



Research Paper

A Case Study on Small- and Centralized Biogas Plants and Energy Production Capacities in South Gyeongsang Province

Jin Mi Triolo¹ · Sung Gu Shin^{1,2*}

¹Future Convergence Technology Research Institute, Gyeongsang National University, Republic of Korea

²Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University, Republic of Korea

(Received November 7, 2023; Revised December 15, 2023; Accepted December 16, 2023)

Objectives: The primary goals of this research were to assess the viability and practicality of small-scale village facilities as well as central commercial biogas plants. Additionally, the study aimed to create predictive models by exploring various codigestion scenarios.

Methods: The study conducted a comprehensive analysis of available biomass and its maximum energy potential through anaerobic digestion in every city, county, and village within South Gyeongsang province. Five distinct codigestion scenarios were explored, encompassing assessments of processing capacity, energy production potential, and the necessary digester capacity for anaerobic digestion. At the village level, the scenarios comprised: C1, which involved sole digestion of manure; C2, codigestion of manure and food waste in a 7:3 ratio; C3, codigestion of pig slurry and slaughterhouse waste in a 9:1 ratio; C4, multiple codigestion with PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8; and finally, C5, involving the addition of sewage and sewage sludge to the codigestion process of C4's biomass.

Results and Discussion: The biomass generated in South Gyeongsang province was 9430 tons/day, with a methane production potential of 167 million cubic meters/year. This biomass had an energy production potential of 156,000 TOE/year and a potential electricity generation of 732.7 GW/year, based on the annual petroleum conversion ton. Codigestion (C5) enabled up to 720% more electricity generation compared to sole digestion of manure (C1). Mixing pig slurry and food waste in a 7:3 ratio resulted in approximately 18% more electricity production compared to the case where manure was mixed with slaughterhouse by-products in a 9:1 ratio.

Conclusion: Biomass imbalance was significant in most regions, particularly due to high variations in food waste generation between regions. Obtaining alternative resources and integrating various biomass for anaerobic digestion, especially in rural areas, is crucial for achieving stable anaerobic digestion and high methane production. Regions with high biomass density are predicted to support large-scale biogas facilities following European standards, while 25 villages showed the potential for small-scale biogas facilities.

Keywords: Codigestion, Biomass mapping, Energy potential, Prediction model, Methane production

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† **Corresponding author**

E-mail: sgshin@gnu.ac.kr

Tel: 055-772-3887 Fax: 055-772-3889

© 2023, Korean Society of Environmental Engineers



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

연구논문

소규모 및 중앙집중식 바이오가스 시설의 타당성 및 에너지 생산량에 관한 경상남도의 사례

박진미¹ · 신승구^{1,2*}

¹경상국립대학교 미래융복합기술연구소

²경상국립대학교 에너지공학과

목적: 지역내 바이오매스 발생량을 토대로 다중원료 병합 소화(multi-feedstock digestion)의 혼합조건에서 처리요구량과 에너지 생산 잠재량 및 바이오가스 시설의 처리 규모를 예측하고, 구축된 예측 모델을 통하여 소규모 중앙집중식 바이오가스 시설의 잠재성과 타당성을 규명하는 데 본 연구의 목적이 있다.

방법: 경상남도 전체와 각 시·군과 동·리 별로 주요 가용 바이오매스의 발생량 및 해당 바이오매스를 혐기성 소화시에 생산할 수 있는 최대 에너지 생산량을 각 해당 지역의 바이오매스 발생량을 기준으로 mapping 하였으며, 병합 소화(codigestion)의 각 시나리오(C1-C5)에 따른 처리량, 에너지 생산 잠재량 및 혐기성 소화에 필요한 처리 규모를 조사하였다. 사용된 바이오매스로는 돈분(PS), 음식물폐기물(FW), 도축부산물(SW), 슬러지(SL)가 포함되었으며, 가장 작은 행정단위인 동·리의 경우별 산정에서는 C1의 경우 PS 단독소화, C2의 경우 PS:FW 7:3 병합 소화, C3의 경우 PS:SW 9:1 병합 소화, C4의 경우 다중 병합 소화로서 PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8, 마지막으로 C5의 경우 C4+SL의 다중(4종) 병합 소화를 적용하였다.

결과 및 토의: 경상남도에서 총 발생하는 해당 바이오매스의 발생량은 9,430 ton/d, 연간 167백만 CH₄ m³/y에 해당하는 메탄 생산 잠재량을 가지는 것으로 나타났으며, 연간 석유환산톤 기준 156,000 TOE/y의 에너지생산 잠재량이 있는 것으로 나타나, 732.7 GW의 전력 생산이 가능한 것으로 나타났다. PS의 단독 혐기성 소화(C1) 대비 병합 소화를 실행했을 때 최대 720%(C5)까지 전력생산이 증가될 수 있는 것으로 나타났으며, PS와 음식물폐기물을 7:3으로 혼합한 C2의 경우, PS와 SW을 9:1의 비율로 혼합한 C3에 비해 약 18% 더 많은 전력 생산 효과를 가져오는 것으로 나타났다.

결론: 대부분 지역에서 바이오매스의 치우침 현상이 매우 큰 것으로 드러났으며, 농·산촌 지역에서의 대체 자원의 확보 및 여러 바이오매스를 통합 소화하여 혐기성 소화의 안정성과 높은 CH₄ 생산량을 달성하는 것이 주요한 인자로 분석되었다. 바이오매스의 밀집도가 높은 지역의 경우 유럽 표준의 대규모 바이오가스 시설이 가능할 것으로 예측되며, 25개 동·리 지역의 경우 중소규모 바이오가스 시설이 가능한 것으로 나타났다.

주제어: 병합 소화, 바이오매스 맵핑, 에너지 잠재량, 예측 모델, 메탄 생산량

1. 서론

혐기성 소화를 통한 바이오가스 생산기술은 가축 분뇨 내에 존재하는 유기물이 혐기성 조건에서 분해하는 과정에서 생성되는 온실가스의 주요 물질인 CH₄을 기술적 혐기성 소화 조건을 가하여 에너지를 생산하고 바이오 연료 및 더 나아가 바이오 플라스틱과 항공유와 같은 바이오 기반 생산품 생산의 주요 플랫폼 물질을 공급하는 기술로서, 화석연료의 감소 및 지구온난화와 같은 당면한 문제에 대비하여 지속 가능한 성장과 미래 바이오 기반의 사회로의 전환에 있어서 각 국가적

전략의 핵심기술로 주목된다.¹⁾ 더욱이 오랜 바이오가스 생산의 경험과 기술이 축적된 지역의 국가들의 경우 단순히 혐기성 소화를 통해 전력과 폐열을 생산하는 방법에서 벗어나, 다양한 차세대 바이오매스를 사용한 다중원료 병합 소화(multi-feedstock digestion)를 통해 고수율의 바이오가스 생산한 후 pressure swing adsorption(PSA), amine-absorption, membrane, water scrubbing 등과 같은 방법을 사용하여 고질화(Biogas upgrading)하여 천연가스를 대체하기 시작하여, 재생활 수 있는 천연가스(Renewable nature gas, RNG)의 개념이 자리잡아 왔다. 더욱이, 최근 Power-to-Gas(PtG)의 일환으로

바이오가스 내에 존재하는 이산화탄소를(CO₂)를 풍력 및 수력으로부터 생산된 잉여의 전력을 이용하여 Electrolysis를 통해 생산된 수소(H₂)를 hydrogenotrophic methanogenesis와 같은 생물학적인 방법을 사용하여 생산된 CO₂와 H₂를 변환한, 바이오메탄(Biomethane)을 생산하여, Electro-fuel의 형태로 변환하는 기술이 최근 급격히 발전되어 RNG 시장의 성장을 가속하고 있다.²⁾

