Journal of the Korean Electrochemical Society
Vol. 28, No. 4, 2025, 120-129
https://doi.org/10.5229/JKES.2025.28.4.120

Review Paper
pISSN 1229-1935
eISSN 2288-9000

이산화탄소 전기화학적 전환을 통한 프로판올 생산 최신 연구동향 분석

최용욱[1]* · 김선규[2]

[1]한국생산기술연구원 에너지시스템그룹
[2]국립부경대학교 고분자·화학소재공학부 에너지화학소재공학전공

(2025년 11월 11일 접수 : 2025년 11월 19일 수정 : 2025년 11월 19일 채택)

Recent Research Trend about Propanol Production via CO_2 Electrochemical Reduction

Yong-Wook Choi[1]* and Sunkyu Kim[2]

[1]Energy System Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Busan 46938 South Korea
[2]Department of Energy and Chemical Materials Engineering, Pukyong National University, Busan 48513 South Korea

(Received November 11, 2025 : Revised November 19, 2025 : Accepted November 19, 2025)

초 록

지구온난화가 극심해짐에 따라 배출원으로부터 바로 버려지는 이산화탄소를 더 이상 방치하지 않고 다른 유용한 물질로 변환하여 탄소중립을 이루려는 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 이산화탄소 전기화학적 전환은 탄소중립 기술 중 하나로써 신재생에너지와 연계된다면 탄소배출 없이 탄소중립 가치사슬을 구축할 수 있기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 이산화탄소를 전기화학적으로 전환하면 다양한 유용물질을 얻을 수 있는데, 그 중 하나가 프로판올이다. 또한 메탄올과 에탄올 대비 단위부피당 에너지밀도가 높아서 액체연료로써 가능성을 주목받고 있을 뿐만 아니라, 산업용 원료물질로써 그 부가가치가 높기 때문에 이산화탄소 포집-전환 공정의 주요 전환생성물로 인식되고 있다. 그러나 전기화학적 전환 공정은 일반적으로 구리 기반 전극촉매에서만 프로판올로 전환될 뿐만 아니라 에너지 효율이 다른 전환 공정(열화학적 방식 등)에 비해 낮아 전극촉매의 활성과 선택도를 높이기 위한 연구가 필요하다. 최근 연구의 방향은 나노구조화, 표면 결정성 조절, 이종원소 도입 등으로 구리 기반 전극촉매의 프로판올 생산 효율을 높이고 있다.

Abstract : Electrochemical CO_2 reduction has attracted attention because this technology could convert from waste CO_2 into value-added chemicals. Propanol is one of the multi-carbon chemicals via electrochemical conversion from carbon dioxide. It is also spotlighted on the kind of liquid fuels and industrial chemical feedstock by showing higher energy density per unit volume and its versatile uses. However, it is well known that the electrochemical conversion (for propanol) is lower energy efficiency than thermal catalyst process. In addition, propanol conversion is only possible on Cu-based electrode. Therefore, it is still required to increase activity and selectivity of electrocatalysts. By investigating recent research trend, Cu-based catalyst design could be summarized as nanostructuring, controlling surface crystallinity and consisting of binary metal system.

Keywords : Carbon dioxide, Copper, Electrocatalyst, Propanol, Liquid fuel

*E-mail: yongwook@kitech.re.kr

1. 서 론

국제사회에서는 2015년 파리 기후변화협정(Paris agreement) 채택을 통해 지구 평균기온 상승을 산업화 이전 기준 2 ºC보다 낮추고 지구 평균기온상승폭을 1.5 ºC로 제한하도록 선진국뿐만 아니라 전세계 모든 국가가 참여하는 온실가스 감축하는 체제를 마련하였다. 그럼에도 불구하고 자료마다 일부 차이가 있으나 대기 중의 이산화탄소(Carbon dioxide; CO_2) 농도는 인류의 역사가 진행되면서 산업화 이전 기준(1750년) 280 ppm 에서 2020년 기준 410~417 ppm 까지 지속적으로 높아져왔으며, 농도증가 추세는 산업화 이후 시기 들어 급격하게 증가하였다.[1–3] 특히, 미국 국제 모니터링 연구소(Global Monitoring Laboratory)에서 추적조사한 대기 중 CO_2 농도는 2025년 4월 기준 426.81 ppm으로 일말의 꺾임세 없이 가파르게 대기 중의 이산화탄소 농도가 치솟아 기후위기(Climate crisis)를 가속화하고 있는 실정이다.[4] 기후위기는 (1) 작물 생육환경 변화에 따른 식량안보 위태, (2) 자연재해의 빈도 및 강도 증가에 따른 이재민 발생/재산손실, (3) 지구온난화로 인한 해수면 상승과 해양 산성화 등 여러 측면에서 인류의 삶과 지구환경에 문제를 초래하고 있거나 예상된다.[5–7]

지구온난화 현상이 기후위기를 초래하는 가장 큰 원인 중 하나로 인식되고 있기 때문에, 이산화탄소를 비롯한 탄소화합물의 배출을 저감하기 위해 탄소를 포집하고 저장 혹은 활용하는 CCUS (Carbon capture, utilization, and storage) 기술이 해결책으로 제시되고 있다[8–10]. 특히 이산화탄소를 다른 유용한 물질로 변환하는 기술의 경우, 에틸렌(Ethylene), 메테인(Methane), 포름산(Formic acid), 알코올(Alcohol) 등 여러 고부가가치 제품으로 전환(conversion)할 수 있어 유망한 기후기술로 주목받고 있다. 특히 신재생에너지를 전환 공정의 주요 에너지원으로 사용하게 된다면, 탄소배출 없이 전기화학적인 방식으로 이산화탄소를 고부가가치를 갖는 유용한 물질로 전환할 수 있다. 뿐만 아니라, 전력생산과 산업에서 배출되는 탄소량 다음으로 많이 배출되는 분야가 운송수단을 포함한 교통분야이다. 이 때 액체형태의 생성물들, 예를 들어 알코올류들이 '미래의 연료(fuel of the future)'로써 그 잠재력을 주목하고 있다.[11] 가령, 메탄올은 상온에서 높은 에너지 밀도로 액체 형태를 유지한다는 장점 때문에 메탄올을 연료로 추진되어 나가는 선박이 개발되고 있는 중이다.[12] 또한 알코올도 탄소수가 높아질수록 단위부피당 에너지 밀도가 높아지며(에탄올 21 MJ/L 및 프로판올 27 MJ/L), 에너지 밀도가 높은 연료를 사용할수록 더 큰(무거운) 교통수단이 더 멀리 나아갈 수 있도록 기능한다.[13] CO2ER과 관련해서 수행한 수명주기 평가(life cycle assessment)에 따르면, 메탄올과 에탄올 그리고 프로판올을 1 kg을 얻기 위해 소모되는 CO_2의 양은 각각 1.37, 1.91, 2.19 kg-CO_2/kg-product 임을 고려했을 때, 온실효과를 줄이기 위해 탄소수가 더 높은 액체연료로 전환해야 될 필요성이 있다(Table 1).[14] 따라서 탄소수가 더 많은 물질들을 다탄소(multi-carbon) 화합물이라 칭하며, 전기화학적 전환 연구의 방향도 탄소수를 높여 더 부가가치가 높은 화학물질들로 전환하는 쪽에 집중될 수밖에 없다. 그러나 전기화학적 공정의 경우, 다른 공정(열화학적 촉매 공정 등) 대비 친환경적인 장점은 분명하나 에너지 효율, 화학적 변환 속도, 선택도 등에서 여전히 해결해야 될 요소들이 많은 것 또한 사실이다.[15]

