (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	원료물질		FKM 가스켓				●	market for synthetic rubber (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	원료물질		스테인리스강				●	market for steel, chromium steel 18/8 (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	원료물질		알루미늄				●	market for aluminium, wrought alloy (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	원료물질		폴리비닐플루오라이드				●	market for polyvinylfluoride (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	원료물질		콘크리트				●	market for concrete, normal strength (RoW)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2019-2025
	설비(완제품)		전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)				●	inverter production, 500kW, excluding end-of-life disposal, proxy (GLO)	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011-2025
	에너지									
	용수									
	수송									
산출	제품		balance of plant, proton exchange membrane electrolysis							
	부산물									
	폐기물	매립								
		대기								
		수계								

[2] 데이터 할당

공정 중 다중 산출이 발생하지 않아 할당을 수행하지 않았다. 설비 수명에 따른 수소 1 kg당 배분(기능단위 환산)은 할당이 아니다.

구분		물질명	할당인자
1	대상 모듈공정	balance of plant, proton exchange membrane electrolysis	100%
2	부산물		–

[3] 데이터 계산

구분		내용
1	상·하위 흐름 연결을 위한 계산	openLCA 2.7.0에서 기준흐름으로 연결(부품 공정 → BOP 집계 → 검토범위). 배경 provider는 UUID로 직접 지정. 물질별 기여(투입량 × 공급 공정 1단위당 상류 포함 영향)의 합이 openLCA 계산 총량과 일치함을 확인하였다.
2	물질수지/물수지 검증 및 조정	기준흐름 1 unit이 수소 1 kg 배분분으로 정의되어 활동데이터와 단위가 일치한다. 원문 질량을 기능단위로 환산한 값을 엑셀 수식과 독립 계산으로 대조하였다.
3	연료 연소에 따른 배출량 계산	[미해당] 본 공정은 전경에서 연료를 연소하지 않는다.

(3) 물질 투입·산출표

	구분	물질명	데이터 출처				양	단위
			실측	계산	추정	일반		
투입	원료물질	크롬강 18/8				●	8.69E-05	kg
	원료물질	저합금강 열연				●	1.68E-04	kg
	원료물질	FKM 가스켓				●	4.09E-07	kg
	원료물질	스테인리스강				●	3.24E-04	kg
	원료물질	알루미늄				●	1.52E-05	kg
	원료물질	폴리비닐플루오라이드				●	6.02E-06	kg
	원료물질	콘크리트(종류 · 밀도 미제공)				●	2.18E-07	m3
	설비(완제품)	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)				●	1.60E-06	Item(s)
	에너지							
	용수							
산출	제품	balance of plant, proton exchange membrane electrolysis					1	unit
	폐기물							
	배출물							

(4) 목록분석 결과

* 별도 엑셀파일 참조

6 환경영향평가 결과

(1) 영향평가 정보

	지표	내용
1	평가 소프트웨어	openLCA 2.7.0
2	평가 방법론	Environmental footprint 3.1 (EF v3.1, ecoinvent 3.12 Methods)
3	배경 데이터베이스	ecoinvent 3.12 Cutoff System (2026-04-14) + 국가 LCI DB
4	계산 대상	openLCA 공정 electrolyzer balance of plant production, PEM (BOP 1 unit)

(2) 영향평가 결과

[1] 영향범주별 평가 결과

	영향범주	지표	단위	평가결과	기여도(%)
1	*Acidification*	Accumulated Exceedance (AE)	mol H+-Eq	4.37E-04	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(96.6%), 스테인리스강(2.1%), 크롬강 18/8(0.6%), 저합금강 열연(0.4%), 알루미늄(0.3%), 기타(0.1%)
2	*Climate change*	Radiative forcing as Global Warming Potential (GWP100)	kg CO2-Eq	2.42E-02	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(88.6%), 스테인리스강(6.6%), 크롬강 18/8(1.8%), 저합금강 열연(1.6%), 알루미늄(0.8%), 기타(0.6%)
3	*Climate change: biogenic*	GWP100	kg CO2-Eq	4.67E-05	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(92.5%), 스테인리스강(4.8%), 크롬강 18/8(1.3%), 저합금강 열연(0.6%), 알루미늄(0.5%), 기타(0.3%)
4	*Climate change: fossil*	GWP100	kg CO2-Eq	2.41E-02	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(88.5%), 스테인리스강(6.6%), 크롬강 18/8(1.8%), 저합금강 열연(1.6%), 알루미늄(0.8%), 기타(0.7%)
5	*Climate change: land use and land use change*	GWP100	kg CO2-Eq	7.73E-05	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(96.1%), 스테인리스강(2.3%), 크롬강 18/8(0.6%), 알루미늄(0.5%), 저합금강 열연(0.3%), 기타(0.1%)
6	*Ecotoxicity: freshwater*	Comparative Toxic Unit for ecosystems	CTUe	4.99E-01	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(93.7%),

