Check for updates

Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 5, 2026, pp. 622~635
DOI: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.5.622

JHNE
pISSN 1738-7264 • eISSN 2288-7407

저온 수전해 생산 수소의 수분 특성과 흡착식 건조 기술 동향

김지수 · 백종민 · 서민혜 · 유영돈 · 김수현†

고등기술연구원 에너지환경연구센터

Moisture Characteristics of Product Hydrogen and Trends in Adsorption-Based Drying Technologies for Low-Temperature Water Electrolysis

JISU KIM, JONGMIN BAEK, MINHYE SEO, YOUNGDON YOO, SUHYUN KIM†

Institute for Advanced Engineering, Energy Environment Research Center, 175-28, Goan-ro 51beon-gil, Baegam-myeon, Cheoin-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea

†Corresponding author : shkim0605@iae.re.kr

Received 31 July, 2026
Revised 29 September, 2026
Accepted 29 September, 2026

© The Korean Hydrogen and New Energy Society

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), which permits non-commercial use, sharing, adaptation, distribution, and reproduction in any medium or format, provided the original work is properly cited.

Abstract >> This review examines adsorption-based hydrogen drying for low-temperature water electrolysis, covering moisture generation, downstream treatment, adsorbent selection, and regeneration. Water adsorption equilibrium, kinetics, and breakthrough behavior are discussed, and activated alumina, silica gel, and zeolitic molecular sieves are compared. PSA, TSA, VPSA, and combined temperature–pressure regeneration are reviewed with respect to their regeneration principles, operating sequences, advantages, and limitations.

Key words : Low-temperature water electrolysis(저온 수전해), Hydrogen drying(수소 건조), Adsorption dryer(흡착식 건조기), Adsorbent(흡착제), Adsorbent regeneration(흡착제 재생)

1. 서 론

전 세계적으로 탄소중립 실현과 재생에너지 보급 확대를 위한 정책적, 기술적 노력이 지속되면서, 재생전력을 이용한 저온 수전해가 그린수소 생산의 주요 기술로 주목받고 있다[1]. 수전해 시스템의 적용 규모가 확대됨에 따라 스택의 효율과 내구성뿐만 아니라 생산 수소의 품질을 안정적으로 확보하기 위한 후단 정제 및 건조 공정의 중요성도 증가하고 있다[1–3].

저온 수전해에서 생산된 수소에는 공정 특성상 액상 수분과 수증기가 포함될 수 있으며, 운전 및 퍼지 조건에 따라 산소나 질소 등의 불순물이 함께 존재

2026 The Korean Hydrogen and New Energy Society. All rights reserved.

할 수 있다[2,4-6]. 수전해 스택 후단에서는 기액 분리를 통해 동반된 액상 수분을 우선 제거하며, 필요에 따라 열교환기를 이용하여 수소를 냉각하고 응축된 수분을 추가로 분리한다. 또한, 잔류 산소 제거를 위해 탈산소 반응기(deoxo reactor)를 적용하는 경우에는 산소와 수소의 촉매 반응으로 물이 추가 생성되므로, 후단 건조 공정에서 처리해야 하는 수분 부하가 증가할 수 있다[2,4].

냉각과 응축은 건조기(dryer)로 유입되는 수분 부하를 줄일 수 있지만, 해당 공정만으로 수분 함량을 요구 수준까지 낮추는 데에는 한계가 있다. 20°C에서 수소가 순수한 액상 물과 기액 평형을 이룬다고 가정하고 Buck의 포화수증기압 상관식을 이용하면, 습윤공기의 증강계수(enhancement factor)를 적용하지 않은 이상기체 기준 수분농도는 1 bar (a)와 10 bar (a)에서 각각 약 23,000 ppm (v)와 2,300 ppm (v)로 계산된다[7]. 이는 ISO 14687:2025에서 Type I 및 Type II grade D 수소에 요구하는 수분 허용 농도인 5 μmol/mol보다 높은 수준이다[8]. 따라서 해당 품질 기준을 충족하기 위해서는 냉각 및 응축 후 잔류하는 수증기를 흡착제가 충전된 흡착탑에서 선택적으로 제거하여 수분 분압을 낮추는 흡착식 건조기가 요구된다[2,4].

흡착식 건조기의 성능은 흡착제의 수분 흡착 평형과 동역학뿐만 아니라 유입 수소의 온도, 압력, 유량 및 수분 부하, 흡착층 구성과 재생 조건에 의해 결정된다[3,4,9]. 그러나 기존 연구는 수전해 후단 정제 시스템의 실증, 특정 흡착제의 수분 흡착 특성 또는 흡착탑의 열전달 해석에 개별적으로 집중되어 있어, 수전해 수소의 수분 특성부터 흡착제 선정과 건조기 운전 기술까지 연계한 종합적인 검토가 필요하다. 이에 본 연구에서는 저온 수전해 생산 수소의 수분 특성과 후단 처리 공정을 정리하고, 주요 수분 흡착제와 흡착층 구성, 흡착식 건조기의 운전 및 재생 기술을 종합적으로 분석하여 흡착제 선정과 운전 방식 결정에 필요한 주요 기술 요인을 제시하고자 한다.

본 연구는 2000년부터 2026년 8월까지 발표된 문헌을 중심으로 저온 수전해 생산 수소의 수분 제거 공정 기술 동향을 검토하였다. 문헌 검색에는 Web of Science, Scopus 및 Google Scholar를 이용하였으며, “water electrolysis”, “hydrogen drying”, “hydrogen purification”, “adsorption dryer”, “adsorbent”, “water vapor adsorption” 및 “adsorbent regeneration”을 기본 검색어로 설정한 후, 흡착제 종류와 PSA, TSA 및 VPSA 등의 재생방식 관련 용어를 추가로 조합하였다. 또한 흡착평형, 흡착동역학 및 재생 원리를 다룬 주요 선행문헌은 출판연도와 관계없이 추가로 검토하였다.

2. 저온 수전해 수소의 수분 특성 및 건조 공정

2.1 생산 수소의 수분 발생 및 배출 특성

저온 수전해를 통해 생산된 수소의 수분 특성은 물방울이나 미스트 형태로 동반되는 액체 상태의 물과 기체 상태로 존재하는 수증기로 구분할 수 있다[2,4,10]. 액상의 물은 스택 출구에서 수소와 함께 배출된 후 주로 기액 분리기에서 제거되지만, 가스 유속이 높거나 기액 분리기의 체류시간이 충분하지 않으면 미세 액적이 후단으로 이동할 수 있다[2,10]. 수증기는 수소가 스택과 기액 분리기 내부의 물과 접촉하는 과정에서 포함되며, 그 농도는 수소의 온도와 절대압력에 영향을 받는다[4,11,12]. 특히 수소가 물과의 평형에 가까운 상태로 배출되는 경우에는 출구온도가 높을수록 수증기 함량이 증가하고, 동일한 온도에서는 전체 압력이 높을수록 수증기 몰분율이 감소한다[2,4].

