

# 미래 배터리 기술의 중심, HNBR 바인더의 역할과 전망



**유지훈**

중앙대학교  
첨단소재공학과  
yujeehoon@cau.ac.kr



**유영재**

중앙대학교  
첨단소재공학과 교수  
yjyoo@cau.ac.kr

## 서론

이차전지의 성능을 결정짓는 주요 구성 요소 중 하나는 전극 바인더입니다. 전극 바인더는 전극의 물리적 구조를 유지하고, 전자와 이온의 이동을 보장하는 중요한 역할을 합니다. 기존의 바인더로 흔히 사용되는 폴리비닐리덴 플루오라이드(PVDF)는 낮은 접착력과 약한 기계적 강도로 인해 고에너지 밀도 배터리의 요구를 충족시키기에는 한계가 있습니다.<sup>1</sup> 특히, 두꺼운 전극이나 고용량 전극의 경우 이러한 단점이 더욱 두드러집니다. 따라서, 차세대 고성능 이차전지를 개발하기 위해서는 새로운 고기능성 폴리머 바인더의 탐색이 필수적입니다.

최근 전극 바인더의 설계와 개발에 대한 관심이 크게 증가하였습니다. 다양한 전극 재료, 특히 리튬이온 배터리(LIB)의 음극 및 양극 재료와 리튬-황 배터리(Li-S)의 양극 재료에 적합한 바인더<sup>2</sup>들이 개발되고 있습니다. 이러한 바인더들은 단순한 접착제의 역할을 넘어, 전기 전도성, 전해질 계면 안정화, 폴리설퍼이드 앵커링<sup>3</sup> 등의 기능을 제공합니다. [그림1]에서 제시하는 바와가 같이 바인더 설계에서는 수용성, 결합강도, 탄성, 전도성, 화학적 기능성 및 전해질 흡윤성 등의 측명을 고려하고 있습니다.

HNBR(수소화 니트릴 부타디엔 고무)는 이러한 요구를

충족시키는 유망한 바인더 재료로 주목받고 있습니다. HNBR은 우수한 기계적 강도와 화학적 안정성을 가지며, 고온에서도 안정된 성능을 유지할 수 있습니다. 또한, HNBR의 고무 특성은 전극의 기계적 스트레스에 대한 내성을 향상시키며, 전해질과의 호환성도 뛰어납니다. 이러한 특성들은 고에너지 밀도 및 장수명 이차전지의 성능을 극대화하는 데 중요한 역할을 할 수 있습니다.

HNBR의 주요 장점 중 하나는 그 뛰어난 내열성입니다. 고온에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있는 HNBR은, 특히 전기차와 같은 고온 환경에서 사용되는 이차전지에 매우 적합합니다. 또한, HNBR은 화학적 저항성이 높아 다양한 전해질과의 호환성<sup>4</sup>이 우수하며, 이는 전해질과의 부반응을 최소화하여 전지의 수명을 연장시키는 데 기여할 수 있습니다.

HNBR 바인더의 또 다른 중요한 특성은 그 우수한 기계적 강도입니다. HNBR은 높은 인장 강도와 탄성을 가지며, 이는 전극이 충전 및 방전 사이클 동안 겪는 기계적 스트레스에 대한 저항성을 높입니다. 이러한 기계적 안정성은 특히 고용량 전극 재료에서 중요한데, 예를 들어, 실리콘 음극재의 경우 충전 및 방전 시 큰 부피 변화가 발생하여 전극의 구조적 무결성이 손상될 수 있습니다. HNBR 바인더는 이러한 문제를 완화시켜 전극의 장기적인 성능을 보장할 수 있습니다.

