

3D 프린터로 제작된 미세유체 디바이스를 활용한 액적 제조

Emulsion Generation from 3D-Printed Microfluidic Devices

신수빈 · 이재문 · 박소은 · 김도연 · 황윤호

Su-Bin Shin · Jaemoon Lee · Soeun Park · Doyeon Kim · Yoon-Ho Hwang

Department of Polymer Engineering, Pukyong National University,
45 Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48547, Korea
E-mail: yoonho0806@pknu.ac.kr

1. 서론

생명공학, 제약 및 첨단 소재 산업이 발전함에 따라, 고효율·고정밀 스크리닝 및 기능성 물질 대량생산 기술에 대한 수요가 급증하고 있다. 이를 위한 핵심 기술로 주목받는 액적 기반 미세유체 기술은 두 비혼화성 유체를 이용해 연속상 내부에 나노리터에서 마이크로리터 부피의 단분산 액적을 규칙적으로 생성하고, 각 액적을 독립된 미세반응기로 활용하는 기술이다. 시료 소모량이 적고 반응 조건을 정밀하게 제어할 수 있어 단일세포 분석, 디지털 PCR, 약물 전달체와 마이크로캡슐 제조, 기능성 입자 합성 등에 널리 활용되며, 일반적으로 변동계수(coefficient of variation) 5% 이하의 크기 분포가 단분산 액적의 실용적 기준으로 요구된다.¹

현재 액적제조용 미세유체소자는 주로 포토리소그래피와 PDMS 기반의 소프트리소그래피 공정으로 제작되어 왔다. 이 방식은 높은 해상도를 확보할 수 있지만, 고가의 클린룸 시설과 복잡한 다단계 작업이 필수적이다. 무엇보다 구조가 2차원 평면에 국한되는 경우가 많아 다중 에멀전 생성이나 대량 생산을 위한 병렬화 설계에 근본적인 제약이 따른다. 이러한 한계를 극복하기 위해 3D 프린팅 기술이 미세유체소자의 차세대 제작 방식으로 연구되고 있다. 3D 프린팅은 Computer-Aided Design(CAD) 설계를 통해 빠르게 설계도를 제작하고 단일 공정으로 직접 구현하여, 축대칭 유로나 적층형 분배 구조와 같은 복잡한 3차원 형상을 별도의 정렬 및 접합 공정 없이 제작할 수 있다.² 특히 광조형(vat-photopolymerization) 계열 기술은 수십~수백 마이크로미터 크기의 유로 해상도와 비교적 우수한 광학적 특성을 제공하며 실질적인 제작 대안으로 부상하고 있다.¹⁻³

그러나 3D 프린팅을 액적 미세유체소자에 온전히 적용하기 위해서는 광경화 수지의 특성과 유체 거동 제어 사이의 균형을 맞추는 것이 여전히 중요한 과제이다. 고해상도 출력을 위한 광개시제나 첨가제는 소자의 광학적 투명도를 떨어뜨릴 수 있으며, 출력물의 표면 화학 특성은 액적 생성의 핵심인 표면 젖음성(wettability)을

Author



신수빈

2026

부경대학교
고분자공학과
(학사)
2026-현재
부경대학교
고분자공학과
(석사과정)



박소은

2026

부경대학교
고분자공학과
(학사)
2026-현재
부경대학교
고분자공학과
(석사과정)



이재문

2021-현재

부경대학교
고분자공학과
(학사과정)



김도연

2022-현재

부경대학교
고분자공학과
(학사과정)



황윤호

2013
2019
2022
2024
2024-현재

충남대학교 화학공학과 (학사)
POSTECH 화학공학과 (박사)
POSTECH 화학공학과 (Post-Doc)
University of Pennsylvania (Post-Doc)
부경대학교 고분자공학과 조교수

불안정하게 만들 수 있다. 반대로 내화학적이나 생체적 합성이 뛰어난 소재는 프린팅 정밀도가 떨어지거나 점도가 높아 유로 제작이 까다로운 트레이드오프(trade-off) 관계를 가진다. 따라서 성공적인 3D 프린팅 기반 액적 생성을 위해서는 정교한 3차원 설계뿐만 아니라 적절한 소재 선택 및 표면 개질 전략이 필수적이다.

본 글에서는 액적 생성의 유체역학적 원리를 바탕으로 주요 3D 프린팅 기법의 특징과 이를 활용한 액적 제조의 최신 연구 동향을 정리한다. 또한 단일·다중 에멀전 생성과 병렬화 적용 사례를 분석하며, 3D 프린팅으로 제작된 미세유체 디바이스를 활용한 액적제조 시스템에 관하여 논의한다.