저온 수전해의 수소측 수분 부하는 스택 내부의 물 이동과 생성가스의 기액 분리과정에서 결정된다. 고분자전해질막 수전해에서는 산화극(anode)에 공급된 물의 일부가 확산, 전기삼투 이동 및 압력차에 의해 막을 통과하여 환원극(cathode)으로 이동한 후 생성 수소와 함께 배출될 수 있다(Fig. 1). 수소와 함께 배출되는 물의 양은 전류밀도와 운전온도에 영향을 받으며, 가압 운전에서는 산화극과 환원극의 차압도 물 이동에 영향을 미칠 수 있다[13-16]. 알칼라인 수전

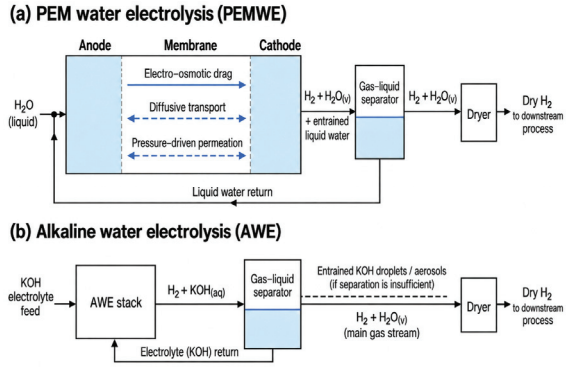


Fig. 1. Moisture generation and transport pathways in PEM and alkaline water electrolysis systems

해에서는 생성 수소가 순환 전해액과 접촉한 상태로 기액 분리기에 유입되므로, 분리기 출구 수소에는 운전 온도에 따른 수증기가 포함된다(Fig. 1). 또한 기액 분리 성능이 충분하지 않으면 미세한 전해 액적이나 에어로졸이 후단으로 동반되어 배관과 흡착제를 오염시킬 수 있으므로, 건조기 유입 수분과 함께 전해액의 동반 여부도 고려해야 한다[2,17].

이러한 수분 발생 및 분리 특성은 최종적으로 기액 분리기 후단의 단위시간당 수분 유출량으로 나타나며, 이 값은 건조기 용량을 결정하는 직접적인 설계 기준이 된다. 동일한 수전해 방식에서도 스택 운전 조건과 기액 분리 성능에 따라 후단으로 전달되는 수분량이 달라질 수 있으며, 이는 전단 냉각 및 응축 공정에서 제거해야 하는 수분량, 흡착제 충전량 및 흡착 주기에 반영된다[4,10].

2.2 습윤 수소의 전처리 및 흡착 건조 공정

스택에서 배출된 수소는 포함된 수분과 잔류 불순물을 단계적으로 제거하여 수소 품질을 확보하기 위해 전처리 및 흡착 건조 공정을 거친다. Fig. 2는 수소측 기액 분리, 냉각, 탈산소, 응축수 분리 및 흡착 건조로 이어지는 대표적인 후단 공정을 나타낸다. 다만 그림은 각 공정의 기능적 연계를 단순화하여 나타낸 것으로, 실제 장치의 적용 여부와 배열은 수전해 방식, 수소 배출 압력, 잔류 산소 농도 및 목표 수소 품질에 따라 달라질 수 있다[2,4,10,18,19].

기액 분리는 스택에서 수소와 함께 배출되는 액체 상태의 물을 제거하는 1차 전처리 단계로, 기액 분리기에서는 가스 유속을 낮추고 충분한 체류시간을 확보하여 비교적 큰 물방울을 제거한다[2,10]. 그러나 유입 속도, 액면 높이와 운전 부하에 따라 분리 성능이 달

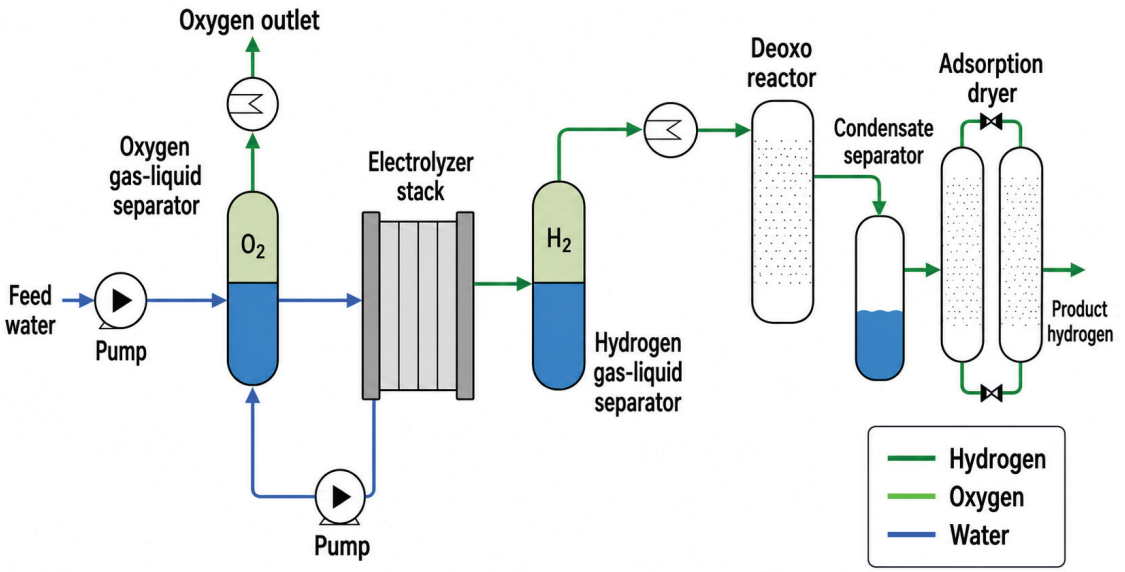


Fig. 2. Schematic diagram of hydrogen production and drying processes in a low-temperature water electrolysis system

라질 수 있으며, 특히 부하 변동으로 가스 유량과 내부 유동이 급격히 변하면 미세 액적 제거 성능이 저하되어 후단으로 동반될 수 있다[20,21]. 알칼라인 수전해에서는 전해액을 포함한 미세 액적이나 에어로졸이 배관과 후단 장치로 이동할 수 있으므로, 필요에 따라 액적 제거기(demister), 세정 집진기(scrubber) 또는 액적 응집 필터(coalescing filter)를 적용하여 전해액 성분을 추가로 제거한다[2,17,21].

냉각과 응축수 분리는 기액 분리 후 수소에 남아 있는 수증기의 일부를 액체 상태의 물로 전환하여 건조기의 수분 부하를 줄이는 공정이다[2,4]. 열교환기에서 수소 온도가 수분의 이슬점 이하로 낮아지면 수증기가 응축되며, 생성된 응축수는 별도의 기액 분리기나 액적 응집 필터를 통해 제거해야 한다[2,4,10]. 응축수가 충분히 배출되지 않으면 액적이 후단으로 다시 동반될 수 있으므로, 냉각 성능과 함께 응축수 분리 및 배출 구조를 고려해야 한다[10,21].

탈산소 반응기는 수소 중 잔류 산소를 제거하는 동시에 후단에서 처리해야 하는 물을 추가로 생성하는 공정 요소이다. 탈산소 반응에서는 산소와 수소의 촉매 반응에 의해 물과 반응열이 발생하므로, 반응기 후단에서 냉각과 응축수 분리가 요구될 수 있다[2,4]. Ligen 등의 50 kW급 알칼라인 수전해 시스템은 약 10 bar에서 운전되었으며, 탈산소 반응기 후단의 수소를 5°C로 냉각하여 시간당 약 50–70 mL의 응축수를 제거하였다. 해당 시스템의 정격 수소생산량 0.85 kg-H_2/h과 응축수 밀도 1.0 kg/L를 기준으로 환산하면, 이는 약 59–82 g-H_2O/kg-H_2에 해당한다[2]. Dik과 Teicht도 탈산소 후 냉각과 응축수 분리를 거쳐 수소를 흡착탑으로 공급하는 공정을 제시하였다[4].

흡착식 건조기는 수분 친화성이 높은 흡착제가 충전된 흡착탑에 수소를 통과시켜 잔류 수증기를 선택적으로 제거하는 장치이다[2,4,22,23]. 전단의 기액 분리와 냉각 및 응축은 액체 상태의 물과 수증기의 일부를 제거하여 건조기의 수분 부하를 낮추지만, 해당 온도와 압력에서 응축되지 않고 남아 있는 수증기까지 충분히 제거하는 데에는 한계가 있다[2,4]. 이러한 한계를 보완하기 위해 잔류 수증기는 후단 흡착층에서 추가로 제거하며, 연속 운전 시에는 흡착제가 포화되기 전에 흡착탑을 전환하고 포화된 흡착제는 가열, 감압, 건조 가스 퍼지 또는 이들의 조합을 통해 재생한다[22-28].