Table 1. Associated parameters about CO_2 electrochemical reduction (CO2ER) including production capacity [14].

CO2ER products	CO_2 consumption (kg CO_2 per kg product)	Voltage vs. NHE
HCOOH	0.956	-0.19
CO	1.57	-0.103
CH_4	2.74	0.17
CH_3OH	1.37	0.017
C_2H_4	3.14	0.08
C_2H_5OH	1.91	0.085
CH_3COOH	1.47	0.098
C_3H_7OH	2.19	0.1

이산화탄소 전환을 통해 획득한 알코올의 경우 액체 연료로써의 기능으로도 존재하지만, 화학산업 분야에서도 주요 원료물질(feedostock) 사용될 수 있는데, 가령 n-propanol은 산업용 용제로써 연간 30 억달러 시장규모를 갖고 있으며, 프로필렌으로의 전환을 위한 중간체로써도 연간 130 억 달러 시장규모를 갖고 있는 것으로 나타난다.[16–18] N-propanol의 경우 시장에 판매가격이 높기 때문에 열화학 공정에서 일산화탄소(CO)와 에틸렌 그리고 수소를 원료로 20 MPa 과 대략 80~150 ºC에서 hydroformylation과 hydrogenation 두 단계 전환반응을 통해 획득하며, 4 톤의 이산화탄소가 투입되면 1 톤의 n-propanol을 얻을 수 있다.[14,18,19] 반면 전기화학적 직접전환 공정은 원료로 투입되는 이산화탄소가 전환 공정 중간에 carbonate 혹은 bicarbonate로 변환되면서 원료손실이 발생하여 공정에너지 효율이 앞서의 열화학 공정에 비해 낮다는 단점이 지적되고 있다.[18,20] 따라서 다양한 촉매 설계 전략을 통해 N-propanol의 전환공정 효율을 높일 필요가 있다.

본 고에서는 이산화탄소 전기화학적 전환(CO_2

electrochemical reduction; CO2ER)에서 주요 생성물들 중 하나인 알코올류(특히, 프로판올)를 중심으로 지금까지 진행된 연구들을 살펴보고, 해당 전환물질의 선택도와 활성을 높이기 위해 어떠한 촉매 구조적/화학적 특성이 더 개선되어야 하는지 설계전략을 제시하고자 한다. 이러한 촉매설계 전략으로 향후 기후변화에 대응할 수 있는 전기화학적 공정 개발에 기여할 것으로 기대한다.

2. 본 론

2.1 전기화학적 전환의 주요 생성물 분석 및 알코올 계열 화합물 전환 현황

전기화학적으로 이산화탄소를 전환했을 때 생성되는 물질들은 Fig. 1(a)와 같다. 기본적으로 기체형태의 생성물들과 액체형태의 생성물들로 나뉠 수 있으며, 기체형태로는 메테인, 에틸렌 등이 있고 액체형태로는 포름산과 아세톤, 아세테이트, 메탄올, 에탄올 그리고 프로판올 등이 있다.[21,22] 그러나 모든 금속 촉매가 이산화탄소를 다른 유용한 물질로 전환하는 것은 아니다. Fig. 1(b)에 나타난 것처럼 바이카보네이트(bicarbonate) 기반 전해질에서 금, 은 그리고 아연은 이산화탄소를 일산화탄소로 전환할 수 있고 전이후금속 계열 촉매(주석 및 인듐 등)은 주로 포름산으로 전환한다. 티타늄, 철, 니켈 그리고 백금은 이산화탄소를 전환하지 않고 수용성 전해질을 수전해 반응으로 수소만 선택적으로 전환할 뿐이다. 이외에도 이종원소(보론, 질소) 등이 도핑된 그래파이트 등에서도 알코올류를 전환할 수 있으며, 구리는 이산화탄소를 알코올을 포함한 다양한 탄소화합물로 전환할 수 있다.[13,23,24]

특히 이산화탄소를 다탄소 화합물로 전환되기 위해서는 몇 가지 화학적 변환 과정을 거쳐야 하는데, 이 메커니즘에 대해서는 여러 복잡한 조건 때문에 하나의 과정으로 귀결되지 않는 것으로 조사되고 있다.[25–28]