2. 본론

2.1 지배 무차원수와 유동 영역

미세채널 유동은 레이놀즈 수($Re = \rho U D / \mu$)가 매우 낮은 층류 영역에 속하므로 관성 효과는 상대적으로 작으며, 액적 형성은 주로 계면장력과 점성 전단력의 경쟁에 의해 결정된다. 이를 대표하는 지표가 모세관 수($Ca = \mu U / \gamma$)이며, 실제 액적 형성 거동은 유량비(Q_d/Q_c)와 점도비(μ_d/μ_c)의 영향도 함께 받는다.² 낮은 모세관 수에서는 분산상이 채널을 부분적으로 차단하면서 상류 압력이 증가하는 압착(squeezing)이 나타나고, 이때 액적 크기는 주로 유량비에 의해 좌우된다. 모세관 수가 증가하면 계면에 작용하는 점성 전단의 영향이 커지면서 적하(dripping) 영역으로 전이하고, 일반적으로 액적 크기는 감소한다. 더 높은 모세관 수에서는 분산상이 긴 제트를 형성한 뒤 계면 불안정성에 의해 분열하는 분사(jetting)가 나타난다. 이러한 유동 영역의 전이는 채널 형상과 유체 물성에 따라 달라질 수 있으므로, 균일한 액적 생성을 위해서는 안정적인 적하 영역을 확보하는 것이 중요하다.

2.2 액적 생성 형상

대표적인 액적 생성 형상으로는 T-junction, co-flow, flow-focusing, step-emulsification이 있다(그림 1). T-junction은 분산상과 연속상 채널이 직교하는 단순한 구조로, 특히 낮은 모세관 수의 압착 영역에서 유량비를 이용해 액적 크기를 비교적 용이하게 조절할 수 있다. Co-flow는 분산상과 연속상이 동일한 방향으로 동축 흐름을 형성하므로 분산상과 채널 벽면의 직접적인 접촉을 줄일 수 있으며, 3D 프린팅을 이용한 축대칭 유로 구현에 적합하다. Flow-focusing은 양측 또는 주변의 연속상이 분산상을 좁은 오리피스로 집속하여 높은 전단 및 신장 유동을 형성하므로 채널 치수보다 작은 액적 생성에 유리하다.⁴ Step-emulsification은 얇은 유로가 깊은 저장부로 급격히 확대될 때 계면 곡률과 라플라스 압력이 변화하면서 액적이 자발적으로 분리되는 방식이다. 특히 액적 크기가 유량 변화에 비교적 둔감하고 주로 노즐

형상에 의해 결정되므로, 다수 노즐을 이용한 병렬화 및 처리량 증대에 적합하다.^{5,6}

2.3 액적 크기의 스케일링 관계

액적 크기는 생성 형상과 유동 영역에 따라 서로 다른 스케일링 관계를 따른다. 이때 두 비혼화성 유체의 계면에서 곡률에 의해 발생하는 압력차를 라플라스 압력(ΔP)이라 하며, 이는 Young-Laplace 관계인 $\Delta P = \gamma(1/R_1 + 1/R_2)$ 로 표현되며, 구형 액적에서는 $\Delta P = 2\gamma/R$ 로 단순화할 수 있다. 따라서 액적의 곡률 반경이 작아질수록 계면에서 발생하는 라플라스 압력은 증가한다. 낮은 Ca 의 압착 영역에서 작동하는 T-junction에서는 $L/w \approx 1 + a(Q_d/Q_c)$ 의 관계에 따라 유량비가 액적 크기의 주요 제어 변수가 되며, 동일한 채널 형상에서는 Q_d/Q_c 가 증가할수록 액적 길이가 증가하는 경향을 보인다. Flow-focusing의 적하 영역에서는 특정 유동 조건에서 액적 지름이 대체로 $d \propto Ca^{-n}$ 의 형태로 감소하며, 지수 n 은 채널 형상과 유체 물성에 따라 달라질 수 있다. Step-emulsification에서는 얇은 노즐에서 깊은 저장부로 진입하면서 계면 곡률과 라플라스 압력이 급격히 변화하고, 이에 따라 국부적 수축(necking)과 액적 분리가 유도된다. 이 경우 액적 크기는 유량보다 노즐 높이와 같은 형상 치수의 영향을 크게 받으며, 이러한 유량 둔감성은 병렬화된 노즐 사이의 유량 편차가 액적 크기 편차로 직접 전이되는 것을 완화한다.⁵

