

친환경 고분자를 중심으로 살펴본 지속 가능 소재의 미래 전망



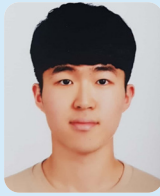
정재우

- 2000. 송실대학교 섬유공학과 학사
- 2003. 서울대학교 재료공학부 석사
- 2008. 서울대학교 재료공학부 박사
- 2009-2012. 프린스턴 대학교 Post-Doc.
- 2012-2013. 한국과학기술연구원 선임연구원
- 2013-현재. 송실대학교 신소재공학과, 부교수



유영준

- 2020. 송실대학교 유기신소재 · 파이버공학과 학사
- 2022. 송실대학교 신소재공학과 석사
- 2022-현재. 송실대학교 신소재공학과 박사과정



강희철

- 2021. 송실대학교 유기신소재 · 파이버공학과 학사
- 2021-현재. 송실대학교 신소재공학과 석 · 박사통합과정

1. 서 론

고분자 및 섬유 소재 분야에 있어 현대 사회의 중요한 화두 중 하나는 지속 가능한 고분자(sustainable polymers)이다. 지속 가능한 고분자는 재생 가능한 자원에서 추출하거나, 재활용이 가능한 생분해성이 있어 환경에 미치는 부정적 영향을 최소화할 수 있어서 순환 경제 모델(circular economy model)에 입각하여 인류와 환경 보호는 물론 자원의 효율적 사용을 가능하게 한다[1-4]. 고분자의 이러한 접근 방식은 “요람에서 요람까지 (cradle to cradle)” 라고 알려져 있으며, 이는 제품의 생명주기가 시작할 때부터 사용 후 처리될 때까지 미치는 모든 영향을 고려한다는 것을 뜻한다. 이러한 관점에서 지속 가능한 제품은 자원을 낭비하지 않고, 가능한 많이 재활용되며, 최종적으로 환경에 해를 끼치지 않도록 설계되어야 한다. 이러한 고분자의 예로는 천연 고분자(예: cellulose, starch), 개질된 천연 고분자(예: polylactide(PLA), polyhydroxyalkanoate(PHA)) 및 합성 고분자(예: 생분해성 polyester)가 있는데 이들 중 일부는 이미 산업에 활용되고 있다.

결국 지속 가능한 고분자가 성공적으로 개발되어 사용되기 위해서는 전체 공급망에서 지속 가능성과 효율성을 보장하고 기존 석유화학 기반 고분자와 비교하여 비용과 고분자 특성에 경쟁력을 갖추는 것, 환경적으로 무해한 재사용 및 재처리(기계적 재활용), 해중합(화학적 재활용) 또는 생분해 재료를 설계하고 제조하는 것이 중요하다고 하겠다[5-8]. 현시점에서선 분명 어려운 일임에 틀림없지만 고분자 과학, 산업 공정, 생물학, 환경 과학, 비용 관리 및 조달, 제도 개선과 법률 제정 등 다양한 측면을 함께 고려하여 다학제적으로 개발된다면 머지않아 지속 가능형 고분자 소재가 기존의 석유화학 기반의 플라스틱을 대체할 수 있으리라 생각된다.

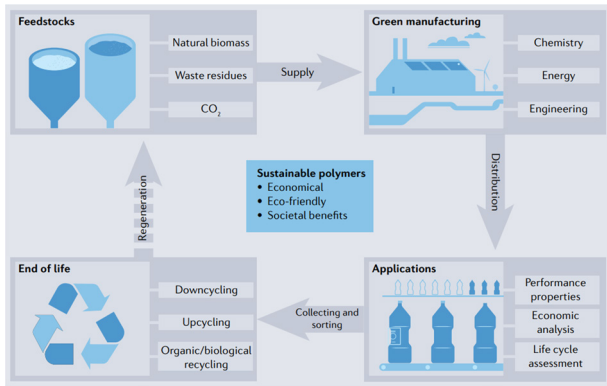


Figure 1. 원료에서 재생에 이르는 지속 가능한 고분자의 수명 주기 모식도[9].

본 기고글에서는 많은 지속 가능 소재 중에서도 친환경 고분자를 중심으로, 지속 가능 소재가 어떤 방향으로 나아가고 있고 또 어느 부분에 중점을 두고 바라보아야 하는지에 대해 이야기하려고 한다. 다른 자료들에서 많이 접할 수 있는 기술적인 부분들인 기계적 재활용이나 화학적 재활용, 생분해 기술과 같은 연구 동향은 과감히 생략하였고, 지속 가능한 고분자가 성공하기 위해 고려해야 하는 요소들과 이들의 응용과 전망을 중심으로 작성하였다. 본 기고글에 실리지 않은 다른 영역의 지속 가능 소재에 대해서는 조만간 다른 기고글을 통해 다시 논의하기로 하고, 부디 본 기고글이 학회의 많은 구성원들에게 지속 가능 소재에 대한 관심을 불러일으킬 수 있는 계기가 되길 기대해 본다. 참고로 본 기고글은 2022년 6월에 출판된 Nature Reviews Methods Primers 지의 “Sustainable polymers”를 근간으로 작성되었다.

2. 지속 가능한 고분자의 성공적인 개발을 위한 필요 요소

지속 가능한 고분자의 성공을 위해서는 여러 가지 중요한 요소들이 고려되어야 하는데 우선적으로 기존의 석유 기반 플라스틱 제품들과 비교하여 경쟁력을 갖추어야 한다. 즉, 성능 면에서는 기존 제품과 비슷하거나 우수해야 하며, 경제적으로도 경쟁력을 갖추고 있어야 한다[10]. 아울러 환경적인 측면에서도 지속 가능성이라는 중요한 가치를 실현시킬 수 있어야 한다. 이를 위해서는 재생 가능한 원료를 사용해야 하는데, 이러한 원료의 사용은 기존의 방식보다 더 많은 비용을 요구한다. 따라서 지속 가능한 고분자 소재를 개발하기 위해서는 바이오매스

를 단량체 및 고분자로 효율적으로 전환시킬 수 있는 기술을 개발하여 가격 경쟁력을 갖추는 것이 매우 중요하다[11]. 뿐만 아니라, 특정한 특성과 선택성을 제공하는 것이 매우 중요하며, 정밀한 고분자 중합법과 사용한 후 이들을 재활용할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 해중합 과정에서의 전환율이 고려된 지속 가능성 고분자를 설계할 수 있어야 하고, 공정적인 측면에서도 친환경 용매와 촉매를 사용하여 공정 변환 단계 수를 최소화해야 한다. 생산 및 가공 과정에서 발생하는 모든 에너지 소비 역시 최소화할 수 있어야 한다. 현재 많은 연구진들이 이러한 부분에 대해 다양한 연구를 진행하고 있는 가운데 이를 실생활에 구현시키기 위해서는 산업계와의 긴밀한 협력관계를 맺어야 한다는 점도 잊지 말아야 할 점 중 하나이다.