		(CTUe)			스테인리스강(4.4%), 크롬강 18/8(1.2%), 저합금강 열연(0.5%), 알루미늄(0.1%), 기타(0.1%)
7	*Ecotoxicity: freshwater, inorganics*	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	4.93E-01	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(93.7%), 스테인리스강(4.4%), 크롬강 18/8(1.2%), 저합금강 열연(0.5%), 알루미늄(0.1%), 기타(0.1%)
8	*Ecotoxicity: freshwater, organics*	Comparative Toxic Unit for ecosystems (CTUe)	CTUe	5.78E-03	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(94.0%), 스테인리스강(3.4%), 저합금강 열연(1.1%), 크롬강 18/8(0.9%), 알루미늄(0.3%), 기타(0.3%)
9	*Energy resources: non-renewable*	Abiotic resource depletion - fossil fuels (ADP-fossil)	MJ, net calorific value	3.62E-01	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(91.5%), 스테인리스강(5.0%), 크롬강 18/8(1.4%), 저합금강 열연(1.2%), 알루미늄(0.5%), 기타(0.4%)
10	*Eutrophication: freshwater*	Fraction of nutrients reaching freshwater end compartment (P)	kg P-Eq	3.71E-05	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(93.6%), 스테인리스강(4.4%), 크롬강 18/8(1.2%), 저합금강 열연(0.6%), 알루미늄(0.2%), 기타(0.1%)
11	*Eutrophication: marine*	Fraction of nutrients reaching marine end compartment (N)	kg N-Eq	3.73E-05	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(92.3%), 스테인리스강(4.6%), 크롬강 18/8(1.2%), 저합금강 열연(1.0%), 알루미늄(0.6%), 기타(0.3%)
12	*Eutrophication: terrestrial*	Accumulated Exceedance (AE)	mol N-Eq	4.39E-04	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(93.2%), 스테인리스강(4.0%), 크롬강 18/8(1.1%), 저합금강 열연(0.9%), 알루미늄(0.5%), 기타(0.3%)
13	*Human toxicity: carcinogenic*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	4.67E-11	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(94.7%), 스테인리스강(3.3%), 크롬강 18/8(0.9%), 저합금강 열연(0.9%), 알루미늄(0.3%), 기타(0.1%)

14	*Human toxicity: carcinogenic, inorganics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	3.83E-11	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(96.2%), 스테인리스강(2.7%), 크롬강 18/8(0.7%), 저합금강 열연(0.2%), 알루미늄(0.1%), 기타(0.0%)
15	*Human toxicity: carcinogenic, organics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	8.40E-12	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(87.7%), 스테인리스강(5.8%), 저합금강 열연(3.7%), 크롬강 18/8(1.5%), 알루미늄(1.2%), 기타(0.2%)
16	*Human toxicity: non-carcinogenic*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	3.81E-09	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(98.6%), 스테인리스강(0.9%), 크롬강 18/8(0.2%), 저합금강 열연(0.2%), 알루미늄(0.0%), 기타(0.0%)
17	*Human toxicity: non-carcinogenic, inorganics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	3.58E-09	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(98.6%), 스테인리스강(0.9%), 크롬강 18/8(0.2%), 저합금강 열연(0.2%), 알루미늄(0.0%), 기타(0.0%)
18	*Human toxicity: non-carcinogenic, organics*	Comparative Toxic Unit for humans (CTUh)	CTUh	2.31E-10	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(99.6%), 스테인리스강(0.2%), 저합금강 열연(0.1%), 크롬강 18/8(0.1%), 알루미늄(0.0%), 기타(0.0%)
19	*Ionising radiation: human health*	Human exposure efficiency relative to U	kBq U235-Eq	2.04E-03	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(92.6%), 스테인리스강(5.0%), 크롬강 18/8(1.3%), 저합금강 열연(0.7%), 폴리비닐플루오라이드(0.3%), 기타(0.2%)
20	*Land use*	Soil quality index	dimensionless	2.06E-01	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(93.5%), 스테인리스강(4.3%), 크롬강 18/8(1.2%), 저합금강 열연(0.6%), 알루미늄(0.2%), 기타(0.3%)
21	*Material resources: metals/minerals*	Abiotic resource depletion (ADP ultimate reserves)	kg Sb-Eq	4.58E-06	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(98.7%), 스테인리스강(1.0%), 크롬강

					18/8(0.3%), 저합금강 열연(0.1%), 폴리비닐플루오라이드(0.0%), 기타(0.0%)
22	*Ozone depletion*	Ozone Depletion Potential (ODP)	kg CFC-11-Eq	3.39E-10	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(94.1%), 스테인리스강(3.4%), 크롬강 18/8(0.9%), 저합금강 열연(0.7%), 알루미늄(0.3%), 기타(0.5%)
23	*Particulate matter formation*	Human health effects associated with exposure to PM2.5.	disease incidence	2.21E-09	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(89.1%), 스테인리스강(6.5%), 크롬강 18/8(1.7%), 저합금강 열연(1.7%), 알루미늄(0.8%), 기타(0.3%)
24	*Photochemical oxidant formation: human health*	Tropospheric ozone concentration increase	kg NMVOC-Eq	1.70E-04	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(94.5%), 스테인리스강(3.2%), 크롬강 18/8(0.9%), 저합금강 열연(0.8%), 알루미늄(0.4%), 기타(0.3%)
25	*Water use*	*User deprivation potential (deprivationweighted water consumption)*	*m3 world Eq deprived*	*1.17E-02*	*전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)(90.9%), 스테인리스강(5.3%), 저합금강 열연(1.6%), 크롬강 18/8(1.4%), 알루미늄(0.4%), 기타(0.4%)*

