

ORIGINAL ARTICLE

자철석 가루 투입을 통한 푸르푸랄의 혐기성 소화 개선 효과 조사

강선민 · 이준엽*

국립부경대학교 지구환경시스템과학부(환경공학전공)

Enhancing Anaerobic Digestion of Furfural Wastewater through Magnetite Powder Supplementation

Seonmin Kang, Joonyeob Lee*

Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan 48513, Korea

Abstract

The effect of magnetite particles on the anaerobic digestion (AD) of furfural wastewater was investigated using sequential anaerobic batch tests. The batch tests with four 500 mL anaerobic bioreactors were performed under two conditions: FC treatment for AD of furfural without magnetite particles, and FM treatment for AD of furfural with magnetite particles. The FC bioreactors showed a decreasing methane production rate (MPR) across the sequential batches, with a final batch MPR of 11.3 ± 0.4 mL CH₄/L/d, indicating the need for a methanogenesis enhancer to achieve high-rate AD of furfural. Conversely, FM bioreactors exhibited significantly higher MPR, exceeding FC values by 4-196%, with a final batch MPR of 33.5 ± 0.1 mL CH₄/L/d, which was about three times higher than FC. Additionally, FM bioreactors had faster degradation rates of furfural, valeric acid, and acetic acid compared to FC, with values exceeding those in FC by 3.0, 1.14, and 2.8 times, respectively. These results demonstrate that magnetite particles can enhance the AD of furfural not only by accelerating methanogenesis but also by accelerating the anaerobic degradation of furfural and its intermediates, such as volatile fatty acids. This study provides valuable insights for developing high-rate AD systems for furfural wastewater treatment.

Key words : Anaerobic digestion, Furfural wastewater, Magnetite powder, Methane production rate, Furfural degradation rate

1. 서론

도시화, 산업화, 인구 증가의 영향으로 매년 폐기물과 폐수의 발생은 증가하고 있는 추세이다. 전 세계적으로 매년 380조 L에 달하는 폐수가 발생하고 있으며, 해당 폐수에 포함된 에너지는 1억 5800만 가구에 전기를 공급하기에 충분한 양이다(Qadir et al., 2020). 하지

만 현재로서는 이러한 폐수가 잠재하고 있는 에너지를 완전히 활용하지 못하고 있는 실정으로, 지속 가능한 발전과 탄소중립에 대응하기 위해 폐수 및 폐기물의 자원화 및 에너지화 기술 개발에 대한 필요성이 증대되고 있다. 혐기성 소화는 혐기성 조건에서 혐기성 미생물의 생화학적 반응에 기반한 생물학적 처리 기술로 유기성 폐기물을 처리함과 동시에 신재생 에너지원인 바이오

Received 2 January, 2024; Revised 30 January, 2024;

Accepted 7 February, 2024

*Corresponding author : Joonyeob Lee, Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University, Busan 48513, Korea
Phone : +82-51-629-6525
E-mail : Leejy@pknu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

가스를 생산할 수 있다(Sun et al., 2021). 폐수에 존재하는 다양한 유기 화합물은 혐기성 소화를 통해 메탄을 다량 함유한 바이오가스로 전환될 수 있으며, 이러한 바이오가스는 폐수 처리 시설에서의 에너지원으로 사용됨과 동시에 전기를 생산하기 위한 에너지원으로 활용될 수 있다.

푸르푸랄($C_5H_4O_2$)은 알데하이드에 퓨란이 결합된 형태의 화학물질로 80가지 이상의 다양한 고부가가치 화학물질의 생산을 위한 전구체로 활용되며, 제지 생산 공정 및 석탄 가스화 공정 등 다양한 산업체 공정에서 추출용매로 사용되고 있는 화학물질로 전 세계적으로 연간 70만 톤에 달하는 푸르푸랄이 제조되고 있으며, 생산되는 푸르푸랄 1톤 당 약 30톤에 달하는 푸르푸랄 폐수가 발생하고 있는 실정이다(Mao et al., 2013; Qiu et al., 2023). 특히 푸르푸랄은 생태독성을 가진 화학물질로 푸르푸랄 제조 공정에서 발생하는 폐수는 이런 푸르푸랄을 주요물질로 포함하며 총 유기물 농도가 10~20 g COD/L 수준인 고농도 유기성 폐수로 보고되고 있어, 이를 하천에 방류하기 전 적정 폐수처리 기술의 적용이 필수적이다(Wang et al., 2019; Xia et al., 2022; Tian et al., 2023). 푸르푸랄은 에너지잠재량이 높은 유기성 물질로 푸르푸랄 폐수의 처리에 혐기성 소화 기술을 적용할 경우 바이오가스 생산을 통한 에너지 회수의 장점이 있을 것으로 평가된다. 하지만, 푸르푸랄은 혐기성 미생물의 성장 및 활성에 저해 영향을 줄 수 있는 화학물질로 보고되고 있어 혐기성 소화를 통한 처리 시 공정 안정성을 확보할 수 있는 공정 운