이런 과정 중에 우리는 다양한 분석 기법을 통해 단량체 또는 고분자의 화학 구조를 식별하고 순도 및 반응 선택성과 효율을 정량화하는 것이 필요하다. 핵자기공명분광분석, 질량분석, 현미경(엑상 전자 현미경 등) 및 유변학 분석과 같은 분석법을 통해 단량체 또는 고분자의 화학 구조를 규명해야 하고, 가스 크로마토그래피-질량 분석법을 사용하여 단량체 순도와 반응 선택성을 분석할 수 있어야 한다[12,13]. 특히, 가스 크로마토그래피를 이용해 유효탄소수를 계산하여 단량체의 수율을 정밀히 분석해내는 것도 필요하다[14]. 뿐만 아니라, 바이오 기반 고분자가 만들어지는 과정 속에 단량체 합성 및 추출, 단량체에서 고분자로의 전환, 부산물 및 부반응의 유무와 같은 반응 효율도 확인해야 한다. 촉매 및 첨가제도 지속 가능성에 따라 가능한 한 정확하게 정량화해야 한다. 대상 용도에 맞춰 열역학적 또는 생물학적 특성을 고려해야 하며, 구조와 공정, 그리고 물성 간의 상관관계도 확립해야 한다. 화학 반응기(반응성 압출의 압출기 포함)에 부착된 근적외선/중적외선 라만 분광법 및 엑상 전자 현미경과 같은 스펙트럼 기술은 중합 과정 중 발생하는 고분자 구조 변화를 즉석해서 식별하는 데 유리하며, 필요에 따라 구조와 특성, 그리고 공정을 미리 제어할 수 있게 도와준다. 최종적으로 만들어진 지속가능 고분자들의 물성도 측정되어야 하는데 이들이 기존 플라스틱을 대체하기 위해 필요한 요구 사항을 충족하는지 확인하는 데 있어 매우 중요한 단계라고 할 수 있다. 그러나 이 단계에서의 목표는 단순히 지속 가능한 고분자가 기존 플라스틱을 대체하기 위해 동일한 기준과 요구사항을 갖고 있는지만 검증하는 것이 아니다. 오히려 물성 분석을 통해 제조 방법이나 공정을 조정하고 제조 단계에서 발생할 수 있는 복잡성을 줄이면서도 필요한 응용 분야 특성

에 도달하게 하는 것이 실제적인 목표라 할 수 있다. 이는 가공성, 결정화, 유연학, 물질 전달, 기계적, 전기 전도성 등을 평가하여 확립할 수 있고, 그 외에도 생애주기평가(life cycle assessment, LCA)를 통한 지속 가능성 평가로 향후 지속 가능성 고분자 소재가 나아갈 바를 가늠해야 한다. 이 외에도 보다 올바른 특성화 도구와 국제 표준을 사용하여 화합물의 구조와 특성을 정확하게 분석해야만 성공적인 지속 가능 소재를 개발해낼 수 있다.

3. 지속 가능한 고분자의 시장 개발

순환 경제에 맞춰 기존 및 신규 상업용 제품 및 응용분야를 개발하는 것은 지속 가능한 발전을 위해 매우 중요하다. 이러한 소재들을 사용하여 다양한 제품으로 사용하게 되면 소비자의 지속 가능한 라이프스타일을 구현하는데 도움이 될 수 있다. 예를 들어, 포장재 분야에서는 친환경적인 포장 솔루션을 개발하여 일회용 플라스틱 사용을 줄일 수 있고, 농업 분야에서는 생분해성 소재를 사용한 비료나 농업 필름을 개발하여 환경 부담을 줄일 수 있다. 자동차 부품 분야에서는 경량화와 함께 재활용 소재를 사용하여 연료 효율성을 높일 수 있으며, 섬유 분야에서는 바이오 기반 섬유를 사용하여 지속 가능한 의류 생산을 촉진할 수 있다[15]. 무엇보다 이들은 사용이 끝난 후에 환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있어 자원을 보다 효율적으로 활용하고 폐기물의 양을 줄일 수 있다. 이런 점에서 지속 가능 소재를 보다 다양한 분야로 활용하는 것이 필요하다.

