



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년11월09일
 (11) 등록번호 10-1917315
 (24) 등록일자 2018년11월05일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 C02F 11/12 (2006.01) C02F 11/02 (2006.01)
 (52) CPC특허분류
 C02F 11/12 (2013.01)
 C02F 11/02 (2013.01)
 (21) 출원번호 10-2018-0001147
 (22) 출원일자 2018년01월04일
 심사청구일자 2018년01월04일
 (56) 선행기술조사문헌
 KR1020170092383 A*
 JP06343997 A*
 KR101024447 B1*
 KR101338951 B1*
 *는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
 명지대학교 산학협력단
 경기도 용인시 처인구 명지로 116 (남동, 명지대학교)
 (72) 발명자
 장덕진
 경기도 성남시 수정구 위례동로 15, 5704동 202호(창곡동, 힐스테이트 위례)
 하오종디
 경기도 용인시 처인구 명지로60번길 33-6, 301호(역북동)
 (74) 대리인
 특허법인다나

전체 청구항 수 : 총 12 항

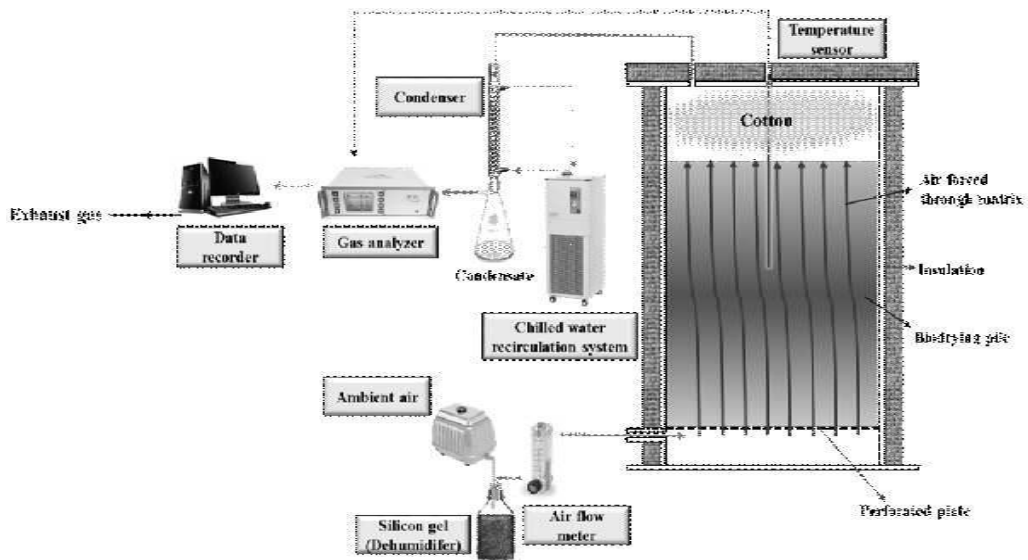
심사관 : 김종진

(54) 발명의 명칭 커피 찌꺼기를 이용한 탈수 슬러지의 고속 생물건조방법

(57) 요약

본 발명은 커피 찌꺼기를 이용한 탈수 슬러지의 고속 생물건조방법에 관한 것으로, 커피 찌꺼기 및 탈수 슬러지를 혼합하는 단계; 및 혼합물의 생물건조를 수행하는 단계를 포함하는 탈수 슬러지의 생물건조방법을 제공한다.

대표도 - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2015R1D1A1A01059073

부처명 한국연구재단

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 이공분양기초연구사업

연구과제명 저온 열풍건조와 생물건조를 결합한 에너지 저소비형 고효율 하수슬러지 건조 기술 개발

기 여 율 1/1

주관기관 명지대학교 산학협력단

연구기간 2015.11.01 ~ 2018.10.31

명세서

청구범위

청구항 1

커피 찌꺼기 및 탈수 슬러지를 혼합하는 단계; 및

혼합물의 생물건조를 수행하는 단계를 포함하며,

생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 함수율은 50 wt% 이하, 중량 손실 비율은 60% 이상, 수분 제거율은 70% 이상, 휘발성 고형물 손실률은 40% 이상, 건조 속도는 0.5 kg/일 이상이며,