영기술의 적용이 필수적이다. 혐기성 소화의 메탄생성 반응에 대한 푸르푸랄의 IC50(i.e., 50% 저해영향 시 농도)와 IC100(i.e., 100% 저해영향 시 농도)은 1.03 g/L과 약 2 g/L로 보고된 바 있다(Akobi et al., 2016; Ghasimi et al., 2016; Akobi et al., 2017; Xia et al., 2022). 따라서 푸르푸랄 폐수의 안정적인 처리 및 바이오가스화를 위해서는 푸르푸랄의 혐기성 분해 및 메탄생성반응을 촉진시켜줄 수 있는 개선제를 활용한 혐기성 소화 공정 기술에 대한 연구가 필요하다(Prabakar et al., 2018).

자철석(Fe_3O_4)은 철 산화물이며 전도성 물질로 미생물 간의 직접중간전자전달을 유도하는 매개체 역할을 하여 다양한 유기성 오염물질의 혐기성 소화 및 메탄생성반응을 촉진시키는 것으로 보고되고 있다(Lee et al., 2019). 혐기성 소화의 주요 중간생성물질인 프로피온산을 처리하는 혐기성 소화조에 20 mM의 자철석 가루를 투입하였을 때, 프로피온산 분해 및 메탄생산속도가 최대 33% 이상 개선되었다고 보고된 바 있으며, 산업 폐수에서 다량 발견되는 독성 물질 중 하나인 페놀을 처리하는 혐기성 소화 반응조에서도 자철석 가루를 투입하였을 때 대조군 대비 메탄생산속도가 68% 이상 개선되었다고 보고된 바 있다(Cruz Viggli et al., 2014; Jung et al., 2022). 자철석 가루는 푸르푸랄의 혐기성 소화 반응의 메탄생성반응을 개선시켜 줄 수 있는 잠재성이 있을 것으로 기대되나, 관련 연구는 제한적으로 보고되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 연속 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 통해 푸르푸랄의 혐기성

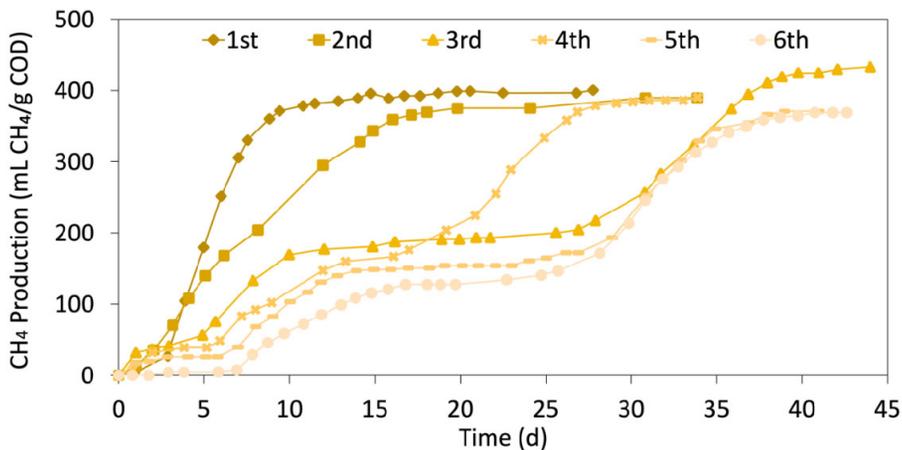


Fig. 1. Methane production of FC anaerobic bioreactors through the sequential anaerobic batch tests.