이에 반해 국내 실정의 경우, 재생에너지원을 사용한 이른바 Green hydrogen을 생산하는 정책과 더불어, 수소와 관련된 바이오가스의 고질화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 정작 바이오가스의 원료가 되는 바이오매스의 발생량에 관한 면밀한 조사의 부재로 인해 각 원료의 분포 및 가용량에 관한 거시적인 통찰이 이루어지지 않은 상태에 있어, multi-feedstock digestion의 도입에 걸림돌이 될 뿐만 아니라, 고에너지를 가져올 수 있는 유기성 폐자원, 특히 식품회사에서 발생하는 폐자원들이 폐기되거나 여전히 해양투기가 행해지고 있다. 한편, 축산분뇨 발생량의 꾸준한 증가로 인해 최근 몇 년간 돈분(Pig slurry, PS)의 단독소화(monodigestion) 혹은 PS와 음식물류폐기물(food waste, FW)을 혼합한 단순형태의 codigestion이 자리를 잡아가고 있다. 하지만, PS의 경우 높은 질소(N) 및 황(S) 농도로 인한 암모니아성 질소(ammoniacal N)의 독성 및 황화물(sulfide)의 직간접 영향으로 인한 혐기성 소화과정에서의 저해(inhibition) 현상은, 생산량의 악화와 낮은 소화효율뿐만 아니라 소화액(digestate)의 산성화(acidification)의 가속화로 인해 혐기성 소화 자체가 중지^{3),4)}가 될 수 있다. 따라서, multi-feedstock digestion를 통해, 탄소(C) 및 N 원소 균형, 저해 요인 물질의 희석효과, 분해 속도가 상이한 원료들의 적정 혼합을 통한 소화속도의 조절, 목적 유기물 부하율(organic loading rate, OLR)를 위한 적정 원료의 혼합비를 쉽게 하여, 이러한 문제점을 극복할 수 있다.^{5),6)} 이를 위하여, 주 기질로 이용되고 있는 축산분뇨의 발생량, 축산농가의 밀집도에 관한 데이터의 확보와 이송이 가능한 거리의 유기성 폐자원의 발생량 및 메탄 잠재량을 포함한 주요 기질적 특성에 대한 종합적이고 면밀한 조사가 필요하고, 에너지 및 관련 환경정책 및 관련 제도와 환경 에너지에 관한 국가의 장기적 정책과 전략의 로드맵 마련이 필요하다. 이를 위해서는 1) 가장 소단위의 행정구역에서부터 광역권에 이르기까지 바이오매스의 종류별 기질적 특성에 따른 체계적인 분류와 2) 각 구역에서 발생하는 각 해당 바이오매스의 배출량 및 분포도와 가용성과 3) 각 바이오매스의 총에너지지함량 및 혐기성 소화 시 CH₄의 최대 생산 잠재량에 대한 조사를 통해 소규모 지역적 잠재성 및 타당성에 관한 광역권에 이르기까지의 국가적인 체계적인 조사가 필요하다.⁷⁾ 따라서, 본 연구는 국가적 수준에 앞서 한 예로 경상남도 권역을 대상으로 가장 작은 단위에서부터 광역권 지역에서 발생하는 대표성을 띠는 바이오매스를 대상으로 배출량 및 분포도와 병합 소화의 각 시나리오에

따른 지역별 가용성을 조사하고, 도출한 결과를 사용하여 각 지역의 바이오매스 혐기성 소화 시 CH₄의 최대 생산 잠재량, 소규모에서 대규모 바이오가스 시설의 잠재적 수량 및 분포에 관한 통찰력을 제공하는 것에 목적을 두었다.

2. 분석 방법

2.1. 범위의 설정

조사 대상은 경상남도 전체 2) 시·군 단위 및 3) 동·리 단위로 나누어 분석을 진행하여, 예시 모델의 기본단위를 정하였으며, 조사 대상 바이오매스는 경우 현재 국내 바이오가스 시설의 원료로 사용되고 있는 PS, FW 및 슬러지(sludge, SL; 하수 및 분뇨)가 포함되었고, 현재 사용되고 있지 않지만, 에너지 함량이 높은 동물성 원료인 도축부산물(slaughterhouse waste, SW) 및 수산부산물(fish residue, FR)이 포함되었다. FR의 경우 해안에 근접한 지역이 아닌 내륙지방에서 이용이 어려운 점을 고려하여 도 단위 분석에서는 포함되었으나, 시·군 단위 및 동·리 단위의 mapping에서는 제외되었다. SL의 지자체 시설에서 자체 처리가 되어 국내 실정상 돈분과 병합 처리가 실시되지 않기 때문에 FR의 경우와 동일하게 경상남도 전체의 잠재량 분석에만 포함되었고 시·군 및 동·리 단위의 병합소화 사례별 분석에는 포함되지 않았다. 따라서, 각 시·군 및 동·리 규모의 잠재량은 PS, FW, SW의 세가지 바이오매스를 대상으로 하였다.

2.2. 데이터의 수집 및 시나리오 설정

가축 사육 두수 및 가축 분뇨 발생량의 경우 환경부 발간의 전국 가축 분뇨발생 및 처리현황⁸⁾에 따라 가축 종별 가축 분뇨, 농가수, 두수를 참조하여 PS의 발생량을 산정하였으며, FW 발생량의 경우 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 중 생활(가정)음폐 및 사업장비(非)배출 음폐 발생 및 처리 현황⁹⁾을 참조하였으며, SL의 발생량은 하수도 통계 중 하수 찌꺼기 및 분뇨찌꺼기 발생 및 처리 현황¹⁰⁾을 참조하였다. SW의 경우 환경부 국립환경과학원 도축, 육류 가공 및 저장처리업의 환경오염방지 및 통합관리를 위한 최적 가용기법 기준서를 나타난 도축사업장 폐기량¹¹⁾을 참조했다. PS의 경우 발생량, 가축 두수, 분뇨량 및 농가 수를 시·군 및 동·리까지 구분하여 mapping이 가능하였으나, FW 및 SL의 경우 시·군 단위까지 데이터의 획득이 가능하였으며, SW 및 FR의 경우 시·군 및 동·리와 같은 중소규모 단위의 데이터의 부재로 인해 경상남도의 전체 발생량을 사용하였다.

각 시·군 및 동·리 규모의 잠재량의 사례별 분석은 총 네가지로 나누어 PS, FW, SW의 세가지 바이오매스를 대상으로 설정하여 진행되었다. 시·군별 시나리오 분석은 각 시군에서 발생하는 모든 해당바이오매스를 바이오가스화하는 조건에서 혼합비율을 적용하였으며, 이와 달리 동·리의 경우 동리의

발생량에 대한 데이터의 부족으로 보편적으로 이용되는 병합 소화 비율을 적용하였다.

첫 번째 시나리오는 PS 단독소화 (PS 100% monodigestion)로 설정되었으며 각 동·리에서 발생하는 PS 전량을 바이오 가스화하는 경우를 분석하였다. 두 번째 시나리오는 PS와 FW의 병합 소화 사례로서 PS와 FW의 병합 소화 경우에는 시·군 단위의 분석에서는 각 시·군에서 발생하는 PS와 FW를 전량 바이오 가스화하는 조건으로 설정되었고 동·리 규모의 분석에서는 동·리 규모의 FW 발생량에 대한 통계가 없기 때문에 보편적으로 이용되는 병합 소화 비율인 PS 70%, SW 30%(PS:FW= 7:3, 2 biomasses codigestion)를 적용하였다. 세 번째 시나리오에서는 PS와 SW를 병합 소화하는 경우로서, 혼합비율은 경상남도의 전체 SW 발생량과 PS의 발생량의 비율이 PS 89.6%, SW 10.4%임을 고려하여 동일한 비율을 시·군 및 동·리 분석에 적용(PS:SW=9:1, 2 biomasses codigestion) 하였다. 마지막 시나리오는 경우 PS, FW, SW의 세가지 바이오매스를 병합소화하는 시나리오로서 시·군 분석의 경우에는 각 시·군에서 발생하는 PS와 FW를 전량 바이오 가스화하고, SW의 첨가 비율을 PS의 증량을 기준으로 경상남도의 전체 SW 발생량과 PS의 발생량의 비율이 PS 89.6%, SW 10.4%임을 고려하여 PS:SW=9:1의 혼합비율 설정하였고 동·리 분석의 경우의 PS의 증량을 기준으로 PS, FW, SW를 각각 6.5대 2.8대 0.8(PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8 3 biomasses codigestion)의 비율로 적용하였다.

각 경우에 따른 메탄 생산 잠재량은 각 바이오매스의 CH₄ 생성 잠재량(Biochemical methane potentials(CH₄ L/kg VS, BMP)을 적용하였으며, 각 바이오매스의 유기물 농도(Volatile Solids, VS)를 사용하여 증량당 CH₄ 생성 잠재량으로 변환한 값을 사용하였다. 본 연구에서는 증량당 CH₄ 생성 잠재량의 산술적 결과를 총에너지 잠재량으로 환산하였기 때문에 ‘잠재량’으로 표기하였고, 따라서, 혐기성 소화에서 있을 수 있는 소화 불균형 및 체류시간 등의 소화 조건 및 병합 소화에 따른 실질적 에너지의 생산량에 대한 기술적 모델링 및 계산은 포함되지 않았다.