커피 찌꺼기의 함수율(MC)은 3 ± 2 wt%, 휘발성 고형물(VS) 함량은 97 ± 2 wt%, 밀도는 0.4 ± 0.2 g/cm³, 고-발열량(HHV)은 $22,800 \pm 500$ kJ/kg, 저-발열량(LHV)은 $22,000 \pm 500$ kJ/kg, 용존 유기 탄소(DOC) 함량은 30 ± 5 mg/g, 다당류 함량은 25 ± 5 mg/g, 단백질 함량은 0.4 ± 0.2 mg/g, C 함량은 51 ± 5 wt%, H 함량은 7 ± 2 wt%, N 함량은 2 ± 1 wt%, S 함량은 0.3 ± 0.2 wt%, O 함량은 35 ± 5 wt%인 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

커피 찌꺼기는 벌킹제로서 사용되는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

커피 찌꺼기는 수집하여 $105 \pm 10^\circ\text{C}$ 에서 1 ± 0.5 일 동안 건조시킨 후 사용하는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

탈수 슬러지 및 커피 찌꺼기는 습량 기준으로 4±1:1의 중량비율로 혼합하는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 5

삭제

청구항 6

제1항에 있어서,

생물건조는 생물건조 반응기에서 수행되는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

생물건조 반응기는 혼합물 더미를 수용하는 단열 및 밀폐된 반응 용기, 반응 용기의 상부 공간에 충전되는 충전제, 반응 용기의 하부에 설치되는 천공판, 반응 용기의 하부와 연결되는 공기 공급라인, 공기 공급라인과 연결되는 공기 공급기, 공기 공급라인에 설치되는 탈습기, 반응 용기의 상부와 연결되는 가스 배출라인, 가스 배출라인에 설치되는 응축기, 가스 배출라인에 설치되는 가스 분석기, 반응 용기에 설치되는 온도 센서를 구비하는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 8

제6항에 있어서,

생물건조 중에 혼합물 더미를 4±2일마다 뒤집는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

생물건조의 조작 기간은 8±2일인 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 10

제1항에 있어서,

생물건조 중에, 45℃ 이상의 고온 기간은 5일 이상, 최고 온도는 65℃ 이상, 8일째에 온도 누적(TC)은 200℃ · 일 이상, 최대 CO₂ 농도는 7.5 vol% 이상인 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 11

삭제

청구항 12

제1항에 있어서,

생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 조작 분류 단위(OTU)는 2000 이하, Chao1의 군집 풍부도 지수는 2000 이하, Shannon의 다양성 지수는 4 이하인 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 13

제1항에 있어서,

생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 저-발열량(LHV)은 9,000 kJ/kg 이상인 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

청구항 14

제1항에 있어서,

생물건조를 거친 혼합물은 고체 연료로 이용되는 것을 특징으로 하는 탈수 슬러지의 생물건조방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 탈수 슬러지의 생물건조방법에 관한 것으로, 특히 커피 찌꺼기를 이용한 탈수 슬러지의 고속 생물건조방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 엄격한 환경 규제 및 높은 처리 비용으로 인해, 하수 슬러지 관리의 초점은 통상적인 처리로부터 에너지 회수로 바뀌고 있다. 폐수처리장(WWTP)에서, 농축 슬러지는 일반적으로 기계적으로 탈수된다. 그러나, 이 탈수 슬러지(DS)는 80-85 wt%의 전형적인 함수율(MC)로 여전히 많은 물을 함유하고 있고, 따라서 고체 연료로서 직접 이용될 수 없다. 최근에, 생물건조(biodrying)는 유기 폐기물의 MC를 낮추기 위한 전처리 방법으로서 부상하였다. 그렇지만, MC가 너무 높을 뿐만 아니라 생분해성 휘발성 고형물(BVS) 함량 및 공극률이 낮기 때문에, 탈수 슬러지(DS)의 직접 생물건조는 기술적으로 실현 가능하지 않은 것 같다. 이 문제를 해결하기 위해, 벌킹제(bulking agent)가 DS와 흔히 혼합되어 자유 공기 공간(FAS)을 향상시키고 초기 MC를 최적 범위로 조절한다. 대량으로 얻기가 쉽고 저렴하기 때문에, 짚, 톱밥(SD), 밀 잔류물, 왕겨 및 대팻밥이 하수 슬러지 생물건조용 벌킹제로서 자주 이용되었다. 그러나, 이러한 벌킹제의 사용은 저온 프로파일 및/또는 짧은 고온 기간을 수반하는 불충분한 열 생산을 초래하였다. 이러한 리그노셀룰로오스성 벌킹제는 물에 약간 녹고, 그 결과 벌킹제에 의해 기여되는 용존 유기물(DOM)의 농도는 낮다. 따라서, 미생물 대사에 필요한 다양한 영양소가 이러한 벌킹제에 의해 충분하