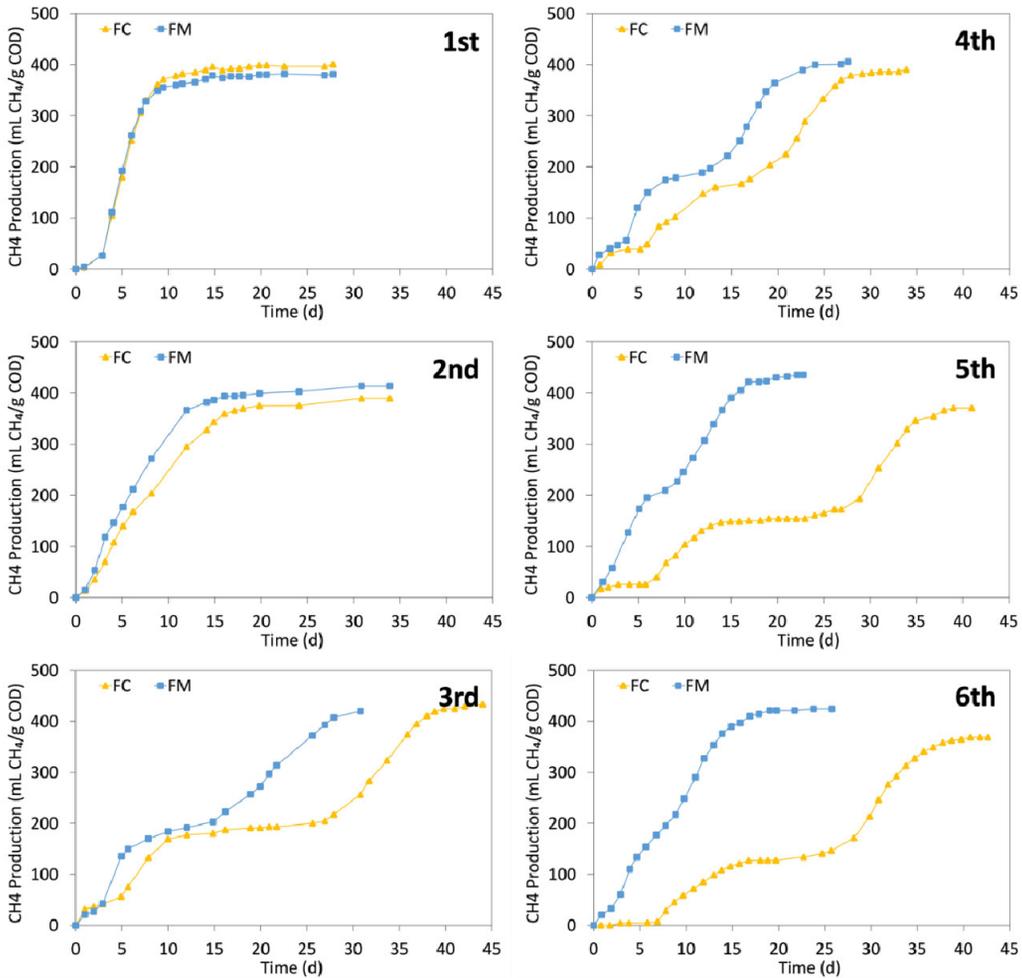


Fig. 2. Comparison of methane production of FC and FM anaerobic bioreactors through the sequential anaerobic batch tests.

소화 가능성을 조사하고, 자철석 가루 투입을 통한 혐기성 소화 반응에 대한 개선 영향을 실험적으로 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 푸르푸랄 폐수 처리 연속 회분식 혐기성 소화실험을 통해 혐기성 소화에 대한 푸르푸랄의 저해 영향을 평가하고, 자철석 가루의 투입에 따른 푸르푸랄의 혐기성 소화 반응에 대한 개선 효과를 실험적으로 검증하고자 하였다. 자철석 가루 투입 유무 조건으로 대조

군 반응기 실험과 실험군 반응기 실험을 나누었으며, 각 조건에서는 2기의 동일한 반응기로 2반복 실험을 수행하였다. 총 4기의 푸르푸랄 혐기성 소화 반응기로 총 270일간 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 자철석 가루를 투입하지 않은 혐기성 소화 반응기를 FC, 자철석 가루를 투입한 혐기성 소화 반응기를 FM으로 명명하였다. 자철석 가루 투입 농도는 최적 투입량으로 보고되고 있는 20 mM로 설정하였다(Kato et al., 2012). 모든 반응기는 유효 체적 400 mL로 500 mL 유리병을 이용하여 수행되었다. 반응기에는 푸르푸랄을 단독 기질로 하여 반응기 내 최종 푸르푸랄 농도가 1.0 g COD/L이

되도록 푸르푸랄 합성 폐수를 준비하여 적정량 투입하였으며 해당 폐수에는 혐기성 미생물의 생장에 필요한 필수 영양소와 미량 원소를 포함한 용액과 혐기성 조건 조성을 위한 환원제를 포함하였다(Angelidaki et al., 2009). 접종원의 초기 투입 농도는 3 g VSS/L로 설정하여 투입하였으며, 하수슬러지를 처리하는 실규모 중은 혐기성 소화조의 소화슬러지를 채취하여 접종원으로 사용하였다. 모든 반응기의 pH 조건은 3N NaOH와 3N HCl을 사용하여 pH 7.5로 조정해주었다. 폐수와 접종원을 투입한 반응기는 부틸 고무마개와 알루미늄 캡을 이용하여 밀봉한 후, 내부 공기를 질소-이산화탄소 혼합가스(N₂:CO₂, 80:20)를 통해 치환하여 혐기성 조건을 조성해주었다. 모든 반응기는 진탕배양기에서 37°C, 120 rpm 혼합 조건에서 배양되었다.

