

Review

ZIF-8 혼합기질막의 계면 구조: 열적 안정성과 기체 수송 특성

정시은 · 신인혜 · 배원규^{*,†}

충실대학교 화학공학과, *충실대학교 전기공학부

(2026년 5월 8일 접수, 2026년 7월 6일 수정, 2026년 7월 6일 채택)

Interfacial Structure of ZIF-8 Mixed-Matrix Membranes: Thermal Stability and Gas Transport Properties

Sieun Jung, Inhye Shin, and Won-Gyu Bae^{*,†}

Department of Chemical Engineering, Soongsil University, Dongjak-gu 06978, Korea

*Department of Electrical Engineering, Soongsil University, Dongjak-gu 06978, Korea

(Received May 8, 2026; Revised July 6, 2026; Accepted July 6, 2026)

초록: 최근 산업 공정에서 저에너지·고효율 기체 분리의 중요성이 확대되며, 상변화를 수반하지 않고 모듈화가 용이한 고분자 분리막이 주목받고 있다. 그러나 zeolitic imidazolate framework(ZIF)-8 혼합기질막(mixed-matrix membrane, MMM)에서 계면 제어가 충분하지 않으면, 분산 불안정, 응집, 불완전한 계면 접착이 비선택적 공극 형성과 선택도 저하로 이어져 적용 범위가 제한된다. 본 총설은 ZIF-8 MMM에 주목하여, ZIF-8-고분자 계면 구조가 열적 안정성과 기체 수송 특성을 조절하는 방식을 검토한다. 나아가 표면 기능화, 상용화제 도입, 최적 충전량 창 설계를 중심으로 성능 재현성 확보 방안을 정리하고, 실제 공정 적용을 위한 계면 설계 방향을 제시한다.

Abstract: As the importance of low-energy and high-efficiency gas separation has increased in industrial processes, polymer membranes have attracted attention because they do not require phase transition and are suitable for modular process design. However, in zeolitic imidazolate framework (ZIF)-8 mixed-matrix membranes (MMMs), insufficient interfacial control can lead to unstable dispersion, aggregation, and incomplete interfacial adhesion, resulting in nonselective void formation and reduced selectivity, thereby limiting their practical applicability. This review focuses on ZIF-8 MMMs and examines how the ZIF-8-polymer interfacial structure regulates thermal stability and gas transport properties. Furthermore, this review summarizes approaches for improving performance reproducibility based on surface functionalization, compatibilizer incorporation, and optimal filler-loading window design, and proposes interfacial design directions for practical process applications.

Keywords: zeolitic imidazolate framework-8, mixed-matrix membrane, interfacial structure, thermal stability, gas transport.

서 론

CO₂ 포집, 바이오가스 업그레이딩, 수소 회수와 같은 대량 기체 분리 공정에서는 분리 단계의 에너지 요구량과 설비 부담이 공정 경제성과 탄소 배출에 직접 영향을 미친다.¹⁻⁴ 막 분리 기술은 공정 구성이 비교적 단순하고 모듈화와 연속 운전에 유리하며, 상변화를 수반하지 않아 에너지 부담을 줄일 수 있는 대안으로 검토되어 왔다.^{2,4-8} 그러나 고분자 막은 투과도와 선택도의 동시 향상에 trade-off가 있고, physical aging, plasticization, 계면 결함이 더해지면 실제 공정 조건에서 성능

유지가 제한된다.⁹⁻¹² 또한 post-combustion CO₂ 포집에서는 낮은 CO₂ 분압, 수분, 산성 불순물, 단일기체-혼합기체 성능 차이가 성능 유지에 영향을 미치고,¹³⁻¹⁸ 바이오가스 업그레이딩에서는 H₂S, NH₃, siloxane, 수분이 선택도와 회수율, 장기 안정성을 제한할 수 있으며,¹⁹⁻²³ 수소 회수에서는 syngas 또는 shifted syngas 내 CO₂, CH₄, N₂, CO 공존과 H₂/CO₂ 분리 특성이 실제 운전 성능에 영향을 미친다.²⁴⁻²⁶ 따라서 고분자막 설계에서는 초기 투과도와 선택도, 혼합기체, 가습 조건, 불순물 노출, 장기 운전에서의 구조 안정성을 함께 고려해야 한다.

Metal-organic framework(MOF) 계열 필러는 규칙적 기공 구조와 조절 가능한 표면 특성 때문에 선택적 수송 경로 설계에 유리하다. 특히 zeolitic imidazolate framework(ZIF)-8은 기체 분리에 적합한 미세기공 구조와 비교적 우수한 화학적 안정성을 바탕으로 대표적 필러로 활용되어 왔다.^{8,10,12,27-29} 그

[†]To whom correspondence should be addressed.
wgbae@ssu.ac.kr, ORCID[®] 0000-0002-2891-5056
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

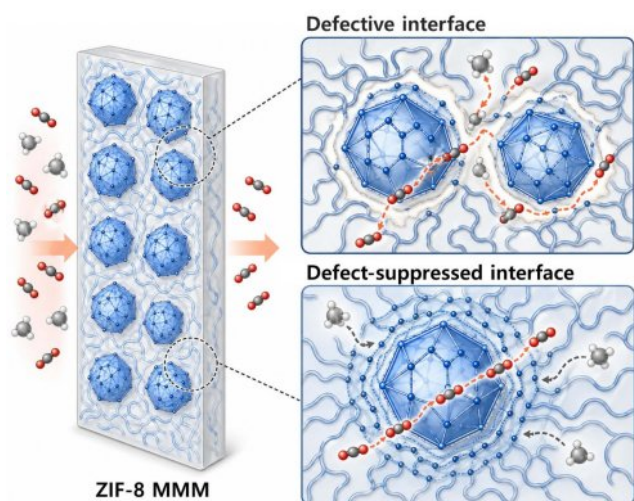


Figure 1. Interface-controlled gas transport in ZIF-8 MMMs.

러나 ZIF-8 혼합기질막(mixed-matrix membrane, MMM)의 성능은 필러 기공성만으로 결정되지 않고, 고분자-ZIF-8 계면의 상용성, 분산 안정성, 계면 결합 여부에 의해 크게 좌우된다.^{8,10,12,27,28} 계면 적합성이 낮으면 응집과 비선택적 결합이 발생하고, 안정한 계면 상호작용이 형성되면 분산 유지와 선택적 수송 경로 형성에 유리하다.^{10,27,28} 따라서 ZIF-8 MMM의 설계적 의의는 계면 구조 기반의 수송 경로 제어를 통해 투과도-선택도 trade-off를 조정한다는 점에 있다.^{12,27,28} ZIF-8 MMM에서 계면 구조에 따른 기체 수송 경로의 차이는 Figure 1에 나타내었다.

본 총설은 ZIF-8 MMM에 범위를 한정하고, 고분자-ZIF-8 계면 구조가 열적 안정성과 기체 수송 trade-off를 조절하는 과정을 검토한다. 나아가 실제 공정 조건에서 계면 안정성과 분리 성능을 유지하기 위한 설계 방향을 제시한다.