가용 바이오매스의 정성적 데이터는 PS와 FW의 경우 실험실 분석을 진행하였으며, 이 외의 데이터, 즉 SW는 Vazifekhoran and Triolo, 2019¹²⁾, SL의 경우 Qiao *et al.*, 2014¹³⁾, 그리고 FR의 경우 Bucker *et al.*, 2020¹⁴⁾을 참조하였다. 예측모델링에서 사용된 항목은 고형물농도 Total Solids(TS), 유기물 농도 Volatile Solids(VS) 및 BMP가 포함되었으며, VS를 사용하여 증량당 CH₄ 생성 잠재량(CH₄ L/kg wet weight)으로 환산한 결과를 사용하여 에너지 잠재량을 분석하고 비교하였으며, 각 바이오매스의 TS 농도는 습식 혐기성 소화에 있어서 가수분해가 용의하고 배관을 통한 연속식 기질의 이송이 가능한 최대농도(TS 15%)¹⁵⁾ 이하의 농도를 병합 소화 혼합비율을 검증하는 데 참고되었다.

2.3. 실험방법

PS는 경상남도에서 창녕에 소재한 양돈농가의 모돈과 자돈 및 비육돈이 혼합된 저장조에서 채집하였으며, FW는 경상남도의 지자체에서 발생하는 음식물 탈리액을 사용하였다. TS 및 VS는 APHA¹⁶⁾에 의해 측정하였으며, BMP의 경우 독일 혐기성소화표준법(VDI 4630, 2014)¹⁷⁾를 따라 측정하였다. 120 ml의 serum bottle를 사용하여 증온에서(35±2 °C) 3반복에 의해 진행되었으며, 접종액과 기질의 비율을 VS 기준 3으로 두었다. 사용된 접종액은 하수슬러지 및 음식물 폐기물을 증온에서 병합 소화 처리하고 있는 대구하수처리장의 혐기성 소화액을 사용하였다.

2.4. Stepwise screening

동·리 단위로 나누어 진행한 소규모 지역의 바이오가스 시설의 타당성 조사를 위한 mapping에서는 발생하는 축산분뇨의 유무에 따라, 1st screening 단계에서 경상남도의 행정동(109개) 및 행정리(4827개)를 합한 총 4936개의 동·리 중 환경부 발간의 전국 가축 분뇨 발생 및 처리 현황⁸⁾의 통계자료에 따라 PS이 발생하는 동·리를 1차 기준으로 삼았다. 2nd screening 단계에서는 1차 기준을 통과한 지역 중 일일 PS 발생량이 10톤을 초과하는 지역만 포함하여 조사하였으며, 2nd screening을 통과한 지역을 대상으로 원물의 병합 소화 시나리오의 혼합비율을 4가지 케이스로 나누어 CH₄ 생산 및 에너지 생산량 예측 모델링을 실시하였다. 다음으로 3rd screening에서는 중규모의 바이오가스 시설(Centralised biogas plant) 설치의 가능성 조사를 위해서 바이오매스 혼합원물의 발생량이 높은 순위로 25개 구역을 조사하였다. 또한, 원물의 바이오 가스화를 위한 가용성이 높은 구역의 축산분뇨 발생의 집중도를 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Overall biomass availabilities and energy potentials

경상남도에서 발생하는 연구의 대상이 된 바이오매스의 총가용량은 9430ton/d 로 나타났으며, 연간 167mil.CH₄ m³/y에 해당하는 CH₄ 생산 잠재량을 가지는 것으로 나타났다(Table 1). 총 연간 발생량 및 에너지 잠재량은 3.44 mil.ton/y의 바이오매스로 석유환산톤(Tonne of oil equivalent, TOE)을 기준하여 156천 TOE/y에 이르렀다. 각 PS, FW, SW, FR, SL의 연간 발생량 및 에너지 생산 잠재량은 PS 2.29mil.ton/y (25.5 천 TOE/y), FW 237,040ton/y(26.5 천TOE/y), SW 266,815 ton/y(65.8천 TOE/y), 어패류 부산물 257,692ton/y(34.1 천 TOE/y), 하수 및 분뇨SL 298,205 (4.7천TOE/y)로 나타났으며, 156.1 천TOE/y의 최대 생산량으로 예측되었다.

국가지표체계의 통계기준에 따른 TOE 기준 국내 1인당 전

Table 1. Availability and energy production potential of the chosen biomass in South GyeGyeongsang Province.

	Daily biomass amounts		VS and methane potentials			Energy production potentials				
	(ton/d)	(%)	VS (kg VS/kg)	BMP (NL CH ₄ /kg VS)	BMP _{vw} (NL CH ₄ /kg VS)	(1000 m ³ /d)	(mil.m ³ /y)	(%)	(1000TOE/y) ¹	(GW/y) ¹
PS	6280	66.6	0.040	293.2	11.7	73.7	26.9	16	25.5	119.8
FW	896	9.5	0.140	609.9	85.4	76.5	27.9	17	26.5	124.4
SW	731	7.8	0.314	821.0	257.8	188.5	68.8	42	65.3	306.4
FR	706	7.5	0.258	540.5	139.6	98.6	36.0	22	34.1	160.3
SL	817	8.7	0.106	243.9	25.9	13.5	4.9	3	4.7	21.9
Sum	9430	100.0				450.7	164.5	100	156.1	732.7

Assumed efficiency of biogas generator 42%, PS:pig slurry, FW: food waste, SW:slaughterhouse waste, FR:fish residue, SL: sludge

력 사용량이 2.093toe/y/pe임을 고려했을 때 연간 도내인구의 2.28%에 해당하는 74,570인구의 전력 사용을 충당이 가능한 것으로 분석되었다. 도내 총 VS 발생량은 875ton VS/d로 나타났다으며 총 바이오매스의 평균 VS 농도는 92.8g VS/kg로 나타났다.

가장 높은 발생량을 보인 PS의 경우 전체 바이오매스 발생량의 66.6%를 해당하는 매우 높은 발생량을 보였으며, PS를 통해 매년 최대 26 mil.m³/yr의 CH₄ 생산이 가능한 것으로 조사되어, 최대 25,510 toe/y 및 119.8GWh의 전기생산량으로 나타났다. PS를 제외한 나머지 바이오매스의 연간 총 발생량은 706ton/d - 896ton/d로서, FW, SW, SL 등의 각각 발생량이 전체 발생량의 약 8% 내외로(7.5% ~ 9.5%)나타나 비교적 유사한 배출량을 보였다. PS의 경우 높은 수분함량에도 불구하고, 전체 바이오매스의 발생량의 90% 이상에 이르는 매우 높은 발생량으로 인해, VS 부하량에서도 VS 251.2ton/d의 일일 배출량으로 가장 높은 결과를 나타냈다. 또한, SW의 경우 PS와 버금가는 229.6 VS ton/d의 일일 발생량을 보였고, FR 182.4 VS ton/d, FW 125.4 VS ton/d, SL 86.6 VS ton/d의 순으로 나타났다.

CH₄ 생산 잠재량의 경우 높은 발생량을 보인 PS(26.9 mil.m³ CH₄/y)에 비해 SW(68.8 mil.m³ CH₄/y)가 가장 높은 CH₄ 생산 잠재량을 보여, 최대 에너지원으로 나타났다(Table 1, Fig. 1). FW의 경우 PS 발생량의 14.2%에 머물렀지만 연간 CH₄ 생산 잠재량은 PS와 매우 유사한 것으로 나타났다(27.9 mil.m³ CH₄/y), SL의 경우 가장 낮은 CH₄ 생산 잠재량으로 조사되었다(4.9 mil.m³ CH₄/y).

바이오매스의 평균 VS 농도 92.8g VS/kg로 나타났고, 중량당 평균 CH₄ 생산 잠재량은 48.6 CH₄ m³/ton로서 높은 에너지 잠재량을 보였다. 높은 수분함량과 비교적 낮은 생분해성으로 인해 낮은 CH₄ 생산 잠재량을 가진 PS (11.7 CH₄ m³/ton)에 비해 고지방 및 단백질질을 함유한 SL (257.8 CH₄ m³/ton) 및 FR (139.6 CH₄ m³/ton)의 높은 CH₄ 생산 잠재량에 기인한 것으로 보여진다. FW의 경우 85.4 CH₄ m³/ton의 CH₄ 생산 잠재량으로 나타나 SW 및 FR에 비해 상대적으로 낮게 나타났다. SL 및 FR의 경우 도축부산물물의 부위별 차이 및 어패류의

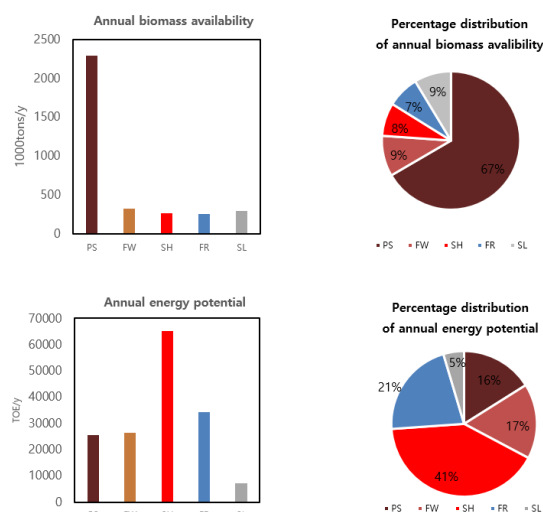


Fig. 1. Annual biomass availability and total energy potentials measured in Tonne of Oil Equivalent (TOE) for each biomass type in South Gyeongsang province. top left: total annual biomass availability (in 1000 tons per year), top right: Percentage distribution of biomass availability (%), bottom left: total annual energy potentials in Tonne of Oil Equivalent (TOE per year), bottom right: percentage distribution of energy potentials in Tonne of Oil Equivalent (TOE). Abbreviations: PS (Pig slurry), FW (Food waste), SW (Slaughterhouse waste), FR (Fish residue), SL (Sludge)."