회분식 혐기성 소화 반응이 끝나면 반응기 내의 내용물을 잘 섞은 후 혼합액의 50%를 다른 연속회분식 실험의 접종원으로 활용하였고, 반응기 내 최종 푸르푸랄 농도가 1.0 g COD/L이 되도록 푸르푸랄 합성 폐수를 투입해주었다. 동일한 방식의 회분식 실험을 6회 연속적으로 반복하여 수행하였다. 바이오가스 발생량은 주기적으로 10 mL 유리주사기로 측정하였으며, 바이오가스의 메탄함량은 기체 크로마토그래피(Agilent 8860, Agilent)와 열전도도 검출기를 이용하여 분석하였다. 반응기 액체시료의 푸르푸랄과 휘발성유기산(VFAs) 농도는 기체 크로마토그래피(Agilent 8860, Agilent)와 불꽃이온화 검출기를 이용하여 분석하였다. 시료의 pH 및 VSS는 표준시험방법을 참조하여 분석하였다(APHA-AWWA-WEF, 2005).

각 회분식 혐기성 소화 반응기의 최대메탄생성속도는 modified Gompertz model을 사용하여 판별하였다(Zwietering et al., 1990).

$$M_{CH_4}(t) = P \times \exp\left(-\exp\left(\frac{MPR \times e}{P} \times (\lambda - t) + 1\right)\right) \quad (1)$$

여기서, M 은 시간에 따른 누적 메탄생성량(mL CH₄/g COD), P 는 최대메탄수율(mL CH₄/g COD), MPR 은 최대메탄생성속도(mL CH₄/L/d), λ 는 메탄생성 지연시간(d), t 는 회분식 혐기성 소화 반응 시간(d)을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 푸르푸랄 폐수 처리 연속 회분식 혐기성 소화 실험

본 연구에서는 연속 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 통해 푸르푸랄 폐수의 혐기성 소화 가능성을 메탄수율, 최대메탄생성속도 및 메탄생성 지연 시간 관점에서 실험적으로 평가하였다. 자철성 가루가 투입되지 않은 반응기를 FC로 하여 해당 혐기성 소화 반응 인자들을 평가하였다. FC 반응기의 경우, 6차례의 회분식 반응 차수에 걸쳐 평균적으로 392.2 ± 23.6 mL CH₄/g COD의 메탄수율이 관측되었다(Fig. 1). 이 결과는 37°C에서 이론적 메탄수율값인 398 mL CH₄/g COD의 98.5%에 미치는 수준으로 이는 연속 회분식 혐기성 소화 반응을 통해 대상 푸르푸랄의 대부분이 메탄으로 전환되었음을 의미한다. 이를 통해 연속 회분식 혐기성 소화 공정을 통해 푸르푸랄 폐수의 처리가 가능하며, 또한 높은 수율로 바이오가스 생산이 가능함을 실험적으로 확인하였다.

FC 반응기의 최대메탄생성속도는 푸르푸랄 폐수 처리 연속 회분식 혐기성 반응 실험의 회분식 반응 차수가 증가할수록 감소하는 경향이 관측되었다(Fig. 1). 최대 메탄생성속도는 연속 회분식 반응이 3차 회분식 반응까지 진행됨에 따라 79.0 ± 4.0 mL CH₄/L/d에서 9.9 ± 0.5 mL CH₄/L/d 수준으로 약 87% 가량 감소하였으며, 6차 회분식 반응에서는 1차 회분식 반응 대비 86% 가량 감소한 결과인 11.3 ± 0.4 mL CH₄/L/d 수준으로 수렴하는 결과가 확인되었다. 이 결과는 대표적인 산업폐수 오염물질인 폐놀의 연속 회분식 혐기성 소화 시 최대메탄생성속도인 45.9 mL CH₄/L/d 보다 75% 낮은 수준으로 고율 혐기성 소화를 통한 푸르푸랄 처리 및 바이오가스 생산을 위해서는 메탄생성반응의 개선이 필수적일 것으로 평가된다(Jung et al., 2022). 또한 메탄생성 지연시간이 연속 회분식 반응이 6차 회분식 반응까지 진행됨에 따라 2.7일에서 8.1일로 3배 길어진 결과는 푸르푸랄 폐수 처리 연속 회분식 혐기성 소화 반응기 내 메탄생성균의 생장이 저해영향을 받고 있음을 의미하므로(Fig. 1), 푸르푸랄 폐수를 처리하는 혐기성 소화 공정에서는 소화조 내의 미생물을 최대한 길게 체류시킬 수 있는 적절한 공정 기술과 메탄생성균의 생장을 촉진시킬 수 있는 개선제의 적용이 필요할 것으로 평가된다.