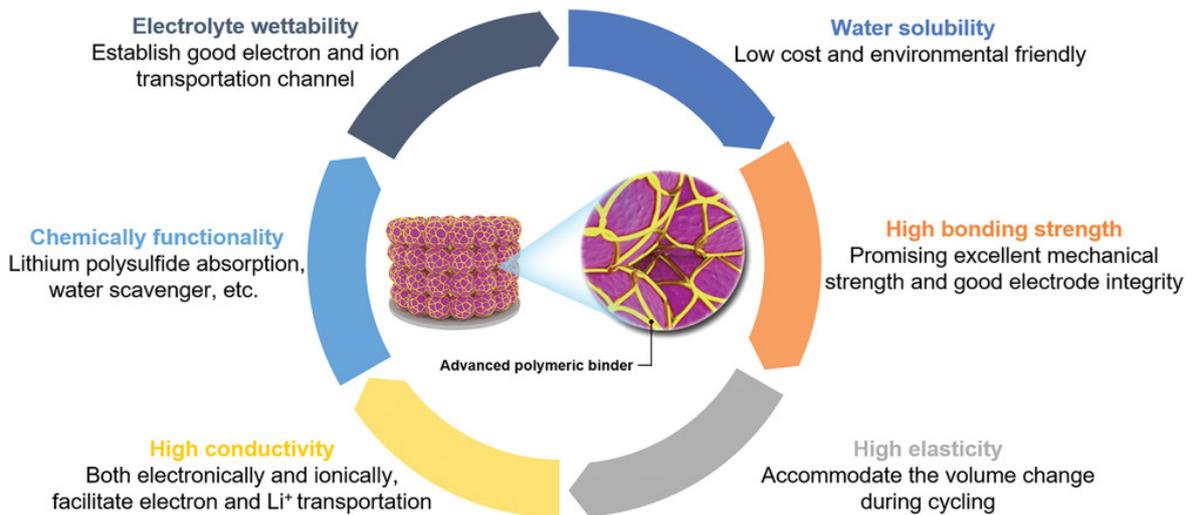


그림 1. 고성능 배터리 위한 고분자 바인더가 가져야 하는 이상적인 특성<sup>5</sup>

본 글에서는 HNBR 바인더의 현재 세계적인 연구 동향과 문제점들을 고찰하고자 합니다. HNBR의 물리적, 화학적 특성을 기반으로 한 장점들을 분석하고, 이를 통해 기존 바인더의 한계를 어떻게 극복할 수 있는지 논의할 것입니다. 또한,

HNBR의 적용에 있어 현재 연구에서 드러난 문제점들과 해결 방안들을 살펴봄으로써, 차세대 고성능 이차전지의 핵심 소재로서 갖는 HNBR의 잠재력을 조명하고자 합니다.

## HNBR의 바인더로서의 기계적 강도와 전기화학적 안정성

연구는 리튬 이온 배터리 전극에 사용되는 새로운 잠재적 바인더 소재로서 폴리아크릴로니트릴 기반 고무(HNBR)를 제안합니다. 몬트리올 대학 Dominic Rochefort 연구팀은 상업용 엘라스토머인 HNBR을 사용하여 리튬 이온 배터리 양극 및 음극에 대한 바인더로서의 성능을 평가했습니다. 이 연구의 주된 목적은 HNBR의 전기화학적 안정성을 검증하고, 이를 통해 전극의 기계적 강도와 성능을 개선하는 것입니다.

HNBR은 전기화학적 안정성, 기계적 강도, 접착력에서 기존의 PVdF(폴리비닐리덴 플루오라이드) 바인더보다 우수한 특성을 보였습니다. HNBR을 가교 처리하여 전해질에 대한 불용성을 확보하고, 이를 통해 전극의 구조적 무결성을 유지하면서도 유연한 변형이 가능하게 했습니다. 인장 시험 결과, 가교된 HNBR 필름은 최대 400%의 가역적 변형을 보여주었고, PVdF는 단 10%의 연신율에서 비가역적 변형에 도달했습니다. 이는 HNBR이 PVdF보다 훨씬 높은 변형 능력을 가짐을 나타냅니다.