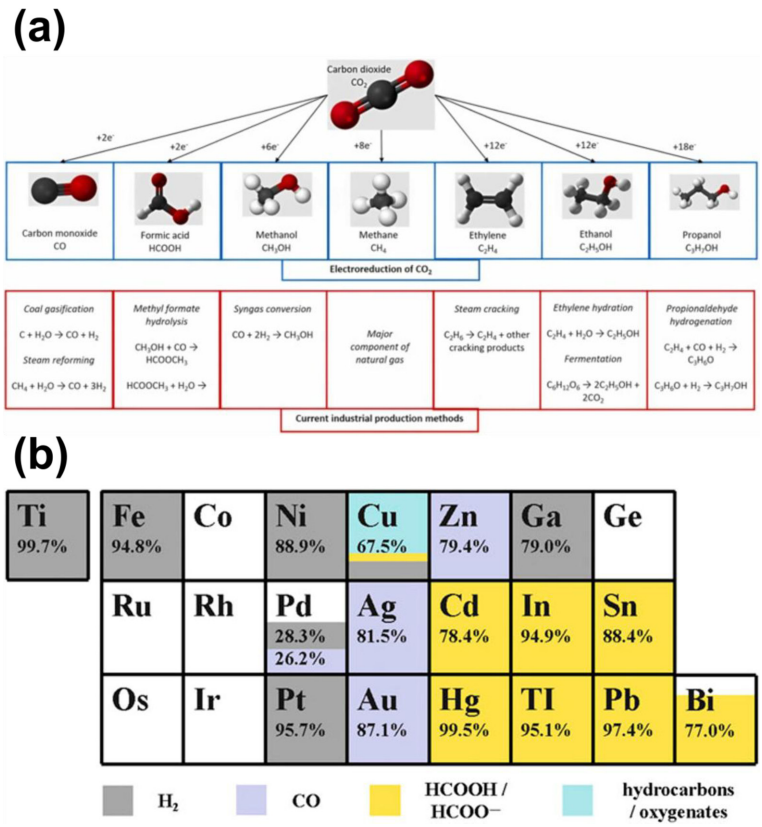

Fig. 1. (a) Main products through CO2ER (top blue squares) and the respective current industrial production method (bottom red squares). Reprinted under Creative Commons CC-BY from Ref. [22]. (b) Periodic table showing primary products for CO2ER on metal electrocatalyst under bicarbonate-based electrolyte. Reprinted under Creative Commons CC-BY from Ref. [24].

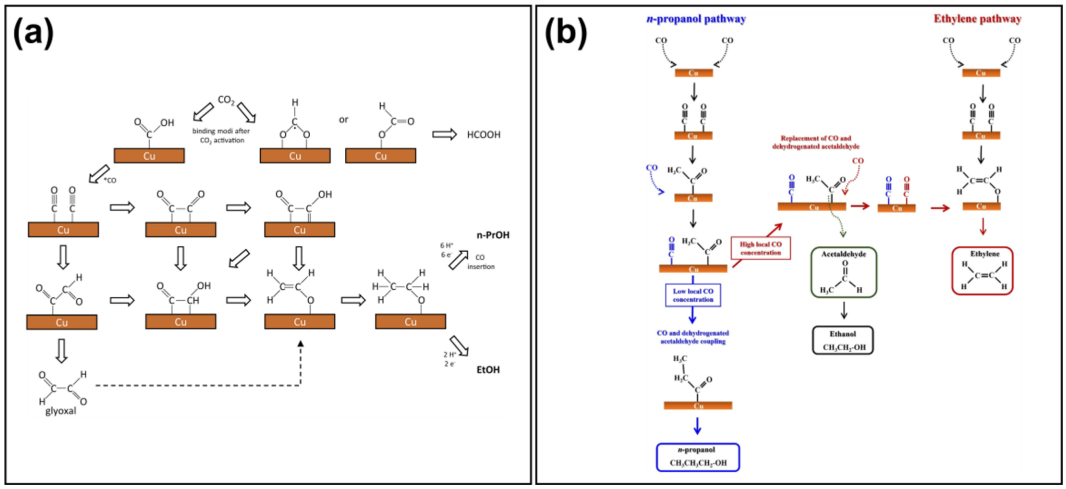

Fig. 2. Reaction pathways for N-propanol production from (a) and (b). (a) is reprinted under Creative Commons CC-BY from Ref. [27]. (b) is reprinted under Creative Commons CC-BY from Ref. [28]. Copyright 2025 American Chemical Society.

Fig. 2(a) 와 (b)는 각각 다른 그룹에서 연구한 결과인데, 기본적으로 이산화탄소가 일산화탄소를 거쳐서 프로판올로 전환된다. 그러나 그 중간과정에서 살펴보면 명확하게 다른 반응경로로 진행됨을 알 수 있다. N-propanol 로 전환되기 위해서는 다양한 중간체들과 반응경로가 존재하며, 각각의 순서에 대해서는 연구결과마다 의견들이 엇갈리고 있는 상황이다. 가령, Fig. 2에 도시된 것처럼 삼중결합을 갖는 CO들이 C-C커플링되기 위해 단일결합 혹은 이중결합으로 변환되는 그 과정들에서 크게 차이가 나는 것을 확인할 수 있으며, 또한 중간체들에서 어떤 원소가 촉매 표면에 흡착되는지도 명확하게 차이가 나는 것으로 보고되었다. 그러나 앞서 살펴본 바와 대로 이산화탄소가 다탄소화합물로 전환되기 위해서는 공통적으로 dimerization (OC-CO)와 커플링(OC-COH)을 거쳐야 하는 것은 자명한 사실이다.[26]

2.2 알코올 계열 화합물 전환 위한 구리 기반 촉매 설계 전략

이산화탄소 전기화학적 공정의 효율을 높이기 위해서는 다양한 촉매 설계 전략이 필요하다. Nitopi et al. 이 조사한 문헌에 따르면, (1) 나노구조화, (2) 표면 결정면 조절, (3) 이종원소 도입, (4) 전해질 효과 등 크게 4 가지 전략으로 전극촉매 설계 전략이 적용되고 있는 것을 확인할 수 있다.[29] 금속 촉매가 벌크(bulk) 상태일 때 비해 나노구조화로 변경된다면 예상치 못한 화학적 특성변화와 함께 표면적이 증대되어 전극촉매의 활성이 좋아질 수 있다.[30] 또한 CO2ER을 위해 사용되는 구리 기반 촉매는 금속 상태(metallic state)로 사용하지 않고 산화물 유래된 촉매(oxide-derived catalyst) 형태로 전극을 제조하여 사용한다. 산화물 유래된 구리 촉매가 단순한 금속상태인 구리 전극보다 활성과 안정성이 더 높기 때문인데, 이산화탄소 전환 과정에서 산화물 유래된 구리 전극 표면에서 CO 중간체 결합이 안정적으로 유지되어 다탄소화합물 전환 공정으로 넘어가기 쉽기 때문이다(Fig. 3).[31] 또한, 구리 금속이 구리산화물 구조로 변환하면서 자연스레 나노구조화가 일어나게 되며 그 경우에 다양한 효과가 수반된다. 특히, Yeo 그룹에서 금속 상태의 Cu 나노입자나 전해연마한 Cu 샘플보다 Cu 나노구조화한 샘플이 표면에 결함(defect sites)이 인위적으로 많아짐에 따라 CO2ER을 위한 과전압을 200~300 mV 앞당기는 것을 보여준 이래로 후속연구들은 산화물 유래 구리 촉매를 합성하고 분석을 진행하였다.[32] 가령 Long et al.은 CuO 와 Cu_2O 구리 산화물들을 각각 0.1 M $KHCO_3$ 수용액에서 –0.94 V vs Ag/AgCl를 20 분 동안 가해준 후, Ar 분위기에서 건조한 직후 측정을 진행하였다. 같은 구리 산화물 전극이라 할지라도 산화수가 달라짐에 따라 배위수 및 국부구조가 미세하게 달라져 촉매 선택도가 달라진다(Fig. 4(a)). 가령 CuO 전극을 전기화학적 선환원(pre-reduction)하여 측정한 샘플은 n-propanol을 17.9% 패러데이 효율(faradaic efficiency; FE)을 기록했지만 Cu_2O 전극을 전기화학적 선환원한 샘플의 경우에는 포메이트(formate)를 선택적으로 전환하였다.[33] 반면, Zhang et al.은 습식법을 사용하여 CuO/$Cu(OH)_2$을 만든 이후 바로 전기화학적으로 Cu_2O/Cu로 환원하여