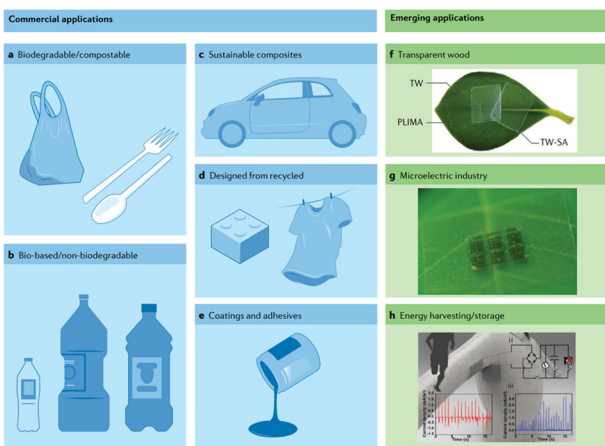


Figure 2. 이미 상업적으로 이용되고 있거나 앞으로 전도 유망한 응용분야

3.1. 포장 및 소비재

현재 포장 및 소비재 분야에서는 다양한 종류의 바이오 기반 고분자가 상업적으로 사용되고 있다. 이들은 연질 및 경질 포장재, 식료품 봉투, 식품 포장재, 커피 캡슐 등 다양한 제품으로 사용되고 있는데 가장 널리 사용되는 바이오 기반 고분자 중 하나는 바이오 poly(ethylene terephthalate)(PET)이다. 이들은 식물 기반 자원을 사용하여 제작되며 지속 가능한 포장 소재에 가장 적합한 솔루션으로 널리 사용되고 있다. 코카콜라에서 출시한 바이오 PET로 만든 PlantBottle은 석유 기반 소재와 비슷한 수준으로 내용물을 보존하고 보호할 수 있을 뿐만 아니라, 2009년 이후 자동차 100만 대가 도로에서 퇴출되는 것과 버금가는 양의 CO₂ 배출량을 줄인 것으로 추정되고 있다[19]. 레고(LEGO)는 2025년까지 지속 가능한 포장재만을 사용하고 2030년까지 모든 레고 브릭을 바이오 기반 또는 재활용 플라스틱으로 생산할 것을 목표로 하고 있다. 실제로 2018년부터 일부 레고 브릭은 사탕수수 기반 polyethylene(PE)으로 생산되고 있으며, 재활용 페트병으로 만든 브릭은 시제품 단계에 있다[20,21]. 식음료 및 포장재가 유기물에 의해 오염되는 기타 용도의 경우에는 산업용 PLA 또는 산업 및 가정용 퇴비화 가능 poly(butylene adipate terephthalate)(PBAT), PHA, starch, cellulose acetate 소재가 활용될 수 있다. 여러모로 지속 가능형 바이오 기반 고분자를 포장재로 사용하게 되면 화석 기반 제품과 함께 기계적 또는 화학적으로 재활용할 수 있다는 장점이 있지만, 현재 대부분 경우 지속 가능성 고분자의 가격이 매우 비싸기 때문에 이를 값싼 포장재로 활용하고자 하는데 상업적 어려움이 있다. 또한 PLA 및 전분 혼합물과 같은 일반적인 생분해성 포장재는 식품 포장재로 사용될 수 있지만 낮은 유리전이온도(glass-transition temperature, T_g)와 제한된 내열성 때문에 뜨거운 음료나 식사 용도로는 부적합하기도 하다. 이러한 한계를 극복하기 위해 가격적인 면이나 물성적인 면에서 더 많은 부분이 보완되어야 할 것이다.

3.2. 농업 및 원예

농업 및 원예 분야에서 플라스틱의 사용이 꾸준히 증가하고 있는 가운데, 2019년 농업용 필름의 사용량은 740만 톤으로 추정되고 있다 [22]. 이들은 주로 단기간 사용되는 데, 분해되거나 오염되어 수거 및 재활용이 어려운 경우가 많다. 이러한 점에서 적절하게 잘 설계된 생분해성 플라스틱은 멀칭(mulching), 온실 덮개, 화분, 나무 보호막, 과일 보호 필름 및 기타 관련 제품 등에 사용되기 적합하다. 이러한 제품은 토양 매립 시 완전히 분해되어 수거 및 토양 청소가 필요 없으며, 선형 저밀도 폴리에

틸렌(linear low-density polyethylene, LLDPE) 멀칭과도 비슷한 기능 및 성능을 보여주고 있다[23]. 이 외에도 농업 잔류물 및 재활용 플라스틱으로 설계된 제품들이 다양한 생산 수준에서 상용화되고 있으며, 농업 및 원예 분야를 넘어 보다 지속 가능한 제품이 개발 중이다.

3.3. 자동차, 건축, 코팅 및 접착제

최근 자동차, 건축, 코팅 및 접착제 산업에 지속 가능한 소재의 사용이 증가하고 있다. 그 중에서도 특히 자동차 산업은 바이오 복합재, 바이오 기반 플라스틱 및 재활용 플라스틱을 선도적으로 채택하고 있고, 실제로도 2018년 100% 바이오 플라스틱으로 만든 최초의 현대 자동차 프로토타입이 시연된 바 있다[24]. 상업적으로 바이오 복합재는 주로 자동차 내부(도어 및 바닥 패널, 대시보드, 포장 트레이 등)에 사용되지만 구조 부품도 개발 중인데, 포르쉐의 경우 대마 복합재로 만든 차체를 설계하기 시작하였다[25]. 뿐만 아니라, 바이오 복합재는 생산과 사용 과정에서 무게와 CO₂ 배출량을 줄일 수 있다. 이런 점에서 유럽 연합의 자동차 업계는 매년 8만 톤의 목재와 식물 섬유를 차량 생산에 사용하고 있다[26]. 특히 천연 섬유는 유리 섬유보다 가격이 저렴하고 여러 가지 성능상 이점을 제공하기 때문에 기존의 석유화학 기반 고분자 기재를 식물 유래 고분자로 대체하거나 농업, 임업 및 산업 후 폐기물을 자동차용 소재로 사용하는 것에 많은 관심이 기울여지고 있다. 더 나아가 경량 및 고강도 건축 부품을 위해 지속 가능한 바이오 기반 및 재활용 가능한 열경화성 복합재 개발도 이루어지고 있고, 바이오 기반 코팅 및 접착제의 활용도 활발히 진행되고 있다[27-29]. 최초의 상업용 바이오 기반 건물 외장용 코일 코팅인 GreenCoat는 유채씨 오일로 개발되었고, 현재 대규모 상업용 제품으로 생산되고 있다[30]. 이러한 코팅 및 접착제는 환경적으로 친화적이며, 건축물의 지속 가능성을 높이는 데 기여하고 있다.

3.4. 지속 가능한 섬유

전통적인 섬유 산업은 환경에 심각한 부정적 영향을 미쳐 왔다. 그러나 바이오 기반 및 재활용 가능한 지속 가능성 고분자 섬유를 사용하게 되면 이러한 영향을 줄일 수 있다[31]. 예를 들어, 바이오 가스로부터 생산된 polyhydroxyvalerate(PHB) 기반 섬유, 미생물 셀룰로스 직물(nanollose), 버섯 균사체(mylo) 또는 선인장 잎(desserto)으로 생산된 비건 가죽 등 새로운 바이오 기반 및 생분해성 섬유가 프로토타입 또는 파일럿 규모로 제조되고 있는데, 이들은 기존의 섬유의 환경 부작용을 크게 줄여 준

다[32]. 또한 85%에 달하는 섬유 제품이 매립지로 버려지고 패션 산업의 주기가 빠르게 변해가고 있는 상황에서 섬유의 재활용 문제가 해결되어야지만 날로 늘어가는 섬유 패션 산업의 심각한 환경 문제를 해결할 수 있다. 실제로 Renewcell은 섬유 재활용 회사로 2020년 타임지 선정 100대 발명품에 선정된 소재인 서클로스(circulose)를 생산하여 상업적 단계까지 끌어 올린 바 있다[33]. 이 재활용 섬유는 이미 리바이스와 H&M을 비롯한 주요 기업에서 지속 가능한 청바지와 기타 품목을 생산하는 데 사용되고 있다. 또 다른 상업적 성공 사례로 Parley Ocean Plastic과 Adidas가 해양 플라스틱으로 폴리에스터 원단을 개발한 바 있고 2020년 말까지 3억 3천만 개의 페트병에 해당하는 폴리에스터 원단으로 3천만 개의 신발을 제조한 바 있다[34].