ZIF-8 MMM의 구조 형성

ZIF-8 도입량과 분산 거동. ZIF-8 MMM에서 도입량의 실질적 범위는 고분자계와 제조 방식에 따라 달라지며, 실제 막 구조는 필러 형상, 표면 상태, 용액 내 분산 안정성에 의해 결정된다.³⁰⁻³⁴ PSf 기반 dual-layer hollow fiber에서는 0.25–0.5 wt%에서 안정한 분산이 유지되었으나 0.75–1.0 wt%에서는 부분 응집과 공극 형성 위험이 증가했고, PIM-1계에서는 5–15 wt% 구간에서 응집체, 불완전한 고분자 피복, 계면 공극이 뚜렷해졌다.^{8,30} 반면 계면 적합성이 확보된 ZIF-8-NH₂/폴리이미드 조합에서는 50 wt%까지 비교적 치밀한 단면이 유지되었다.¹⁰ 이러한 차이는 허용 가능한 충전량 차이가 보편적 수치로 규정되기보다, 고분자-필러 상호작용과 제조 조건이 함께 결정하는 범위임을 뒷받침한다.^{8,10,30,35,36} Pebax MH1657/ZIF-8 MMM의 단면 및 표면 형태와 ZIF-8의 분산·응집 거

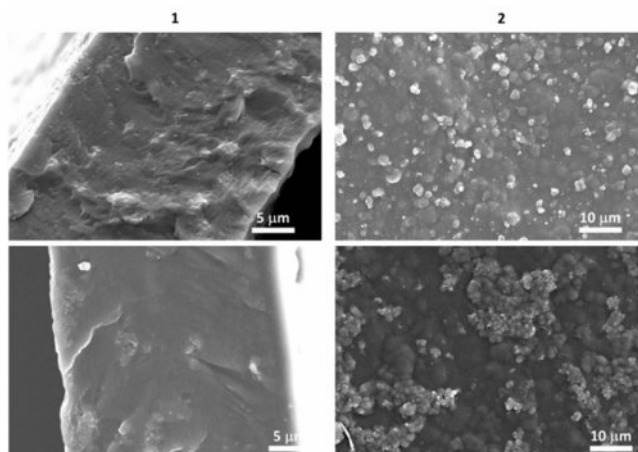


Figure 2. Representative cross-sectional and surface SEM images showing morphology and ZIF-8 dispersion changes in Pebax MH-1657/ZIF-8 MMMs. Reproduced from Ref. 36, Lasseuguette, E. *et al.*, *Membranes*, **2022**, 12, 584. ©2022, MDPI.

동은 Figure 2에서 관찰된다.³⁶

형태와 표면 상태도 막 내부 구조를 크게 변화시킨다. PIM-1계에서 일반 ZIF-8은 매트릭스 내부에서 응집되기 쉬웠지만, ZIF-8 겔은 상호연결된 3차원 네트워크로 보다 균질하게 분포하였다.³¹ 2D ZIF-8 나노시트를 도입한 Pebax계에서는 5–10 wt%에서 정렬된 분산이 유지된 반면, 20–30 wt%에서는 적층과 응집이 함께 나타났다.³⁴ IPD 층이나 RF 층으로 표면을 조정한 ZIF-8에서는 SEM/TEM 단면에서 응집체와 계면 기공이 줄고, 더 치밀한 분산 구조가 확인되었다.^{32,33}

계면 강직화층 형성. Pebax 및 polyethersulfone(PES) 기반 MMM에서는 ZIF-8 도입 후 T_g 상승이 반복적으로 보고되었다. Pebax계에서는 *in-situ* 방식으로 형성된 ZIF-8이 *ex-situ* 혼합 ZIF-8보다 더 높은 T_g 를 나타냈으며, 이는 Pebax 사슬과 더 강한 필러-고분자 상호작용을 형성한 결과이다.³⁷ PES 기반 MMM에서도 필러 충전량 증가에 따라 T_g 가 상승하여, MOF-고분자 계면에서 사슬 강직화 형성을 뒷받침한다.³⁸ RF 코팅 ZIF-8을 도입한 MMM에서는 수소결합과 계면 접촉이 강화되면서 선택도는 상승하고 투과도는 일부 감소하였는데, 이는 강직화층이 계면 결합을 줄이는 동시에 확산 저항도 높일 수 있음을 의미한다.³³

비선택적 계면 공극과 우회 수송. 비선택적 계면 공극은 응집과 불완전한 고분자 피복이 겹치는 고충전 영역에서 두드러진다. TB/ZIF-8 MMM에서는 무개질 ZIF-8이 응집한 반면, PDA로 표면을 조정한 ZIF-8@PDA는 막 내부에 더 고르게 분포하였다.³⁹ 6FBD/ZIF-8계에서는 40 wt%에서 non-selective void 및 cavity 형성과 함께 선택도 저하가 급격해졌고, PIM-1/ZIF-8계에서도 응집이 커질수록 polymer로 충분히 피복되지 않은 입자와 interfacial void가 증가하였다.^{30,40} 이 경우 ZIF-8 미세기공을 거치지 않는 우회 수송(bypass transport)

이 우세해져, 계면 공극은 선택적 수송 경로를 우회시키는 구조적 결함으로 작용한다.^{30,39,40}

계면 인근 자유체적 변화는 계면의 치밀성에 따라 다른 의미를 가진다. CA/ZIF-8 막에서는 ZIF-8 첨가 후 fractional free volume가 0.115에서 0.243으로 증가했지만, PEI-grafted PZIF-8을 적용하면 0.211로 낮아지며 더 조밀한 구조가 형성되었다.⁴¹ 열처리된 T-ZIF-8/PI 막에서도 자유체적이 감소했지만, 치밀하고 선택적인 확산 경로가 형성되어 선택도는 향상되었다.⁴² 따라서 자유체적 증가는 성능 향상 또는 저하를 직접 의미하지 않으며, 선택적 확산 경로로 조직되는지 혹은 비선택적 계면 공극으로 작용하는지가 더 중요하다.^{30,39,42}

열적 안정성 변화

유리전이온도(T_g) 변화. T_g 는 계면 인근 사슬 운동성과 필러-고분자 상호작용을 반영하는 열분석 지표이다. 다만 T_g 절대값은 고분자 조성, 충전량, 제조 조건, DSC 조건의 영향을 받으므로, 각 시스템 내부의 상대적 변화 경향을 중심으로 비교한다.^{43,44} Pebax/ZIF-8 MMM의 충전량별 DSC 및 TGA 곡선은 Figure 3에 제시하였다.⁴⁵

단일 T_g 를 보이는 계에서는 상승 경향이 비교적 명확하다. Pebax/maltitol/ZIF-8 MMM에서는 ZIF-8 함량이 0에서 10 wt%로 증가할 때 T_g 가 -46.22°C 에서 -41.55°C 로 상승했고, PES

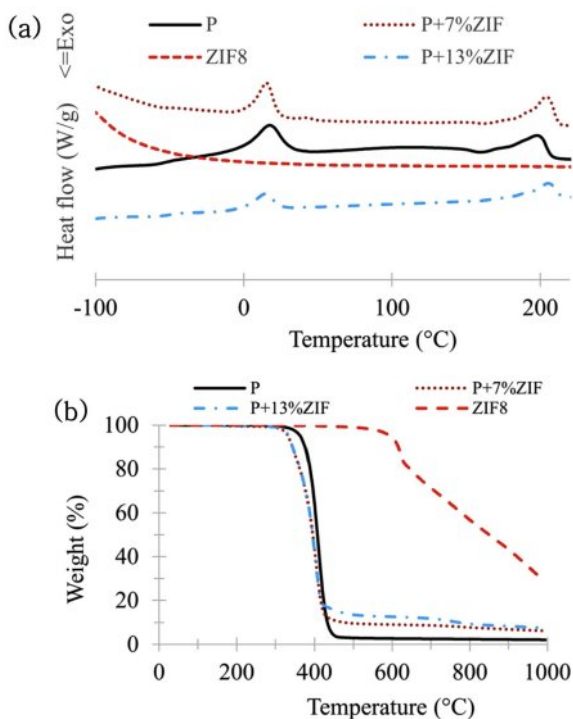


Figure 3. (a) DSC and (b) TGA curves of Pebax/ZIF-8 MMMs at different ZIF-8 loadings. Reproduced from Ref. 45, Eljaddi, T. *et al.*, *Membranes*, **2022**, 12, 836. ©2022, MDPI.

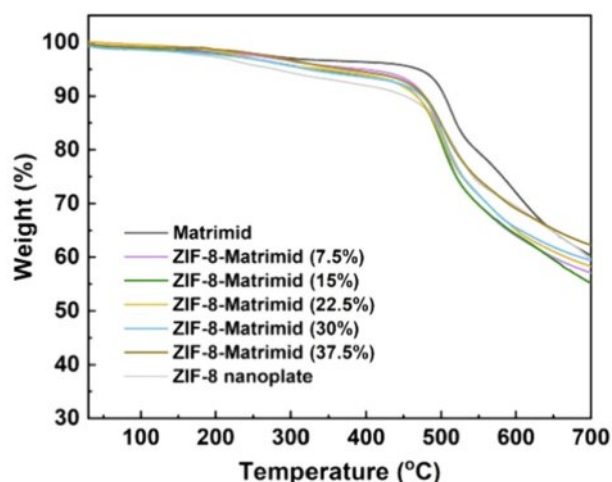


Figure 4. TGA curves of ZIF-8 nanoplates and ZIF-8-Matrimid MMMs with different ZIF-8 nanoplate loadings. Reproduced with permission from Ref. 48, Jia, Y. *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2024**, 16, 37100–37110. ©2024, American Chemical Society.