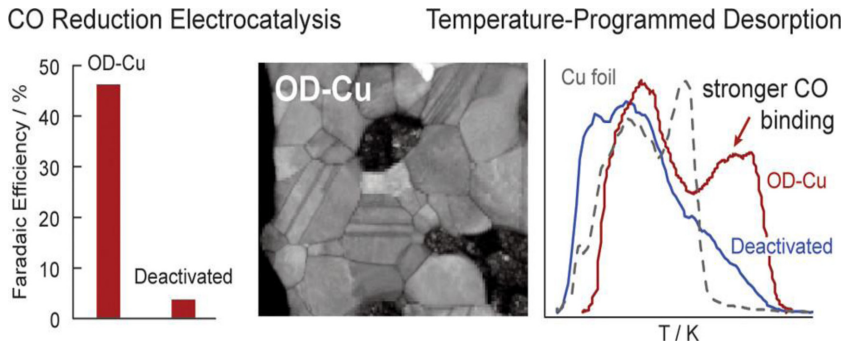

Fig. 3. The comparison between oxide-derived Cu (OD-Cu) and metallic Cu (Cu foil). Adapted with permission from Ref. [31], Copyright 2025 American Chemical Society.

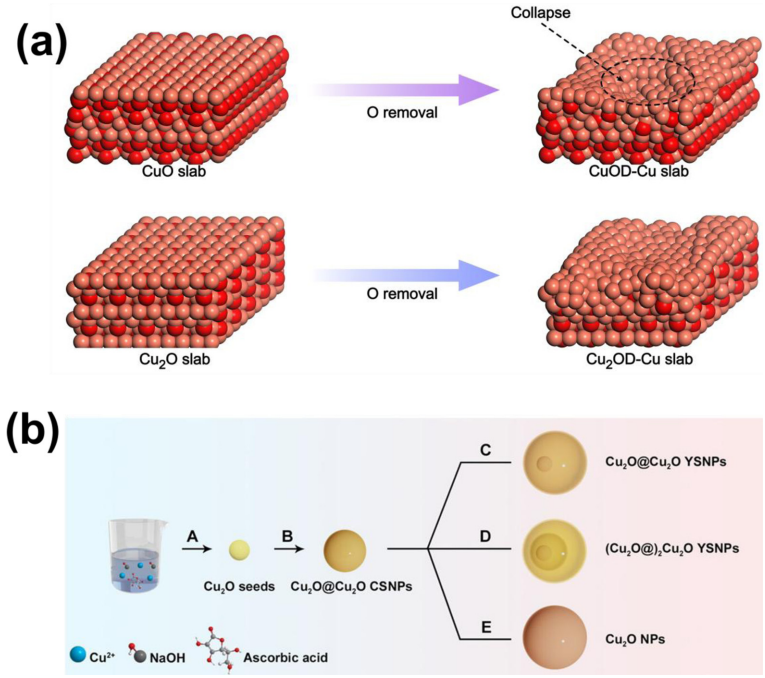

Fig. 4. (a) Oxygen removal reconstruction on both CuO and Cu_2O. (a) is reprinted under Creative Commons CC-BY-NC from Ref. [33]. (b) The fabrication of Cu oxide based electrocatalysts showing different structures. (b) is reprinted with permission from Ref. [35]. Copyright 2025 American Chemical Society.

CO2ER 성능을 측정한 결과, H-type cell에서 n-propanol이 –1.4 vs RHE에서 16.2% FE 및 부분전류밀도 6.8 mA/cm^{2}을 기록했다. 또한 flow-cell에서 측정한 결과는 –1.1 V vs RHE에서 12.1% FE와 함께 무려 101.6 mA/cm^2 부분전류밀도를 기록했다. 밀도범함수 이론(density functional theory; DFT) 계산 결과와 함께 Cu 전극 구조를 조사했을 때, *CO와 *OCCO dimer 등 C_1 및 C_2 중간체가 $^*C_3$ 중간체로 커플링에 유리하게끔 나노구조화 한 것이 프로판을 활성을 높인 것으로 나타났다.[34] 프로판올 전환 성능을 높이기 위해서는 다른 연구결과에서도 다양한 CuO 기반 나노입자를 만들어 살펴본 결과 C_1 및 C_2 중간체의 양(국부 농도)을 높이는 것이 유효하다는 결과가 발표되었다(Fig. 4(b)).[35]

구리 기반 촉매의 성능을 높이는 또다른 전략은 표면 결정성을 조절하는 방법이 있다. Fig. 5에서 도시한 것처럼 (100), (111), (220) 등 특정 결정면으로만 구성된 Cu_2O 나노 구조를 통해 CO2ER 성능을 비교

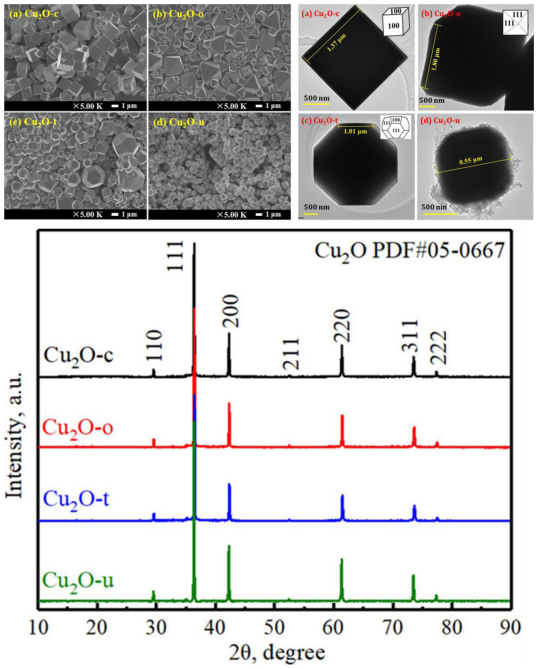

Fig. 5. SEM images (Top left panels) and TEM images (Top right panels) of differenet Cu_2O catalysts: (a) Cu_2O-c, (b) Cu_2O-o, (c) Cu_2O-t, and (d) Cu_2O-u. Bottom panel is XRD spectra of synthesized Cu_2O catalysts. Reprinted with permission from Ref. [36]. Copyright 2025 American Chemical Society.