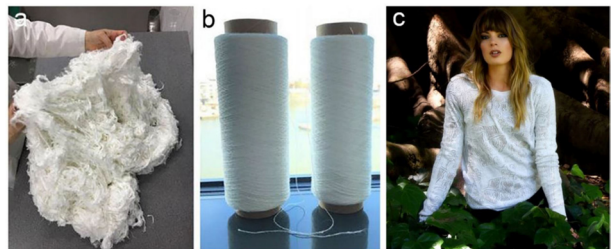


Figure 3. Nanollose의 미생물 셀룰로스 제품들[35].

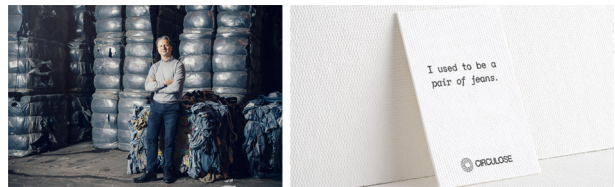


Figure 4. 스웨덴 섬유 리사이클링 회사인 Renewcell 사에서 개발한 Circulose[36,37].

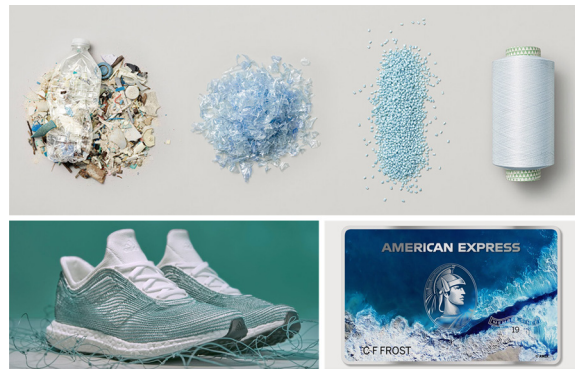


Figure 5. Parley Ocean Plastic과 협업하여 해양 플라스틱으로 만든 아디다스 신발과 아메리칸 익스프레스 신용카드[38].

3.5. 바이오 기반 및 생분해성 전자 기기

전자 기기는 스마트 포장부터 공기 및 정수 필터, e헬스, 데이터 및 에너지 저장, 사물 인터넷에 이르기까지 우리 생활의 모든 영역에 침투해 있다. 시간이 지남에 따라 내구성이 강한 고체 기기에서 단기간에 자주 사용하는 유연한 휴대용 기기로 변화하고 있다. 이는 전자기기의 안정적인 기능뿐만 아니라 생체 적합성 및 사용 후 관리를 보장하는데 많은 어려움으로 작용하고 있다. 이런 점에서 바이오 기반, 생분해성 또는 재활용 가능한 전자 기기는 다양한 일회용 디바이스에 지속 가능한 솔루션을 제공할 수 있다. 뿐만 아니라 바이오 기반 고분자를 이용해 건강, 식품의 신선도 또는 환경 오염 물질을 모니터링하는 휴대용 센서에서부터 휴대용 전기 화학 에너지 저장 장치, 태양 전지, 플렉시블 OLED 및 전자 생체 모방 피부에 이르기까지 다양한 응용 분야에 활용될 수 있다는 것이 수많은 연구진들로부터 입증되었다[39]. 특히 이러한 소재에 3D 프린팅 기술을 이용한다면 바이오 기반 에너지 저장 재료, 소프트 일렉트로닉스 및 센서 생산을 보다 수월하게 할 수 있어 보다 혁신적인 친환경 전자 제품을 개발하는 데 도움이 될 수 있다[40].

많은 기업들이 지속 가능성 목표에 대해 공개적으로 야심 찬 약속을 하고 있으며, 일부 기업들은 지속 가능한 바이오 플라스틱 사용을 지속적으로 늘리기 위한 전략을 세우고 있다. 아직 접근성, 기계적 특성, 내구성 등이 제한적이거나 비용이 너무 높아서 100% 지속 가능한 플라스틱으로 대체되지 못하지만, 관련 소재에 대해 지속적인 발전이 이루어지고 있다는 점을 생각해 보면 이들의 활용도가 더욱 넓어질 것이라는 것을 쉽게 예상할 수 있다. 예를 들어, 대두유에서 추출된 콩 기반 폼은 매트리스, 가정용 가구, 카시트 등에 이미 상업적으로 사용되고 있고, IKEA는 2030년까지 100% 재생 또는 재활용 플라스틱 사용을 목표로 2018년부터 지속적인 시도를 해오고 있다. 코카콜라의 바이오 PET 기반 PlantBottle에 이어, 2020년에는 다사니(Dasani)가 식물 기반과 재활용 PET를 동일하게 사용하는 하이브리드 보틀을 출시한 바도 있다. 포드 자동차는 2019년에 링컨 컨티넨탈의 콘솔에 최대 크기의 천연 섬유 강화 자동차 사출 성형 부품을 도입하기도 하였다. 물론 이 콘솔은 유리로 채워진 복합재보다 수명 후 관리 차원에서 볼 때 재활용성이 크게 좋지는 않았지만 무게가 훨씬 가벼워 연비를 개선할 수 있다는 점에서 또 다른 지속 가능 고분자의 방향성을 제시해 주었다. 이 외에도 여러 기업들이 석유 기반 플라스틱의 환경적 비용을 줄이고자 하는 소비자들의 요구와 함께

브랜드 차별화를 추구하며 지속 가능한 새로운 고분자 기술로의 전환을 모색하고 있다. 아마도 머지않아 환경보호, 소비자 인식의 변화, 규제와 정책, 기술 발전과 장기적인 경제적 이점으로 많은 기업들이 석유 기반 플라스틱에서 벗어나 지속 가능한 대안으로 산업을 전환하게 될 것이며, 이는 플라스틱 산업에 중요한 변화를 이끌 것으로 생각된다.