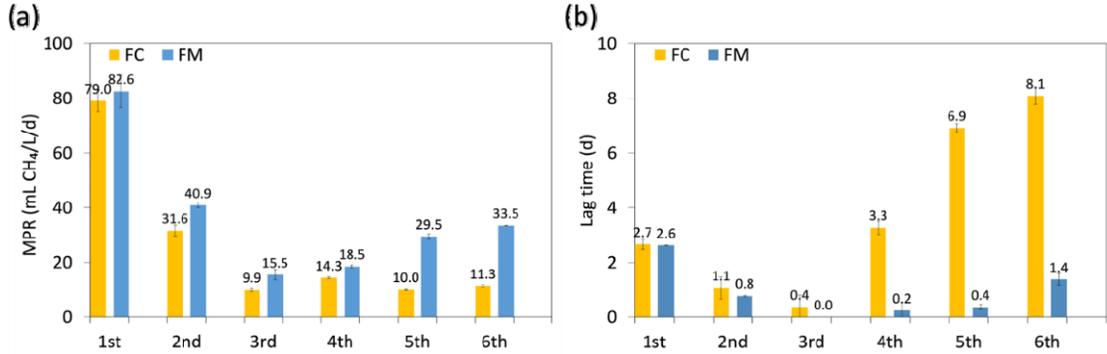


Fig. 3. Methane production rate MPR and lag time of FC and FM anaerobic bioreactors.

3.2. 자철석 가루 투입에 따른 푸르푸랄 폐수 처리 연속 회분식 혐기성 소화 개선 영향 조사

본 연구에서는 연속 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 통해 자철석 가루 투입을 통한 푸르푸랄 폐수 처리 혐기성 소화 반응 개선 영향을 실험적으로 평가하였다. 자철석 가루가 투입되지 않은 대조군 반응기를 FC로, 20 mM의 자철석 가루가 투입된 실험군 반응기를 FM으로 명명하고, 각각의 혐기성 소화 반응 인자들을 비교하였다(Fig. 2).

FM 반응기의 최대메탄생성속도는 연속 회분식 반응이 3차 회분식 반응까지 진행됨에 따라 82.6 ± 6.1 mL CH₄/L/d에서 15.5 ± 1.9 mL CH₄/L/d 수준으로 약 82% 가량 감소하였으나, 4차 회분식 반응부터 증가하기 시작하며 6차 회분식 반응까지 점진적으로 증가하였다. 그 결과, 6차 회분식 반응에서는 3차 반응 대비 2.2배 가량 증가한 수준인 33.5 ± 0.01 mL CH₄/L/d의 결과가 확인되었다(Fig. 3). 이 결과를 FC 실험 결과와 비교 시, 전 차수의 회분식 반응에서 4~196% 가량의 메탄생성속도 개선 효과가 확인되었다. 1차 회분식 반응부터 3차 회분식 반응까지는 FC 반응기와 FM 반응기 모두 최대메탄생성속도가 지속적으로 감소하였으며, 이 결과는 푸르푸랄을 혐기성 소화하는 미생물의 성장 및 순응에는 적정 수준의 시간이 필요함을 의미한다. 3차 회분식 반응부터 6차 회분식 반응까지 최대메탄생성속도가 감소한 채로 수렴한 FC 반응기와는 달리, 자철석 가루를 투입한 FM 반응기에서는 4차 회분식 반응부터 6차 회분식 반응까지 최대메탄생성속도가 지속적으로 증가하는 경향이 관측되었으며, 이는 푸르푸랄을 혐기성 소화하는 미생물 군집이 FM 반응기 내에 성공

적으로 성장 및 순응하였을 뿐만 아니라 자철석 가루가 해당 미생물 군집의 푸르푸랄 혐기성 소화 반응(다시 말해, 메탄생성반응)을 촉진시켰음을 의미한다. 특히, 6차 회분식 반응의 경우, FM 반응기가 FC 반응기 대비 약 3배 가량 빠른 최대메탄생성속도를 나타냈다. FM 반응기의 메탄생성 지연시간은 0 ~ 2.6일로, 메탄생성 지연시간 또한 FC 실험 결과 대비 전 차수의 회분식 반응에서 4~100% 가량 짧아지는 개선 효과가 확인되었다. 4차 회분식 반응부터 6차 회분식 반응까지 메탄생성 지연시간이 3.3~8.1일로 증가한 FC 반응기와는 대조적으로 FM 반응기에서는 메탄생성 지연시간이 0.2~1.4일로 낮게 유지된 결과는 자철석 가루 투입을 통해 푸르푸랄 폐수 처리 연속 회분식 혐기성 소화 반응기 내 메탄생성균의 성장 저해영향이 완화되었음을 의미한다. 본 연구를 통해 자철석 가루가 푸르푸랄 처리 혐기성 소화 반응의 개선제로서의 활용 가능성을 실험적으로 확인하였다.