종류에 따라 유기물의 구성에 차이가 높게 나타나기 때문에 보다 에너지 잠재량에 관한 사례별 정확한 조사를 위해서 해당 지방에서 발생하는 바이오매스의 데이터가 적용이 필요한 것으로 사료된다. 결과적으로 PS와 바이오매스 발생 전량을 multi-feedstock digestion을 하였을 때 PS 단독소화 대비 약 4.2배 높은 단위 중량당 메탄 생산량(CH₄ m³/ton)이 가능한 것으로 나타났다.

3.2. Biomass and energy potentials of each county

중 단위 규모인 시·군 지역의 각 바이오매스 배출량의 경우 각 구역의 인구 및 산업구조의 차이로 인해 김해시를 제외한 대부분 지역에서 시·군 단위의 데이터접근이 가능한 바이오

Table 2. The daily biomass availability (measured in tons per day) and total energy potentials (expressed in TOE per year) of each county, organized in descending order based on the quantity of pig slurry generated

	Daily biomass amounts (ton/d)				Annual energy potentials (TOE/y) ¹				All
	PS	PW	SW	SL	PS	PS+PW	PS+SW	PS+PW+SW	
합천군	1568	9	110.9	6.2	3869	4136	13770	14036	14092
김해시	1470	152	108.1	116.1	3772	8263	13422	17913	18953
창녕군	1237	13	46.6	7.0	1627	2015	5789	6178	6240
고성군	959	7	58.4	9.3	2037	2253	7250	7466	7549
밀양시	939	22	45.9	38.5	1600	2263	5695	6358	6703
거창군	904	11	33.3	22.8	1161	1481	4133	4453	4657
산청군	874	4	62.7	6.5	2186	2312	7781	7907	7965
함안군	821	11	53.1	11.2	1852	2190	6592	6929	7029
의령군	669	4	29.2	6.5	1019	1152	3628	3760	3819
사천시	607	25	29.9	29.0	1044	1792	3717	4465	4724
양산시	565	86	39.7	98.5	1386	3944	4934	7492	8374
하동군	529	8	27.8	3.7	970	1193	3453	3676	3709
진주시	521	97	22.3	88.6	779	3660	2773	5654	6447
함양군	497	7	25.6	5.8	895	1097	3184	3386	3438
창원시	474	316	28.8	296.1	1003	10345	3570	12912	15563
남해군	238	10	3.8	5.6	133	415	474	756	806
거제시	84	93	3.4	39.0	119	2864	425	3169	3518
통영시	33	19	1.5	26.1	52	620	184	753	986
평균	722	50	41	45	1417	2889	5043	6515	6921

¹The total energy potential derived from all available biomass sources, PS:pig slurry, FW: food waste, SW:slaughterhouse waste, SL: sludge

매스들, 즉, PS, FW, SL의 쏠림 현상이 높게 나타나는 것이 확인되었다. 앞서 언급한 바와 같이 SW의 시·군 단위의 데이터 부재로 인해 병합 소화시 SW의 사용량을 임의 산정(SW/PS 0.116)하여 예측했을 때 가장 높은 수치를 보인 지역은 김해시, 합천군, 창녕군 및 창원시로 순으로 나타나(Table 2, Fig. 2), 지역 간 각 바이오매스의 높은 발생량의 편차를 보였다.

PS의 발생량이 1000ton/d를 넘어선 지역은 조사에 포함된 18개 지역 중 3개 지역, 즉, 합천군(1568ton/d), 김해시(1470ton/d), 창녕군(1237ton/day)의 순으로 나타났다. FW의 발생량으로는 도시지역인 창원(315ton/d), 김해(152ton/d), 진주(97ton/d), 거제(93ton/d), 양산(86ton/d)의 순으로 일일 FW 발생량이 많게 조사되었으나, 그 외의 농산촌지역 및 소도시의 경우 평균 11.6ton/d(±6.4)의 낮은 발생량을 보였다. 그와 반대로 해안에 위치한 남해, 거제 통영의 경우 가장 낮은 PS 발생량을 보였을 뿐만 아니라 FW도 전반적으로 낮았으며, 특히 이들 지역의 FR의 발생량이 이번 연구에 포함되지 않았으나, 높은 발생량으로 예측된다.

앞서 언급한 바와 같이 김해시의 경우 PS 및 FW의 발생량 모두 도내에서 가장 높은 바이오매스 발생량을 보였으며, SW 및 SL을 포함한 multi-feedstock digestion 운전의 경우 각 바이오매스의 이상적인 혼합비율을 보였다. 즉, 각 바이오매스의 비율이 PS:FW:SW:SL (79.6%:8.2%:5.9%:6.3%)으로 나타

나 또한, 본 결과가 확인되기 전 각 바이오매스 기질적 특성을 고려해서 설정되었던 Case 4의 multi-feedstock digestion의 바이오매스 혼합 비율과도 매우 유사하게 나타나, 바이오매스의 정량적 및 정성적 측면에서 가장 이상적인 지역으로 예측되었다. 또한, 에너지 생산 잠재량에서도 Fig. 2에 나타난 것과 같이 가장 높은 잠재량을 가진 것으로 (19,953TOE/y) 분석되었으며, 김해시의 경우 각 바이오매스에 따른 예측된 총 잠재량 및 비율은 PS 377TOE/y(19.9%), FW 3772TOE/y(23.7%), 9651TOE/y(50.9%), SL1039(5.5%)로 나타났다.

김해시를 이어 높은 발생량을 보인 합천군의 경우 가장 높은 PS의 발생량을 보였으나 매우 낮은 FW의 양으로 인해 따라서, 합천군과 같이 적정량의 FW의 병합 소화가 불가능한 지역의 시설에서 SW를 대체 에너지원으로 사용될 수 있는 것으로 나타났다. 도내 평균 SW 발생량을 병합 소화에 적용 시 111ton/d의 SW가 혐기성 소화로 첨가될 수 있는 것으로 나타나, 단독소화 시 최대 매년 3,869 TOE/y, SW 첨가 시 13,770 TOE/y의 TOE 생산이 가능한 것으로 나타났다. 낮은 발생량의 보인 FW를 전량 투입하여 PS, FW와 SL을 혼합한 multi-feedstock digestion을 할 경우 합천군의 총에너지 잠재량은 4.191TOE/y로 매우 낮은 잠재량을 보였으며, SW를 포함했을 때는 김해시에 이어서 14,092TOE/y의 매우 높은 에너지 잠재량을 가져오는 것으로 예측되어, 합천군과 같이 적정량의 FW의 병합 소화가 불가능한 지역의 시설에서 SW를 대체