4. 지속 가능한 고분자 소재 개발의 제약 사항

지속 가능한 고분자의 개발과 상용화에 있어 여전히 직면하고 있는 주요 도전 과제는 효율적이면서도 통합된 전환 방법의 부족, 그리고 대상 제품에 대한 명확한 이해 부족이라 할 수 있다[41]. 사실 이러한 문제는 지속 가능한 고분자 연구 초기 단계부터 인식되어져 왔다. 그러나 많은 연구와 투자에도 불구하고 아직까지도 그 해결이 쉽지 않은 실정이다. 보통의 경우 지속 가능한 고분자는 전통적인 석유 기반 고분자에 비해 제조 효율성이 좋지 못하다[41]. 이는 화학 반응에서 원하는 제품으로 전환되는 비율이 낮기 때문이며 사용되는 원료나 공정의 비용 효율성에도 문제가 있을 수 있다. 뿐만 아니라, 다양한 단량체와 고분자 구조에 적합한 합성 경로를 개발하는 것 역시 여전히 만만치 않은 문제이다. 각기 다른 물질에 대한 맞춤형 공정을 개발하는 데에도 시간과 비용이 많이 들기 때문에 지속 가능 소재를 광범위하게 상용화기에 쉽지 않은 실정이다. 또한 지속 가능한 고분자를 사용할 최종 제품에 대한 구체적인 요구 사항과 특성에 대한 이해가 부족하게 되면 지속 가능한 고분자의 설계와 개발을 복잡하게 만들 뿐만 아니라, 아무리 지속 가능한 특성을 지녔다 하더라도 제품의 요구 성능에 미치지 못하게 되어 실사용이 어렵다는 한계가 있다. 무엇보다도 지속 가능한 고분자는 제품 사용 후 효과적인 사후 처리(재활용, 재사용, 생분해 및 퇴비화)가 뒷받침되어야 하는데 이는 처리 비용을 증가시켜 상업화에 큰 걸림돌이 되고 있다.

4.1. 제품의 라이프 사이클 종료 (end of life, EoL)시 한계점

지속 가능한 고분자의 사용 후 처리 과정에서 있어 가장 중요하게 생각해야 할 점은 고분자 재료의 재활용 가능성을 높이는 것과 환경 부작용을 최소화하는 것이다. 이러한 차원에서 기계적 재활용은 단순히 재료를 재사용하는 것에 초점을 맞추고 있지만, 화학적 재활용은 플라스틱을 원래의 단량체나 올리고머로 전환하여 새로운 고분자를 생성하는 과정이므로

로 재활용에 대한 보다 근본적인 해결책이 될 수 있다. 그러나 PET, PE와 같은 플라스틱의 화학적 재활용은 여전히 비용 문제, 에너지 효율성 문제, 플라스틱 폐기물의 복잡성 및 오염 문제로 인해 진척 상태가 매우 더딘 상태다. 또 다른 사후 처리 과정인 생분해성 고분자의 퇴비화 과정의 경우에도, 퇴비화를 위해 특정 환경 조건(높은 수분, pH, 온도)과 긴 분해 시간(약 6개월)이 필요하다는 점에서 역시 그 적용이 쉽지 않다. 만일 퇴비화 속도만 고려하여 생분해도를 높이면 환경에 대한 악영향은 최소화 할 수는 있겠지만 분해 속도는 물질과도 깊은 연관이 있어 무작정 그 속도를 높일 경우 유통 및 보관의 차원에서도 큰 문제를 야기할 수 있다. 이런 점에서 평상시에는 우수한 물성을 지니고 있다가 특정한 조건에서만 급속도로 분해되는 자극-응답형 생분해 고분자를 설계할 필요가 있다.

4.2. 제조 한계 확장

실험실 환경에서 개발된 지속 가능한 고분자를 산업적 규모로 제조할 필요가 있는데, 이를 위해서는 몇 가지 중요한 고려 사항이 있다. 첫째, 실험실 규모에서 사용되는 공정들을 산업 규모로 적용이 가능할 만큼 최적화해야 하고 재현성을 확보해야 한다. 이를 위해서는 설비의 확장 또는 새로운 설비의 개발이 뒤따르게 된다. 그러나 거대한 예산을 들여 새롭게 설비를 투자한다는 것은 기존 산업계에 쉬운 일은 아니다. 이런 점에서 초기단계부터 기존 설비를 그대로 이용할 수 있는 소재와 공정을 염두에 두고 지속 가능형 고분자 구조를 설계하는 것이 필요하다. 두번째, 적절한 촉매를 사용하거나 개발하는 것이 필요하다. 실험실 단위에서의 바이오매스 전환율과 선택성을 대규모 공정에서 그대로 유지한다는 것은 매우 어려운 일이다. 고분자의 생산 효율성을 최대화하기 위해서는 바이오매스 원료를 가능한 한 많이 원하는 고분자로만 전환시켜야 하는데 이는 촉매의 역할에 크게 좌우된다[42,43]. 효율적인 촉매는 반응 시간을 단축하고, 원료 사용을 줄이며, 부산물을 최소화할 수 있다. 그러므로 효율적 촉매를 사용하여 지속 가능한 고분자의 대규모 생산 공정 한계를 극복하고 생산 비용을 절감시키는 것이 필요하다. 세번째, 사용 후 처리의 관점에서 중합과 해중합(분해) 사이의 균형을 맞추는 것이 필요하다. 중합은 물성적인 측면이나 보관/유통 및 소비자의 사용 측면에서 매우 중요하지만, 사용 후 처리라는 것을 고려해보면 분해가 잘 일어나야지만 물질에 지속 가능성이 부여될 수 있다. 이렇게 서로 상반되는 중합과 해중합의 특성을 균형감 있게 조절하여야지만 지속 가능한 고분자의 미래가 열릴 수 있다. 마

지막으로, 제품의 다양성을 보장하고, 특정 원료에 대한 의존도를 감소시켜 다양한 재생 가능한 원료로부터 지속 가능한 고분자를 제조하는 것이 이들의 산업적 생산에 매우 중요한 요소이다. 이를 위해서는 고분자과학, 환경공학, 생명공학, 계산과학, 경제학 및 새로운 제조 및 가공 기술 분야의 연구자들을 합쳐 다학제적으로 지속 가능형 고분자를 개발하는 것이 필요하며, 더 나아가 산업체와의 파트너십, 정부의 제도적 정책적 지원, 소비자의 인식 전환 등과 같이 거시적 사회 담론 형성도 지속 가능형 고분자의 생산 한계를 극복하는데 매우 중요한 역할을 할 것이다.