기반 MMM에서도 순수 PES의 T_g 가 219.7°C 에서 227.5°C 로 상승하였다.^{43,44} 이는 ZIF-8 도입이 고분자 사슬 운동성을 억제하고, 계면 인근에 강직화된 영역을 형성했음을 뒷받침하였다.^{43,44}

블렌드 또는 미세상분리 계에서는 각 전이온도를 분리해 해석해야 한다. Pebax1657/PES/ZIF-8계에서는 PP1의 저온 T_g 와 고온 T_g 가 각각 -46.72°C 와 95.10°C 였고, PPZ13에서는 -42.83°C 와 102.85°C 로 함께 상승하였다.⁴⁶ PU/PC/ZIF-8 삼원계에서도 순수 PU(M0)의 저온 T_g 는 -72.3°C 였으나, 12 wt% ZIF-8을 포함한 M0Z12에서는 -59.6°C 로 이동하여 PU-rich 조성에서 연질 세그먼트 운동성이 제한되었음을 확인하였다.⁴⁷

열처리 전후 구조 안정성. 열처리형 시스템에서는 열처리 후 구조 유지 범위와 열분해 저항이 구조 안정성을 평가하는 주요 지표로 사용되었다. 열처리된 ZIF-8 nanoplate/Matrimid계에서는 새로운 화학결합 형성 없이 polymer chain rearrangement가 발생했다.⁴⁸ 모든 MMM에서 10 wt% 중량감소 온도가 450°C 이상으로 유지되었으며, 충전량별 TGA 곡선은 Figure 4에 제시하였다.⁴⁸ T_g 또한 316°C 에서 최대 337°C 까지 상승하여, 열처리에 따른 계면 안정화와 구조 강직화가 함께 진행했음을 보였다.⁴⁸

고내열 polyimide계에서는 계면 상호작용과 고온 안정성을 함께 조절하기 위한 복합화 전략이 적용되었다. 6FDA-Durene/ZIF-8/IL계에서는 순수 6FDA-Durene PI의 T_g 가 416.62°C 였으며, ZIF-8/IL 도입 후 438.13°C 로 상승하였다.⁴⁹ 열분해 개시 온도 또한 약 423.87°C 에서 496°C 까지 상승해, ZIF-8/IL 도입이 고온 조건에서의 구조 안정성 향상과 연결됨을 확인하였다.⁴⁹

ZIF-8 MMM의 열적 안정성은 하나의 지표로 수렴하지 않

는다. 유연한 고분자계에서는 T_g 변화, 열처리형 시스템에서는 구조 무결성 유지 범위, 고내열 고분자계에서는 분해 저항과 고온 안정성이 주요 판단 기준으로 사용된다.^{43,44,48,49}

분해 온도 변화(ΔT_d). ZIF-8 도입 효과는 분해 개시점 또는 최대 분해 지점의 이동을 통해 열분해 거동 변화로 확인된다. ΔT_d 상승은 계면 상호작용 강화, 사슬 운동성 제한, 무기상 도입에 따른 열분해 지연 효과와 연결될 수 있으며, ΔT_d 하강은 사슬 포장 교란, 자유체적 증가, 계면 불균일성이 동반된 계에서 관찰될 수 있다. 따라서 분해 온도 변화는 필러 함량, 계면 구조, 고분자 재배열 방향을 함께 반영하는 열분석 지표이다.

상승 사례는 여러 계에서 확인된다. Amine-modified ZIF-8을 포함한 PS계 MMM에서는 순수 막의 주 분해 온도 지표가 500 °C 였던 반면, ZIF-8 도입막에서는 525 °C로 이동하였다.⁵⁰ 6FDA-Durene/ZIF-8/IL계에서는 순수 6FDA-Durene PI의 T_g 가 416.62 °C에서 438.13 °C로 상승했으며, 열분해 개시 온도 역시 약 423.87 °C에서 496 °C까지 상승하였다.⁴⁹ 또한 Pebax1657/PES/ZIF-8계에서도 PPZ13가 PP1보다 더 높은 분해 온도를 보여, ZIF-8 도입 후 계면 상호작용과 사슬 운동성 제한이 열적 안정성 향상에 기여함을 뒷받침하였다.⁴⁶

반대 경향도 보고되었다. Ag/Zn-ZIF-8/Pebax계에서는 순수 Pebax에서 350 °C였던 초기 분해 온도가 Z-3 도입 후 320 °C로 감소했으며, 이는 Pebax 사슬 배열 교란과 자유체적 증가가 동반된 사례로 해석된다.⁵¹ ZIF-8/CA계에서는 순수 CA의 T_g 가 183 °C에서 최대 188 °C까지 소폭 상승했지만, TGA에서는 순수 CA와 MMM이 전반적으로 유사한 주 사슬 분해 거동을 보였다.⁵² 이는 필러 조성, 분산 상태, 계면 적합성에 따라 열분해 거동이 서로 다른 방향으로 이동할 수 있음을 시사한다.^{51,52}

충전량 의존 열분해 안정성. 필러 함량 효과를 해석할 때에는 분해 온도 상승 폭, 고온 잔존량 변화, 고충전 상태에서의 구조 유지 여부를 구분해 비교해야 한다. ZIF-8 MMM에서는 무기 충전재 비율 증가로 TGA 잔존량이 커지는 경향이 비교적 일관되게 나타난다. 그러나 잔존량 증가는 우선 조성 효과를 반영하므로, 분해 개시 온도나 주 분해 구간의 이동과 같은 의미로 해석해서는 안 된다. 실제 열안정성 향상 여부는 분해 개시 온도, 최대 분해 온도, 고온 구조 유지 여부를 기준으로 판단해야 한다.

PMP/ZIF-8계에서는 충전량 증가에 따른 분해 지연이 비교적 분명하다. 순수 PMP의 열분해는 약 290 °C에서 시작하였으나, ZIF-8 함량이 증가할수록 T_d 가 상승하여 30 wt%에서 약 355 °C에 도달하였다.⁵³ 또한 800 °C에서의 잔존량 분석을 통해 실제 충전량이 각각 9.5, 19.7, 28.9 wt%로 확인되어, 조성상 무기상 잔존량 증가와 분해 지연 효과가 함께 나타났다.⁵³

반면 polyetherimide/ZIF-8계에서는 모든 시료가 420 °C까지 안정하게 유지되고 충전량 증가에 따라 고온 잔존량도 증가했지만, T_g 는 216 °C에서 212 °C로 소폭 낮아졌다.⁵⁴ 이 계에서는 충전량 증가 효과가 강한 계면 강직화보다 필러 존재와

고온 잔존량 변화에서 보다 명확하게 나타났다.⁵⁴

고충전 조건에서의 안정성 유지 여부는 열처리된 ZIF-8 nanoplate/Matrimid계에서 확인된다. 모든 MMM의 10 wt% 중량감소 온도는 450 °C 이상으로 유지되었고, T_g 는 순수 Matrimid의 316 °C에서 7.5, 15, 22.5, 30 wt% 충전량에서 각각 322, 328, 332, 337 °C로 상승하였다.⁴⁸ 그러나 37.5 wt%에서는 T_g 가 319 °C로 낮아져, 과도한 충전량에서 응집과 계면 공극이 강직화 효과를 약화할 수 있음을 시사한다.⁴⁸

따라서 충전량 의존 열적 안정성은 필러 함량 변화와 계면 구조의 질이 열분해 거동에 반영된 결과이다. 충전량이 증가해도 응집이나 비선택적 계면 결함이 동반되면 안정화 효과는 약화되며, T_g , ΔT_d , 열처리 후 구조 변화는 이 계면 안정성이 서로 다른 방식으로 드러난 결과이다.

기체 수송 성능과 Trade-off 해석

투과도 변화. CO₂ 투과도 해석에서는 시험 조건에 따른 이상 선택도와 분리계수의 구분이 선행되어야 한다. 건조 단일 기체 CO₂/N₂ 데이터와 가습 혼합기체 CO₂/CH₄ 데이터는 측정 환경과 수송 메커니즘이 다르므로, 절대값을 같은 축에서 직접 비교하기보다 각 조건군 내부에서 계면 설계 효과를 읽는 편이 적절하다.