해본 결과, 알코올 전환 패러데이 효율이 각각 Cu_2O-o (octahedron structure with (111)), Cu_2O-c (cubic structure with (100)), Cu_2O-u (urchin-like structure with (100), (220), and (222)), Cu_2O-t (truncated octahedron structure with (100) and (111)) 순으로 나타났다(35.4% > 26.2% > 25.0% > 10.7%).[36] 특히 Cu_2O-o 샘플의 경우, 12.6% 프로판올 FE을 기록했는데, C-C 커플링을 위한 CO^* 중간체의 흡착을 안정화시킨 것이 주효한 것으로 조사되었다. 프로판올 외에도 다탄소화합물을 잘 전환하기 위해 알려진 구리 촉매의 결정면은 (111) 지수로 많은 연구들이 보고되고 있다. Fu et al.은 concave octahedral Cu_2O 나노결정체가 (100) 및 (110) 결정체보다 프로판올을 포함한 다탄소화합물을 전환하는데 선호하는 결정면으로 보고했다.[37] 그러나 일부 연구에서는 (111) 결정면은 메테인 전환을 선호하며, 경우에 따라서는 (100) 결정면이 에틸렌을 선호한다고 보고한만큼, 각각의 연구에서 주요 목표 전환생성물에 따라 선호되는 결정면이 다르다는 사실을 주지할 필요가 있다.[38–40]

앞서 살펴본 결정학적 구조 및 형태학적 구조를 조절하는 것 외에 이종원소 도입을 통해 n-propanol 전환 성능을 극대화한 연구들은 최근들어 활발하게 연구되고 있는 실정이다. Pb가 도핑(doping)된 Cu 기반 전극촉매의 경우 CO에서 전환반응을 출발했을 때, 프로판올 FE 및 에너지 전환 효율은 각각 47% 및

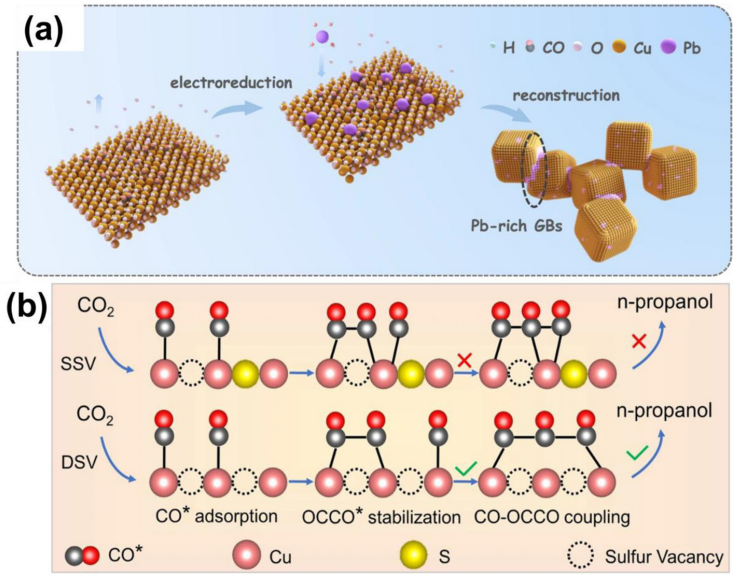

Fig. 6. (a) Schematic illustration of Pb-Cu electrocatalysts. Reprinted under Creative Commons CC-BY from Ref. [41]. (b) Mechanism of n-propanol formation on different CuSx based electrocatalysts with SSV (single sulfur vacancy) and DSV (double sulfur vacancy). Reprinted under Creative Commons CC-BY from Ref. [50].

25%였다.[41] 이 경우에도 *CO 중간체의 전극표면과의 흡착을 안정하게 유지한 것이 operando X선 흡광 분석과 계산결과로 입증되었다. 무엇보다도 Fig. 6(a)에서 나온 것처럼, 결정립계에 Pb 도핑량을 높인 것이 더욱 좋은 프로판올 전환율을 기록한 것으로 나타났다. Peng et al.은 $*C_2$ 중간체의 안정화와 C_1(CO*)-C_2(OCCO*) 커플링을 통해 C_3 화합물을 형성(CO-OCCO)하는 메커니즘은 낮은 선택도와 수율 때문에 문제를 겪고 있기 때문에 CuS 기반 촉매로 문제를 해결하려 하였다. 특히 Fig. 6(b)에 도시한 것처럼 인위적으로 이중 결함 (double vacancy)을 조성하여 C-C 커플링의 활성화 에너지 장벽(energy barrier)을 낮추었다. 그 결과, H-cell에서 –1.05 V vs RHE 인가전압에서 15.4% 프로판올 FE을 획득할 수 있었다. 이외에도 Lee 그룹은 CuP_2을 사용하여 알칼라인 수용성 전해질에서 1-프로판올을 포함한 탄소수 3 이상의 전환물을 FE 66.9% 및 1.1 A/cm^{2}을 제로갭 셀에서 획득하였다.[42] 앞서 살펴본 촉매들은 비금속 원소를 도입하였는데, Cu 기반 결정구조에 Au를 자가정렬된 단일층으로 제조하여 Cu/Cys/Au 촉매를 만들 경우, 프로판올 페러데이 효율을 29.1% (–1.2 V vs RHE)까지 극대화한 연구결과도 보고되었다.[43]