5. 지속 가능한 고분자 소재의 전망

지난 20~30년 동안 지속 가능한 고분자에 대한 많은 진전이 있어왔다. 이 분야에 있어 대부분의 연구는 재생 가능한 단량체를 고성능 고분자에 적용하고, 생분해성 및 재활용 가능성을 높이는 데 집중되어 왔다. 이러한 발전은 고분자의 구조와 성능에 대한 깊은 이해, 적절한 촉매의 선택, 그리고 점점 강화되는 환경 규제와 밀접하게 연관되어 있으며, 다양한 고분자 합성 경로, 고분자 구조화, 해중합 방법, 인공지능을 이용한 컴퓨터 과학, 생명공학, 그리고 생애주기평가(LCA) 등 다학제적 융합을 통해 새로운 지속 가능 고분자를 산업적 스케일로 구현해 내는 것이 필요하다[44-46]. 그러나 여전히 석유 기반 고분자와 합성물을 지속 가능한 대안으로 완전히 대체하는 것은 쉬운 일은 아니다. 이러한 점에서 지속 가능한 고분자 소재의 향후 연구 분야는 주로 재활용이나 퇴비화가 가능한 저비용 다기능 고분자의 개발, 고온 응용 분야를 위한 고성능 고분자의 개발, 지속 가능형 섬유 및 복합재의 개발, 농업 및 식품 가공 폐기물, 비식용 원료를 사용하는 친환경, 무폐기물, 저에너지 공정의 개발에 집중될 것으로 보인다.

조금 더 구체적으로는 당, 지질, 단백질 등 재생 가능한 공급원료 외에도, 지속 가능한 고분자의 응용 분야를 확장할 수 있는 리그닌 기반 방향족과 탄소 감축에 큰 영향을 줄 수 있는 이산화탄소로부터 제조된 지속 가능형 소재에 대한 관심이 높아질 것으로 예상된다. 특히, 2020년 3월 유럽 연합에서 제안한 순환 경제 계획과 같이 탄소 중립을 요구하는 글로벌 입법 규제가 점차 강화되고 있는데 이는 지속 가능한 고분자에 대한 연구 혁신과 시장 수요를 촉진하는 핵심 자극제가 될 것이다[47]. 아울러 대용량 및 소량 고부가가치 바이오매스나 도시 폐기물을 활용한 제품 개발은 차세대 지속 가능 고분자 개발의 미래 지향점이 될 것으로 보인다.

대[45]. 도시 폐기물은 이제 단순히 버려지는 쓰레기가 아니라 이를 활용하여 고부가가치 바이오 기반 고분자를 생산하는데 사용되어 질 것이며, 이러한 기술 발전은 소재의 지속 가능성과 자원 순환에 크게 기여할 것이다[48,49]. 이미 바이오 복합재, 바이오 수지 프리프레그, 탄소 섬유 및 도시 폐기물에서 추출한 바이오 기반 지속 가능형 고분자가 제품으로 나오고 있고 이에 대한 상업적 성패에 많은 이들의 귀추가 주목되고 있다[50]. 이외에도 향후 지속 가능한 고분자 개발은 초기 바이오매스 선별부터 소재 성능 개선 및 수명 후 관리 옵션에 이르기까지 분자 설계, 촉매 기술, 폐기물 배출 감소, 퇴비화를 포함한 재료 재활용 촉진, 데이터 축적 및 공유를 위한 데이터베이스 및 정보 센터 구축에 초점을 맞춰 진행될 것이다. 특히 막대한 양의 플라스틱 폐기물이 발생되고 있고 새로운 플라스틱이 계속 생산되고 있다는 점에서 기계적 또는 화학적 재활용을 통해 기존의 고분자 폐기물을 고부가가치 단량체, 화학 물질 및 고분자로 바꾸는 기술 개발이 더욱 중요해질 것이다. 무엇보다 정부는 바이오 플라스틱 생산 및 플라스틱 재활용과 관련된 비즈니스 성장에 지속적인 추진책을 마련해야 하며, 폐기물로 만든 플라스틱이 순수 수지로 만든 제품과 다르지 않다는 소비자 행동과 인식 역시 우리 사회에서 지속 가능한 고분자를 수용케 하는 원동력이 될 것이다[51].

친환경성, 경제성, 사회적 이익은 지속 가능한 고분자의 핵심이다. 앞으로도 많은 과학자들은 재료 순환성, 산업 생태학, 지속 가능한 재료, 전체 생애주기 동안 환경적으로 지속 가능할 수 있게 만드는 소재/제품 디자인 등에 많은 노력을 기울일 것이며, 단순한 유행어가 아니라 우리의 미래가 될 지속 가능성을 유지하기 위한 3R 원칙(감축(Reduce), 재사용(Reuse), 재활용(Recycle))을 최우선 과제로 삼아야 할 때이다.

6. 결 론

천연 자원을 보존하기 위해 역설적으로 시작된 1950년대 플라스틱의 시대는 안전, 에너지 절약, 환경 보호 측면에서 전 세계에 혜택을 주었다는 사실은 분명하다. 하지만 현재 지구는 엄청난 수준의 플라스틱 오염에 직면해 있으며, 기후 변화에 대한 우려도 증가하고 있다. 우리는 이러한 문제를 해결할 수 있는 제2의 플라스틱 시대, 즉 지속 가능한 고분자의 시대에 살고 있다. 그럼에도 불구하고 아직 지속 가능한 고분자의 연구, 개발, 확장 및 구현을 향한 여정은 초기 단계에 머물러 있다. 이미 성숙해져 있는 석유화학 산업에 비해 환경적으로 더 책임 있는 지속 가능한 고분자 소재가 경쟁하기에 매우 어려운 상황이며, 특히 아시아 및 아프리카 국가와 같은 신흥 경제국의 경우 경제 개발을 위해 기존의 석유화학 기반 소재의 사용 유혹을 쉽게 뿌리치기 어려운 실정이다. 결국 범람하고 있는 플라스틱 폐기물 문제를 해결하기 위해서는 기존의 석유화학 제품에 못지않으면서도 재활용이 가능한 고분자 소재의 개발이 필수적이며, 이에 맞춰 정부의 일회용 플라스틱에 대한 금지 및 세금 부과 등 행정적 제도적 접근이 반드시 필요하다. 무엇보다 지속 가능성을 위해서라면 기꺼이 더 많은 비용을 지불할 수 있다는 소비자들의 의식이 개선되어야 지속 가능한 고분자의 미래가 열릴 것이라는 것은 두말할 나위 없다. 어쩌면 이러한 과정을 통해 우리는 새로운 지속 가능한 고분자 소재로부터 기존의 석유 기반 플라스틱에서 예상치 못했던 장점을 끌어낼 수 있을 지도 모른다. 이런 점에서 새로운 지속 가능한 고분자 소재 개발에 더 많은 힘을 기울여야 하며, 유한한 자원으로 부터 만들어지고 있는 플라스틱의 생산과 사용을 줄임으로써 지속 가능한 고분자의 시대를 앞당기고 진정한 플라스틱 순환 경제를 창조해내야 할 것이다.