게 제공되지 않는다. DS 및 이러한 저-용해성 재료의 혼합물이 균일하지 못함을 또한 주목할 필요가 있다. 또한, 리그노셀룰로오스는 미생물 분해에 저항적이다. 그러므로, 높은 생분해 가능성, 높은 DOM 함량, 적절한 FAS 및 좋은 균일도를 나타내는 새로운 별킹제를 찾는 노력이 계속되었다. Zhao 등은 호기성 공정에서 높은 생분해 가능성 때문에, 짚이 DS 생물건조용 별킹제로서 SD보다 더 잘 수행함을 보고하였다. 그러나, 생물건조가 2 주 동안 길게 계속되었음에도, 최종 MC는 높았다(50-55 wt%). Yang 등은 별킹제로서 공기-건조 슬러지(AS)를 이용함으로써 높은 수분 제거율(55.1%)을 달성하였다. 그러나, AS의 준비는 시간-소모적이므로(주위 대기에서 적어도 2주), 대규모 DS 생물건조를 어렵게 한다. 게다가, AS는 모래 및 금속 산화물과 같은 무기물질을 20-50 wt% 함유하므로, 공정 조작에 문제를 유발하고 저-에너지 생물건조 제품을 생산할 수 있다.

[0003] 커피 찌꺼기(Spent coffee ground: SCG)는 에스프레소 또는 수용성 커피의 생산 중에 발생하는 고체 잔류물이다. 국제 커피 협회(ICO)에 따르면, 약 9.1백만톤의 커피콩이 2016년에 소비되었다. 일반적으로, 550-670 kg의 SCG가 1 ton의 커피콩으로부터 발생되고, 따라서 5.8백만톤 이상의 SCG가 매년 발생한다. SCG는 영양소가 풍부하지만, 그 안에 폴리페놀, 탄닌 및 카페인이 함유되어 있기 때문에, 가축 사료용으로 거의 사용되지 않는다. 대신에 SCG는 원예 개량 및 버섯 재배용으로 사용되지만, 막대한 양을 처리하는 효율적인 방법이 이용 가능하지 않기 때문에, 대부분의 SCG는 어떠한 처리 없이 무가치한 폐기물로 폐기된다. 최근에, 퇴비화, 혐기성 소화, 바이오디젤 생산, 연소 및 열분해용으로 SCG를 이용하는 몇몇 시도가 이루어졌다. 계속 증가하는 발생을 처리하기 위해 SCG 관리에 점점 관심을 기울이고 있지만, 생물건조용 별킹제로서 SCG에 초점을 맞춘 연구는 없었다. 그 이용가능성, 생분해성 및 고-발열량을 고려하면, SCG는 고체 연료 생산을 목표로 하는 생물건조에서 별킹제에 대한 좋은 후보물질일 것으로 생각된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0004] 본 발명의 목적은 짧은 조작 기간 내에 높은 수분 제거율 및 발열량을 얻을 수 있는 탈수 슬러지의 생물건조방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0005] 본 발명은 상술한 목적을 달성하기 위해, 커피 찌꺼기 및 탈수 슬러지를 혼합하는 단계; 및 혼합물의 생물건조를 수행하는 단계를 포함하는 탈수 슬러지의 생물건조방법을 제공한다.