3. 수소 건조용 흡착제의 수분 흡착 특성

3.1 수분 흡착평형 및 동역학

수분 흡착평형은 일정한 온도와 수분분압에서 흡착제가 보유할 수 있는 수분량을 나타내며, 건조기의 처리용량과 흡착 지속시간을 산정하는데 활용된다. 평형흡착량은 일반적으로 수분분압이 증가할수록 증가하고 온도가 상승할수록 감소한다. 수분 몰분율(y_H_2O)은 기체 혼합물 중 수분의 몰 비율이며, 이상기체 혼합물로 가정하면 수분분압(P_H_2O)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{H_2O} = y_{H_2O} \times P_{total} \quad (1)$$

여기서 P_{total}은 전체압력을 의미한다. 따라서 수분 몰분율이 동일하더라도 전체압력이 달라지면 수분분압이 변하며, 이에 따른 평형흡착량의 변화는 수분분압을 통해 반영된다[4,29–31].

평형흡착량과 운전조건의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q^* = f(T, P_{H_2O}) \quad (2)$$

여기서 q^*는 평형흡착량, T는 흡착온도, P_{H_2O}는 수분분압을 의미한다. 흡착등온선은 일정한 온도에서 수분분압과 평형흡착량의 관계를 나타내며, 흡착제의 평형특성 비교와 건조기 처리용량 예측에 사용된다. 수분 흡착평형을 표현하기 위해 Langmuir, Freundlich, Toth, Sips 및 Langmuir–Freundlich 등의 흡착등온식이 사용되며, 적용되는 모형과 매개변수는 흡착제의 특성과 측정 온도 및 수분분압 범위에 따라 달라진다[4,29-31]. Dik과 Teicht는 제올라이트 13X의 수분 흡착평형을

Langmuir–Freundlich 등온식으로 모델링하고, 25, 115 및 145℃에서 수분분압에 따른 평형흡착량의 변화를 정량적으로 제시하였다(Fig. 3)[4].

수분 흡착동역학은 수분이 벌크 기체에서 흡착제 외부표면과 입자 주변의 경막을 거쳐 세공 내부의 흡착점까지 이동하는 속도를 의미하며, 실제 동적흡착량과 파과시간을 결정한다. 전체 흡착속도는 외부 물질전달과 입자 내부 확산의 영향을 함께 받으며, 평형흡착량이 크더라도 물질전달속도가 느리면 흡착제 전체가 이용되기 전에 출구 수분농도가 증가할 수 있다[22,23,31,32].

흡착속도는 선형 구동력(linear driving force, LDF) 모형으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dq}{dt} = k_{LDF}(q^* - q) \tag{3}$$

여기서 q는 시간에 따른 흡착량, k_{LDF}는 선형 구동력 물질전달계수이다. q^*와 q의 차이가 클수록 흡착 구동력이 증가하며, k_{LDF}가 클수록 흡착제가 평형상태에 빠르게 접근한다[4,22,23,31].

건조기에서는 흡착속도에 따라 흡착층 내부의 수분 이동과 출구 수분농도가 달라지며, 이러한 동적 흡착거동은 운전시간 또는 누적 수소 처리량에 따른 출구 수분농도의 변화인 파과곡선으로 나타낼 수 있다. 흡착이 진행되면 질량전달구간이 흡착층 입구에서 출구 방향으로 이동하며, 출구 수분농도가 설정 기준에 도달하는 시점을 파과로 정의한다. 물질전달속도가 빠르면 질량전달구간이 좁게 형성되어 파과 전까지 흡착층의 상당 부분이 이용되는 반면, 물질전달속도가 느리면 흡착층 일부가 충분히 이용되기 전에 파과가 발생한다[22,23,31,32]. 따라서 평형흡착량은 주어진 온도와 수분분압에서 흡착제가 보유할 수 있는 수분량을 나타내며, 파과시간과 유효 동적흡착량은 실제 건조기 운전에서 이용되는 수분 제거용량을 나타낸다. Jacobs 등은 제올라이트 4A의 흡착-재생 주기에서 출구 상대습도와 흡착층 온도 변화를 함께 측정하였으며, 습윤가스 공급에 따라 출구 상대습도가 증가하고 가열 및 건조가스 공급 과정에서 감소하는 거동을 보고하였다(Fig. 4)[33].

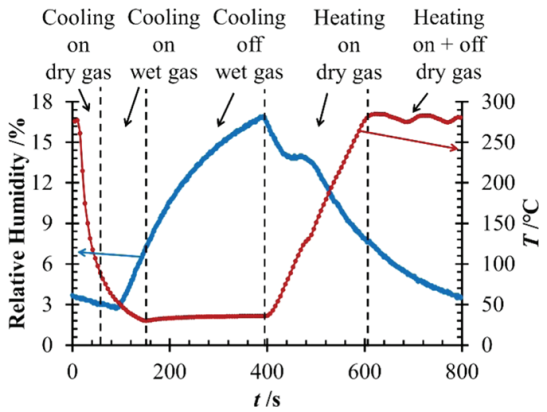


Fig. 4. Breakthrough curve (blue) and corresponding temperature profile (red) for zeolite 4A over a complete experimental cycle. Dashed lines indicate the imposed temperature and gas-composition conditions. (Reproduced from Ref. 33 under the CC BY-NC-ND 4.0 license)

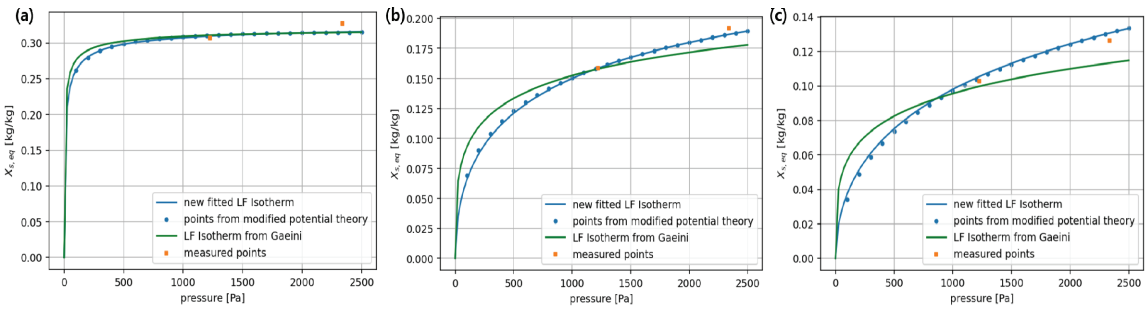


Fig. 3. Water adsorption equilibrium of zeolite 13X described by the Langmuir–Freundlich isotherm at (a) 25℃, (b) 115℃, and (c) 145℃. (Adapted from Ref. 4 under the CC BY 4.0 license)

3.2 주요 수분 흡착제

수소 건조기용 흡착제는 목표 수분농도에서의 유효 흡착량과 수분 선택성을 중심으로 선정한다. 대표적인 상용 수분 흡착제에는 활성알루미나, 실리카겔 및 제올라이트계 분자체가 있으며, 이들은 표면의 극성, 세공크기와 분포 및 수분과의 결합세기가 서로 다르다. 이러한 특성 차이는 흡착제별로 적용 가능한 수분분압 범위와 재생조건에 영향을 미친다.

주요 흡착제의 물리화학적 특성과 수분 흡착특성은 Table 1에 정리하였다. 특히 낮은 노점을 확보하기 위한 심층건조에서는 목표 출구 수분농도에 해당하는 저분압 영역의 평형흡착량이 중요하다. 약 25℃와 100 Pa 이하에서 보고된 문헌값을 비교하면, 제올라이트 5A와 13X는 실리카겔 및 활성알루미나보다 낮은 수분분압에서도 높은 평형흡착량을 나타냈다[29,34]. 따라서 활성알루미나와 실리카겔은 비교적 높은 수분부하를 처리하는 전처리에, 제올라이트계 분자체는 낮은 노점이 요구되는 최종 건조에 유리하다. 다만 동일한 계열의 흡착제도 결정구조, 제조조건, 성형방법 및 결합제 함량에 따라 실제 흡착성능이 달라질 수 있다.