자철석 가루 투입에 따른 푸르푸랄의 혐기성 분해 및 중간 생성물인 휘발성 유기산의 축적 및 분해에 대한 영향을 평가하기 위해 본 연속 회분식 실험에서 자철석 가루 투입에 따른 푸르푸랄 혐기성 소화 반응의 개선 효과가 가장 명확하게 판별된 FC 반응기와 FM 반응기의 6차 수 실험을 대상으로 가스 크로마토그래피를 활용하여 푸르푸랄 및 휘발성 유기산의 분석을 수행하였다(Fig. 4). 푸르푸랄의 경우 자철석 가루를 투입하지 않은 FC 반응기에서는 84.3 mg COD/L의 분해속도로 완전히 분해되는데까지 약 12일 가량 소요되었으며, 자철석을 투입한 FM 반응기에서는 255.5 mg COD/L 분해속도로 완전히 분해되는데까지 약 4일 가량 소요되었

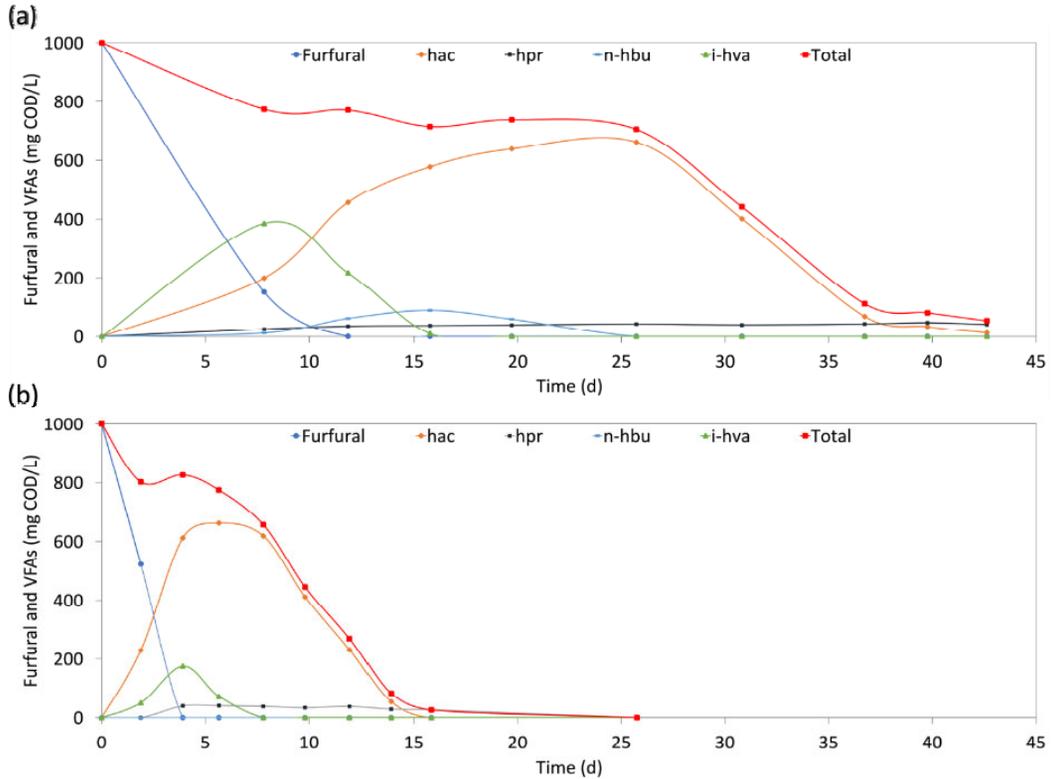


Fig. 4. Furfural and volatile fatty acids (VFAs) concentration in (a) FC and (b) FM anaerobic bioreactors in the 6th sequential batch tests. hac: acetic acid, hpr: propionic acid, n-hbu: N-butyric acid, i-hva: i-valeric acid.

다(Table 1). 이를 통해, 자철석 가루 투입이 푸르푸랄의 혐기성 분해 반응 속도를 약 3배 가량 개선 시킨 것을 확인할 수 있었다.

FC 반응기에서는 푸르푸랄의 혐기성 소화의 중간 생성물로 발레르산, 부티르산, 프로피온산 및 아세트산이 각각 최대 385 mg COD/L, 90 mg COD/L, 47 mg COD/L, 662 mg COD/L의 농도로 축적되는 것을 확인하였다. 특히 발레르산, 부티르산 및 프로피온산은 혐기성 분해가 열역학적으로 용이하지 않은 유기산(깁스 자유에너지가 양의 값으로, 각각 47.46 kJ/mol, 49.65 kJ/mol, 78.62 kJ/mol)으로 소화조에 쉽게 축적되며, 소화조의 산성화 및 메탄 생산량 감소를 유발하는 것으로 알려져 있어, 푸르푸랄 폐수의 혐기성 소화 시 해당 물질들의 축적을 최소화하고, 분해 속도를 개선시키는 전략이 필요할 것으로 사료된다(Stams and Plugge, 2009; Li et al., 2020). 본 연구에서 자철석 가루를 투입한 FM 반응기에서는 아세트산은 동일한