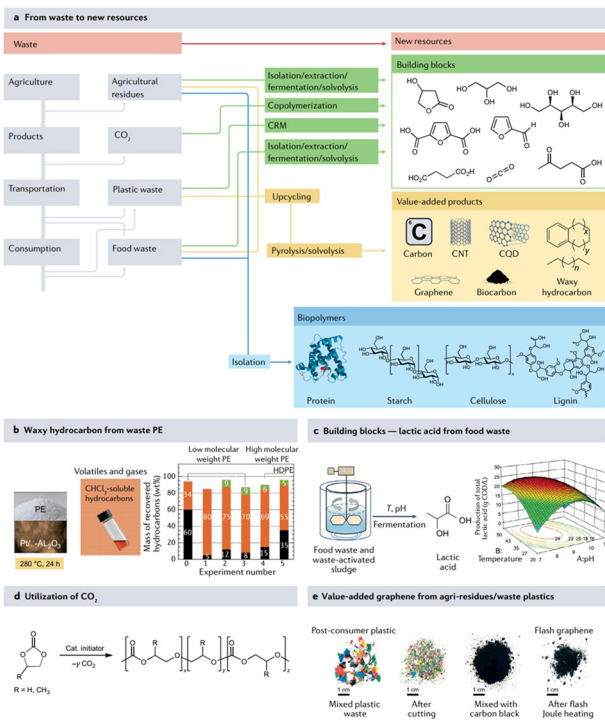


Figure 6. 지속 가능형 고분자의 미래 전망 및 방향성에 대한 모식도 [8,9,48,49,52].

참고문헌

1. United Nations Conference on Trade and Development. Circular economy. UNCTAD. 2022.
2. M. Hong and E. Y.-X. Chen. Future directions for sustainable polymers. *Trends in Chemistry*. Vol. 1, pp. 148–51, 2019.
3. D. K. Schneiderman and M. A. Hillmyer. 50th anniversary perspective: There is a great future in sustainable polymers. *Macromolecules*. Vol. 50, pp. 3733–49, 2017.
4. Y. Zhu, C. Romain, and C. K. Williams. Sustainable polymers from renewable resources. *Nature*. Vol. 540, pp. 354–62, 2016.
5. J. M. Eagan, J. Xu, R. Di Girolamo, C. M. Thurber, C. W. Macosko, A. M. LaPointe, F. S. Bates, and G. W. Coates. Combining polyethylene and polypropylene: Enhanced performance with PE/i PP multiblock polymers. *Science*. Vol. 355, pp. 814–16, 2017.
6. M. Häußler, M. Eck, D. Rothauer, and S. Mecking. Closed-loop recycling of polyethylene-like materials. *Nature*. Vol. 590, pp. 423–27, 2021.
7. S. Yoshida, K. Hiraga, T. Takehana, I. Taniguchi, H. Yamaji, Y. Maeda, K. Toyohara, K. Miyamoto, Y. Kimura, and K. Oda. A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science*. Vol. 351, pp. 1196–99, 2016.
8. F. Zhang, M. Zeng, R. D. Yappert, J. Sun, Y.-H. Lee, A. M. LaPointe, B. Peters, M. M. Abu-Omar, and S. L. Scott. Polyethylene upcycling to long-chain alkylaromatics by tandem hydrogenolysis/aromatization. *Science*. Vol. 370, pp. 437–41, 2020.
9. A. K. Mohanty, F. Wu, R. Mincheva, M. Hakkarainen, J.-M. Raquez, D. F. Mielewski, R. Narayan, A. N. Netravali, and M. Misra. Sustainable polymers. *Nature Reviews Methods Primers*. Vol. 2, p. 46, 2022.
10. R. M. Cywar, N. A. Rorrer, C. B. Hoyt, G. T. Beckham, and E. Y.-X. Chen. Bio-based polymers with performance-advantaged properties. *Nature Reviews Materials*. Vol. 7, pp. 83–103, 2022.
11. M. Dusselier, P. Van Wouwe, A. Dewaele, P. A. Jacobs, and B. F. Sels. Shape-selective zeolite catalysis for bioplastics production. *Science*. Vol. 349, pp. 78–80, 2015.
12. W. Gibson and J. P. Patterson. Liquid phase electron microscopy provides opportunities in polymer synthesis and manufacturing. *Macromolecules*. Vol. 54, pp. 4986–96, 2021.
13. J. M. Pin, M. Misra, and A. K. Mohanty. Cross-Linkable Liquid-Crystalline Biopolyesteramide as a Multifunctional Polymeric Platform Designed from Corn Oil Side-Stream Product of Bioethanol Industry. *Macromolecular Rapid Communications*. Vol. 40, p. 1900093, 2019.
14. L. Shuai, M. T. Amiri, Y. M. Questell-Santiago, F. Héroguel, Y. Li, H. Kim, R. Meilan, C. Chapple, J. Ralph, and J. S. Luterbacher. Formaldehyde stabilization facilitates lignin monomer production during biomass depolymerization. *Science*. Vol. 354, pp. 329–33, 2016.
15. European Bioplastics. Applications for bioplastics. European Bioplastics. <https://www.european-bioplastics.org/market/applications-sectors/>. 2021.
16. Y. H. Jung, T.-H. Chang, H. Zhang, C. Yao, Q. Zheng, V. W. Yang, H. Mi, M. Kim, S. J. Cho, and D.-W. Park. High-performance green flexible electronics based on biodegradable cellulose nanofibril paper. *Nature communications*. Vol. 6, p. 7170, 2015.
17. C. Montanari, Y. Ogawa, P. Olsén, and L. A. Berglund. High performance, fully bio-based, and optically transparent wood biocomposites. *Advanced Science*. Vol. 8, p. 2100559, 2021.
18. M. Zhang, M. Zhao, M. Jian, C. Wang, A. Yu, Z. Yin, X. Liang, H. Wang, K. Xia, and X. Liang. Printable smart pattern for multifunctional energy-management E-textile. *Matter*. Vol. 1, pp. 168–79, 2019.
19. Coca-Cola Company. What is PlantBottle packaging?. Coca-Cola. <https://www.coca-colacompany.com/faqs/what-is-plantbottle-packaging>. 2022.
20. G. Alexander. The search for petroleum-free LEGO. LEGO. <https://earth911.com/eco-tech/petroleum-free-legos/>. 2018.
21. LEGO. Sustainable materials. LEGO. <https://www.lego.com/sv-se/sustainability/environment/sustainable->