Table 1의 건조 단일기체 CO₂/N₂ 자료에서는 ZIF-8@GO, NH₂-ZIF-8, PDA@ZIF-8 도입 Pebax계가 CO₂ 투과도와 이상 선택도의 균형을 보였다.⁵⁵⁻⁵⁷ 이 조건군에서는 ZIF-8의 도입 자체보다 표면 기능기와 계면 정합성이 CO₂ 투과도 증가와 선택도 유지의 균형을 좌우하였다. ZIF-8@GO계는 CO₂ 투과도 증가가 두드러졌고, NH₂-ZIF-8계와 PDA@ZIF-8계는 계면 결함 억제와 CO₂ 친화도 향상에 의해 선택도 유지에 보다 유리한 경향을 보였다.⁵⁵⁻⁵⁷

Table 2의 Pebax MH1657 기반 가습 혼합기체 CO₂/CH₄ 자료는 건조 단일기체 조건과 구분되는 별도의 조건군에 해당한다. PSS-ZIF, ZIF-8@AC-1, Bio-ZIF 도입 계는 가습 조건에서도 CO₂ 투과도와 분리계수의 균형을 유지하였다.⁵⁸⁻⁶⁰ 이는 podlike filler, aminoclay 층, bio-inspired active site 등 서로 다른 계면 설계 요소가 CO₂ 친화적 수송환경과 다중 수송경로 형성에 기여한 결과로 해석된다.⁵⁸⁻⁶⁰

선택도 변화. 선택도는 시험 조건에 따라 이상 선택도와 분리계수로 구분되므로, 단일기체 조건과 혼합기체 조건의 값을 같은 의미로 직접 비교하기 어렵다. 이 값은 투과도 증가가 실제 분리 성능 향상으로 이어졌는지, 또는 선택도 손실을 수반했는지를 판단하는 기준이 된다. Pebax/PEI-ZIF-8 복합막에서는 PEI 사슬의 amine group이 CO₂ 친화적 수송환경과 facilitated transport path를 형성하여 CO₂/N₂ 선택도 향상에 기여하였다.⁶¹ PSS-ZIF/Pebax계에서는 술폰산기 기반 CO₂ 친화성과 1D/3D transport pathway가 CO₂/CH₄ 분리계수 향상에

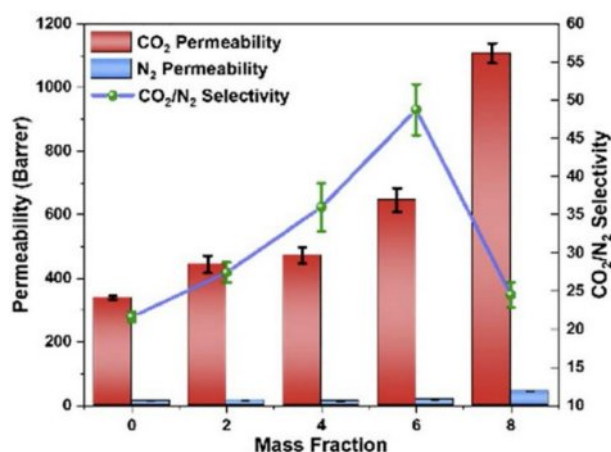


Figure 5. CO₂/N₂ separation performance of H-ZIF-8/Pebax MMMs at varied filler loadings. Reproduced from Ref. 63, Xia, T. *et al.*, *Smart Mol.*, **2025**, 3, e20240066. ©2025, Wiley.

작용하였다.⁵⁸ 즉 선택도 증가는 다공성 필러 첨가에 따른 직접적 효과만이 아니라, 계면에서 CO₂에 유리한 수송환경이 안정적으로 형성되었는지를 함께 반영한다.^{58,61}

다만 단일기체 조건에서 확보된 선택도 향상이 실제 혼합기체 조건에서 그대로 유지되는 것은 아니었다. PMP/ZIF-8 계에서는 30 wt%에서 CO₂/CH₄ 이상 선택도가 30.42, CO₂/H₂ 이상 선택도가 28.11까지 증가했지만, 혼합기체 조건에서는 각각 29.71과 27.26으로 소폭 감소하였다.⁵³ 이러한 결과는 선택도가 실제 공급 조성에서의 흡착과 수송 경쟁에 의해 조정되며, 계면 개질이 실제 분리 조건에서도 선택도 저하를 얼마나 억제하는지를 보여주는 지표임을 의미한다.⁵³

충전량 의존 성능 변화. 여러 ZIF-8 MMM 사례에서 초기 충전 구간에는 CO₂ 투과도 향상과 선택도 유지 또는 증가가 함께 관찰된다. 다만 높은 ZIF-8 충전량에서의 성능 변화는 응집 또는 분산 안정성 저하만으로 단정하기 어렵다. 일부 ZIF-8 MMM에서는 필러 간 접촉 혹은 상호연결성이 ZIF-8

기공 기반 수송 경로 형성에 기여하여 투과도 증가로 이어질 수 있음이 보고된 바 있으므로, 충전량 의존 성능은 계면 결합에 의한 비선택적 수송과 기공 내부 수송의 상대적 기여를 함께 고려하여 해석할 필요가 있다.^{12,31,62}

Table 1과 Table 2에서도 ZIF-8@GO/Pebax, NH₂-ZIF-8/Pebax, PSS-ZIF/Pebax, Bio-ZIF/Pebax는 제한된 충전 범위에서 투과도와 선택도 또는 분리계수의 균형을 보였다.^{55,56,58,59} H-ZIF-8/Pebax MMM의 충전량별 CO₂/N₂ 분리 성능은 Figure 5에서 비교된다.⁶³ H-ZIF-8/Pebax는 6 wt%에서 우수한 CO₂/N₂ 성능을 나타냈으나, 8 wt%에서는 분리계수가 크게 감소하였다.⁶³ 이러한 결과는 초기 충전 구간에서는 CO₂ 친화도 증가와 선택적 수송경로 형성이 성능 향상에 기여하지만, 과도한 충전량에서는 응집과 계면 결합이 성능 이득을 상쇄할 수 있음을 보여준다.^{55,56,58,59,63} Figure 6에서는 ZIF-8@BNNS/Pebax MMM의 CO₂/N₂ 분리 성능을 Robeson 2008

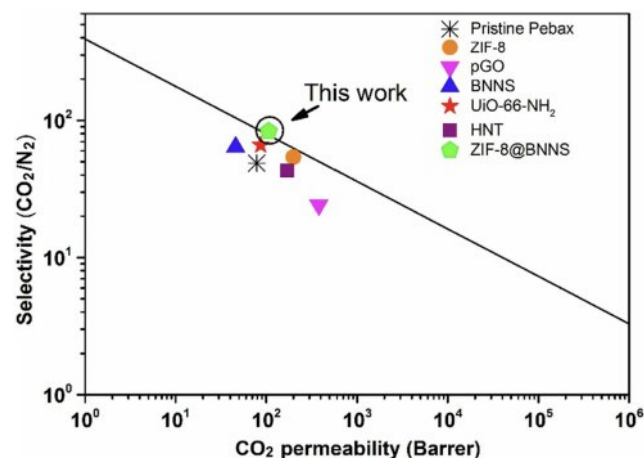


Figure 6. Relationship between CO₂ permeability and CO₂/N₂ selectivity of ZIF-8@BNNS/Pebax MMMs and reported membranes with the Robeson 2008 upper bound. Reproduced from Ref. 64, Guo, F. *et al.*, *Membranes*, **2023**, 13, 444. ©2023, MDPI.