전기화학적 안정성 평가에서 HNBR은 1.02.2V 및 2.24.2V의 전위 범위에서 전기화학적으로 안정한 것으로 나타났습니다. 또한, 전극 제조 과정에서 HNBR은 활성 물질과 전도성 탄소를 균일하게 분산시켜 전극의 전기화학적 성능을 극대화했습니다. SEM 관찰 결과, HNBR 기반 전극은 PVdF 기반 전극보다 더 균일한 분산을 보여주었습니다. 접착력 시험에서 HNBR 기반 전극은 양극에서 1.3 N/cm, 음극에서 0.6 N/cm의 접착 강도를 보였으며, 이는 PVdF 기반 전극보다 각각 1.4배, 3배 더 높은 강도입니다.

전기화학적 테스트 결과, HNBR 기반 전극은 PVdF 전극에 비해 초기 용량이 더 높고, 200번의 충방전 사이클 후에도 높은 용량 유지율을 보였습니다. HNBR 기반의 cLFP 음극은 0.2D에서 153mAh/g, 15D에서 118mAh/g의 용량을 유지했으며, PVdF 기반 전극은 동일한 조건에서 각각 144mAh/g 및 117mAh/g의 용량을 기록했습니다. LTO 전극의 경우, HNBR 기반 전극은 0.2C에서 172mAh/g, 15C에서 165mAh/g의 용량을 보여주었으며, 이는 PVdF 전극의 158mAh/g보다

우수한 성능입니다. [그림 2]

이 연구는 HNBR의 기계적 특성과 전기화학적 안정성이 리튬 이온 배터리의 성능 향상에 크게 기여할 수 있음을 시사합니다. HNBR 기반 전극은 특히 유연한 배터리 응용 및 높은 전력 밀도가 요구되는 분야에서 뛰어난 성능을 발휘할 수 있으며, 기존 PVdF 바인더를 대체할 수 있는 유망한 대안으로 평가하고 있습니다.