- materials/. 2022.
22. H. Y. Sintim and M. Flury. Is biodegradable plastic mulch the solution to agriculture's plastic problem? *Environ. Sci. Technol.* Vol. 51, pp. 1068–69, 2017.
 23. D. Briassoulis and A. Giannoulis. Evaluation of the functionality of bio-based plastic mulching films. *Polymer Testing*. Vol. 67, pp. 99–109, 2018.
 24. A. Barrett. First car made completely from bio-plastics. *Bioplastics News*. <https://bioplasticsnews.com/2018/07/09/bioplastics-car/>. 2018.
 25. S. V. Joshi, L. Drzal, A. Mohanty, and S. Arora. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. Vol. 35, pp. 371–76, 2004.
 26. Nova-Institut. Biocomposites. *Renewable Carbon News*. <https://renewable-carbon.eu/news/biocomposites-350000-production-of-wood-and-natural-fibre-composites/>. 2012.
 27. I. S. Bayer. Superhydrophobic coatings from ecofriendly materials and processes: a review. *Advanced Materials Interfaces*. Vol. 7, p. 2000095, 2020.
 28. J. Hermens, T. Freese, K. Van den Berg, R. Van Gemert, and B. Feringa. A coating from nature. *Sci. Adv.* Vol. 6, p. 51, 2020.
 29. Z. Li, M. Rabnawaz, and B. Khan. Response surface methodology design for biobased and sustainable coatings for water-and oil-resistant paper. *ACS Applied Polymer Materials*. Vol. 2, pp. 1378–87, 2020.
 30. SSAB. Henning Stummel's tin house. SSAB. <https://www.ssab.co.uk/products/brands/greencoat/award-architecture/henning-stummels-tin-house>. 2021.
 31. Sorona. The Sorona story. DuPont. <https://sorona.com/our-story>. 2021.
 32. E. Cirino. The environment's new clothes: biodegradable textiles grown from live organisms. *Scientific American*. <https://www.scientificamerican.com/article/the-environments-new-clothes-biodegradable-textiles-grown-from-live-organisms/>. 2018.
 33. Time. Clothes made out of clothes. *Time*. <https://time.com/collection/best-inventions-2020/5911418/renew-cell-circulose>. 2020.
 34. Adidas. Our sustainability initiatives. Adidas. <https://report.adidas-group.com/2020/en/at-a-glance/2020-stories/our-sustainability-initiatives.html>. 2020.
 35. C. Zhong. Industrial-scale production and applications of bacterial cellulose. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Vol. 8, p. 605374, 2020.
 36. RENEWCELL. CIRCULOSE. RENEWCELL. <https://www.renewcell.com/en/circulose/>. 2024.
 37. European Environmental Bureau (EEB). Renewcell. META. <https://meta.eeb.org/story/renewcell/>. 2020.
 38. PARLEY. OCEAN PLASTIC. PARLEY. <https://parley.tv/journal/parley-ocean-plastic>. 2018.
 39. D. Zhao, Y. Zhu, W. Cheng, W. Chen, Y. Wu, and H. Yu. Cellulose-based flexible functional materials for emerging intelligent electronics. *Advanced materials*. Vol. 33, p. 2000619, 2021.
 40. J. H. Yoon, S.-M. Kim, Y. Eom, J. M. Koo, H.-W. Cho, T. J. Lee, K. G. Lee, H. J. Park, Y. K. Kim, and H.-J. Yoo. Extremely fast self-healable bio-based supramolecular polymer for wearable real-time sweat-monitoring sensor. *ACS applied materials & interfaces*. Vol. 11, pp. 46165–75, 2019.
 41. J. J. Bozell and G. R. Petersen. Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy's "Top 10" revisited. *Green chemistry*. Vol. 12, pp. 539–54, 2010.
 42. J. M. Garcia. Catalyst: design challenges for the future of plastics recycling. *Chem*. Vol. 1, pp. 813–15, 2016.
 43. X. Zhang, M. Fevre, G. O. Jones, and R. M. Waymouth. Catalysis as an enabling science for sustainable polymers. *Chemical reviews*. Vol. 118, pp. 839–85, 2018.
 44. Nature Research Custom Media. Catalysing the search for catalysts. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/d42473-021-00152-0>. 2021.
 45. P. Fabbri, D. Viaggi, F. Cavani, L. Bertin, M. Michetti, E. Carnevale, J. V. Ochoa, G. Martinez, M. Esposti, and P. Fischer. Top emerging bio-based products, their properties and industrial applications. Berlin: Ecologic

- Institut. Available online: www.ecologic.eu (accessed on 22 March 2021). 2018;
46. R. Wei, T. Tiso, J. Bertling, K. O'Connor, L. M. Blank, and U. T. Bornscheuer. Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling. *Nature Catalysis*. Vol. 3, pp. 867–71, 2020.
 47. European Commission. Circular economy action plan Directorate-General for Environment, 2020.
 48. W. A. Algozeeb, P. E. Savas, D. X. Luong, W. Chen, C. Kittrell, M. Bhat, R. Shahsavari, and J. M. Tour. Flash graphene from plastic waste. *ACS nano*. Vol. 14, pp. 15595–604, 2020.
 49. W. Zhang, X. Li, T. Zhang, J. Li, S. Lai, H. Chen, P. Gao, and G. Xue. High-rate lactic acid production from food waste and waste activated sludge via interactive control of pH adjustment and fermentation temperature. *Chemical Engineering Journal*. Vol. 328, pp. 197–206, 2017.
 50. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate change 2021: the physical science basis. IPCC, 2021.
 51. M. D. Meng and R. B. Leary. It might be ethical, but I won't buy it: Perceived contamination of, and disgust towards, clothing made from recycled plastic bottles. *Psychology & Marketing*. Vol. 38, pp. 298–312, 2021.
 52. B. Grignard, S. Gennen, C. Jérôme, A. W. Kleij, and C. Detrembleur. Advances in the use of CO₂ as a renewable feedstock for the synthesis of polymers. *Chemical Society Reviews*. Vol. 48, pp. 4466–514, 2019.