Table 1. CO₂/N₂ Separation Data of Pebax-based ZIF-8 MMMs Under Dry Pure-gas Conditions at 25 °C and 1 bar

Polymer	Filler/system	Loading (wt%)	PCO ₂ (Barrer)	CO ₂ /N ₂ ideal selectivity	Ref.
Pebax 2533	ZIF-8@GO	6	249	47.6	55
Pebax MH1657	NH ₂ -ZIF-8(10)	6	163.8	62.0	56
Pebax 4033	PDA@ZIF-8	15	220.06	56.14	57

Table 2. CO₂/CH₄ Separation Data of Pebax MH1657-based ZIF-8 MMMs Under Humidified Mixed-gas Conditions at 25 °C and 2 bar

Polymer	Filler/system	Loading (wt%)	PCO ₂ (Barrer)	CO ₂ /CH ₄ separation factor	Ref.
Pebax MH1657	PSS-ZIF	7	528.0	36.0	58
Pebax MH1657	ZIF-8@AC-1	7	620 ± 10	40 ± 0.4	60
Pebax MH1657	Bio-ZIF	12	542 ± 6.0	40 ± 0.4	59

upper bound와 비교하였다.⁶⁴

다만 최적 충전량 창이 모든 계에서 동일한 값으로 수렴하는 것은 아니다. ZIF-8@RF/Pebax는 RF 층에 의해 계면 적합성이 향상되며 30 wt%까지 CO₂ 투과도 363.0 Barrer와 CO₂/CH₄ 선택도 29.6으로 성능이 증가했으나, 40 wt%에서는 응집에 따른 비선택적 결합이 확인해졌다.³³ ZIF-8-NH₂/6FBDA 계에서도 고분자와 기능화된 ZIF-8 사이의 수소결합과 π - π 적층이 강화되면서 50 wt%까지 결합 없는 계면이 유지되었고, 그 결과 50 wt%에서 CO₂ 투과도 80.8 Barrer와 CO₂/CH₄ 이상 선택도 89.4를 나타냈다.¹⁰ 따라서 충전량 의존 성능 변화에서는 최적 창 위치와 폭이 계면 설계 수준에 따라 달라진다는 점이 중요하다.

성능 데이터는 ZIF-8 도입 효과를 단순 수치 경쟁으로 제시하기보다, 계면 구조와 열적 안정성이 실제 기체 수송 결과로 연결되는 방식을 보여준다. 따라서 성능 평가는 최고 수치보다 투과도-선택도 균형이 유지되는 조건을 중심으로 이루어져야 한다.

Trade-off 완화를 위한 설계 전략

ZIF-8 표면 기능화. 기능화된 ZIF-8 표면의 유기층은 고분자 매트릭스와의 상호작용을 강화하고, 분산 안정성과 계면 적합성을 높여 비선택적 공극 발생을 억제한다.^{41,61,65,66} PEI가 도입된 ZIF-8 계에서는 한쪽 amine이 ZIF-8의 Zn 중심과 배위 결합을 형성하고, 다른 amine이 Pebax 사슬과 수소결합을 형성하면서 필러-고분자 적합성이 향상되었다. 이와 함께 계면 누설 경로가 억제되어 CO₂/N₂ 분리 성능도 개선되었다.⁶¹ CA 기반 막에서도 PEI-grafted ZIF-8은 PEI의 amine기와 CA의 carbonyl/hydroxyl group 사이 상호작용을 통해 ZIF-8 응집과 계면 공극 형성을 감소시키는 방향으로 작용하였다.⁴¹

PIM-1 기반 표면 코팅 또한 동일한 계면 안정화 전략에 해당한다. ZIF-8@PIM-1/Pebax 계에서는 비개질 ZIF-8 막에서 관찰되던 비선택적 결합이 완화되었고, 20 wt% 충전량에서도 필러 주변에 비선택적 공극이 없는 치밀한 계면이 유지되었다.⁶⁵ 또한 acyl-chlorinated PIM을 이용한 기능화 계에서는 ZIF-8 표면과 개질층 사이의 공유결합, 아마이드기 사이의 수소결합, 매트릭스와의 약한 수소결합이 연속적으로 작동하는 구배형 계면 결합 구조가 형성되었다. 이 구조는 계면 결합을 감소시키면서도 고충전 필러의 효과를 보다 안정적으로 발현시키는 기반이 되었다.⁶⁶

상용화제/결합제 도입. 상용화제 또는 결합제는 필러 응집을 줄이고 고분자-필러 계면을 안정화하여, ZIF-8이 제공하는 선택적 수송 경로가 비선택적 누설 경로에 의해 상쇄되는 것을 억제한다.^{45,67} Pebax 2533/ZIF-8 계에서 Pluronic P123을 도입하면 2 wt%와 5 wt% ZIF-8 조건에서 CO₂ 투과도가 개선되었고, 계면활성제 농도가 2.5%와 5%인 조건 모두 선택도는

무첨가 막보다 향상되었다.⁶⁷ 선택도 향상은 계면활성제 도입에 따른 ZIF-8 응집도 감소와 연관되며, 그 효과는 2.5% 계면활성제 조건에서 더 뚜렷하게 나타났다.⁶⁷ 반면 10 wt% ZIF-8 또는 5% 계면활성제 조건에서는 CO₂ 투과도가 다시 감소하였는데, 이는 분산 안정화 효과가 존재하더라도 과도한 첨가가 확산 저항 증가나 구조 왜곡으로 이어짐을 보여준다.⁶⁷

Pebax/ZIF-8/PEG 계에서도 유사한 흐름이 확인된다. PEG가 없는 막에서는 ZIF-8 응집과 ZIF-8 불량 분산 영역이 관찰되었지만, PEG가 포함된 막에서는 EDX 분석에서 Zn 분포가 더 균일하게 나타났다.⁴⁵ 이 결과는 PEG가 입자 표면을 감싸 응집을 줄이고, Pebax와의 상호작용을 통해 보다 균질한 막 형성을 돕는다는 점을 뒷받침한다.⁴⁵ 다만 PEG 도입 또한 충전량 증가에 따른 한계를 완전히 해소하지는 못한다. ZIF-8 함량이 더 증가하면 막 결합과 선택도 저하 문제가 다시 발생하므로, 상용화제/결합제는 계면 결합이 본격화되기 전 구간의 안정성을 넓히는 방향으로 작용한다.^{45,67}

최적 충전량 설계. 분산 안정성, 계면 건전성, 분리 성능이 유지되는 범위에서 실질적인 충전량 창이 형성된다.^{50,62,68} *In-situ* ZIF-8 겔/Pebax 계에서는 10 wt%에서 CO₂ 투과도와 CO₂/N₂ 선택도가 최대에 도달했으나, *ex-situ* 제조막은 30 wt%에서 투과도 증가와 함께 응집 및 선택도 저하가 나타나 고충전이 곧 최적 조건을 의미하지 않음을 보였다.⁶² PHNZ/Pebax 치밀막에서도 10 wt%에서 최적 CO₂/N₂ 성능이 보고되었지만, 15 wt%에서는 응집과 비선택적 결합에 의해 선택도가 감소하였다.⁶⁸ 반면 PSf hollow fiber/A-ZIF-8 계에서는 0.25 wt%에서 가장 우수한 CO₂/CH₄ 선택도와 anti-plasticization 거동이 확인되었고, 이후 충전량 증가에 따라 성능이 다시 감소하였다.⁵⁰ 따라서 실용적 충전량 창은 단일 수치로 일반화하기 어렵다. 치밀 Pebax MMM에서는 10 wt% 전후가 반복적으로 유리한 구간으로 나타나지만, hollow fiber 또는 고압 민감 구조에서는 sub-1 wt% 수준에서도 최적 성능이 형성될 수 있다.^{50,62,68} 최적 충전량 설계에서는 응집과 계면 결합이 뚜렷해지기 전 범위에서 성능 이득을 유지할 수 있는 계면 안정성이 확보되어야 하며, 충전량의 절대값보다 해당 구간에서 유지되는 구조 건전성이 더 중요하다.^{50,62,68}

표면 기능화는 필러 표면의 접착과 결합 발생을 제어하고, 상용화제 도입은 분산 안정성과 계면 형성 과정을 보조하며, 최적 충전량 설계는 이러한 효과가 성능 이득으로 유지되는 범위를 설정한다. 즉, trade-off 완화 전략은 계면 안정화라는 공통된 방향으로 수렴하지만, 각 전략이 작용하는 위치와 기능은 구분된다.

결론 및 향후과제

결론. ZIF-8 MMM의 성능은 필러의 고유 기공성만으로 결정되지 않는다. 실제 막 내부에서 ZIF-8이 균일하게 분산되고

고분자-ZIF-8 계면이 치밀하게 형성될 때 선택적 수송 경로와 구조 안정성이 함께 확보된다. 이와 달리 응집, 불완전한 고분자 피복, 느슨한 계면이 형성되면 비선택적 공극이 누설 경로로 작용하여 선택도가 저하된다. 따라서 ZIF-8 MMM의 성능 분기점은 계면 구조가 선택적 확산 경로로 조직되는 방식에 의해 결정된다.