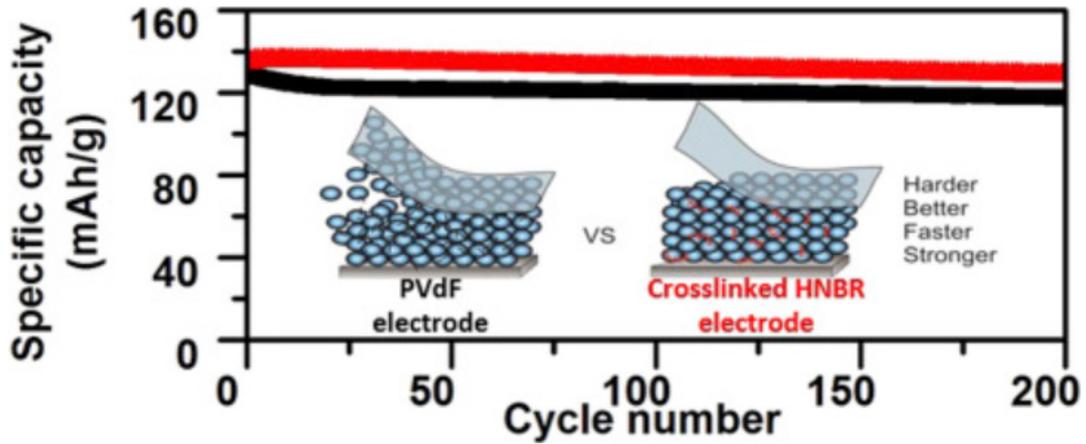


그림 2. HNBR 바인더의 장기 사이클 성능<sup>6</sup>

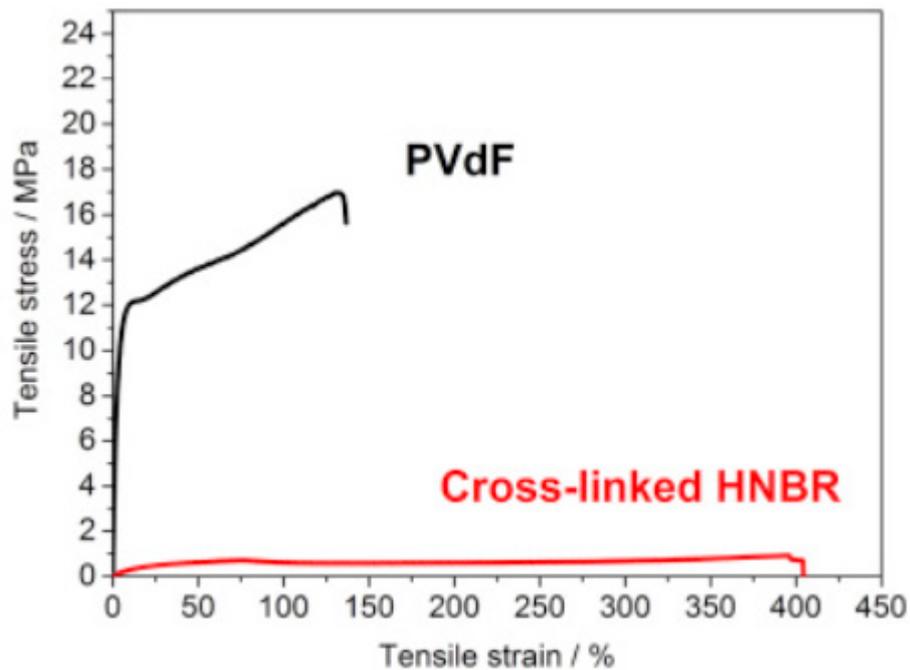


그림 3. 인장시험으로 확인된 전극 최적화 기계적 물성<sup>5</sup>

## 복합화에서의 기계적 물성 부여

HNBR은 단독으로 사용하기 보다는 Li-Si 배터리에서 SBR(스티렌부타디엔 고무)과 CMC(카르복시메틸 셀룰로오스)를 복합하여 CMC의 부족한 기계적 물성을 SBR의 복합화<sup>7</sup>를 통해 개선함과 같이 복합화를 통해 기계적 물성을 주로 부여하고 있으며 안정적인 전기화학적 물성이 복합화하였을 때의 부반응에 대한 리스크가 적어 고성능 배터리를 위한 솔루션으로 제시되고 있습니다.

한국재료연구원의 유정근 박사 연구팀에서 고 에너지 밀도 리튬 이온 배터리용 다기능 첨가제로 HNBR를 택하여 분산도 향상 뿐만 아니라 기계적, 화학적, 물리적 및 열적 특성을 개선하였다. [그림 4] 위의 연구는 HNBR과 PVDF의 복합화를 위해 멜리민-포름알데히드 코폴리머를 사용하여 안정적으로 HNBR의 물성과 PVDF의 물성을 부여하였으며 얇고 유연한 후막 전극을 구현하여 원통형 배터리를 위한 솔루션을 제공하였습니다.