3.2.1 활성알루미나

활성알루미나는 γ-Al_2O_3와 χ-Al_2O_3를 주성분으로 하는 다공성 산화알루미나로, 높은 비표면적과 발달된 세공구조를 갖는다. 표면에는 서로 다른 결합세기를 갖는 수산기가 분포하며, 물 분자는 이러한 극성 흡착점과의 상호작용을 통해 흡착된다. 낮은 수분분압에서는 강한 표면 흡착점이 우선적으로 이용되며, 수분분압이 증가하면 다층흡착과 세공 충전이 진행된다[32,34-36].

활성알루미나의 수분 흡착특성은 비표면적뿐만 아니라 세공크기 분포, 표면 수산기 농도 및 열처리 조건에 따라 달라진다. 흡착속도는 입자 외부의 경막 물질전달과 세공 내부 확산에 의해 영향을 받으며, 입자크기가 작고 가스 유속이 높을수록 외부 및 내부 물질전달저항이 감소할 수 있다. 흡착온도가 상승하면 수분의 확산속도는 증가할 수 있으나 평형흡착량은 감소한다. 따라서 온도 상승이 반드시 동적 수분 제거성능의 향상으로 이어지는 것은 아니며, 실제 파과거동은 흡착속도와 평형흡착량의 상대적인 영향에 따라 달라진다[32,37,38].

활성알루미나는 높은 수분부하를 처리할 수 있고 성형체의 기계적 강도와 내마모성이 비교적 우수하여 건조기의 전처리층 또는 벌크 수분 제거용 흡착제로 사용된다. 또한 제올라이트계 분자체보다 수분과의 결합이 상대적으로 약해 비교적 낮은 온도에서 재생할 수 있다. 다만 수분분압이 매우 낮아지면 평형흡착량이 감소하므로, 낮은 출구 수분농도를 단독으로 확보하는 데에는 한계가 있다. 이에 따라 활성알루미나는 제올라이트 전단에 배치되어 유입 수분부하와 후단 흡착제의 재생부하를 줄이는 용도로 활용된다[22,23,39,40].

3.2.2 실리카겔

실리카겔은 $SiO_2 \cdot xH_2O$로 표현되는 비정질 함수이산화규소로, 실록산 결합으로 이루어진 골격과 표면 실라놀기를 갖는 다공성 흡착제이다. 물 분자는 실라놀기와의 수소결합을 통해 우선 흡착되며, 수분분압이 증가하면 이미 흡착된 물 분자를 중심으로 수소결합 네트워크가 형성된다. 이후 세공 내 다층흡착과 모세관 응축이 진행되면서 수분 흡착량이 증가한다[41–45].

실리카겔의 수분 흡착특성은 평균 세공크기와 세공부피에 크게 좌우되며, 제조조건에 따라 미세세공 또는 중간세공이 발달한 다양한 제품으로 구분된다. 세공크기가 작은 실리카겔은 비교적 낮은 수분분압에서 흡착이 시작되는 반면, 세공크기와 세공부피가 큰 실리카겔은 수분분압이 높은 영역에서 더 많은 수분을 수용할 수 있다. 흡착과 탈착 과정에서 모세관 응축과 증발이 서로 다른 압력범위에서 발생하므로 흡착이력이 나타날 수 있으며, 반복적인 수분 흡착과 재생은 세공구조와 성형체의 안정성에 영향을 줄 수 있다[42-45].

실리카겔은 높은 수분분압에서 흡착용량이 크고

Table 1 Comparison of the physicochemical properties and water adsorption characteristics of representative desiccants

Property	Activated alumina [22,23,32,34-40,44,48,49]	Silica gel [22,23,29,39,42-45,48-51]	A-type zeolites [22,23,33,40,45-47,50-53]	Zeolite 13X [4,22,23,29-31,33,40,46,47,51,52,54]
Composition and structure	- Porous transition alumina composed mainly of χ and/or γ-Al_2O_3 - $Al_2O_3 \geq 90$ wt%, depending on grade	- Amorphous porous hydrated silica - $SiO_2 \cdot xH_2O$ - $SiO_2 \geq 95$ wt%	- LTA-type aluminosilicate - Si/Al ≃ 1.0 - 3A: K^+-exchanged - 4A: Na^+ form - 5A: Ca^{2+}-exchanged	- FAU-X-type aluminosilicate - Si/Al ≃ 1.0–1.5 - Predominantly Na^+ form
Characteristic pore diameter	- Mesopore diameter: 2–10 nm	- Mesopore diameter: 2–25 nm	- Effective pore opening - 3A: ≃ 3 Å - 4A: ≃ 4 Å - 5A: ≃ 5 Å	- Effective pore opening ≃10 Å
Specific surface area	- 200–350 $m^2 \cdot g^{-1}$	- 500–800 $m^2 \cdot g^{-1}$	- 600–800 $m^2 \cdot g^{-1}$	- 600–850 $m^2 \cdot g^{-1}$
Typical pore volume	- Total pore volume: 0.35–0.60 $cm^3 \cdot g^{-1}$	- Total pore volume: 0.40–1.00 $cm^3 \cdot g^{-1}$	- Micropore volume: 0.25–0.35 $cm^3 \cdot g^{-1}$	- Micropore volume: 0.30–0.40 $cm^3 \cdot g^{-1}$
Representative equilibrium water uptake	- 15–30 wt%	- 20–40 wt%	- 18–23 wt%	- 20–30 wt%
Equilibrium H2O uptake at low partial pressure, q* (mol/kg), $P_{H_2O} \leq 100$ Pa, approximately 25°C)	- 3.29 at 100 Pa	- 0.98 at 27.1 Pa - 2.07 at 88.9 Pa	- 5A: 7.44 at 14.7 Pa - 5A: 8.61 at 36.0 Pa	- 6.25 at 3.5 Pa - 8.40 at 15.0 Pa - 10.18 at 44.0 Pa
Typical regeneration temperature	- 180–300°C	- 100–180°C	- 3A: 200–260°C - 4A/5A: 250–315°C	- 230–315°C
Advantages	- High mechanical strength - High bulk-moisture capacity - Relatively low material cost - Relatively high resistance to liquid-water exposure	- High water uptake at intermediate-to-high humidity - Relatively low regeneration temperature - Low regeneration-energy requirement	- Strong water affinity at low water partial pressure - Very low achievable outlet moisture concentration - High water selectivity, particularly for 3A	- Broad adsorption range - High water capacity - Simultaneous adsorption of water and polar impurities
Limitations	- Lower deep-drying capability than molecular sieves - Adsorption–desorption hysteresis - Performance dependent on surface condition	- Rapid decrease in adsorption capacity at low water activity - Limited deep-drying capability - Possible degradation under severe hydrothermal conditions	- Relatively high regeneration-energy requirement - 4A and 5A may co-adsorb CO_2 and other small molecules - Sensitive to liquid water, oil and heavy contaminants	- Relatively high regeneration-energy requirement - Competitive adsorption by CO_2 and other polar species - Susceptible to pore contamination
Typical application	- Bulk-moisture removal - Pre-drying - Protection of downstream molecular-sieve beds	- Pre-drying - Removal of high moisture loads - Humidity-control applications	- Final-stage deep drying - 3A: selective water removal - 4A/5A: water and small-molecule removal	- Final-stage deep drying - Simultaneous removal of water, CO_2 and other polar impurities

활성알루미나 및 제올라이트계 분자체보다 낮은 온도에서 재생할 수 있어 유입가스의 수분부하를 줄이는 전처리 흡착제로 사용된다. 그러나 수분분압이 낮은 영역에서는 제올라이트계 분자체보다 수분 친화도가 낮아, 매우 낮은 출구 수분농도가 요구되는 최종 건조에는 적용이 제한된다. 또한 액상의 물에 장시간 노출되거나 급격한 온도변화가 반복되면 입자의 균열과 미분 발생이 증가할 수 있으므로, 건조기 전단에서 액적을 충분히 제거한 후 적용된다[22,23,29,39].