계면 강직화와 자유체적 재배열은 열적 안정성과 기체 수송 trade-off를 함께 조절한다. 적절한 강직화는 사슬 운동성을 제한해 선택적 확산을 강화하고 계면 결함을 줄이지만, 과도한 강직화는 자유체적 감소와 확산 저항 증가를 유발할 수 있다. 또한 최적 충전량은 분산 안정성, 계면 접착, 자유체적 재배열, 선택적 확산 경로가 균형을 이루는 범위로 정의된다. 표면 기능화, 상용화제 도입, 최적 충전량 설계는 모두 비선택적 누설 경로를 억제하고 성능 재현성을 높이는 계면 안정화 전략으로 수렴한다. 따라서 실제 공정 적용성은 단일기체 기준의 초기 성능보다 혼합기체, 가습 조건, 불순물 노출, 장기 운전 중 계면 구조와 분리 성능이 유지되는지를 기준으로 검증되어야 한다.

향후과제. 계면 구조 해석은 막 형성 과정과 열처리 전후의 구조 변화를 직접 추적하는 방향으로 고도화되어야 한다. SEM/TEM, T_g, TGA, 투과도-선택도 변화만으로는 ZIF-8 표면에서의 고분자 사슬 재배열 양상과 선택적 계면이 비선택적 공극으로 전환되는 시점을 구분하는 데 한계가 있다. 따라서 용액 내 분산 상태, casting 또는 상전이 과정, 열처리 중 계면 변화를 추적하는 *in-situ* 또는 *operando* 분석과 함께, 고분자 종류, ZIF-8 형상과 표면 상태, 제조 조건, 측정 기체쌍, 습도 조건, 장기 안정성 정보를 일관된 기준으로 축적하는 데이터 기반 접근이 필요하다.

산업적 적용을 위해서는 ZIF-8 합성과 막 제조 과정에서 발생하는 scale-up 변수를 계면 형성 관점에서 평가해야 한다. 입자 크기 편차, 표면 상태 변화, 분산 불균일, 막 두께 편차는 고분자-ZIF-8 계면 형성과 성능 재현성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 batch-to-batch variation, 모듈화 수준, 장기 운전 중 성능 유지가 주요 평가 기준으로 포함되어야 하며, 이러한 기준이 확립된다면 ZIF-8 MMM은 재현성 있는 공정 적용 가능성을 평가하는 플랫폼으로 확장될 수 있다.

감사의 글: 이 연구는 숭실대학교의 지원을 받아 수행했습니다.

이해상충: 저자(들)는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

1. Abejón, R.; Torre-Celeizabal, A.; Casado-Coterillo, C.; Garea, A. Analysis of the Techno-Economic Competitiveness of a Three-Stage Membrane Separation Process for Biogas Upgrading Using a Biopolymer-Based Mixed-Matrix Membrane. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2024**, 12, 1297-1308.
2. Song, Y.; Kim, S.-J.; Lee, S.; Lee, J. H.; Yeo, J.-G.; Kim, J.-K. Process Design and Optimization of Membrane-based CO₂ Capture Process with Experimental Performance Data for a Steam Methane Reforming Hydrogen Plant and a Coal-fired Power Plant. *J. Clean. Prod.* **2024**, 475, 143643.
3. Liu, Y.; Liu, Z.; Kraftschik, B. E.; Babu, V. P.; Bhuwania, N.; Chinn, D.; Koros, W. J. Natural Gas Sweetening Using TEGMC Polyimide Hollow Fiber Membranes. *J. Membr. Sci.* **2021**, 632, 119361.
4. Araújo, T.; Bernardo, G.; Mendes, A. High-performance Hydrogen Separation Using Cellulose-based Carbon Molecular Sieve Membranes. *J. Membr. Sci.* **2024**, 693, 122337.
5. Zach, B.; Pluskal, J.; Šomplák, R.; Jadrný, J.; Šyc, M. Tool for Optimization of Energy Consumption of Membrane-based Carbon Capture. *J. Environ. Manage.* **2022**, 320, 115913.
6. Li, H.; Wang, F.; Li, S.; Yu, M. Two-stage Membrane-based Process Utilizing Highly CO₂-selective Membranes for Cost and Energy Efficient Carbon Capture From Coal Flue Gas: A Process Simulation Study. *J. Membr. Sci.* **2023**, 669, 121259.
7. Yagihara, K.; Wu, T.-W.; Ohno, H.; Fukushima, Y. Evaluating the Economic Potential of Membrane Technologies for Post-combustion in Existing Combustion Systems: Comparison with MEA-based System. *Chem. Eng. J.* **2025**, 510, 161588.
8. Kamaludin, R.; Xuefeng, M.; Othman, M. H. D.; Imtiaz, A.; Puteh, M. H.; Abdul Kadir, S. H. S. ZIF-8-based Dual Layer Hollow Fiber Mixed Matrix Membrane for Natural Gas Purification. *Fuel* **2023**, 354, 129377.
9. Almansour, F.; Foster, A. B.; Ameen, A. W.; Mohsenpour, S.; Budd, P. M.; Gorgojo, P. High Gas Permeance in CO₂-selective Thin Film Composite Membranes from Bis(phenyl)fluorene-containing Blends with PIM-1. *J. Membr. Sci.* **2024**, 699, 122652.
10. Zhao, Q.; Sun, Y.; Zhang, J.; Fan, F.; Li, T.; He, G.; Ma, C. Mixed Matrix Membranes Incorporating Amino-functionalized ZIF-8-NH₂ in a Carboxylic Polyimide for Molecularly Selective Gas Separation. *J. Membr. Sci.* **2024**, 693, 122326.
11. Shin, J. H.; Yu, H. J.; Jung, J.; An, H.; Park, J. H.; Lee, A. S.; Lee, J. S. Extrinsic Microporous Polymer Membranes Derived from Thermally Cross-linked Perfluorinated Aryl-ether-free Polymers for Gas Separation. *Nat. Commun.* **2025**, 16, 7143.
12. Jo, J. H.; Lee, C. O.; Ryu, G. Y.; Jae, H.; Roh, D.; Chi, W. S. Hierarchical Amine-Functionalized ZIF-8 Mixed-Matrix Membranes with an Engineered Interface and Transport Pathway for Efficient Gas Separation. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2022**, 4, 6426-6439.
13. Yun, S.; Jang, M.-G.; Kim, J.-K. Techno-economic Assessment and Comparison of Absorption and Membrane CO₂ Capture Processes for Iron and Steel Industry. *Energy* **2021**, 229, 120778.
14. Wu, H.; Li, Q.; Guo, B.; Sheng, M.; Wang, D.; Mao, S.; Ye, N.; Qiao, Z.; Kang, G.; Cao, Y.; Wang, J.; Zhao, S.; Wang, Z. Industrial-scale Spiral-wound Facilitated Transport Membrane Modules for Post-combustion CO₂ Capture: Development, Investigation and Optimization. *J. Membr. Sci.* **2023**, 670, 121368.
15. Yang, Y.; Han, Y.; Zou, C.; Pang, R.; Hu, J.; Chen, K.; Ho, W. S.