앞서 살펴본 연구결과들은 Cu 기반 촉매의 구조적/화학적/결정학적 특성을 조절하여 C_1 및 C_2 중간체들의 커플링과 전극표면과의 안정화를 유도했다면, 전해질과 전극 국소 계면에서 CO 분압과 아세트알데하이드 농도를 조절하여 n-프로판올 생성을 향상시킨 연구가 보고되었다. Koper 그룹은 CO와 아세트알데하이드 중간체의 적절한 비율로 존재하게 되면 에탄올 생성 속도는 줄어드는 반면 n-propanol 생성 속도는 증가하게 되며, 이는 전극 표면에 흡착된 메틸카르보닐이 알코올 전환의 중간체로써 작용하는 것으로 나타났다. 특히 메틸카르보닐은 전극 표면의 활성점(active site) 위에서 CO흡착과 경쟁하기 때문에 프로판올 전환이 어렵다고 설명했다.[28]

또한 서론에서 살펴보았듯이, 구리 이외에도 CO2ER을 통해 알코올을 전환하는 연구들이 속속되어 보고되고 있다. 이전에는 주로 수소를 발생시키거나(니켈 촉매) 포메이트 생성(주석 촉매)을 선호하는 것으로 알려진 금속촉매들도 적절한 이종원소를 도핑함으로써 다탄소화합물을 전환할 수 있다는 연구가 보고되고 있다.[44,45] 그래파이트에 붕소와 질소를 결합한 연구는 87.9% FE로 탄소수 2 이상의 화합물을 전환하였는데, 이종원소가 같이 도핑된 활성점에서 C-C커플링이 원활하게 일어나면서 촉매활성과 선택도를 대폭 증가시킨 것으로 보고되었다.[13] 따라서, 지금까지 연구방향이 이뤄졌던 구리 촉매 외에도 다양한 금속/비금속 촉매에서도 알코올류를 전환할 수 있기 때문에 앞서 살펴본 나노구조화를 포함한 다양한 이종원소 도입과 촉매 화학적/구조적 상태를 조절하여 더 다양한 촉매소재에서 활성과 선택도를 향상시키는 연구가 필요하다.

앞서 살펴본 연구들에서는 H-cell에서 소재간 비교를 통해 성능 우위에 있는 소재를 결정한 후, flow-cell에서 활성과 선택도를 대폭 향상하는 전략으로 연구가 진행되었다. Flow cell을 구성하는 멤브레인 종류를 변경하거나 이산화탄소 투입되는 상태를 조절하거나, 구성요소에서 전해액을 변경하는 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.[46–49] 따라서, 전극촉매 소재 외에도 연구자가 성능평가를 하는 구성요소에 대한 고민과 전해질막이나 물관리 등 다른 전기화학촉매 시스템에서 문제가 되고 있는 요소들을 참고하여 CO2ER에도 적용해 볼 필요가 있다.

3. 결 론

이산화탄소를 전기화학적인 방식으로 전환함으로써 다양한 탄소화합물을 얻을 수 있으며, 그 중에서도 프로판올은 메탄올이나 에탄올에 비해 단위부피당 에너지 밀도가 높고 화학 산업의 주요한 원료로 사용되기 때문에 그 시장성이 매우 높은 전환 생성물로 인식되고 있다. 그러나 프로판올 전환은 기체 상태 전환물, 예를 들어 메테인이나 에틸렌과 다른 액체연료인 포름산에 비해 그 수율이 낮으며, 수용성 전해질 환경에서 Cu 기반 전극촉매에서만 획득가능하다. 따라서 프로판올 생산속도를 높이기 위해 C_1 및 C_2 계열의 중간체들의 커플링 활성화와 전극표면의 흡착 안정화가 필요하며, 이를 해결하기 위해 나노구조화, 표면 결정성 조절, 이종원소 도입, 전해질 효과 등 다양한 방법들이 촉매 설계 전략으로써 제시되었고 살펴보았다. 전반적으로 금속 상태의 구리를 사용하기 보다는 산화수를 갖는 구리 기반 촉매로 합성을 하거나 개질하여 전극을 제조하는 것이 더 좋은 성능을 나타내었다. 또한, 산화물 기반 촉매 외에도 칼코겐 계열 원소를 포함한 비금속 원소와 귀금속 등 다양한 촉매 화학적 조성이 실험이 되었고, 각각 프로판올 활성 혹은 선택도를 향상시킨 것으로 나타났으며, 같은 촉매물질이라면 H-cell 보다는 flow cell 이 더 좋은 성능을 보여주는 것으로 확인되었다. 이와 같은 촉매 설계 전략을 기반으로 프로판올을 비롯한 다탄소화합물 전기화학적 전환 공정에 더 발전이 있을 것으로 기대한다.

Acknowledgments

This review was supported by the Regional

Innovation System & Education (RISE) program through the Institute for Regional Innovation System & Education in Busan Metropolitan City, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Busan Metropolitan City, Republic of Korea (2025-RISE-02-001-000).