수준인 662 mg COD/L의 농도로 축적되는 것을 확인 하였으나, 열역학적으로 분해가 용이하지 않은 발레르산과 프로피온산의 경우 각각 최대 178 mg COD/L과 40 mg COD/L의 농도로 FC 반응기 대비 각각 54%, 15% 낮은 농도로 축적되며, 부티르산은 축적되지 않은 것으로 확인되었다. 또한 축적된 발레르산, 프로피온산 및 아세트산은 FM 반응기에서 FC 반응기 대비 각각 1.14배, 3.2배, 2.8배 가량 빠른 속도로 분해된 것으로 관측되었다. 기존 문헌에 따르면, 자철석 가루의 투입은 혐기성 미생물 간 직접종간전자전달(DIET) 반응을 유도하여 발레르산, 부티르산 및 프로피온산의 혐기성 분해 시 열역학적 제한 사항을 제거하여 해당 휘발성 유기산들의 분해를 획기적으로 개선시키는 것으로 보고되고 있음을 고려해 볼 때, 본 연구의 푸르푸랄 혐기성 소화 반응의 개선 영향도 자철석 가루 투입에 따른 미생물 간 DIET 반응의 활성화에서 기인한 것으로 추정된다(Xu et al., 2019). 본 연구의 결과를 통해, 자철석

Table 1. Furfural and volatile fatty acids (VFAs) degradation rate in the 6th sequential batch tests. ND: not determined.

Degradation rate (mg COD/L/d)	FC 6th batch	FM 6th batch
Furfural	84.3	255.5
Acetic acid	15.2	41.8
Propionic acid	0.5	1.6
Butyric acid	3.5	ND
Valeric acid	19.6	22.4
Total organics	22.2	38.8

가루 투입이 푸르푸랄과 푸르푸랄의 혐기성 분해 중간 산물인 휘발성 유기산의 축적을 저감하고, 분해속도를 개선시키며, 최종적으로는 혐기성 소화 반응의 메탄생성속도를 촉진시키는 개선제로서의 역할을 수행 가능함을 실험적으로 확인하였다. 추후 후속연구를 통해 자철석 가루를 활용한 고율 푸르푸랄 폐수 처리 혐기성 소화 공정 개발이 필요할 것으로 평가되며, 본 연구의 결과는 해당 연구의 기초자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 연속 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 통해 푸르푸랄 폐수의 혐기성 소화 가능성과 자철석 가루 투입을 통한 혐기성 소화 반응 개선 영향을 실험적으로 평가하였다.

- (1) 자철석 가루를 투입하지 않은 푸르푸랄 폐수 혐기성 소화 실험 조건인 PC 반응기의 연속 회분식 실험 결과, 평균적으로 이론값의 98.5%에 달하는 높은 메탄 수율($392.2 \pm 23.6 \text{ mL CH}_4/\text{g COD}$)이 관측되었으나, 메탄생산속도는 회분식 반응 차수가 진행됨에 따라 감소하여 $11.3 \pm 0.4 \text{ mL CH}_4/\text{L/d}$ 수준으로 수렴하는 결과가 확인되었다. 이를 통해, 연속 회분식 혐기성 소화 공정을 통해 푸르푸랄 폐수의 처리가 가능하며, 또한 높은 수율로 바이오가스 생산이 가능함을 확인하였으나, 고율 혐기성 소화를 위해서는 관련 혐기성 미생물을 길게 체류시킬 수 있는 적절한 공정 기술과 메탄생성균의 생장을 촉진시킬 수 있는 개선제의 적용이 필요할 것으로 평가된다.
- (2) 자철석 가루를 투입한 PM 반응기의 연속 회분식 실험 결과, 메탄생산속도는 PC 반응기 대비 3배 가량

빠른 $33.5 \pm 0.1 \text{ mL CH}_4/\text{L/d}$ 으로 수렴하였으며, 푸르푸랄, 발레르산, 아세트산 분해속도는 PC 반응기 대비 3배, 1.14배, 그리고 2.8배 가량 빠른 수치가 확인되었다. 이를 통해 자철석 가루 투입이 푸르푸랄과 푸르푸랄의 혐기성 분해 중간 산물인 휘발성 유기산의 축적을 저감하고, 분해속도를 개선시키며, 최종적으로는 혐기성 소화 반응의 메탄생산속도를 촉진시키는 개선제로서의 역할을 수행 가능함을 실험적으로 확인하였다.

본 연구의 결과는 자철석 가루를 활용한 고율 푸르푸랄 폐수 처리 혐기성 소화 공정 개발연구의 기초자료로 활용 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 폐자원에너지화 전문인력양성 사업으로 지원되었습니다(YL-WE-21-002). 또한, 이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 램프(LAMP) 사업 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. RS-2023-000301702).

REFERENCES

Akobi, C., Hafez, H., Nakhla, G., 2016, The impact of furfural concentrations and substrate-to-biomass ratios on biological hydrogen production from synthetic lignocellulosic hydrolysate using mesophilic anaerobic digester sludge, *Bioresource Technology*, 221, 598-606.