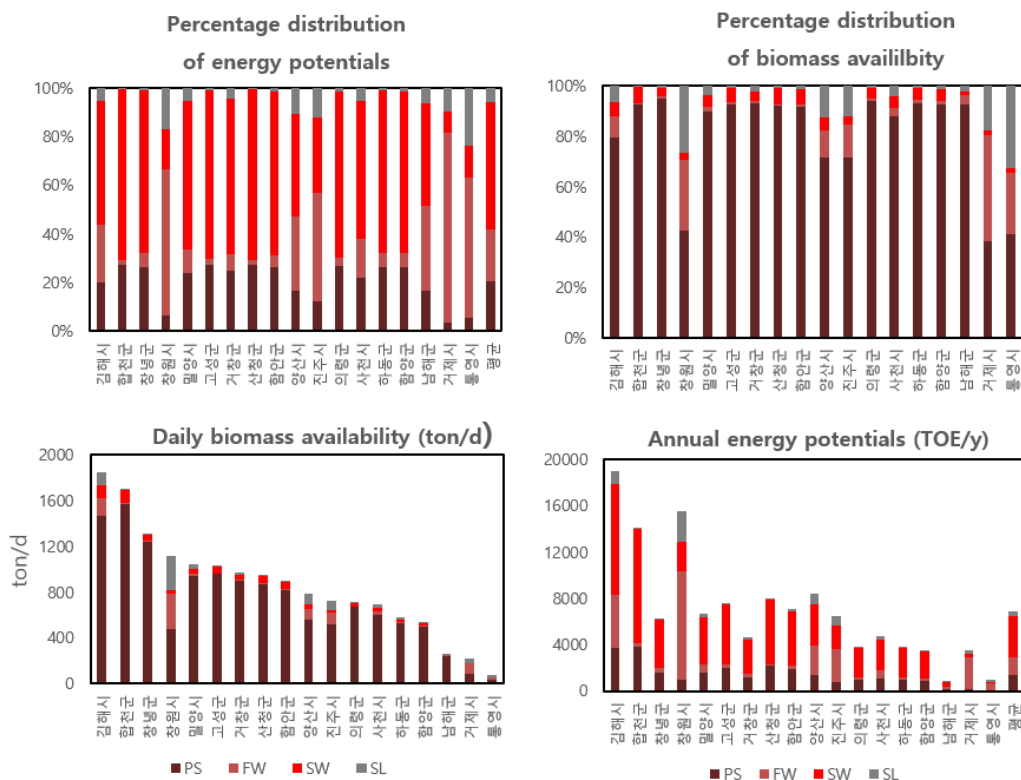


Fig. 2. Percentage distributions of biomass amounts and energy potentials in 18 counties. Top left: Total annual biomass availability (in 1000 tons per year), top right: Percentage distribution of biomass availability (%), bottom left: Daily biomass availability(ton/d). bottom right: Total annual energy potentials in Tonne of Oil Equivalent (TOE per year). Abbreviations: PS (Pig slurry), FW (Food waste), SW (Slaughterhouse waste), FR (Fish residue), SL (Sludge)."

에너지원으로 사용될 경우 매우 높은 에너지 생산이 가능한 것으로 분석되었다. 김해시 및 함천군을 제외한 나머지 대부분의 지역은 상대적으로 유사한 에너지 생산 잠재량을 가진 것으로 예측되었다(Fig. 2).

반면, Fig. 2에서 나타난 바와 같이 FW의 발생량이 가장 높은 것으로 조사된 창원시는 함천군 및 창녕군에 비해 바이오매스의 총량은 낮았으나, 에너지 잠재량의 경우는 김해시를 이어서 두 번째로 높은 나타났다.

3.3. A multi-criteria approach for codigestion scenarios

3.3.1. Food waste versus slaughterhouse waste

PS 와 FW의 병합 소화에서 보편적으로 사용되는 PS:FW 7:3의 혼합비율을 사용했을 때 33.8CH₄ m³/ton의 CH₄ 생산이 가능한 것으로 예측되었고, 단독소화 대비 약 2.9배 높은 CH₄ 생산 잠재량을 가지는 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 3에 나타난 바와 같이 FW의 평균 발생량이 매우 낮아 PS에 비해 6.5%에 그치고 있는 것으로 나타나 FW가 매우 부족한 것으로 나타났다. 더욱이, FW의 발생량이 도시 지역에 편중되어 있고, 시 지자체에서 FW를 자체 처리하는 경우가 늘어나고 있어 PS의 발생량이 특히 높은 농촌 지역에서의 혐기성 소화 시설이 더욱 증가할 경우 혐기성소화 원물의 불균형 현상이 예측

된다. Fig. 3에서 나타난 바와 같이 특히, 양돈농가가 수가 많은 함천, 창녕 및 거창과 같은 농산촌지역의 경우 PS에 대한 FW의 비율이 극히 낮고(1.2%<) 지역 내 발생하는 PS와 FW의 병합 소화의 경우 FW로부터 생산할 수 있는 에너지양이 함천 6.4%, 창녕 19.3%, 거창 21.6%에 머무르는 것으로 나타났다.

이와 같이 적절한 병합 소화의 효과를 가져오기 위해서 FW를 이용가능한 바이오매스로 대체하는 경우, 예를 들어, PS의 혐기성 소화에 FW의 이용을 SW로 대체했을 때 시·군의 평균 예상 에너지 생산 잠재량은 5043TOE/y으로 나타나 PS FW 병합 소화의 경우(2889TOE/y)비해 1.75배 높게 예측되었다(Fig. 3). 특히, FW의 상대적 발생량이 낮은 함천, 창녕 및 거창의 경우 SW와 같은 대체 에너지자원으로 높은 이용이 특히 중요한 것으로 나타났다. 그러나, PS와 SW의 혼합 시나리오의 경우 높은 CH₄ 생산 잠재량에 반해, SW에 존재하는 nitrogen 및 기름성분으로 인한 혐기성소화의 불균형, 즉 예를 들어 높은 N 농도로 인한 ammonia inhibition과 Long chain fatty acids(LCFA)의 축적으로 인한 직·간접 독성 및 과다 scum 발생과 인한 기술적 문제의 위험이 존재하므로 이러한 위험을 회피하는 혼합비율의 결정, 이러한 문제를 극복할 있는 혐기성소화 전의 적절한 preprocessing을 기술의 적용을 필

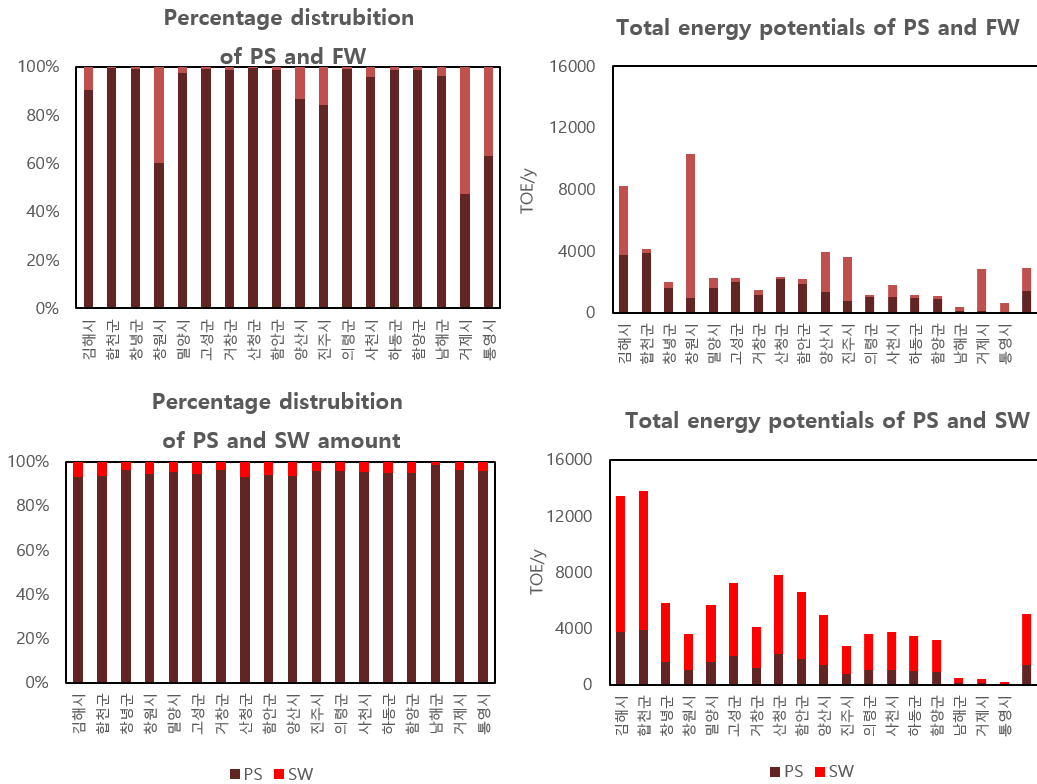


Fig. 3. Assessing biomass availability and total energy potentials in Tonne of Oil Equivalent (TOE): A County-wise comparison of food waste and slaughterhouse waste.
Top left: Percentage distribution of pig slurry and food waste (%), top right: Total pig slurry and food waste energy potentials Tonne of Oil Equivalent (TOE/y), bottom left: Percentage distribution of pig slurry and slaughterhouse waste(%), bottom right: total energy potentials of pig slurry and slaughterhouse waste in Tonne of Oil Equivalent (TOE per year). Abbreviations: PS (Pig slurry), FW (Food waste), SW (Slaughterhouse waste), FR (Fish residue), SL (Sludge)."