[0006] 본 발명에서 커피 찌꺼기는 별킹제로서 사용될 수 있다.

[0007] 본 발명에서 커피 찌꺼기는 수집하여 105±10℃에서 1±0.5일 동안 건조시킨 후 사용할 수 있다.

[0008] 본 발명에서 탈수 슬러지 및 커피 찌꺼기는 습량 기준으로 4±1:1의 중량비율로 혼합할 수 있다.

[0009] 본 발명에서 커피 찌꺼기의 함수율(MC)은 3±2 wt%, 휘발성 고형물(VS) 함량은 97±2 wt%, 밀도는 0.4±0.2 g/cm³, 고-발열량(HHV)은 22,800±500 kJ/kg, 저-발열량(LHV)은 22,000±500 kJ/kg, 용존 유기 탄소(DOC) 함량은 30±5 mg/g, 다당류 함량은 25±5 mg/g, 단백질 함량은 0.4±0.2 mg/g, C 함량은 51±5 wt%, H 함량은 7±2 wt%, N 함량은 2±1 wt%, S 함량은 0.3±0.2 wt%, O 함량은 35±5 wt%일 수 있다.

[0010] 본 발명에서 생물건조는 생물건조 반응기에서 수행될 수 있다.

[0011] 본 발명에서 생물건조 반응기는 혼합물 더미를 수용하는 단열 및 밀폐된 반응 용기, 반응 용기의 상부 공간에 충전되는 충전제, 반응 용기의 하부에 설치되는 천공판, 반응 용기의 하부와 연결되는 공기 공급라인, 공기 공급라인과 연결되는 공기 공급기, 공기 공급라인에 설치되는 탈습기, 반응 용기의 상부와 연결되는 가스 배출라인, 가스 배출라인에 설치되는 응축기, 가스 배출라인에 설치되는 가스 분석기, 반응 용기에 설치되는 온도 센서를 구비할 수 있다.

[0012] 본 발명에서 생물건조 중에 혼합물 더미를 4±2일마다 뒤집을 수 있다.

[0013] 본 발명에서 생물건조의 조작 기간은 8±2일일 수 있다.

[0014] 본 발명에서 생물건조 중에, 45℃ 이상의 고온 기간은 5일 이상, 최고 온도는 65℃ 이상, 8일째에 온도 누적(TC)은 200℃·일 이상, 최대 CO₂ 농도는 7.5 vol% 이상일 수 있다.

[0015] 본 발명에서 생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 함수율은 50 wt% 이하, 중량 손실 비율은 60% 이상, 수분 제거

율은 70% 이상, 휘발성 고형물 손실률은 40% 이상, 건조 속도는 0.5 kg/일 이상일 수 있다.

- [0016] 본 발명에서 생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 조작 분류 단위(OTU)는 2000 이하, Chao1의 군집 풍부도 지수는 2000 이하, Shannon의 다양성 지수는 4 이하일 수 있다.
- [0017] 본 발명에서 생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 저-발열량(LHV)은 9,000 kJ/kg 이상일 수 있다.
- [0018] 본 발명에서 생물건조를 거친 혼합물은 고체 연료로 이용될 수 있다.

발명의 효과

- [0019] 본 발명에 따라 높은 DOM 농도와 BVS 함량 및 열 함량을 갖는 SCG를 DS 생물건조용 벌킹제로서 사용함으로써, 긴 고온 기간 및 높은 미생물 활성을 통해, 짧은 조작 기간 내에 높은 수분 제거율을 얻을 수 있다. SCG를 이용한 생물건조 제품의 LHV는 기존 벌킹제를 이용한 생물건조 제품보다 높아서 고-에너지 고체 연료의 생산이 가능하다.