3.2.3 제올라이트계 분자체

제올라이트계 분자체는 SiO_4와 AlO_4 사면체가 규칙적으로 연결된 결정성 알루미노실리케이트로, 균일한 크기의 미세세공과 교환성 양이온을 갖는다. 골격 내 Si^{4+}의 일부가 Al^{3+}로 치환되면서 형성된 음전하는 Na^+, K^+ 및 Ca^{2+} 등의 양이온으로 보상된다. 물분자는 세공 내부의 양이온과 강하게 상호작용하므로 제올라이트계 분자체는 낮은 수분분압에서도 높은 수분 친화도를 나타내며, 낮은 노점이 요구되는 수소의 최종 건조에 주로 적용된다[22,23,29-31,40].

A형 제올라이트계 분자체에는 3A, 4A 및 5A가 있으며, 교환된 양이온의 종류에 따라 유효 세공입구가 각각 약 3, 4 및 5 Å로 달라진다. 3A는 K^+가 치환된 형태로 비교적 큰 분자의 세공 진입을 제한하며, 4A는 Na^+ 형태, 5A는 Ca^{2+}가 일부 치환된 형태이다. X형 제올라이트인 13X는 A형보다 큰 약 10 Å의 세공입구와 발달된 미세세공을 갖고 있어 높은 수분 흡착용량을 나타내지만, 수분 이외의 극성 성분도 함께 흡착할 수 있다[22,23,46,47].

제올라이트계 분자체는 낮은 수분분압에서의 평형흡착량이 높아 건조기 출구의 수분농도와 노점을 낮추는 데 유리하다. Ligen 등은 50 kW급 알칼라인 수전해 수소의 진공보조 압력변동흡착 공정에 4A 제올라이트를 적용하여 1 ppm 미만의 출구 수분농도를 확보한 사례를 보고하였다[2]. 또한, Son 등은 25℃, 수분분압 6.4 Pa에서 13X의 수분 평형흡착량을 8.6 ± 0.9 mol/kg으로 측정하였다[30]. 이러한 저분압 흡착특성은 13X를 낮은 노점이 요구되는 심층건조층에 적용하는 데 유리하다. 반면 수분과의 강한 결합으로 인해 흡착열과 재생에너지 요구량이 크며, 재생이 충분하지 않으면 잔류수분에 의해 다음 흡착단계의 유효용량이 감소한다. 또한 액적이나 오염물질이 세공을 막으면 흡착성능이 저하될 수 있으므로 전단 기액분리 및 여과공정과 함께 운전된다[4,22,23,31].

4. 흡착식 건조기의 재생 및 운전 기술

흡착식 건조기의 연속운전은 흡착과 재생의 반복 및 재생된 흡착탑을 다시 흡착단계에 투입하는 탑 전환을 통해 이루어진다. 재생은 흡착층의 온도를 높이거나 재생압력과 수분분압을 낮추는 방식으로 이루어지며, 압력변동흡착, 온도변동흡착, 진공보조 압력변동흡착 및 온도–압력 복합재생으로 구분할 수 있다(Table 2). 재생방식에 따라 흡착 이후의 운전단계와 재생시간이 달라지며, 재생 후 잔류수분량은 다음 흡착주기의 순환 흡착용량과 파과시간에 영향을 미친다[22,23,26-28].

재생방식과 함께 흡착탑 수와 운전순서도 연속운전성과 공정 효율에 영향을 미친다. 3탑 이상의 다중 흡착탑에서는 한 탑에서 흡착을 수행하는 동안 나머지 탑에서 재생과 냉각 또는 재가압을 각각 수행하도록 운전단계를 배치할 수 있다. Santos 등은 수전해 생산 수소 건조용 3탑 진공보조 압력변동흡착공정에서 각 흡착탑의 운전위상에 120°의 차이를 두어 흡착, 진공재생 및 퍼지, 재가압 단계를 탑별로 분담하였다. 해당 공정은 최적 운전조건에서 98.98%의 수소 회수율과 -66.76℃의 이슬점을 달성하였다[55]. 또한 Yang 등은 가스 건조용 3탑 온도변동흡착공정에서 냉각 중인 흡착탑에서 배출된 가스를 가열기를 거쳐 재생 중인 흡착탑에 열운반가스(heat carrier gas, HCG)로 공급하였다. 모사 결과, 2탑 공정 대비 단위 열소비를 약 40% 감소시킬 수 있음을 보고하였다[56]. Ahn 등은 4탑 압력변동흡착공정에서 흡착이 종료된 고압 탑을 압력이 서로 다른 두 탑과 순차적으로 연결하여, 잔류 수소를 각 탑의 재가압에 이용하는 2단 압력평형 운전을 적용하였다. 이를 통해 방출 감압

Table 2 Comparison of adsorbent regeneration methods

Regeneration method	Main driving force	Regeneration sequence	Main characteristics	Limitations
Temperature swing adsorption	- Increase in adsorbent temperature	- Heating, temperature holding, dry-gas purging, and cooling	- Effective desorption of strongly adsorbed water	- Thermal energy consumption and long heating and cooling periods
Pressure swing adsorption	- Reduction in regeneration pressure	- Depressurization, dry-gas purging, and repressurization	- Short-cycle regeneration without bed heating	- Possible incomplete desorption and hydrogen consumption for purging
Vacuum pressure swing adsorption	- Reduction below atmospheric pressure	- Depressurization, vacuum regeneration, and repressurization	- Enhanced desorption at relatively low temperature	- Vacuum-pump power consumption and gas-tight equipment
Combined temperature–pressure swing	- Heating with depressurization or vacuum	- Depressurization or vacuum, heating, purging, and cooling	- Lower regeneration temperature or reduced purge-gas demand	- Additional heating and pressure-reduction equipment

(blowdown) 전에 탑 내부의 수소를 일부 회수할 수 있다[57].

2탑 구성에서도 압력평형을 포함한 운전순서에 역충전(backfill)을 추가하여 재가압 과정의 탑 내부 가스 조성을 조절할 수 있다. 역충전은 원료가스에 의한 재가압 전에 제품 수소를 흡착 흐름의 반대 방향으로 공급하여 탑 내부의 수소농도를 높이는 단계이다. Ahn 등은 역충전을 포함한 7단계 2탑 압력변동흡착공정을 연구하였으며, 역충전에 의해 제품 수소의 순도는 향상되지만 수소 회수율은 감소할 수 있음을 보고하였다[58]. 따라서 재생방식, 흡착탑 수 및 운전순서는 목표 수분농도와 제품 순도를 만족하는 범위에서 퍼지가스 사용량, 수소 회수율 및 재생에너지 소비를 고려하여 선정할 필요가 있다.

4.1 압력변동흡착

압력변동흡착(pressure swing adsorption, PSA)은 흡착압력보다 낮은 압력으로 흡착탑을 감압하여 수분의 평형흡착량을 감소시키는 방식이다. 흡착 이후에는 감압, 퍼지 및 재가압이 순차적으로 이루어지며, 가열과 냉각이 포함되지 않아 온도변동흡착보다 짧은 주기로 운전할 수 있다[22,23,27].

압력변동흡착의 재생성능은 흡착압력과 재생압력의 차이, 퍼지가스의 수분농도와 유량 및 퍼지시간에 의해 좌우된다. 재생압력을 낮추거나 건조한 퍼지가스의 사용량을 증가시키면 잔류수분량을 줄일 수 있지만, 제품 수소를 퍼지가스로 사용하는 경우 수소 회수율이 감소한다. 또한 수분과의 결합력이 강한 흡착제에서는 압력 저하만으로 충분한 탈착이 이루어지지 않아 반복운전에 따라 순환 흡착용량이 감소할 수 있다[22,23,27].