요로 한다.

앞서 언급한 바와 같이 2가지의 바이오매스를 혼합하는 비교적 단순한 병합 소화의 위험성을 극복하기 위해서 독일, 스웨덴, 덴마크와 같은 유럽에서 사용해 온 다중 바이오매스 혼합방식(multiple codigestion)을 도입하여, 매우 낮은 FW 발생량을 보인 지역의 바이오매스 부족 현상을 회피하고, SW 혐기성 문제가 될 수 있는 N 및 지방 성분의 과도로 인한 혐기성 소화과정의 불균형을 회피하여 안정된 혐기성 소화 조건을 갖추어 높은 소화율 및 생산성을 이룰 수 있다.¹⁸⁾ 예를 들어, 덴마크의 co-substrate는 8종의 상위항목, 즉, 가축 분뇨, 고품성 가축 분뇨, 에너지작물, 하수SL, 밀짚, 산업유기성 폐기물, FW, 농업생산 잔재물로 구분하여 각 상위항목에 하위항목을 두어 총 36종 바이오매스를 병합 소화에 다양하게 이용하고 있다.¹⁹⁾ 더욱이, 2012년에 발표되었던 발생하는 축산분뇨의 50%를 2020년까지 바이오 가스화하는 정책²⁰⁾으로 인해 이뤄졌던 바이오가스 산업의 확장을 가능하게 이끌었던 원인은 이미 co-substrate의 부족한 상황에서 농산잔재물과 고품성 가축 분뇨의 적극적인 도입이라고 할 수 있으며, 이들 차세대 바이오매스의 사용량은 꾸준히 증가하고 있는 실정이다.

3.3.2. Potential of small biogas plants and centralized biogas plants

경상남도의 행정동(109개) 및 행정리(4827개)을 합한 총 4936개의 동·리 중 PS가 발생하는 동·리는 334개 지역으로, 총 6.8%에 해당하였으며, 합천군(46개 동·리), 김해시(29개 동·리), 산청군(27개 동·리)의 순으로 나타나, 총 PS의 발생량이 높았던 합천군과 김해시에서 가장 많은 양돈농가가 포함되었으나, 산청군의 경우 PS의 발생량이 더 높은 창녕군, 밀양시, 거창군보다 더 많은 양돈농가가 포함되었다. 334개 동·리 중 PS의 발생량을 일일 발생량 10톤을 초과한 지역은 179개 구역으로 나타났으며 10톤 이하의 낮은 발생량을 보인 동·리는 155개 지역으로 나타났다. 한편, 일일 발생량이 100톤 이상인 마을은 8개 나타났다(**Table 3**).

Table 4에는 바이오 가스화를 통하여 전력생산량에 기준 한 상위 25개 동·리의 혐기성 병합 소화 시나리오에 따른 TOE 환산 CH₄ 생산 잠재량이 나타나 있다. 바이오가스 시설의 경제성의 주요인자인 처리량의 경우 처리량이 작을수록, 전력생산량 대비에 비해서 높은 비용이 들며, 처리량이 비교적 낮은 소규모 바이오가스 시설의(<100ton/d)의 경우, 바이오가스 고

Table 3. Number of pigs and the daily production of pig slurry in the 334 specified villages.

Daily pig slurry amount (ton/d)	Number of pigs	Number of villages
>100	>19,608	8
50-100	9,804-19,607	25
20-50	3,922-9,802	63
10-20	1,961-3,921	83
1-10	196-1,960	127
<1	<196	28
Sum		334

질화 및 소화액의 고차처리와 같은 고비용의 시설투자에 대한 한계가 있고, 유럽 바이오가스 시설의 ‘Rule of Thumb’에 따라 일 처리량 300 ton/d을 초과하는 경우 충분한 경제성이 있는 것으로 알려져 있다. 덴마크의 경우 중대형 상업형 바이오 가스 시설의 평균 일일 처리량이 571ton/d이고, 단독 농가형

바이오가스 시설의 처리량은 일평균101ton/d에 이른다.¹⁹⁾ 2017년 스페인에서 발표된 연구에 따르면 전기생산량 MW당 €2에서 €6의 비용이 필요하며 바이오가스 시설의 비용은 처리량이 적을수록 (<500 kW), 전력 생산량 대비에 비해서 높은 비용이 드는 것으로 나타났다.

Table 5에서는 중대형 규모의 바이오가스 시설의 (centralized biogas plant)의 설치에 대한 타당성을 조사하기 위해 발생량이 높은 25개 동·리를 시·군별로 구분하여 각 동·리 단위의 처리량 (ton/d) 및 예상 필요 바이오가스 소화조의 용적(m³)을 나타내었다. 김해시의 경우 5개 지역을 포함하여 처리할 경우 대규모 바이오가스 시설(처리량 744ton/d, 소화조 용적 22,318 m³)이 가능 할 것으로 예측되었으며, 이들 5개 지역의 경우 각 발생량이 92-259ton/d 에 이르러, 각 동·리에서 중소규모의 바이오가스 시설이 가능한 것으로 나타났다. 특히, 김해시의 안곡리의 경우 발생량이 259ton/d에 이르러 경상남도에서 가장 높은 발생량을 나타내어서, 동·리 자체에서 중급 규모의 바이오가스 시설이

Table 4. The Annual energy potential from individual biomass sources and codigestion scenarios, respectively, in the top 25 highest-ranked villages.

No.	County and village	Annual energy potentials (TOE/y) from each biomass				Annual energy potentials (TOE/y) from each codigestion case			
		PS	FW	SW	SL	C1	C2	C3	C4
1	김해시 안곡리	682	2128	1745	1039	682	2809	2427	4554
2	합천군 내대리	625	1950	1599	55	625	2575	2224	4175
3	단성면 남사리	515	1607	1318	58	515	2122	1833	3440
4	김해시 용덕리	511	1594	1307	1039	511	2105	1818	3413
5	산청군 내곡리	470	1466	1202	58	470	1936	1672	3138
6	합천군 초곡리	439	1371	1124	55	439	1810	1563	2934
7	하동군 서황리	436	1361	1116	34	436	1798	1553	2914
8	양산시 외석리	413	1289	1057	882	413	1701	1470	2758
9	합천군 대전리	382	1192	978	55	382	1574	1360	2552
10	고성군 감서리	375	1170	960	83	375	1545	1335	2505
11	사천시 대진리	373	1163	954	260	373	1536	1327	2490
12	함안군 산서리	355	1108	909	100	355	1463	1264	2372
13	사천시 가화리	352	1099	901	260	352	1451	1253	2352
14	하동군 안하리	317	989	811	1039	317	1306	1128	2117
15	산청군 창촌리	306	956	784	58	306	1262	1090	2046
16	양산시 화계리	303	945	775	882	303	1248	1078	2023
17	양산시 용당리	284	886	727	882	284	1170	1010	1896
18	김해시 나전리	266	831	681	1039	266	1097	948	1778
19	합천군 갑산리	262	817	670	55	262	1078	931	1748
20	의령군 와요리	260	811	665	58	260	1071	925	1736
21	김해시 원지리	255	795	652	1039	255	1050	907	1702
22	밀양시 마산리	252	786	645	345	252	1038	896	1682
23	김해시 장방리	242	755	619	1039	242	997	861	1616
24	창녕군 산지리	231	722	592	63	231	953	823	1545
25	함안군 대송리	230	718	589	100	230	949	819	1538

PS: Pig slurry, FW: Food waste, SW:slaughterhouse waste, SL: Sludge, C1(PS 100% mono-digestion), C2 (PS:FW= 7:3, 2 biomasses codigestion), C3(PS:SW=9:1, 2 biomasses codigestion), C4(PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8 3 biomasses codigestion)

Table 5. Feasibility analysis of small-scale biogas plants, as well as commercial and centralized biogas facilities, in the top 25 highest-ranked villages