2.4 3D 프린팅 기법과 미세유체 디바이스 제작 적용성

액적 미세유체소자 제작에는 광조형, 재료 압출, 재료 분사 방식이 주로 활용되며, 이 가운데 미세 구조 구현과 광학적 관찰에 유리한 광조형 계열이 가장 널리 사용된다(그림 2). Stereo lithography apparatus(SLA)는 UV 레이저를 점 주사하여 수지를 선택적으로 경화하는 방식이고, digital light processing(DLP)는 digital micromirror device(DMD)를

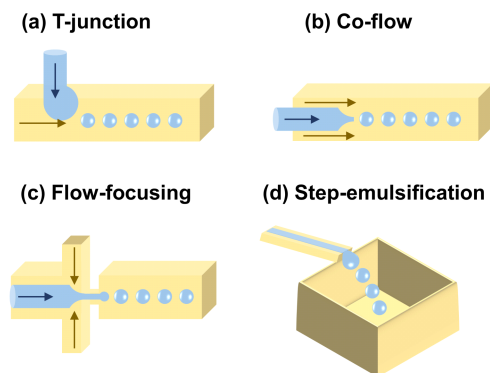


그림 1. 대표적인 미세유체 액적 생성 형상의 모식도. (a) T-junction, (b) Co-flow, (c) Flow-focusing, (d) Step-emulsification. 각 구조에서 분산상과 연속상의 유동에 따른 액적 형성 방식을 나타낸다.

이용해 한 층을 일괄 노광하므로 상대적으로 빠른 제작이 가능하다. 기존 연구에서는 SLA와 DLP를 이용해 수십 마이크로미터 수준의 미세 형상이 구현되었으며, 프린터, 레진 및 노광 조건에 따라 약 20-30 μm 수준의 형상도 보고되었다.¹⁻³ 이러한 광조형 방식은 비교적 매끄러운 내벽과 투명한 구조를 구현할 수 있어 유로 내부의 액적 생성 과정을 직접 관찰하는 데 유리하다. Two-photon polymerization(2PP)는 이광자 흡수를 이용해 수 마이크로미터 수준의 미세구조를 구현할 수 있지만, 작은 조형 영역과 낮은 제작 속도, 높은 비용으로 인해 주로 국소 미세구조나 마스터 몰드 제작에 사용된다.^{2,3}

재료 압출 방식인 fused deposition modeling(FDM)은 장비와 소재 비용이 낮고 다양한 열가소성 수지를 사용할 수 있다는 장점이 있으나, 일반적으로 광조형 방식보다 해상도가 낮고 표면이 거칠며 투명도가 낮아 정밀 액적 소자 적용에는 한계가 있다.³ PolyJet과 같은 재료 분사 방식은 수십 마이크로미터 수준의 구조 형상과 다중 재료 프린팅이 가능하지만, 고가 장비와 독점 레진, 밀폐 유로 내부의 지지제 제거 문제가 제약으로 작용한다.^{1,2} 따라서 현재 액적 미세 유체 분야에서는 미세 유로 구현 능력, 광학적 관찰성 및 제작 속도를 종합적으로 고려할 때 SLA와 DLP가 가장 실용적인 제작 방식으로 평가된다.

2.5 3D 프린팅 기반 에멀전 생성

단일 에멀전은 3D 프린팅 액적 소자분야에서 가장 완성도 높은 응용 기술이다. 초기 연구에서는 co-flow 구조를 단일 부품으로 프린트해 W/O(water-in-oil)와 O/W(oil-in-water) 액적을 모두 생성할 수 있음을 보였고 저가 데스크톱 SLA 프린터에서도 단분산 액적 생성이 보고되었다(그림 3a).⁷ 최근에는 프린터의 물리적 해상도를 높이는 데 의존하기