References

1. S.M. Mousavi, N.M. Dinan, S. Ansarifard, and O. Sonnentag, Analyzing spatio-temporal patterns in atmospheric carbon dioxide concentration across Iran from 2003 to 2020, *Atmos. Environ. X*, **14**, 100163 (2022).
2. F. Kosaka, Y. Liu, S.-Y. Chen, T. Mochizuki, H. Takagi, A. Urakawa, and K. Kuramoto, Enhanced activity of integrated CO_2 capture and reduction to CH_4 under pressurized conditions toward atmospheric CO_2 utilization, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **9**, 3452–3463 (2021).
3. B. Gurkan, X. Su, A. Klemm, Y. Kim, S. Mallikarjun Sharada, A. Rodriguez-Katakura, and K.J. Kron, Perspective and challenges in electrochemical approaches for reactive CO_2 separations, *IScience*, **24**, 103422 (2021).
4. X. Lan, P. Tans, and K. W. Thoning, Trends in globally-averaged CO_2 determined from NOAA global monitoring laboratory measurements, (2025).
5. K. Liu, M. T. Harrison, H. Yan, D. L. Liu, H. Meinke, G. Hoogenboom, B. Wang, B. Peng, K. Guan, J. Jaegermeyr, E. Wang, F. Zhang, X. Yin, S. Archontoulis, L. Nie, A. Badea, J. Man, D. Wallach, J. Zhao, A. B. Benjumea, S. Fahad, X. Tian, W. Wang, F. Tao, Z. Zhang, R. Rötter, Y. Yuan, M. Zhu, P. Dai, J. Nie, Y. Yang, Y. Zhang, and M. Zhou, Silver lining to a climate crisis in multiple prospects for alleviating crop waterlogging under future climates, *Nat. Commun.*, **14**, 765 (2023).
6. G. S. Smith, E. Anjum, C. Francis, L. Deanes, and C. Acey, Climate Change, Environmental disasters, and health inequities: the underlying role of structural inequalities, *Curr. Environ. Heal. Reports*, **9**, 80–89 (2022).
7. B. Hönisch, A. Ridgwell, D. N. Schmidt, E. Thomas, S. J. Gibbs, A. Sluijs, R. Zeebe, L. Kump, R. C. Martindale, S. E. Greene, W. Kiessling, J. Ries, J. C. Zachos, D. L. Royer, S. Barker, T. M. Marchitto, R. Moyer, C. Pelejero, P. Ziveri, G. L. Foster, and B. Williams, The geological record of ocean acidification, *Science.*, **335**, 1058–1063 (2012).
8. T. H. Christensen and V. Bisinella, Climate change impacts of introducing carbon capture and utilisation (CCU) in waste incineration, *Waste Manag.*, **126**, 754–770 (2021).
9. P. Popielak, I. Majchrzak-Kucęba, and D. Wawrzyńczak, Climate change mitigation with CCUS - A case study with benchmarking for selected countries in adapting the European Union's green deal, *Int. J. Greenh. Gas Control*, **132**, 104057 (2024).
10. Y. Zhao, CCUS: A panacea or a placebo in the fight against climate change?, *Green Energy Environ.*, **10**, 239–243 (2025).
11. J. Ye, N. Dimitratos, L.M. Rossi, N. Thonemann, A.M. Beale, and R. Wojcieszak, Hydrogenation of CO_2 for sustainable fuel and chemical production, *Science*, **387**, (2025).
12. C. Siskos, P. Manakas, L. Karaoglanoglou, and A. Vlysidis, Techno-economic and environmental analysis of methanol production from cement carbon dioxide emissions, *Renew. Energy*, **256**, 124109 (2026).
13. H.-T. Kim, J. Park, J. Mun, H. Shin, D.-H. Roh, J. Kwon, S. Kim, S.-J. Kim, G. Lee, S.J. Kang, and T.-H. Kwon, Selective electroreduction of CO_2 to C_{2+} alcohols using graphitic frustrated lewis pair catalyst, *ACS Catal.*, **14**, 10392–10402 (2024).
14. S. Kibria Nabil, S. McCoy, and M.G. Kibria, Comparative life cycle assessment of electrochemical upgrading of CO_2 to fuels and feedstocks, *Green Chem.*, **23**, 867–880 (2021).
15. Z. W. Seh, J. Kibsgaard, C. F. Dickens, I. Chorkendorff, J. K. Nørskov, and T. F. Jaramillo, Combining theory and experiment in electrocatalysis: Insights into materials design, *Science*, **355**, aad4998 (2017).
16. W. R. Leow, Y. Lum, A. Ozden, Y. Wang, D.-H. Nam, B. Chen, J. Wicks, T.-T. Zhuang, F. Li, D. Sinton, and E. H. Sargent, Chloride-mediated selective electrosynthesis of ethylene and propylene oxides at high current density, *Science*, **368**, 1228–1233 (2020).
17. P. Achakulwisut, P. Erickson, C. Guivarch, R. Schaeffer, E. Brutschin, and S. Pye, Global fossil fuel reduction pathways under different climate mitigation strategies and ambitions, *Nat. Commun.*, **14**, 5425 (2023).
18. Y. Chen, X. Wang, X.-Y. Li, R. K. Miao, J. Dong, Z. Zhao, C. Liu, J. E. Huang, J. Wu, S. Chu, W. Ni, Z. Guo, Y. Xu, P. Ou, B. Xu, Y. Hou, D. Sinton, and E.H. Sargent, Electrified synthesis of n-propanol using a dilute alloy catalyst, *Nat. Catal.*, **8**, 239–247 (2025).
19. S. Gehrmann and N. Tenhumberg, Production and use of sustainable C2-C4 alcohols – An industrial perspective, *Chemie Ing. Tech.*, **92**, 1444–1458 (2020).
20. S. Jeong, C. Huang, Z. Levell, R. X. Skalla, W. Hong, N. J. Escorcia, Y. Losovyj, B. Zhu, A. N. Butrum-Griffith, Y. Liu, C. W. Li, D. Reifsnyder Hickey, Y. Liu, and X. Ye, Facet-defined dilute metal alloy nanorods for efficient electroreduction of CO_2 to n -Propanol, *J. Am. Chem. Soc.*, **146**, 4508–4520 (2024).
21. K. P. Kuhl, E. R. Cave, D. N. Abram, and T. F. Jaramillo, New insights into the electrochemical reduction of carbon dioxide on metallic copper surfaces, *Energy Environ. Sci.*, **5**, 7050–7059 (2012).