County	Village	PS (ton/d)	FW (ton/d)	SW (ton/d)	Quantity (ton/d)	Capacity (m3)	C1 (TOE/y)	C2 (TOE/y)	C3 (TOE/y)	C4 (TOE/y)
김해시	안곡리	168	72	20	259	7781	682	2809	2427	4554
	용덕리	126	54	15	194	5831	511	2105	1818	3413
	나전리	66	28	8	101	3038	266	1097	948	1778
	원지리	63	27	7	97	2908	255	1050	907	1702
	장방리	60	26	7	92	2760	242	997	861	1616
	합계	482	206	56	744	22318	1956	8058	6960	13063
합천군	나대리	154	66	18	238	7133	625	2575	2224	4175
	초곡리	108	46	13	167	5012	439	1810	1563	2934
	대전리	94	40	11	145	4360	382	1574	1360	2552
	갑산리	64	28	8	100	2987	262	1078	931	1748
	합계	421	180	49	650	19492	1708	7038	6079	11409
산청군	남사리	127	54	15	196	5877	515	2122	1833	3440
	내곡리	116	50	13	179	5362	470	1936	1672	3138
	창촌리	75	32	9	117	3495	306	1262	1090	2046
	합계	318	136	37	491	14734	1291	5320	4595	8624
양산시	외석리	102	44	12	157	4712	413	1701	1470	2758
	화계리	75	32	9	115	3457	303	1248	1078	2023
	용당리	70	30	8	108	3240	284	1170	1010	1896
	합계	246	105	29	380	11409	1000	4120	3558	6678
하동군	서황리	107	46	13	166	4979	436	1798	1553	2914
	안하리	78	33	9	121	3617	317	1306	1128	2117
	합계	185	79	22	287	8596	753	3104	2681	5031
사천시	대진리	92	39	11	142	4255	373	1536	1327	2490
	가화리	87	37	10	134	4018	352	1451	1253	2352
	합계	179	77	21	276	8273	725	2987	2580	4842
함안군	산서리	87	37	10	135	4052	355	1463	1264	2372
	대송리	57	24	7	88	2628	230	949	819	1538
	합계	144	62	17	223	6679	585	2412	2083	3909
고성군	감서리	92	40	11	143	4279	375	1545	1335	2505
의령군	와요리	64	27	7	99	2967	260	1071	925	1736
밀양시	마산리	62	27	7	96	2874	252	1038	896	1682
산지리	산지리	57	24	7	88	2640	231	953	823	1545

PS:Pig slurry, FW: Food waste, SW:slaughterhouse waste, SL: Sludge, C1(PS 100% mono-digestion), C2 (PS:FW= 7:3, 2 biomasses codigestion), C3(PS:SW=9:1, 2 biomasses codigestion), C4(PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8 3 biomasses codigestion)

가능한 것으로 예측되었다. 합천군 및 산청군의 경우도 또한 합천군의 경우 4개 동·리를 통합 처리할 경우 예상 처리량이 650ton/d, 예상 소화조 용적 19,492 m³)으로 김해시에 버금 가는 것으로 예측되었으며, 그 다음으로 산청군의 3개 동·리를 합할 경우 예상 처리량 491ton/d, 예상 소화조 용적 14,734 m³으로 나타나 상업성 바이오가스 시설의 충분한 잠재력을 가지는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라 이들 25개 동·리 지역의 경우 최소 일일 발생량이 88ton/d으로 동·리 규모의 소규모 바이오가스 시설이 가능한 것으로 나타났다.

3.3.3. Case analysis of village-scale biogas plants

최대 PS의 발생량을 보인 김해시 한림면에 위치한 안곡리

의 경우 22개의 돼지 축산농가에서 32,917 두수의 돼지를 사육하고 있으며(2019년 기준), 5가지의 병합 혐기성 소화 시나리오(C1~C5)를 적용하였을 경우, 에너지 생산량을 조사한 결과는 **Table 6**에 나타나 있으며, 각 케이스별 전력생산량으로 비교했을 때 단독소화시(C1) 682 TOE/년에서 C5를 적용했을 때 최대 5594 TOE/년에 해당하는 에너지 생산이 가능한 것을 보여주었다. 다만, 병합 소화시 요구되는 소화조 용적의 증가 뿐만 아니라, 소화액의 증가 때문에 발생하는 추가 처리비의 문제와 추가되는 액비 생산량에 대한 액비 저장조 용적에 대한 증가에 대한 면밀한 조사가 필요하다. 안곡리의 각 케이스에 따른 필요소화조 용적 및 소화액의 발생량의 조사 결과, PS를 단독 소화하는 경우에 대비 최대 약 2.2배의 소화액이

Table 6. An example of a biogas plant at the village scale: a case analysis.

	Biomass	Energy	daily CH ₄	Annual CH ₄	Annual TOE
	ton/d	%	m ³ /d	m ³ /y	TOE/y
Case 1: PS 100% monodigestion					
PS	168	100%	1969	718,633	682
Sum	168	100%	1969	718,633	682
Case 2: PS:FW= 7:3					
PS	168	70%	1969	718,633	682
FW	72	30%	6143	2,242,297	2128
Sum	240	100%	13266	5,895,323	5594
Case 3: PS:SW=9:1					
PS	168	90%	1969	718,633	682
SW	20	10%	5038	1,838,870	1745
Sum	187	100%	7007	2,557,503	2427
Case 4: PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8					
PS	168	65%	1969	718,633	682
FW	72	28%	6143	2,242,297	2128
SW	20	8%	5038	1,838,870	1745
Sum	259	100%	13150	4,799,800	4554
Case 5: Case 4+ SL100%					
PS	168	45%	1969	718,633	682
FW	72	19%	6143	2,242,297	2128
SW	20	5%	5038	1,838,870	1745
SL	116	31%	3001	1,095,523	1039
Sum	375	100%	13266	5,895,323	5594

PS: pig slurry, FW: food waste, SW: slaughterhouse waste, SL: sludge, C1(PS 100% mono-digestion), C2 (PS:FW= 7:3, 2 biomasses codigestion), C3(PS:SW=9:1, 2 biomasses codigestion), C4(PS:FW:SW=6.5:2.8:0.8 3 biomasses codigestion)

발생하는 것으로 나타났다. 또한, 안곡리의 위치가 김해시에서 가장 인구밀집지역과 약 1 km의 거리에 위치하였기 때문에 악취발생과 관련하여 인구밀집지역과 근거리에 위치한 대규모 바이오가스 시설의 경우에 대한 면밀한 준비와 조사가 선행되어야 한다.

3.4. Comprehensive insights for new biogas plants

조사된 바이오매스를 전량 바이오 가스화하는 경우 총 9,430 ton/d을 중온성 소화의 경우에 보편적으로 사용되는 체류시간인 30일을 적용했을 때 필요 혐기성소화조 용적은 282,905 m³로 계산되었다. 일 처리량 100 ton/d 기준 3,000 m³ 용적의 중소형 규모의 바이오가스 시설의 혐기성소화조를 설치할 경우 94개 시설의 바이오가스 시설이 필요한 것으로 나타났고, 경상남도의 총면적인 10,541 km²를 나눴을 때, 평균 112 km²의 면적당 바이오가스 시설 1기가 설치가 필요한 것으로 나타났으며, 또한, 이론적인 평균적인 PS의 최대 수송 거리는 5.9 km로 나타났다. 바이오가스 시설의 경제성에서 중요한 요소 중 하나인 바이오매스 수송 거리로 인한 가용

바이오매스의 밀집도, 특히 주 기질인 PS을 발생하는 양돈농가의 밀집도 및 발생량이 바이오가스 시설의 실질적 capacity를 결정하는 주요 인자이기 때문에 자세한 이들 인자에 대한 구체적인 mapping이 필요하다.

평균 VS 부하량, 체류시간과 소화조 용적을 적용하여 혐기성소화조의 VS 부하율을 계산했을 때 바이오가스 시설에 처리되는 OLR 값은 3.09 kg VS/m³ d로 나타나, 유기물농도(92.8g VS/kg) 및 OLR 결과는 체류시간이 비교적 짧은 덴마크 및 독일과 같은 고효율의 상업성 바이오가스 시설의 습식 혐기성소화의 보편적 유기물 부하량 및 부하율과 유사한 것으로 나타났으며, 반면 현재 가축 분뇨를 주원료로 처리하는 국내 바이오가스 시설의 경우보다 웃도는 것으로 나타났다. 총 에너지 잠재량 및 바이오매스 가용량을 고려하여 계산되었을 경우 PS 및 기타 바이오매스의 평균혼합비율에서 나타난 바와 같이 주 기질을 PS으로 하였을 때 66.6%의 PS과 33.4%의 기타 바이오매스의 혐기성소화로 나타났으며, 전체 substrate에 대한 각 co-substrate (FW, SH, FR, SL)의 혼합비율은 9.5% (FW), 7.8%(SH), 7.5%(FR), 8.7%(SL)로 나타났다.