보다, 유로 형상을 조절해 국소 전단과 신장 유동을 강화함으로써 해상도 한계를 보완하는 설계가 활용된다. 예를 들어 약 50 μm 해상도의 SLA 프린터로 500-600 μm 폭의 유로를 제작하되, 분기각(45° , 90° , 135°)과 오리피스 단면($500 \times 500 \mu\text{m}^2 \sim 500 \times 100 \mu\text{m}^2$)까지 변화시킨 연구에서는 기존 형상보다 약 90% 작은, 약 80 μm 수준의 액적을 얻을 수 있었다.⁸ 이는 프린터의 최소 조형 치수가 생성 가능한 액적의 최소 크기와 직결되지 않으며, 유동 집속을 강화하는 형상 설계가 해상도 격차를 상당 부분 보완할 수 있음을 보여준다. 비매립형 co-flow-focusing 노즐과⁹ 유연 재료를 이용해 액적 크기 조절 기능을 소자에 내장한 사례도 같은 설계 전략에 해당한다.¹⁰ 또한 DLP 프린터를 이용해 밀리미터 사이즈의 굴뚝 모양 소자를 제작하여 유동 집속과 중력을 함께 활용함으로써 비교적 큰 치수의 유로에서 균일한 단분산성의 액적을 고처리량으로 얻은 연구는 3D 프린팅 소자의 높은 설계 자유도를 보여준다(그림 3b).¹¹

W/O/W와 O/W/O 같은 다중 에멀전은 캡슐, 마이크로젤, 인공세포 모델의 템플릿으로 활용되며,^{12,13} 서로 다른 젖음성을 요구하는 두 개 이상의 액적 생성부를 직렬로 배치해야 하므로 3차원 유로 설계의 이점이 크다. 기능 모듈과 T-junction, co-flow 모듈을 각각 프린트해 나사 결합으로 재구성하거나 다중재료 프린팅으로 서로 다른 재료 특성을 하나의 소자에 통합하는 방식이 보고되었다.¹⁴ 하지만 이중 에멀전 및 복합 에멀전을 전 공정 3D 프린팅만으로 구현한 사례는 아직 제한적이며, 유리 모세관이나 상용 튜빙과의 하이브리드 조립도 여전히 사용되고 있다.²

이처럼 3D 프린팅은 다양한 에멀전 구조를 구현할 수 있지만, 산업적 활용을 가로막는 가장 큰 장벽은 낮은 처리량과 병렬 채널 간의 유량분배 불균일성이다. 단일 생성기의 생산량은 통상 수 mL/h 수준에 불과하여 수십-수백 개의 노즐을 병렬 구동해야 하지만, 매니폴드의 종방향 압력 구배가 커지면 상류와 하류 노즐의 유량과 액적 크기가 달라진다. 실제로 사다리형(ladder) 매니폴드에서는 단일 유닛에서 0.5% 미만이던 변동계수가 15채널 배열에서 5%를 초과하는 사례가 보고된 바 있다(그림 3c).¹⁵ 이러한 채널 간 편차를 줄이기 위해 입구에서 각 노즐까지의 수력 저항을 동일하게 하는 대칭형 트리(tree) 매니폴드를 사용하거나, 각 단위 셀에 충분한 국부 저항을 삽입해 매니폴드 압력 구배의 영향을 상쇄하는 설계가 주로 적용된다. 나아가 병렬 소자 전체에 걸쳐 균일한 표면 처리와 표준화된 계면 활성제 조건을 유지하고, 운전 압력에 의한 유로 변형을 억제할 수 있는 재료를 선택하는 것 역시 중요하게 다뤄진다. 한편, 상류에서 생성된 액적을 하류 분기 구조에서 순차적으로 분열시키는 전략은 압력 편차 문제를 우회하면서 높은 생산량을 확보하고 최종 액적 크기를 조절하는 또 다른 대안으로

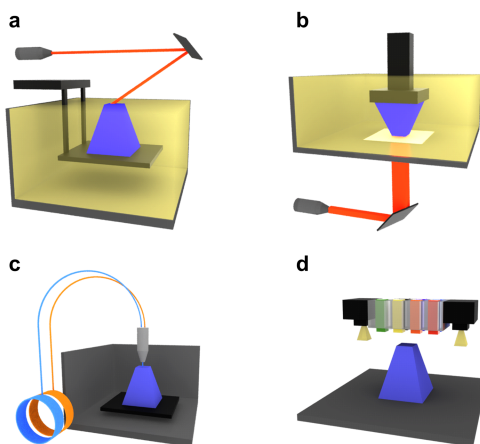


그림 2. 대표적인 3D 프린팅 기법들의 모식도.² (a) Stereo lithography apparatus(SLA). (b) Digital light processing(DLP). (c) Fused deposition modeling(FDM). (d) polyJet.