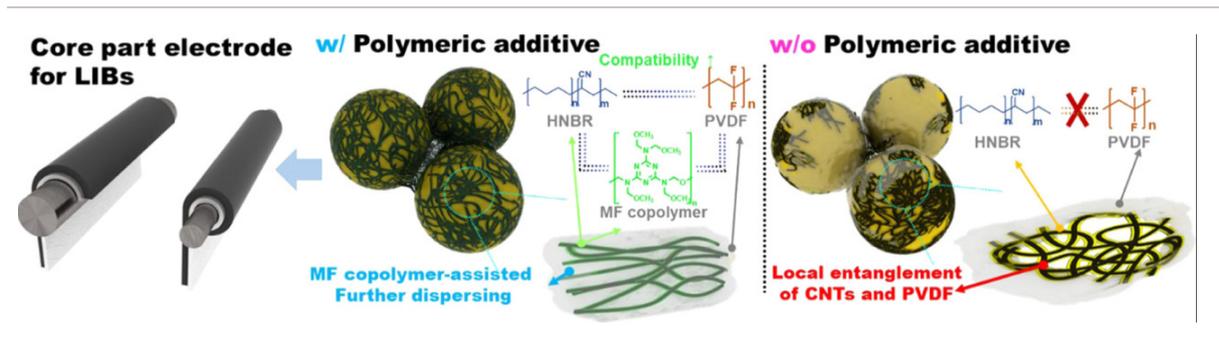


그림 4. HNBR이 첨가된 전극 바인더 시스템<sup>8</sup>

전극에 물성을 부여할 뿐만 아니라 용융가공을 통하여 전극 제조간 건식 공정 적용에 가능성을 부여하여 HNBR이 기존 PTFE가 주류인 건식공정에서 새로운 주인공이 될 수 있는 가능성을 보여주었습니다. 몬트리올 대학의 Mickaël Dollé 팀에서 고분자 가공 보조제와 HNBR을 혼합하는 용융 압출 공정을 제시하였습니다. HNBR의 우수한 분산 특성과 탁월한 기계적, 화학적 물성은 기존 시행되는 습식공정으로 만들어지는 전극을 대체할 수 있는 차세대 전극 생산 공정인 건식 공정에서도 좋은 후보 재료가 될 수 있음을 보여주었습니다. [그림 5]

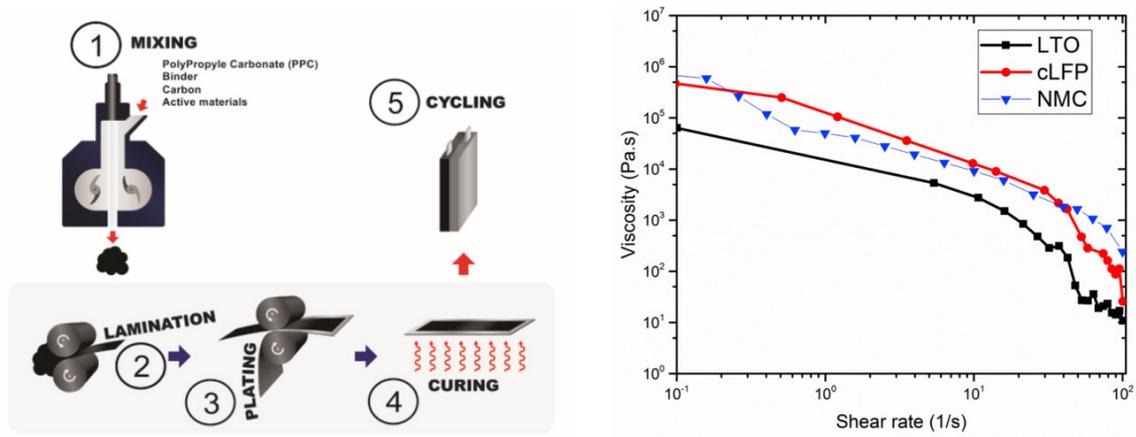


그림 5. (a) 건식 공정 단계의 개략도 및 (b) 80°C에서 LTO(검은색 사각형), cLFP(완전 빨간색 원) 및 NMC(파란색 삼각형)를 사용하여 제조된 블렌드의 90°C에서의 흐름 곡선<sup>9</sup>

위와 같이 HNBR은 복합화 되어 이상적인 바인더의 기계적 특성을 부여하기도 하며 높은 열 안정성과 분산 특성 그리고 쉬운 가공성으로 차세대 배터리 소재로서 배터리의 고성능화 뿐만 아니라 생산 공정까지 상용화에 가깝게 접근할 수 있는 가능성을 보여줍니다.