중앙집중식 대형 바이오가스 시설의 설치는 일평균 처리량이 약 2000ton/d로 산정하였을 때 약 6기의 바이오가스 시설의 설치가 가능한 것으로 나타났다. 하지만, 앞서 언급한 바와 같이 최소행정구역 334개 구역 중 127개 구역(38%)의 낮은 PS발생량은 높지 않은(1-10 ton/d)으로 인해 이들 지역을 병합하여 대규모 처리에 한계가 있어, 각 지역의 축산분뇨 분포에 대한 더욱 세밀한 조사가 진행되어야 하는 것으로 나타났다. 일 평균 발생량 100 ton/d인 8개 동·리의 경우 각 구역간의 거리에 따라 중·대규모의 바이오가스 처리시설이 가능한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 경상남도 전체 및 시·군별, 동·리별로 발생하는 고농도의 에너지 잠재량을 가진 바이오매스를 병합 소화하였을 때의 바이오매스 가용량 및 에너지 생산 잠재량을 예측하였으며, 동·리 수준의 소규모시설 및 시·군의 중앙집중식 상업성 바이오가스 시설의 잠재성과 타당성을 규명하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

경상남도에서 발생하는 바이오매스의 발생하는 PS, FW, SW, 어패류 잔재물, 하수 및 분뇨 SL의 연간 발생량 및 에너지 생산 잠재량은 PS 2.29mil.ton/y (25.5 천 TOE/y), FW 237,040ton/y((26.5 천TOE/y), SW 266,815 ton/y(65.8천 TOE/y), 어패류 부산물 257,692ton/y((34.1 천TOE/y), 하수 및 분뇨SL 298,205 (4.7천TOE/y)로 나타났으며, 총 연간 발생량 및 에너지 잠재량은 3.44 mil.ton/y의 바이오매스로부터 156.1천TOE/y의 최대 생산량으로 예측되었다.

시·군별 PS:FW 7:3의 혼합비율을 사용했을 때 33.8CH₄

m³/ton의 CH₄생산이 가능한 것으로 예측, 단독소화 대비 약 2.9배 높은 CH₄ 생산 잠재량을 보였으나, FW의 비율이 PS에 비해 30%를 훨씬 못 미치는 평균 6.5%에 그쳤고, 발생량을 기준으로 한 결과에서는 SW를 병합 소화 시 평균 15% 더 높은 에너지 생산 잠재량을 보였다. 김해시의 경우 바이오매스의 발생량이 가장 높으며 및 혐기성 소화에 대한 각 바이오매스의 가장 이상적인 혼합비율 (PS:FW:SW:SL 79.6%:8.2%:5.9%:6.3%)을 보였다.

동·리별 분석에서는 PS가 발생하는 334개 동·리 중 일일 발생량이 100톤 초과하는 동·리는 8개 동·리로 나타났으며, PS의 단독 혐기성 소화(C1)비해서 여러 바이오매스를 병합 소화 하였을 때 최대 720%(C5)까지 전력생산이 가능한 것으로 나타났다. PS과 FW를 7:3으로 혼합한 케이스의 경우, PS과 SW를 9:1의 비율로 혼합한 사례에 비해 약 18% 더 많은 전력 생산효과를 가져오는 것으로 나타났다.

비교적 대규모의 중앙 집중식 바이오가스 시설의(centralized biogas plant)의 설치에 대한 타당성을 조사한 결과 김해시의 경우 5개 지역을 포함하여 처리할 경우 처리량 744ton/d 및 소화조 용적 22,318m³의 비교적 대규모 시설의 설치가 가능한 것으로 나타났으며 예상 에너지 생산량은 13,063 (TOE/y)에 달하는 것으로 예측되었고, 합천군의 경우 김해군에 버금가는 capacity의 시설이 가능한 것으로 나타났다.

이상 경상남도의 사례를 들어 바이오매스의 가용량 및 에너지 생산 잠재량과 소규모 바이오가스 시설 및 비교적 대규모의 상업성 바이오가스 시설의 잠재성과 타당성을 조사하였다. 경상남도의 PS의 발생량은 전국 발생량의 10.5%에 그치지만, 충청남도과 경기도 및 경상북도의 경우 PS의 발생량은 경상남도에 비해 매우 높아, 더욱 높은 축산농가의 밀집도와 에너지 잠재량이 예상되는 바 본 연구 사례와 같이 이들 지역에 관한 종합적인 조사와 더불어 전국적인 조사로 확대되어야 할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단의 Brain pool 프로그램(2021H1D3A2A02039182)과 경남테크노파크(경상남도 에너지자립마을 선도모델 발굴 용역)의 지원을 받아 수행되었습니다. 자료 조사에 도움을 준 경상국립대학교 이명은, 신주희 연구원께 감사 말씀 드립니다.

References

1. Bagi Z, Ács N, Böjti T, Kakuk B, Rákhely G, Strang O, Szuhaj M, Wirth R, Kovács KL. Biomethane: The energy storage, platform chemical and greenhouse gas mitigation target, *Anaerobe*, 46,13-22(2017)
2. Ababneh H, Hameed BH. Electrofuels as emerging new green

alternative fuel: A review of recent literature, *Energy Conversion and Management*, Volume 254, 115213(2022)

3. Vergote TLI, De Dobbelaere A, Willems B, Leenknecht Jan, Buysse J, Volcke E, Meers E. Erik. Stability of Thermophilic Pig Manure Mono-digestion: Effect of Thermal Pre-treatment and Separation. *Frontiers in Energy Research*. 8,40(2020).
4. Wang Z, Wang X, Zhong G, Liu J, Sun Y, Zhang C. Rapid determination of ammonia nitrogen concentration in biogas slurry based on NIR transmission spectroscopy with characteristic wavelength selection, *Infrared Physics & Technology*, 122,104085(2022).
5. Vasmara C, Cianchetta S, Marchetti R, Ceotto E, Galletti S. Codigestion of pig slurry and KOH pre-treated giant reed (*Arundo donax* L.) enhances methane yield and digestate characteristics, *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103204(2023).
6. Zhu X, Yellezuome Da, Liu R, Wang Z, Liu X. Effects of codigestion of food waste, corn straw and chicken manure in two-stage anaerobic digestion on trace element bioavailability and microbial community composition, *Bioresource Technology*, 346, 126625(2022)
7. Králík T, Knápek J, Vávrová K, Outrata D, Horák M, Janota L, Jablonská Š. Biomass price as a key factor for the further development of biogas and biomethane use – Methodology and policy implications, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60, 103492(2023).
8. 환경부전국 가축 분뇨발생 및 처리현황 통계자료 (2019)
9. 환경부 전국 폐기물 발생 및 처리 현황 중 생활(가정)음폐 및사업장비(非)배출 음폐 발생 및 처리 현황 (2020)
10. 환경부, 하수도통계 중 하수찌꺼기 및 분뇨찌꺼기 발생 및 처리 현황(2020)
11. 환경부 국립환경과학원 도축, 육류가공 및 저장처리업의 환경오염방지 및 통합관리를 위한 최적가용기법 기준서(2019)
12. Vazifekhoran A, Triolo JM. A novel mathematical modelling of waste biomass decomposition to facilitate rapid methane potential prediction, *Journal of Cleaner Production*, 220, 1222-1230(2019).
13. Qiao W, Yan X, Ye J, Sun YU, Wang W Zhang Z. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment, *Renewable Energy*, 36(12),3313-3318(2011).
14. Tabatabaei M, Valijanian E, Aghbashlo M, Ghanavati H, Sulaiman A, Wakisaka M (2018) Prominent parameters in biogas production systems. *Biogas: Fundamentals Process Operation:135-161(2018)*
15. Zhao X, Yuan YQ, Chen QK, Li Q, Huang Y, Wu D, Li L. Effect of total solids contents on the performance of anaerobic digester treating food waste and kinetics evaluation. *E3S Web of Conferences*. 272,01026(2021).
16. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Standard Public Health, 51,940(2017).
17. Verein Deutscher Ingenieure, 2014. VDI 4630 - Gärsubstrate.
18. Assessment of feedstocks for biogas production, part I—A multi-criteria approach Feiz R., Ammenberg J. (2017) *Resources, Conservation and Recycling*, 122, pp. 373-387.

19. Wenzel H, Triolo JM, Toft LV, Østergaard N. Energiafgrødeanalysen. SDU og SEGES, ISBN: 978-87-934 (2020)
20. Green Growth, Grøn Vækst. Danish Environmental Ministry, April 2009 2009.
21. Maabjerg energycenter, OM MEC – BIOGAS. Retrieved October 25, 2023, from <https://www.maabjergenergycenter.dk/om-biogas/>

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Jin Mi Triolo

Future Convergence Research Institute, Gyeongsang National University, Research professor, ORCID[®] 0000-0002-1960-9823: Writing-original draft.

Seung Gu Shin

Department of Energy Engineering, Gyeongsang National University, Associate professor, ORCID[®] 0000-0002-6077-9576: Supervision, Project administration, Writing-review and editing, Final approval.