압력변동흡착의 운전조건은 단일 재생단계에서 도달한 압력보다 반복주기에서의 파과시간과 출구 수분농도를 기준으로 평가된다. 재생압력, 퍼지량 또는 퍼지시간이 부족하면 다음 흡착주기의 파과가 앞당겨지므로, 순환 정상상태에서 파과시간과 제품 수분농도가 일정하게 유지되는 조건을 기준으로 재생주기를 설정한다[22,23,27].

4.2 온도변동흡착

온도변동흡착(temperature swing adsorption, TSA)은 흡착층을 가열하여 수분의 평형흡착량을 낮추고, 탈착된 수분을 건조한 재생가스로 배출하는 방식이다. 수분과의 결합력이 강한 제올라이트계 흡착제도 비교적 충분히 재생할 수 있어 낮은 출구 수분농도가 요구되는 건조공정에 적용된다. 반면 흡착제와 흡

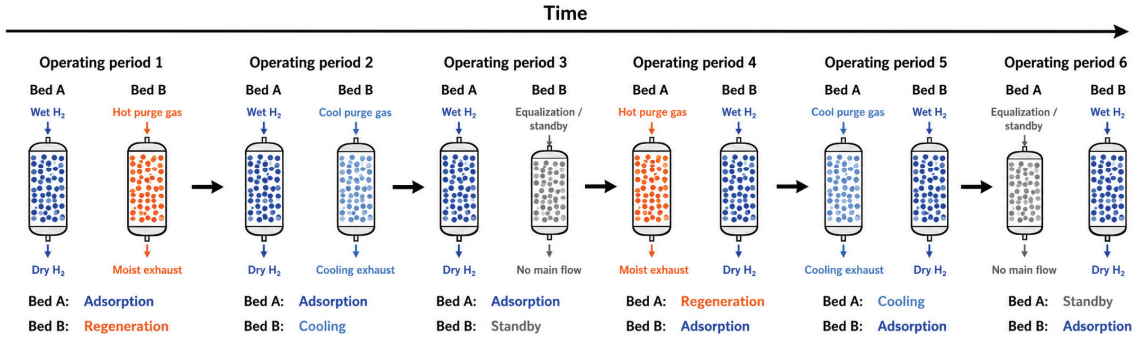


Fig. 5. Conceptual operating sequence of a two-bed adsorption dryer using temperature-swing regeneration

착탑을 가열하는 데 열에너지가 소요되며, 재생 후 흡착온도까지 낮추는 냉각단계가 포함되어 전체 운전주기가 길어진다[22,23,26,59].

온도변동흡착의 재생과정은 일반적으로 가열, 퍼지와 냉각으로 구성된다(Fig. 5). 재생온도가 상승하면 평형흡착량은 감소하지만, 과도한 온도는 에너지 소비를 증가시키고 흡착제의 열적 안정성에 영향을 줄 수 있다. 재생가스 유량은 탈착된 수분의 배출속도에 영향을 미치며, 유량이 부족하면 흡착층이 설정온도에 도달한 이후에도 수분 배출이 지연될 수 있다. 따라서 재생 종료시점은 가열시간만으로 정하기보다 흡착층 온도와 재생가스 출구 수분농도의 변화를 함께 이용하여 평가할 수 있다[22,23,26,33].

냉각은 재생된 흡착층의 온도를 다음 흡착주기에 적합한 수준으로 낮추는 과정이다. 충분히 냉각되지 않은 흡착층은 초기 평형흡착량이 낮아 탑 전환 직후 출구 수분농도가 증가할 수 있다. 이에 따라 냉각 종료시점은 흡착층 내부 온도와 전환 후 초기 수분농도를 기준으로 설정된다[22,23,26].

4.3 진공보조 및 온도–압력 복합재생

진공보조 압력변동흡착(vacuum pressure swing adsorption, VPSA)은 재생압력을 대기압 이하로 낮춰 PSA보다 낮은 수분분압을 형성하는 방식이다. 낮은 재생압력은 수분 탈착의 구동력을 증가시키므로 재생 후 잔류수분량과 퍼지가스 사용량을 줄일 수 있다. 반면 진공펌프와 부대설비가 추가되고, 진공도가 높아질수록 재생에 필요한 동력소비가 증가한다[22,23,27,28].

진공보조 압력변동흡착의 주요 운전변수는 재생압력, 퍼지유량 및 진공 유지조건이다. 재생압력을 낮추면 탈착은 촉진되지만 진공펌프의 동력부하도 증가하므로, 최저 재생압력 자체보다 목표 순환 흡착용량을 확보할 수 있는 압력범위가 중요하다. 재생조건은 반복운전에서 파과시간과 제품 수분농도가 유지되는 범위를 기준으로 설정된다[22,23,27].

온도–압력 복합재생은 감압 또는 진공상태에서 흡착층을 가열하여 온도 상승과 수분분압 감소를 동시에 이용하는 방식이다. 두 구동력이 함께 작용하므로 대기압에서 가열하는 온도변동흡착보다 낮은 재생온도 또는 적은 퍼지가스량으로 수분을 탈착할 수 있다. 이는 수분 친화도가 높은 흡착제에서 압력변동만으로 충분한 용량 회복이 어려운 경우에 적용될 수 있다[28].

복합재생에서는 재생온도, 재생압력 및 퍼지조건이 서로 연계되어 탈착성능을 결정한다. 재생압력을 낮추면 필요한 가열온도나 퍼지량을 줄일 수 있으나, 가열설비와 감압 또는 진공설비가 함께 사용되어 장치 구성과 제어단계가 증가한다. 따라서 복합재생의 운전조건은 특정 변수의 최대화보다 재생 후 잔류수분량, 에너지소비 및 수소 사용량의 균형을 기준으로 설정된다[28].

5. 결 론

저온 수전해 수소의 흡착식 건조 기술을 수분 발생과 전처리, 흡착특성 및 재생방식의 관점에서 검토하였다.

1) 건조기의 설계 수분부하는 스택 출구가 아니라 기액 분리, 냉각 및 응축을 거친 건조기 입구의 수분농도와 유량을 기준으로 산정해야 한다. PEM 수전해에서는 환원극 출구의 액상 물을, 알칼라인 수전해에서는 전해질을 포함한 액적의 유입을 전단에서 관리해야 한다. 탈산소 공정이 설치된 경우에는 반응으로 생성된 물을 제거한 후의 조건을 건조기 설계에 반영한다.
2) 흡착제 충전량과 탑 전환주기는 평형흡착량만으로 결정하기보다 실제 유입조건에서의 파과거동을 기준으로 설정해야 한다. 특히 유입 수분부하가 변하거나 재생이 반복되는 조건에서도 목표 출구 수분농도에 도달하기 전에 탑을 전환할 수 있는지 확인할 필요가 있다.
3) 전처리 후에도 수분부하가 높고 낮은 출구 수분농도가 요구된다면, 활성알루미나 또는 실리카겔로 유입 수분을 먼저 처리하고 제올라이트계 분자체를 최종 건조층에 배치하는 구성을 검토할 수 있다. 흡착제의 조합은 목표 수분농도뿐 아니라 재생조건과 전단에서 제거되지 않은 액적 및 오염물질을 고려하여 결정해야 한다.
4) 재생방식은 목표 출구 수분농도를 반복 운전에서도 유지할 수 있는지를 기준으로 선정해야 한다. 압력변동흡착으로 충분한 순환 흡착용량을 확보할 수 있다면 퍼지수소 사용량과 회수율을 함께 평가하고, 수분 탈착이 부족한 경우에는 진공보조 또는 가열재생을 검토한다. 온도변동흡착을 적용할 때에는 재생에 필요한 열량뿐 아니라 냉각시간이 탑 전환주기에 미치는 영향도 반영해야 한다.