## 차세대 배터리에 대한 도전

최근 배터리에 대한 수요가 급상승 함에 따라 고성능 배터리 기술 또한 비약적인 반응을 이루게 되었습니다. 그러나 이에 대한 부작용으로 고성능의 양극재와 음극재를 버릴 수 없어 열폭주와 같은 배터리의 불안정성이 대두 되고 있습니다. 이를 해결하기 위해 기존 액체 전해질 기반의 배터리에서 전고체 배터리에 대한 관심은 높아지고 있습니다. 기계적, 화학적 안정성을 가진 HNBR은 전고체 전해질의 매트릭스로서 매력적인 후보이며<sup>10</sup> 현재 각광 받고 있는 PEO(폴리에틸렌옥사이드)의 부족한 낮은 열 안정성과 기계적 물성을 개선하려는 노력이 있었으며 용융 공정을 통한 HNBR과의 블렌딩으로 높은 이온 전도도를 달성하였고 기존에 부족한 저온 전기 전도도 또한 상당 부분 극복했습니다. HNBR이 순수 PEO 전고체 전해질에 비해 안정성 특성을 동시에 개선하고 혼합물의 주어진 염 농도에 대해 넓은 온도 범위에서 우수한 이온 전도도의 추세를 확장할 수 있음을 보여주었으며, HNBR의 첨가는 PEO의 강성과 HNBR의 유연성을 결합하여 복합 전극 구성 요소의 응집력을 향상시킬 수 있으므로 혼합물의 기계적 특성에 긍정적인 영향을 미침을 확인 하였습니다. [그림 6]

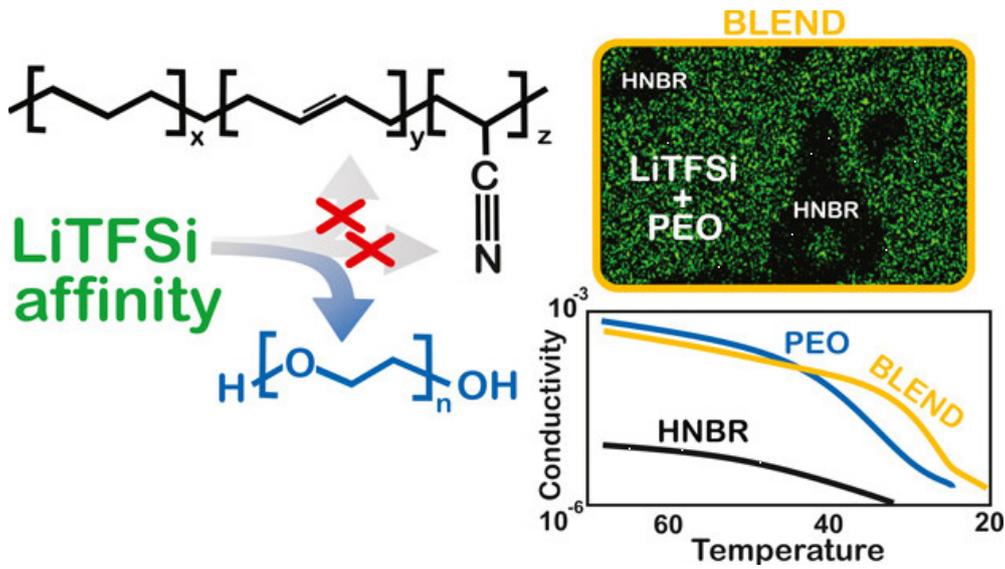


그림 6. HNBR, PEO 복합체 전고체 전해질<sup>11</sup>

## 결론

HNBR은 고성능 이차전지 개발을 위한 바인더로서 다양한 장점을 가지고 있습니다. 첫째, HNBR은 뛰어난 내열성을 가지고 있어, 고온 환경에서도 안정적인 성능을 유지할 수 있습니다. 이는 전기차와 같은 고온 환경에서 사용되는 이차전지에 매우 적합합니다. 둘째, HNBR은 화학적 저항성이 높아 다양한 전해질과의 호환성이 우수하며, 이는 전해질과의 부반응을 최소화하여 전지의 수명을 연장시키는 데 기여할 수 있습니다. 또한, HNBR은 높은 인장 강도와 탄성을 가져 전극이 충전 및 방전 사이클 동안 겪는 기계적 스트레스에 대한 저항성을 높입니다. 이러한 기계적 안정성은 특히 고용량 전극 재료에서 중요한데, 예를 들어 실리콘 음극재의 경우 충전 및 방전 시 큰 부피 변화가 발생하여 전극의 구조적 무결성이 손상될 수 있습니다. HNBR 바인더는 이러한 문제를 완화시켜 전극의 장기적인 성능을 보장할 수 있습니다. 앞으로의 연구에서는 HNBR의 특성을 더욱 개선하고, 이를 통해 이차전지의 성능을 극대화할 수 있는 방법을 모색해야 합니다. 예를 들어, HNBR의 가교 구조를 최적화하여 전기화학적 안정성과 기계적 강도를 동시에 향상시키는 연구가 필요합니다. 또한, HNBR을 다른 고기능성 폴리머와 복합화하여 더 나은 성능을 구현할 수 있는 가능성도 탐구해 볼 수 있습니다.