활용되고 있다(그림 3d).¹⁶

3D 프린팅은 이러한 병렬화에서 적층 정렬이 필요 없는 체적형(volumetric) 매니폴드를 단일 부품으로 구현할 수 있다는 고유한 장점이 있다. 40개 출구를 갖는 부채꼴 분배기와 (그림 3e) 최대 80개 생성기를 포함하는 방사 대칭 네트워크가 그 예이며,^{2,17} 이러한 3차원 유동 경로 배치를 통해 각 생성기까지의 수력학적 저항을 균일하게 제어할 수 있다. 여기에 유량 변화에 둔감한 step-emulsification을 결합하면 노즐 간 유량 편차가 액적 크기 편차로 전이되는 민감도를 더욱 낮출 수 있으며, 일체형(monolithic) 중력 보조 소자를 이용한 고점도 에멀전의 확장 생산도 보고되었다(그림 3f).⁵ 최근에는 위상(topology) 최적화를 이용해 다채널의 유량 균일성을 개선하는 접근도 제시되고 있으며,⁶ 이와 함께, 이중 에멀전의 고처리량 생산을 위해 원터치 조립이 가능한 3D 프린팅 기반 병렬화 모듈형 소자가 보고되었다(그림 3g).¹⁸ 이 연구에서는 선택적인 젖음성 제어를 통해 단일 기기와 동일한 에멀전 특성을 유지하면서 최대 155 mL/h의 높은 생산량을 입증하였다. 따라서 대량 생산에서는 단순히 노즐 수를 늘리는 것보다 매니폴드의 수력학적 균형, 각 생성기의 유량 균일분배, 표면 상태의 균일성을 함께 설계해야 한다.

3. 결론

3D 프린팅은 축대칭 co-flow 유로와 체적형 분배 매니폴드처럼 기존 2차원 공정으로 구현하기 쉽지않은 3차원 구조를

단일 부품으로 제작하고 설계-제작-검증 주기를 단축하는 등 액적 미세유체소자 제작에 뚜렷한 이점을 제공한다. 비록 현재 3D 프린터의 절대 해상도가 포토/소프트리소그래피보다 낮더라도 구조를 적절히 설계하면 채널 치수보다 작은 단분산 액적을 생성할 수 있으며, 이를 체적형 매니폴드와 결합하면 생산량을 병렬적으로 확장할 수 있다. 하지만 산업적 실용화를 위해서는 해상도, 밀폐 유로 내부의 표면 거칠기 및 미경화 레진 제거 문제, 장시간 운전 시 발생하는 레진의 팽윤과 젖음성 변화 및 유량 불균일성 등을 체계적으로 검증하고 극복해야 한다.

참고문헌

1. A. Aladese and H.-H. Jeong, *BioChip J.*, **15**, 313 (2021).
2. J. H. Lee, T. Jang, S. Park, S.-B. Shin, J. Lee, Y.-H. Hwang, and H. Lee, *Lab Chip*, **26**, 1219 (2026).
3. J. Xu, M. Harasek, and M. Gföhler, *Polymers*, **17**, 455 (2025).
4. C. Lee, Y. Cho, W. Jung, J. Lee and Y. Hwang, *J. Mech. Sci. Technol.*, **36**, 333 (2022).
5. Y.-H. Hwang, J. H. Lee, T. Um, and H. Lee, *Lab Chip*, **24**, 4778 (2024).
6. Z. Zhang, S. Feng, H. Li, T. Ding, and S. Tao, *Microfluidics Nanofluidics*, **30**, 9 (2025).
7. J. Zhang, W. Xu, F. Xu, W. Lu, L. Hu, J. Zhou, C. Zhang, and Z. Jiang, *J. Food Eng.*, **290**, 110212 (2021).
8. A. Britel, G. Tomagra, P. Aprà, V. Varzi, S. Sturari, N.-H.