후 기

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. RS-2021-KP002454, No. RS-2026-25535168).

References

1. International Energy Agency, “Global hydrogen review 2026”, International Energy Agency, Paris, 2026, Retrieved from https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2026.
2. Y. Ligen, H. Vrubel, and H. Girault, “Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell vehicles”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 18, 2020, pp. 10639-10647, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.035.
3. S. Kwon, S. Eom, J. S. Yang, and G. Choi, “Development of an in-house code for dry tower of heat transfer analysis in hydrogen purification system”, Energies, Vol. 16, No. 13, 2023, pp. 5090, doi: https://doi.org/10.3390/en16135090.
4. K. Dik and C. Teicht, “Simulation of hydrogen drying via adsorption in offshore hydrogen production”, Energies, Vol. 18, No. 18, 2025, pp. 4906, doi: https://doi.org/10.3390/en18184906.
5. P. Haug, M. Koj, and T. Turek, “Influence of process conditions on gas purity in alkaline water electrolysis”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 15, 2017, pp. 9406-9418, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.111.
6. P. Haug, B. Kreitz, M. Koj, and T. Turek, “Process modelling of an alkaline water electrolyzer”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No. 24, 2017, pp. 15689-15707, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.031.
7. A. L. Buck, “New equations for computing vapor pressure and enhancement factor”, Journal of Applied Meteorology, Vol. 20, No. 12, 1981, pp. 1527-1532, doi: https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2.
8. International Organization for Standardization, “ISO 14687:2025, Hydrogen Fuel Quality—Product Specification”, 2nd ed., International Organization for Standardization, Switzerland, 2025. Retrieved from https://www.iso.org/standard/82660.html.
9. L. Zeng, D. Zhu, and H. Zhang, “Simulation and experi-

mental research on the adsorption bed temperature distribution during hydrogen purification", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 37, No. 17, 2012, pp. 12784-12792, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.157.

10. X. Wang, A. G. Star, and R. K. Ahluwalia, "Performance of polymer electrolyte membrane water electrolysis systems: configuration, stack materials, turndown and efficiency", Energies, Vol. 16, No. 13, 2023, pp. 4964, doi: https://doi.org/10.3390/en16134964.
11. P. H. Huang, "Humidity standard of compressed hydrogen for fuel cell technology", ECS Transactions, Vol. 12, No. 1, 2008, pp. 479-484, doi: https://doi.org/10.1149/1.2921574.
12. K. Ishida, M. Kosaka, and M. Monde, "Dew and frost point estimation of residual water in high pressure hydrogen for conditions of hydrogen filling stations", Journal of the Japan Society of Thermophysical Properties, Vol. 28, No. 3, 2015, pp. 121-126, doi: https://doi.org/10.2963/jjtp.28.121.
13. H. S. Shin and B. S. Oh, "Water transport according to temperature and current in PEM water electrolyzer", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 1, 2020, pp. 56-63, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.209.
14. S. Motupally, L. Mishra, R. S. Thiagarajan, and V. R. Subramanian, "Modeling water transport in polymer electrolyte membrane electrolyzers using a one- dimensional transport model", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 62, 2024, pp. 352-361, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.318.
15. V. Liso, G. Savoia, S. S. Araya, G. Cinti, and S. K. Kær, "Modelling and experimental analysis of a polymer electrolyte membrane water electrolysis cell at different operating temperatures", Energies, Vol. 11, No. 12, 2018, pp. 3273, doi: https://doi.org/10.3390/en11123273.
16. G. Correa, P. Marocco, P. Muñoz, T. Falagüerra, D. Ferrero, and M. Santarelli, "Pressurized PEM water electrolysis: dynamic modelling focusing on the cathode side", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 47, No. 7, 2022, pp. 4315-4327, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.097.
17. L. Deleebeeck, E. Santanach-Carreras, and D. Aymé-Perrot, "Review and recommendations on contaminants quantification in H_2 and O_2 streams produced by alkaline water electrolysis", Fuel, Vol. 428, 2027, pp. 140247, doi: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.140247.
18. G. Sakas, P. Rentschler, A. Kosonen, P. Holtappels, V. Ruuskanen, P. Kauranen, J. Ahola, and R. Dittmeyer, "Dynamic mass and energy balance model of a 50 kW proton exchange membrane electrolyzer system", Applied Energy, Vol. 382, 2025, pp. 125199, doi: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125199.
19. J. J. Caparrós Mancera, F. Segura Manzano, J. M. Andújar, F. J. Vivas, and A. J. Calderón, "An optimized balance of plant for a medium-size PEM electrolyzer: design, control and physical implementation", Electronics, Vol. 9, No. 5, 2020, pp. 871, doi: https://doi.org/10.3390/electronics9050871.
20. Y. Lee and D. J. Hur, "Study of internal flow characteristics in gas-liquid separator of water electrolysis system using numerical analysis", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 23, No. 11, 2024, pp. 88-96, doi: https://doi.org/10.14775/ksmpe.2024.23.11.088.
21. G. Li, W. Fan, J. Zhao, Y. Dang, X. Ji, and G. He, "Structural design and numerical simulation of a combined gas-liquid separator for renewable energy- driven water electrolysis systems", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 209, 2026, pp. 153612, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153612.
22. D. M. Ruthven, "Principles of Adsorption and Adsorption Processes", John Wiley & Sons, USA, 1984.
23. R. T. Yang, Gas Separation by Adsorption Processes, Butterworths, Boston, MA, USA, 1987, pp. 352 doi: https://doi.org/10.1016/C2013-0-04269-7.
24. H. Ahn and C. H. Lee, "Adsorption dynamics of water in layered bed for air-drying TSA process", AIChE Journal, Vol. 49, No. 6, 2003, pp. 1601-1609, doi: https://doi.org/10.1002/aic.690490623.
25. J. Nastaj and B. Ambrożek, "Analysis of gas dehydration in TSA system with multi-layered bed of solid adsorbents", Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 96, 2015, pp. 44-53, doi: https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.08.001.
26. F. Berg, C. Pasel, T. Eckardt, and D. Bathen, "Temperature swing adsorption in natural gas processing: a concise overview", ChemBioEng Reviews, Vol. 6, No. 3, 2019, pp. 59-71, doi: https://doi.org/10.1002/cben.201900005.
27. S. Sircar, "Pressure swing adsorption", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 41, No. 6, 2002, pp. 1389-1392, doi: https://doi.org/10.1021/ie0109758.
28. A. Aleghafouri and M. Davoudi, "Modeling and simulation of a pressure–temperature swing adsorption process for dehydration of natural gas", Adsorption, Vol. 24, 2018, pp. 121-133, doi: https://doi.org/10.1007/s10450-017-9924-z.
29. Y. Wang and M. D. LeVan, "Adsorption equilibrium of carbon dioxide and water vapor on zeolites 5A and 13X and silica gel: pure components", Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 54, No. 10, 2009, pp. 2839-2844,