- W. A Commercial-size Prototype of Countercurrent Spiral-wound Membrane Module for Flue Gas CO₂ Capture. *J. Membr. Sci.* **2024**, 696, 122520.
16. Tran, T.; Kusuma, V. A.; Hopkinson, D. P.; Zhu, L. Disentangling the Gap Between Pure and Mixed-gas Performance of Thin Film Composite Membranes Through Improved Cell Design and Testing Methods. *J. Membr. Sci.* **2025**, 724, 123962.
 17. Medri, E.; Bretton, F.; Ferrari, M.-C.; Ye, C.; McKeown, N. B.; Giacinti Baschetti, M. Effect of Water Vapor on CO₂ and N₂ Permeability in PIM Based Membranes. *J. Membr. Sci.* **2025**, 731, 124233.
 18. Qin, Z.; Feng, X.; Yin, D.; Xin, B.; Jin, Z.; Deng, Y.; Yang, L.; Yao, L.; Jiang, W.; Liu, C.; Dai, Z. Impact of Humidity on the CO₂/N₂ Separation Performance of Pebax-MOF Mixed Matrix Membranes. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2023**, 62, 14034-14046.
 19. Zito, P. F.; Brunetti, A.; Barbieri, G. Renewable Biomethane Production from Biogas Upgrading via Membrane Separation: Experimental Analysis and Multistep Configuration Design. *Renew. Energy* **2022**, 200, 777-787.
 20. Zito, P. F.; Barbieri, G.; Brunetti, A. Biogas Upgrading to Biomethane with Zeolite Membranes: Separation Performance and Economic Analysis. *Chem. Eng. Res. Des.* **2024**, 207, 121-132.
 21. Zito, P. F.; Brunetti, A.; Barbieri, G. Multi-step Membrane Process for Biogas Upgrading. *J. Membr. Sci.* **2022**, 652, 120454.
 22. Brunetti, A.; Lei, L.; Avruscio, E.; Karousos, D. S.; Lindbräthen, A.; Kouvelos, E. P.; He, X.; Favvas, E. P.; Barbieri, G. Long-term Performance of Highly Selective Carbon Hollow Fiber Membranes for Biogas Upgrading in the Presence of H₂S and Water Vapor. *Chem. Eng. J.* **2022**, 448, 137615.
 23. Wojnarova, P.; Rusin, J.; Basinas, P.; Kostejn, M.; Nemec, J.; Stanovský, P.; Kim, A. S.; Izak, P. Unveiling the Potential of Composite Water-swollen Spiral Wound Membrane for design of Low-cost Raw Biogas Purification. *Sep. Purif. Technol.* **2023**, 326, 124783.
 24. Zhang, Y.; Zhang, F.; Liu, S.; Guo, L.; Wang, Z.; Jin, J. Hydrogen-Bonded Ultrathin Porous Polyamide Membrane for High Flux H₂/CO₂ Separation. *Macromolecules* **2024**, 57, 9419-9428.
 25. Brunetti, A.; Chen, D.; Avruscio, E.; Lei, L.; Karousos, D.; Barbieri, G.; Favvas, E. P.; He, X. Boosting Renewable Methanol Production: A Study on Enriched Hydrogen Recovery Using Hollow Fiber Carbon Membranes in Syngas Stream Upgrades. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2024**, 12, 3344-3354.
 26. Iyer, G. M.; Ku, C.-E.; Zhang, C. Hypersensitive Carbon Membranes for Precise High-temperature H₂ and CO₂ Separation. *Sci. Adv.* **2025**, 11, eadt7512.
 27. Arnal-Herault, C.; Ben Ammar, R.; Roizard, D.; Belaisaoui, B.; Poncot, M.; Royaud, I.; Jonquieres, A. New Copolymer Architecture for Mixed Matrix Membranes with High Loadings of ZIF-8 for Enhanced CO₂ Permeability. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2024**, 63, 14148-14164.
 28. Li, Z.; Fan, G.; Chen, M.; Shen, Q.; Cong, S.; Castro-Muñoz, R.; Li, D.; Wang, J.; Zhang, Y. In-situ Grown NH₂-ZIF-8 with Optimized Polymers Compatibility and Rigidity for Enhanced CO₂/CH₄ Separation Performance in Mixed Matrix Membranes. *J. Membr. Sci.* **2025**, 735, 124522.
 29. Eum, K.; Hayashi, M.; De Mello, M. D.; Xue, F.; Kwon, H. T.; Tsapatsis, M. ZIF-8 Membrane Separation Performance Tuning by Vapor Phase Ligand Treatment. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2019**, 58, 16390-16394.
 30. Pérez-Miana, M.; Luque-Alled, J. M.; Yahia, M.; Mayoral, Á.; Coronas, J. ZIF-8 Modified with 2-undecylimidazolate as Filler for Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *J. Mater. Chem. A* **2024**, 12, 10316-10328.
 31. Zhang, K.; Luo, X.; Li, S.; Tian, X.; Wang, Q.; Liu, C.; Tang, Y.; Feng, X.; Zhang, R.; Yin, S.; Wang, S. ZIF-8 Gel/PIM-1 Mixed Matrix Membranes for Enhanced H₂/CH₄ Separations. *Chem. Eng. J.* **2024**, 484, 149489.
 32. Shi, Y.; Wu, S.; Wang, Z.; Bi, X.; Huang, M.; Zhang, Y.; Jin, J. Mixed Matrix Membranes with Highly Dispersed MOF Nanoparticles for Improved Gas Separation. *Sep. Purif. Technol.* **2021**, 277, 119449.
 33. Chen, K.; Ni, L.; Zhang, H.; Li, L.; Guo, X.; Qi, J.; Zhou, Y.; Zhu, Z.; Sun, X.; Li, J. Phenolic Resin Regulated Interface of ZIF-8 Based Mixed Matrix Membrane for Enhanced Gas Separation. *J. Membr. Sci.* **2023**, 666, 121117.
 34. Jeong, S. K.; Jeong, J. Y.; Lim, S.; Kim, W.-S.; Kwon, H. T.; Kim, J. Mixed Matrix Membranes Incorporating Two-dimensional ZIF-8 Nanosheets for Enhanced CO₂/N₂ Separation. *Chem. Eng. J.* **2024**, 481, 148294.
 35. Zhang, Y.; Tong, Y.; Li, X.; Guo, S.; Zhang, H.; Chen, X.; Cai, K.; Cheng, L.; He, W. Pebax Mixed-Matrix Membrane with Highly Dispersed ZIF-8@CNTs to Enhance CO₂/N₂ Separation. *ACS Omega* **2021**, 6, 18566-18575.
 36. Lasseguette, E.; Fielder-Dunton, L.; Jian, Q.; Ferrari, M.-C. The Effect of Solution Casting Temperature and Ultrasound Treatment on PEBAX MH-1657/ZIF-8 Mixed Matrix Membranes Morphology and Performance. *Membranes* **2022**, 12, 584.
 37. Maleh, M. S.; Raisi, A. In-Situ Growth of ZIF-8 Nanoparticles in Pebax-2533 for Facile Preparation of High CO₂-selective Mixed Matrix Membranes. *Colloids Surf. A* **2023**, 659, 130747.
 38. Jonnalagedda, A.; Kuncharam, B. V. R. Study of Mixed Matrix Membranes with In Situ Synthesized Zeolite Imidazolate Frameworks (ZIF-8, ZIF-67) in Polyethersulfone Polymer for CO₂/CH₄ Separation. *RSC Adv.* **2024**, 14, 27074-27085.
 39. Wang, X.; Wu, L.; Li, N.; Fan, Y. Sealing Tröger Base/ZIF-8 Mixed Matrix Membranes Defects for Improved Gas Separation Performance. *J. Membr. Sci.* **2021**, 636, 119582.
 40. Yuan, X.; Yu, H.; Xu, S.; Huo, G.; Cornelius, C. J.; Fan, Y.; Li, N. Performance Optimization of Imidazole Containing Copolyimide/functionalized ZIF-8 Mixed Matrix Membrane for Gas Separations. *J. Membr. Sci.* **2022**, 644, 120071.
 41. Hu, Z.; Zhang, H.; Zhang, X.-F.; Jia, M.; Yao, J. Polyethylenimine Grafted ZIF-8@cellulose Acetate Membrane for Enhanced Gas Separation. *J. Membr. Sci.* **2022**, 662, 120996.
 42. Li, K.; Ma, Y.; Zhao, W.; Yang, L.; Zhang, J.; Zhang, Q.; Ma, X.; Jiao, L.; Yin, Z.; Cheng, B. Simultaneously Enhanced Gas Separation Performance and Long-term Stability by Thermally Treated ZIF-