Akobi, C., Hafez, H., Nakhla, G., 2017, Impact of furfural on biological hydrogen production kinetics from synthetic lignocellulosic hydrolysate using mesophilic and thermophilic mixed cultures, *Int. J. Hydrog.*

- Energy, 42(17), 12159-12172.
- Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., Van Lier, J. B., 2009, Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays, *Water Sci. Technol.*, 59(5), 927-934.
- APHA-AWWA-WEF, 2005, Standard methods for the Examination of Water and Wastewater, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 21st Ed., American Public Health Association: Washington, DC, USA.
- Cruz Viggí, C., Rossetti, S., Fazi, S., Paiano, P., Majone, M., Aulenta, F., 2014, Magnetite particles triggering a faster and more robust syntrophic pathway of methanogenic propionate degradation, *Environ. Sci. Technol.*, 48(13), 7536-7543.
- Ghasimi, D. S. M., Aboudi, K., de Kreuk, M., Zandvoort, M. H., van Lier, J. B., 2016, Impact of lignocellulosic-waste intermediates on hydrolysis and methanogenesis under thermophilic and mesophilic conditions, *Chemical Engineering Journal*, 295, 181-191.
- Jung, S., Kim, M., Lee, J., Shin, J., Shin, S. G., Lee, J., 2022, Effect of magnetite supplementation on mesophilic anaerobic digestion of phenol and benzoate: Methane production rate and microbial communities, *Bioresource Technology*, 350.
- Kato, S., Hashimoto, K., Watanabe, K., 2012, Methanogenesis facilitated by electric syntrophy via (semi)conductive iron-oxide minerals, *Environ. Microbiol.*, 14(7), 1646-1654.
- Lee, J., Koo, T., Yulisa, A., Hwang, S., 2019, Magnetite as an enhancer in methanogenic degradation of volatile fatty acids under ammonia-stressed condition, *J. Environ. Manag.*, 241, 418-426.
- Li, Q., Liu, Y., Yang, X., Zhang, J., Lu, B., Chen, R., 2020, Kinetic and thermodynamic effects of temperature on methanogenic degradation of acetate, propionate, butyrate and valerate, *Chemical Engineering Journal*, 396, 125366.
- Mao, L., Zhang, L., Gao, N., Li, A., 2013, Seawater-based furfural production via corncob hydrolysis catalyzed by FeCl₃ in acetic acid steam, *Green Chemistry*, 15(3), 727-737.
- Prabakar, D., Suvetha K. S., Manimudi, V. T., Mathimani, T., Kumar, G., Rene, E. R., Pugazhendhi, A., 2018, Pretreatment technologies for industrial effluents: Critical review on bioenergy production and environmental concerns, *J. Environ. Manag.*, 218, 165-180.
- Qadir, M., Drechsel, P., Jiménez Cisneros, B., Kim, Y., Pramanik, A., Mehta, P., Olaniran, O., 2020, Global and regional potential of wastewater as a water, nutrient and energy source, *Nat. Resour. Forum*, 44(1), 40-51.
- Qiu, B., Shi, J., Hu, W., Gao, J., Li, S., Chu, H., 2023, Construction of hydrothermal liquefaction system for efficient production of biomass-derived furfural: Solvents, catalysts and mechanisms, *Fuel*, 354, 129278.
- Stams, A. J., Plugge, C. M., 2009, Electron transfer in syntrophic communities of anaerobic bacteria and archaea, *Nat. Rev. Microbiol.*, 7(8), 568-577.
- Sun, H., Wang, E., Li, X., Cui, X., Guo, J., Dong, R., 2021, Potential biomethane production from crop residues in China: Contributions to carbon neutrality, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 148.
- Tian, H., Quan, Y., Yin, Z., Yin, C., Fu, Y., 2023, Bioelectrochemical Purification of Biomass Polymer Derived Furfural Wastewater and Its Electric Energy Recovery, *Polymers*, 15(16).
- Wang, Z., Liu, Z., Noor, R. S., Cheng, Q., Chu, X., Qu, B., Zhen, F., Sun, Y., 2019, Furfural wastewater pretreatment of corn stalk for whole slurry anaerobic co-digestion to improve methane production, *Sci. Total Environ.*, 674, 49-57.
- Xia, A., Feng, D., Huang, Y., Zhu, X., Wang, Z., Zhu, X., Liao, Q., 2022, Activated Carbon Facilitates Anaerobic Digestion of Furfural Wastewater: Effect of Direct Interspecies Electron Transfer, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, 10(25), 8206-8215.
- Xu, H., Chang, J., Wang, H., Liu, Y., Zhang, X., Liang, P., Huang, X., 2019, Enhancing direct interspecies electron transfer in syntrophic-methanogenic associations with (semi) conductive iron oxides: Effects and mechanisms, *Sci. Total Environ.*, 695, 133876.
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., Van't Riet, K., 1990, Modeling of the bacterial growth curve, *Appl. Environ. Microbiol.*, 56(6), 1875-1881.

-
- Graduate student. Seon-Min Kang
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University
kangseonmin@naver.com
 - Professor. Joon-Yeob Lee
Division of Earth Environmental System Science (Major of Environmental Engineering), Pukyong National University
Leejy@pknu.ac.kr