[2] 물질별 영향평가 결과

	구분	흐름	물질명	목록		평가결과 (kg CO_2 eq.)	기여도(%)
				양	단위		
1	투입	중간	크롬강 18/8	8.69E-05	kg	4.30E-04	1.78
2	투입	중간	저합금강 열연	1.68E-04	kg	3.84E-04	1.59
3	투입	중간	FKM 가스켓	4.09E-07	kg	1.30E-06	0.01
4	투입	중간	스테인리스강	3.24E-04	kg	1.60E-03	6.61
5	투입	중간	알루미늄	1.52E-05	kg	1.95E-04	0.81
6	투입	중간	폴리비닐플루오라이드	6.02E-06	kg	8.97E-05	0.37
7	투입	중간	콘크리트(종류 · 밀도 미제공)	2.18E-07	m3	6.64E-05	0.27
8	투입	중간	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)	1.60E-06	Item(s)	2.15E-02	88.57
9	산출	중간	balance of plant, proton exchange membrane electrolysis	1	unit	합계 2.42E-02	100.00

8 참고자료

1) *Gerhardt-M□rsdorf, J.; Peterssen, F.; Burfeind, P.; Benecke, M.; Bensmann, B.; Hanke-Rauschenbach, R.; Minke, C. Life Cycle Assessment of a 5 MW Polymer Exchange Membrane Water Electrolysis Plant. Advanced Energy and Sustainability Research 2024. https://doi.org/10.1002/aesr.202300135*

2) *Blume, N. et al. (2022) Journal of Industrial Ecology, SI §3.4.6 (FKM 조성). https://doi.org/10.1111/jiec.13328*

3) *Ciroth, A. (GreenDelta) Refining the pedigree matrix approach in ecoinvent, 2013.*

9 사용 LCI DB 목록

	물질명	LCI DB 명	국가명	출처	년도	유효기간
1	크롬강 18/8	market for steel, chromium steel 18/8	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
2	저합금강 열연	market for steel, low-alloyed, hot rolled	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
3	FKM 가스켓	market for synthetic rubber	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
4	스테인리스강	market for steel, chromium steel 18/8	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
5	알루미늄	market for aluminium, wrought alloy	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
6	폴리비닐플루오라이드	market for polyvinylfluoride	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025
7	콘크리트(종류 · 밀도 미제공)	market for concrete, normal strength	RoW	ecoinvent 3.12 Cutoff	2019	2025
8	전력전자(인버터 500 kW proxy ×22)	inverter production, 500kW, excluding end-of-life disposal, proxy	GLO	ecoinvent 3.12 Cutoff	2011	2025

KTR 검토 반영내역

No	구분	검토의견	반영내용
1	공통	사용 LCI DB 목록: 같은 물질을 합친 행 분리	물질마다 1행으로 나눴습니다.
2	공통	5쪽 물질 흐름(요약)과 본문 목록 불일치	요약 목록을 본문과 같은 이름 · 순서 · 양으로 맞췄습니다. BOP는 부품별 투입을 재료로 펼친 목록임을 표 아래 적었습니다.
3	개별	인버터 · 변압기 사용처, 응축기 보충설명	인버터는 대표 문헌대로 ecoinvent PV용 500 kW 인버터 22대를 대리로 넣었습니다(아래 자체 정정). 변압기는 원문에 대수 · 용량이 없어 넣지 않았고 한계로 밝혔습니다. 응축기는 원문 S2 재료별 합(1,162.3 kg, 본문 1,157.7 kg보다 0.4 % 많음)을 썼고, 기존 '원문 총량 1,160 kg' 표기는 오기여서 정정했습니다.
4	자체 정정	–	제출본은 인버터를 빼 다른 기술보다 BOP 결과가 약 10분의 1이었습니다(0.0028). 전력변환 장치를 대리 데이터(인버터 22대)로 넣어 0.0294 kg CO_2 e로 바꿨고, 다른 기술(0.0076~0.0517)과 비슷해졌습니다. 대리 데이터라 자료품질(DQR)은 2.88 → 3.59(보통)로 낮아지며, 실측 자료가 나오면 값을 바꿉니다. 목록분석 결과 엑셀 교체본을 보냅니다. 결과표 정정을 요청드립니다: ⑤ 0.0294.
5	공통	검토 DQR은 참고용	참고하겠습니다.