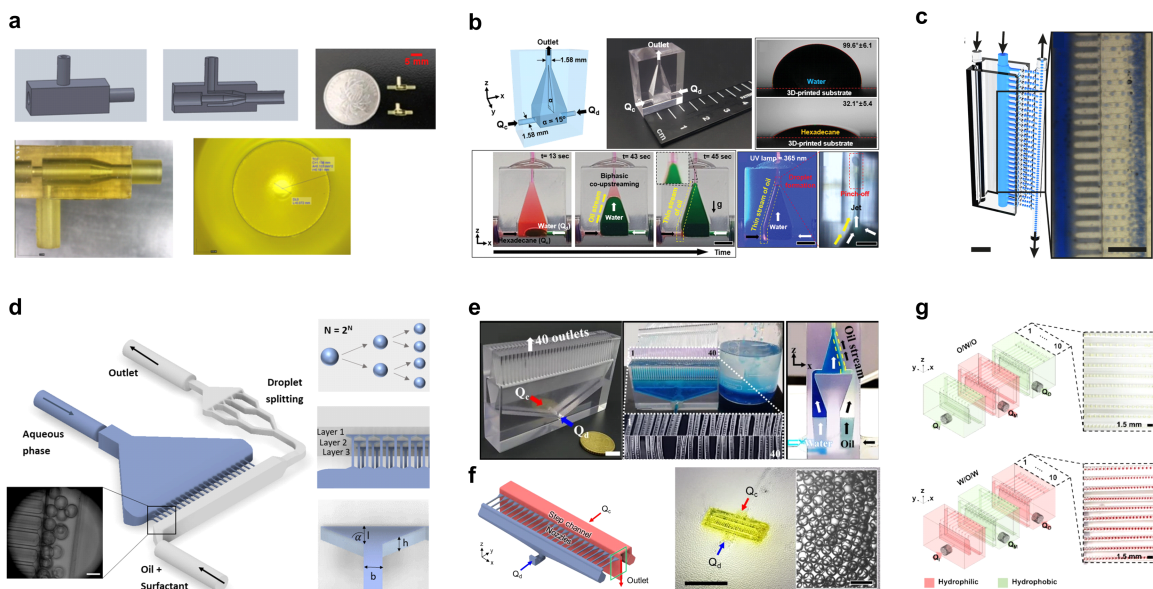


그림 3. 다양한 종류의 3D 프린팅 기반 에멀전 생성 디바이스 이미지. (a) Co-flow가 내장된 일체형 디바이스.⁷ (b) 밀리미터 사이즈의 단분산성 액적을 고처리량 생성할 수 있는 굴뚝 모양 디바이스.¹¹ (c) 신속 프로토타이핑 방식을 이용한 수직 적층형 병렬 디바이스.¹⁵ (d) 상부에서 균일한 액적을 제작하고 하부에서 순차적으로 분열시키는 캐스케이드 방식의 디바이스.¹⁶ (e) 굴뚝 모양 디바이스를 40개 병렬화하여 처리량을 극대화한 디바이스.¹⁷ (f) 중력을 이용해 고점도의 액적을 고처리량으로 생산할 수 있는 step-emulsification 방식 디바이스.⁵ (g) 이중 에멀전 및 캡슐의 고처리량 생산을 위해 제작된 일체형 병렬화 디바이스.¹⁸

- Amine, P. Olivero, and F. Picollo, *RSC Adv.*, **14**, 7770 (2024).
9. A. Dewandre, J. Rivero-Rodriguez, Y. Vitry, B. Sobac, and B. Scheid, *Sci. Rep.*, **10**, 21616 (2020).
10. N. Weigel, M. J. Männel, and J. Thiele, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 31086 (2021).
11. Y.-H. Hwang, T. Um, J. Hong, G.-N. Ahn, J. Qiao, I. S. Kang, L. Qi, H. Lee, and D.-P. Kim, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1900457 (2019).
12. S. A. Ryu, Y.-H. Hwang, H. Oh, K. Jeon, J. H. Lee, J. Yoon, J. B. Lee, and H. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 36380 (2021).
13. J. H. Lee, Y.-H. Hwang, M. Noh, J. H. Lee, J. B. Lee, and H. Lee, *Biomater. Sci.*, **11**, 7531 (2023).
14. Q. Ji, J. M. Zhang, Y. Liu, X. Li, P. Lv, D. Jin, and H. Duan, *Sci. Rep.*, **8**, 4791 (2018).
15. T. Femmer, A. Jans, R. Eswein, N. Anwar, M. Moeller, M. Wessling, and A. J. C. Kuehne, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **7**, 12635 (2015).
16. M. Vigogne, T. A. Neuendorf, R. Bernhardt, and J. Thiele, *J. Polym. Sci.*, **61**, 1902 (2023).
17. Y.-H. Hwang, T. Um, G.-N. Ahn, D.-P. Kim, and H. Lee, *Chem. Eng. J.*, **431**, 133998 (2022).
18. G.-S. Na, S. H. Pyen, Y.-H. Hwang, and D.-P. Kim, *Chem. Eng. J.*, **528**, 172213 (2026).