22. G. Leonzio, A. Hankin, and N. Shah, CO_2 electrochemical reduction: A state-of-the-art review with economic and environmental analyses, *Chem. Eng. Res. Des.*, **208**, 934–955 (2024).
23. Y. Hori, Electrochemical CO_2 reduction on metal electrodes, *Mod. Asp. Electrochem.*, 89–189 (2008).
24. Z. Yang, F. E. Oropeza, and K. H. L. Zhang, P-block metal-based (Sn, In, Bi, Pb) electrocatalysts for selective reduction of CO_2 to formate, *APL Mater.*, **8**, (2020).
25. Y. Hori, R. Takahashi, Y. Yoshinami, and A. Murata, Electrochemical reduction of CO at a copper electrode, *J. Phys. Chem. B*, **101**, 7075–7081 (1997).
26. C. Zhan, F. Dattila, C. Rettenmaier, A. Herzog, M. Herran, T. Wagner, F. Scholten, A. Bergmann, N. López, and B. Roldan Cuenya, Key intermediates and Cu active sites for CO_2 electroreduction to ethylene and ethanol, *Nat. Energy*, **9**, 1485–1496 (2024).
27. T. Jaster, A. Gawel, D. Siegmund, J. Holzmann, H. Lohmann, E. Klemm, and U.-P. Apfel, Electrochemical CO_2 reduction toward multicarbon alcohols - The microscopic world of catalysts & process conditions, *IScience*, **25**, 104010 (2022).
28. A. H. M. da Silva, Q. Lenne, R. E. Vos, and M. T. M. Koper, Competition of CO and acetaldehyde adsorption and reduction on copper electrodes and its impact on n-propanol formation, *ACS Catal.*, **13**, 4339–4347 (2023).
29. S. Nitopi, E. Bertheussen, S. B. Scott, X. Liu, A. K. Engstfeld, S. Horch, B. Seger, I. E. L. Stephens, K. Chan, C. Hahn, J. K. Nørskov, T. F. Jaramillo, and I. Chorkendorff, Progress and perspectives of electrochemical CO_2 reduction on copper in aqueous electrolyte, *Chem. Rev.*, **119**, 7610–7672 (2019).
30. A. Cho, Connecting the dots to custom catalysts, *Science*, **299**, 1684–1685 (2003).
31. A. Verdaguer-Casadevall, C. W. Li, T. P. Johansson, S. B. Scott, J. T. McKeown, M. Kumar, I. E. L. Stephens, M. W. Kanan, and I. Chorkendorff, Probing the active surface sites for CO reduction on oxide-derived copper electrocatalysts, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 9808–9811 (2015).
32. D. Ren, N. T. Wong, A. D. Handoko, Y. Huang, and B. S. Yeo, Mechanistic insights into the enhanced activity and stability of agglomerated cu nanocrystals for the electrochemical reduction of carbon dioxide to n-propanol, *J. Phys. Chem. Lett.*, **7**, 20–24 (2016).
33. C. Long, X. Liu, K. Wan, Y. Jiang, P. An, C. Yang, G. Wu, W. Wang, J. Guo, L. Li, K. Pang, Q. Li, C. Cui, S. Liu, T. Tan, and Z. Tang, Regulating reconstruction of oxide-derived Cu for electrochemical CO_2 reduction toward n-propanol, *Sci. Adv.*, **9**, (2023).
34. R. Zhang, J. Zhang, S. Wang, Z. Tan, Y. Yang, Y. Song, M. Li, Y. Zhao, H. Wang, B. Han, and R. Duan, Synthesis of n-propanol from CO_2 electroreduction on bicontinuous Cu_2O/Cu nanodomains, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **63**, (2024).
35. H. Du, L.-X. Liu, P. Li, Q. Min, S. Guo, and W. Zhu, Enriching reaction intermediates in multishell structured copper catalysts for boosted propanol electrosynthesis from carbon monoxide, *ACS Nano*, **17**, 8663–8670 (2023).
36. B. Liu, X. Yao, Z. Zhang, C. Li, J. Zhang, P. Wang, J. Zhao, Y. Guo, J. Sun, and C. Zhao, Synthesis of Cu_2O nanostructures with tunable crystal facets for electrochemical CO_2 reduction to alcohols, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 39165–39177 (2021).
37. W. Fu, Z. Liu, T. Wang, J. Liang, S. Duan, L. Xie, J. Han, and Q. Li, Promoting C_{2+} production from electrochemical CO_2 reduction on shape-controlled cuprous oxide nanocrystals with high-index facets, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **8**, 15223–15229 (2020).
38. D. Ma, C. Zhi, Y. Zhang, J. Chen, Y. Zhang, and J.-W. Shi, A review on the influence of crystal facets on the product selectivity of CO_2RR over Cu metal catalysts, *ACS Nano*, **18**, 21714–21746 (2024).
39. G. Zhang, Z.-J. Zhao, D. Cheng, H. Li, J. Yu, Q. Wang, H. Gao, J. Guo, H. Wang, G. A. Ozin, T. Wang, and J. Gong, Efficient CO_2 electroreduction on facet-selective copper films with high conversion rate, *Nat. Commun.*, **12**, 5745 (2021).
40. S. Dhakar and S. Sharma, Facet engineering of copper for product specific CO_2 electroreduction, *J. Phys. Chem. C*, **128**, 4862–4881 (2024).
41. W. Niu, Z. Chen, W. Guo, W. Mao, Y. Liu, Y. Guo, J. Chen, R. Huang, L. Kang, Y. Ma, Q. Yan, J. Ye, C. Cui, L. Zhang, P. Wang, X. Xu, and B. Zhang, Pb-rich Cu grain boundary sites for selective CO-to-n-propanol electroconversion, *Nat. Commun.*, **14**, 4882 (2023).
42. M. Choi, S. Bae, Y. Kim, Y. Lee, M. Cho, S. Kang, and J. Lee, Selective formaldehyde condensation on phosphorus-rich copper catalyst to produce liquid C_{3+} chemicals in electrocatalytic CO_2 reduction, *Nat. Catal.*, **8**, 476–486 (2025).
43. N. C. Bhoumik, Q. A. Padovan, T. Akter, D. K. Stem, and C. J. Barile, Gold self-assembly on copper electrodes promotes n-propanol formation in electrochemical CO_2 reduction, *Angew. Chemie Int. Ed.*, **64**, (2025).
44. Y. Ou, L. Liu, R. R. Seemakurthi, F. You, H. Ma, J. Pérez-Ramírez, N. López, and B. S. Yeo, Controlling hydrocarbon chain growth and degree of branching in CO_2 electroreduction on fluorine-doped nickel catalysts, *Nat. Catal.*, **8**, 714–727 (2025).
45. J. Ding, H. Bin Yang, X.-L. Ma, S. Liu, W. Liu, Q. Mao, Y. Huang, J. Li, T. Zhang, and B. Liu, A tin-based tandem electrocatalyst for CO_2 reduction to ethanol with 80% selectivity, *Nat. Energy*, **8**, 1386–1394 (2023).
46. D. M. Weekes, D. A. Salvatore, A. Reyes, A. Huang, C. P. Berlinguette, Electrolytic CO_2 reduction in a flow cell, *Acc. Chem. Res.*, **51**, 910–918 (2018).
47. Q. Chen, X. Wang, Y. Zhou, Y. Tan, H. Li, J. Fu, and M. Liu, Electrocatalytic CO_2 reduction to C_{2+} Products in Flow Cells, *Adv. Mater.*, **36**, (2024).
48. K. Liu, W. A. Smith, and T. Burdyny, Introductory guide

to assembling and operating gas diffusion electrodes for electrochemical CO_2 reduction, *ACS Energy Lett.*, **4**, 639–643 (2019).
49. B. Endrődi, E. Kecsenovity, A. Samu, F. Darvas, R. V. Jones, V. Török, A. Danyi, and C. Janáky, Multilayer electrolyzer stack converts carbon dioxide to gas products at high pressure with high efficiency, *ACS Energy Lett.*, **4**, 1770–1777 (2019).
50. C. Peng, G. Luo, J. Zhang, M. Chen, Z. Wang, T.-K. Sham, L. Zhang, Y. Li, and G. Zheng, Double sulfur vacancies by lithium tuning enhance CO_2 electroreduction to n-propanol, *Nat. Commun.*, **12**, 1580 (2021).