결론적으로, HNBR은 고성능 이차전지 개발에 있어서 매우 유망한 바인더 재료입니다. 그 우수한 기계적 강도와 화학적 안정성, 높은 내열성 등은 차세대 배터

리의 성능을 획기적으로 향상시킬 수 있는 잠재력을 가지고 있습니다. 앞으로의 연구와 개발을 통해 HNBR의 특성을 더욱 향상시키고, 이를 기반으로 한 고성능 이차전지를 상용화하는 데 한 걸음 더 다가갈 수 있을 것입니다.

## 참고문헌

---

1. Liu, K., Wang, Y., Lai, X. (2022). Data Science-Based Battery Manufacturing Management. In: Data Science-Based Full-Lifespan Management of Lithium-Ion Battery. Green Energy and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-01340-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-01340-9_3)
2. Y. B. Song, K. H. Baek, H. Kwak, H. Lim, Y. S. Jung, Dimensional Strategies for Bridging the Research Gap between Lab-Scale and Potentially Practical All-Solid-State Batteries: The Role of Sulfide Solid Electrolyte Films. *Adv. Energy Mater.* 2023, 13, 2301142. <https://doi.org/10.1002/aenm.202301142>
3. A. Mills, S. Kalnaus, W.-Y. Tsai, Y.-F. Su, E. Williams, X. Zheng, S. Vaidyanathan, D. T. Jr. Hallinan, J. Nanda, G. Yang, *ACS Energy Lett* 2024, 9, 2677.
4. P. Vadhva, J. Hu, M. J. Johnson, R. Stocker, M. Braglia, D. J. L. Brett, A. J. E. Rettie, *ChemElectroChem* 2021, 8, 1930.
5. F. Zou, A. Manthiram, A Review of the Design of Advanced Binders for High-Performance Batteries. *Adv. Energy Mater.* 2020, 10, 2002508. <https://doi.org/10.1002/aenm.202002508>
6. N. Verdier, S. El Khakani, D. Lepage, A. Prébé, D. Aymé-Perrot, M. Dollé, D. Rochefort, *J Power Sources* 2019, 440, 227111.
7. Müllner S, Michlik T, Reichel M, Held T, Moos R, Roth C. Effect of Water-Soluble CMC/SBR Binder Ratios on Si-rGO Composites Using  $\mu$ m- and nm-Sized Silicon as Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Batteries*. 2023; 9(5):248. <https://doi.org/10.3390/batteries9050248>
8. J. Ahn, B. Park, J. Kim, M.-K. Um, J. W. Yi, J.-K. Yoo, *ACS Appl Mater Interfaces* 2021, 13, 19970.
9. S. El Khakani, N. Verdier, D. Lepage, A. Prébé, D. Aymé-Perrot, D. Rochefort, M. Dollé, *J Power Sources* 2020, 454, 227884.

10. L. Caradant, G. Foran, D. Lepage, P. Nicolle, A. Prébé, D. Aymé-Perrot, M. Dollé, *Journal of Power Sources Advances* 2024, 28, 100149.
11. L. Caradant, D. Lepage, P. Nicolle, A. Prébé, D. Aymé-Perrot, M. Dollé, *ACS Appl Polym Mater* 2020, 2, 4943.