- 8-based Nanocomposite Membranes. *Sep. Purif. Technol.* **2025**, 353, 128586.
43. Nobakht, D.; Abedini, R. A New Ternary Pebax®1657/maltitol/ZIF-8 Mixed Matrix Membrane for Efficient CO₂ Separation. *Process Saf. Environ. Prot.* **2023**, 170, 709-719.
 44. Jonnalagedda, A.; Choudhari, S. A.; Nayak, B.; Pani, A. K.; Kuncharam, B. V. R. Asymmetric Mixed Matrix Membranes with Zeolite Imidazolate Frameworks (ZIF-8, ZIF-67, bimetallic ZIF-8/67) and Polyethersulfone for High Flux and High Selective Hydrogen Separation. *Polym. Eng. Sci.* **2025**, 65, 3209-3225.
 45. Eljaddi, T.; Bouillon, J.; Roizard, D.; Lebrun, L. Pebax-Based Composite Membranes with High Transport Properties Enhanced by ZIF-8 for CO₂ Separation. *Membranes* **2022**, 12, 836.
 46. Mosleh, S.; Mozdianfard, M. R.; Khanabaei, G. ZIF-8 Incorporated in an Optimized Pebax1657/PES Membrane for Pure and Mixed CO₂/CH₄ Gas Separation. *Chem. Eng. Technol.* **2024**, 47, 98-107.
 47. Bahrami, A.; Raisi, A. Ternary Synergy in PU/PC/ZIF-8 Mixed Matrix Membranes: Microstructural Engineering for High-performance CO₂ Separation. *Environ. Technol. Innov.* **2026**, 42, 104855.
 48. Jia, Y.; Chen, K.; Liu, P.; Liu, Y.; Pi, X.; Zhang, X.; Zhang, Y. Thermally Annealed High-Aspect-Ratio ZIF-8 Nanoplates-Incorporated Mixed Matrix Membranes for Improved H₂/CO₂ Selectivity. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, 16, 37100-37110.
 49. Moftakhari Sharifzadeh, M. M.; Pajoum Shariati, F.; Ebadi Amooghin, A.; Sanaeepur, H.; Ardjmand, M. Experimental and Modeling Study of 6FDA-Durene Polyimide/Ionic Liquid-modified ZIF-8 Mixed Matrix Membranes for CO₂ Separation. *Results Eng.* **2025**, 26, 104686.
 50. Khan, I. U.; Othman, M. H. D.; Rahman, M. A.; Iftikhar, M.; Ali, Z.; Muqeet, M.; Jaafar, J.; Jilani, A.; Ramli, M. K. N. Enhanced CO₂/CH₄ Separation Using Amine-modified ZIF-8 Mixed Matrix Membranes. *Mater. Chem. Phys.* **2025**, 334, 130404.
 51. Li, Q.-Q.; Li, Y.; Mao, H.; Zhang, Y.-M.; Zhang, Q.-Y.; Chen, X.-R.; Shan, Z.-C.; Zhou, X.-Z.; Xu, L.-H.; Zhao, Z.-P. Bimetallic Engineering in Ag/Zn-ZIF-8/Pebax Mixed Matrix Membranes for Enhanced CO₂ Separation. *J. Membr. Sci.* **2026**, 741, 125046.
 52. Tanvidkar, P.; Jonnalagedda, A.; Kuncharam, B. V. R. Investigation of Cellulose Acetate and ZIF-8 Mixed Matrix Membrane for CO₂ Separation from Model Biogas. *Environ. Technol.* **2024**, 45, 2867-2878.
 53. Majid-Nateri, B.; Abedini, R.; Amiri, A. Mixed Matrix Membrane of Poly(4-methyl-1-pentene) and ZIF-8 for Enhanced CO₂ Separation over H₂ and CH₄. *Sci. Rep.* **2025**, 15, 14418.
 54. Zid, S.; Alcouffe, P.; Zinet, M.; Espuche, E. Mixed-Matrix Membranes Based on Polyetherimide, Metal-Organic Framework and Ionic Liquid: Influence of the Composition and Morphology on Gas Transport Properties. *Polymers* **2022**, 14, 3489.
 55. Dong, L.; Chen, M.; Li, J.; Shi, D.; Dong, W.; Li, X.; Bai, Y. Metal-organic Framework-graphene Oxide Composites: A Facile Method to Highly Improve the CO₂ Separation Performance of Mixed Matrix Membranes. *J. Membr. Sci.* **2016**, 520, 801-811.
 56. Ding, R.; Zheng, W.; Yang, K.; Dai, Y.; Ruan, X.; Yan, X.; He, G. Amino-functional ZIF-8 Nanocrystals by Microemulsion Based Mixed Linker Strategy and the Enhanced CO₂/N₂ Separation. *Sep. Purif. Technol.* **2020**, 236, 116209.
 57. Dong, L.; Chen, M.; Wu, X.; Shi, D.; Dong, W.; Zhang, H.; Zhang, C. Multi-functional Polydopamine Coating: Simultaneous Enhancement of Interfacial Adhesion and CO₂ Separation Performance of Mixed Matrix Membranes. *New J. Chem.* **2016**, 40, 9148-9159.
 58. Liang, C.; Huang, L.; Lv, X.; Wang, J.; Li, L.; Li, X.; Wei, Z. Mixed Matrix Membranes Based on ZIF-8 Nanoparticles/Poly(4-styrene sulfonate) Fillers for Enhanced CO₂ Separation. *ACS Appl. Nano Mater.* **2023**, 6, 2995-3002.
 59. Lv, X.; Huang, L.; Ding, S.; Wang, J.; Li, L.; Liang, C.; Li, X. Mixed Matrix Membranes Comprising Dual-facilitated Bio-inspired Filler for Enhancing CO₂ Separation. *Sep. Purif. Technol.* **2021**, 276, 119347.
 60. Lv, X.; Ding, S.; Huang, L.; Li, X.; Zhang, J. Constructing Dual-Transport Pathways by Incorporating Beaded Nanofillers in Mixed Matrix Membranes for Efficient CO₂ Separation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, 14, 49233-49243.
 61. Jiao, C.; Li, Z.; Li, X.; Wu, M.; Jiang, H. Improved CO₂/N₂ Separation Performance of Pebax Composite Membrane Containing Polyethyleneimine Functionalized ZIF-8. *Sep. Purif. Technol.* **2021**, 259, 118190.
 62. Feng, X.; Liu, C.; Ren, K.; Zhao, X.; Liu, L.; Zhang, K.; Tian, X.; Wang, Q.; Liu, X.; Yu, Y.; Gu, T.; Wang, S. *In-Situ* Synthesis of ZIF-8 Gel Network in Mixed Matrix Membranes for Enhanced CO₂/N₂ Separations. *Chem. Eng. Sci.* **2025**, 311, 121610.
 63. Xia, T.; Wu, Y.; Ji, T.; Hu, W.; Yu, K.; He, X.; Yin, B. H.; Liu, Y. Mixed-matrix Membranes Incorporating Hierarchical ZIF-8 Towards Enhanced CO₂/N₂ Separation. *Smart Mol.* **2025**, 3, e20240066.
 64. Guo, F.; Xiao, W.; Ma, C.; Ruan, X.; He, G.; Wang, H.; Yang, Z.; Jiang, X. Constructing Gas Transmission Pathways in Two-Dimensional Composite Material ZIF-8@BNNS Mixed-Matrix Membranes to Enhance CO₂/N₂ Separation Performance. *Membranes* **2023**, 13, 444.
 65. Kang, C.; Moon, Y.; Kim, J. E.; Kim, H.; Cho, J.; Hong, J.; Park, J.; Kim, B. G. Enhanced CO₂ Separation Performance of Mixed-matrix Membranes Through PIM-1 Based Surface Engineering Using Non-solvent Induced Surface Deposition. *J. Membr. Sci.* **2025**, 721, 123838.
 66. Tao, Y.; Wang, L.; Li, B.; Huang, J.; Pan, Y. Engineering Gas-permeable MOF/polymer Interfaces in Mixed-matrix Membranes for Advanced CO₂ Separation. *J. Membr. Sci.* **2025**, 735, 124588.
 67. Polak, D.; Sułkowska, J.; Szwast, M. The influence of surfactant Pluronic P123 Addition on the Mixed Matrix Membrane PEBAX® 2533 - ZIF-8 Separation Properties. *Desalination Water Treat.* **2021**, 214, 64-73.
 68. Ding, R.; Li, Z.; Dai, Y.; Li, X.; Ruan, X.; Gao, J.; Zheng, W.; He, G. Boosting the CO₂/N₂ Selectivity of MMMs by Vesicle Shaped ZIF-8 with High Amino Content. *Sep. Purif. Technol.* **2022**, 298, 121594.

출판자 공지사항: 한국고분자학회에 게재된 논문 및 기관 소속의 관찰권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.