doi: https://doi.org/10.1021/je800900a.
30. K. N. Son, T. M. J. Richardson, and G. E. Cmarik, "Equilibrium adsorption isotherms for H_2O on zeolite 13X", Journal of Chemical &Engineering Data, Vol. 64, No. 3, 2019, pp. 1063-1071, doi: https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00961.
31. B. Mette, H. Kerskes, H. Drück, and H. Müller-Steinhagen, "Experimental and numerical investigations on the water vapor adsorption isotherms and kinetics of binderless zeolite 13X", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 71, 2014, pp. 555-561, doi: https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.12.061.
32. L. Marcussen, "The kinetics of water adsorption on porous alumina", Chemical Engineering Science, Vol. 25, No. 9, 1970, pp. 1487-1499, doi: https://doi.org/10.1016/0009-2509(70)85070-9.
33. J. H. Jacobs, C. E. Deering, K. L. Lesage, M. J. Stashick, and R. A. Marriott, "Rapid cycling thermal swing adsorption apparatus: commissioning and data analyses for water adsorption of zeolites 4A and 13X over 2000 cycles", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 60, No. 19, 2021, pp. 7487-7494, doi: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c00469.
34. A. Serbezov, "Adsorption equilibrium of water vapor on F-200 activated alumina", Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 48, No. 2, 2003, pp. 421-425, doi: https://doi.org/10.1021/je025616d.
35. R. Desai, M. Hussain, and D. M. Ruthven, "Adsorption of water vapour on activated alumina. I — equilibrium behaviour", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 70, No. 4, 1992, pp. 699-706, doi: https://doi.org/10.1002/cjce.5450700412.
36. C. Cardenas, D. Farrusseng, C. Daniel, and R. Aubry, "Modeling of equilibrium water vapor adsorption isotherms on activated carbon, alumina and hopcalite", Fluid Phase Equilibria, Vol. 561, 2022, pp. 113520, doi: https://doi.org/10.1016/j.fluid.2022.113520.
37. R. Desai, M. Hussain, and D. M. Ruthven, "Adsorption on activated alumina. II — kinetic behaviour", The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 70, No. 4, 1992, pp. 707-715, doi: https://doi.org/10.1002/cjce.5450700413.
38. L. Marcussen, "The influence of temperature on effective diffusivity and adsorption kinetics for humid air—porous alumina", Chemical Engineering Science, Vol. 29, No. 10, 1974, pp. 2061-2069, doi: https://doi.org/10.1016/0009-2509(74)80220-4.
39. D. Ferreira, R. Magalhães, P. Taveira, and A. Mendes, "Effective adsorption equilibrium isotherms and breakt hroughs of water vapor and carbon dioxide on different adsorbents", Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 50, No. 17, 2011, pp. 10201-10210, doi: https://doi.org/10.1021/ie2005302.
40. J. H. Kim, C. H. Lee, W. S. Kim, J. S. Lee, J. T. Kim, J. K. Suh, and J. M. Lee, "Adsorption equilibria of water vapor on alumina, zeolite 13X, and a zeolite X/activated carbon composite", Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 48, No. 1, 2003, pp. 137-141, doi: https://doi.org/10.1021/je0201267.
41. K. M. C. Santos, T. R. Menezes, M. R. Oliveira, T. S. L. Silva, K. S. Santos, V. A. Barros, D. C. Melo, A. L. Ramos, C. C. Santana, E. Franceschi, C. Dariva, S. M. Egues, G. R. Borges, and J. F. De Conto, "Natural gas dehydration by adsorption using MOFs and silicas: a review", Separation and Purification Technology, Vol. 276, 2021, pp. 119409, doi: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119409.
42. Z. Z. Xia, C. J. Chen, J. K. Kiplagat, R. Z. Wang, and J. Q. Hu, "Adsorption equilibrium of water on silica gel", Journal of Chemical &Engineering Data, Vol. 53, No. 10, 2008, pp. 2462-2465, doi: https://doi.org/10.1021/je800019u.
43. H. Li, M. Ai, B. Liu, S. Zheng, and G. Zong, "Water vapor sorption on surfactant-templated porous silica xerogels", Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 143, No. 1, 2011, pp. 1-5, doi: https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.01.026.
44. B. Dawoud and Y. I. Aristov, "Experimental study on the kinetics of water vapor sorption on selective water sorbents, silica gel and alumina under typical operating conditions of sorption heat pumps", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 46, No. 2, 2003, pp. 273-281, doi: https://doi.org/10.1016/S0017-9310(02)00288-0.
45. M. J. Goldsworthy, "Measurements of water vapour sorption isotherms for RD silica gel, AQSOA-Z01, AQSOA-Z02, AQSOA-Z05 and CECA zeolite 3A", Microporous and Mesoporous Materials, Vol. 196, 2014, pp. 59-67, doi: https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2014.04.046.
46. K. M. Kim, H. T. Oh, S. J. Lim, K. Ho, Y. Park, and C. H. Lee, "Adsorption equilibria of water vapor on zeolite 3A, zeolite 13X, and dealuminated Y zeolite", Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 61, No. 4, 2016, pp. 1547-1554, doi: https://doi.org/10.1021/acs.jced.5b00927.
47. D. W. Breck, "Zeolite Molecular Sieves: Structure, Chemistry, and Use", Wiley, USA, 1974.
48. F. Rouquerol, J. Rouquerol, K. S. W. Sing, P. Llewellyn, and G. Maurin, "Adsorption by powders and porous solids: principles, methodology and applications", 2nd ed., Academic Press, Oxford, 2014., doi: https://doi.org/10.

1016/C2010-0-66232-8.
49. ASHRAE, “Desiccant dehumidification and pressure-drying equipment”, “ASHRAE handbook—HVAC systems and equipment”, Chapter 24, ASHRAE, Atlanta, 2020.
50. Ž. Knez and Z. Novak, “Adsorption of water vapor on silica, alumina, and their mixed oxide aerogels”, Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 46, No. 4, 2001, pp. 858-860, doi: https://doi.org/10.1021/je000201i.
51. J. H. Jacobs, C. E. Deering, R. Sui, K. L. Lesage, and R. A. Marriott, “Degradation of desiccants in temperature swing adsorption processes: the temperature dependent degradation of zeolites 4A, 13X and silica gels”, Chemical Engineering Journal, Vol. 451, 2023, pp. 139049, doi: https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139049.
52. P. Azhagapillai, M. Khaleel, F. Zoghieb, G. Luckachan, L. Jacob, and D. Reinalda, “Water vapor adsorption capacity loss of molecular sieves 4A, 5A, and 13X resulting from methanol and heptane exposure”, ACS Omega, Vol. 7, No. 8, 2022, pp. 6463-6471, doi: https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03370.
53. Y. Wang, “Measurements and modeling of water adsorption isotherms of zeolite Linde-type A crystals”, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 59, No. 17, 2020, pp. 8304-8314, doi: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06891.
54. H. Ahn and C. H. Lee, “Effects of capillary condensation on adsorption and thermal desorption dynamics of water in zeolite 13X and layered beds”, Chemical Engineering Science, Vol. 59, No. 13, 2004, pp. 2727-2743, doi: https://doi.org/10.1016/j.ces.2004.04.011.
55. T. M. R. Santos, J. M. Sousa, F. Relvas, and A. Mendes, “High-performing vacuum-pressure swing adsorption unit for drying hydrogen from water electrolysis”, Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol. 65, No. 32, 2026, pp. 17315-17332, doi: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.6c00750.
56. Y. Yang, Y. Chen, Z. Xu, L. Wang, and P. Zhang, “A three-bed six-step TSA cycle with heat carrier gas recycling and its model-based performance assessment for gas drying”, Separation and Purification Technology, Vol. 237, 2020, pp. 116335, doi: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116335.
57. S. Ahn, Y. W. You, D. G. Lee, K. H. Kim, M. Oh, and C. H. Lee, “Layered two- and four-bed PSA processes for H_2 recovery from coal gas”, Chemical Engineering Science, Vol. 68, No. 1, 2012, pp. 413-423, doi: https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.053.
58. H. Ahn, C. H. Lee, B. Seo, J. Yang, and K. Baek, “Backfill cycle of a layered bed H2 PSA process”, Adsorption, Vol. 5, 1999, pp. 419-433, doi: https://doi.org/10.1023/A:1008973118852.
59. S. Kwon, D. Dorj, S. Eom, and G. Choi, “Electromagnetic–thermal coupled analysis and experimental investigation of an induction-heated adsorption tower for hydrogen purification”, Journal of Hydrogen and New Energy, Vol. 37, No. 1, 2026, pp. 34-44, doi: https://doi.org/10.7316/JHNE.2026.37.1.34.