도면의 간단한 설명

- [0020] 도 1은 슬러지 생물건조용 실험장치 구성을 나타낸 것이다.
 도 2a는 생물건조 더미의 온도 프로파일, 도 2b는 온도 누적, 도 2c는 생물건조 반응기로부터의 출구 가스 중 CO₂ 농도를 나타낸 것이다.
 도 3은 여러 가지 벌킹제를 이용한 생물건조 중에 MC(도 3a) 및 VS(도 3b) 변화를 나타낸 것이다.
 도 4는 AS, SCG 및 SD를 이용한 DS의 생물건조 중에 DOC(도 4a), 용존 다당류(도 4b) 및 용존 단백질(도 4c)의 함량 변화를 나타낸 것이다.
 도 5는 주 좌표 분석(PCoA)에 기초한 박테리아 군집 구조의 계통도 3-D 투영을 나타낸 것이다.
 도 6은 3개 Trial의 DS 생물건조 중에 문 레벨(phylum level)에서의 박테리아 군집을 나타낸 것이다.
 도 7은 속 레벨에서 Trial A, B 및 C의 미생물 군집 구조의 변화를 나타낸 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0021] 이하, 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세하게 설명한다.
- [0022] 본 발명에 따른 탈수 슬러지의 생물건조방법은 크게 구분하여 혼합 단계 및 생물건조 단계로 구성되고, 구체적으로 커피 찌꺼기 및 탈수 슬러지를 혼합하는 단계; 및 혼합물의 생물건조를 수행하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0023] 탈수 슬러지(DS)는 폐수처리장에서 발생된 농축 슬러지를 기계적으로 탈수하여 얻어지는 함수율 80 내지 85 wt%의 슬러지이다. 커피 찌꺼기(SCG)는 탈수 슬러지의 생물건조에서 매우 유용한 벌킹제로서 사용될 수 있다. 벌킹제(bulking agent)는 탈수 슬러지와 혼합되어 자유 공기 공간(FAS)을 향상시키고 초기 함수율을 최적 범위로 조절하는 역할을 한다. 커피 찌꺼기는 에스프레소 또는 수용성 커피의 생산 중에 발생하는 고체 잔류물일 수 있다. 커피 찌꺼기는 커피숍 등에서 수집하여 105±10℃에서 1±0.5일 동안 건조시킨 후 사용할 수 있다.
- [0024] 커피 찌꺼기의 함수율(MC)은 3±2 wt%, 휘발성 고형물(VS) 함량은 97±2 wt%, 밀도는 0.4±0.2 g/cm³, 고-발열량(HHV)은 22,800±500 kJ/kg, 저-발열량(LHV)은 22,000±500 kJ/kg, 용존 유기 탄소(DOC) 함량은 30±5 mg/g, 다당류 함량은 25±5 mg/g, 단백질 함량은 0.4±0.2 mg/g, C 함량은 51±5 wt%, H 함량은 7±2 wt%, N 함량은 2±1 wt%, S 함량은 0.3±0.2 wt%, O 함량은 35±5 wt%일 수 있다. 이와 같이, 높은 DOM 농도와 BVS 함량 및 열 함량을 갖는 SCG를 DS 생물건조용 벌킹제로서 사용함으로써, 긴 고온 기간 및 높은 미생물 활성을 통해, 짧은 조작 기간 내에 높은 수분 제거율을 얻을 수 있다.
- [0025] 혼합단계에서 탈수 슬러지 및 커피 찌꺼기는 습량 기준으로 4±1:1의 중량비율로 혼합할 수 있다.
- [0026] 생물건조는 생물건조 반응기에서 수행될 수 있다. 생물건조 반응기는 반응 용기, 충전제, 천공판, 공기 공급라인, 공기 공급기, 탈습기, 가스 배출라인, 응축기, 가스 분석기, 온도 센서 등을 구비할 수 있다.
- [0027] 반응 용기는 혼합물 더미를 수용하는 단열 및 밀폐된 용기로서, 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA) 등의 플라스틱으로 제작될 수 있고, 예를 들어 내경 300±50 mm 및 높이 450±50 mm의 28±5 L 원통 용기로 제작될 수 있다. 반응 용기의 하부에는 공기 유입구가 설치될 수 있고, 반응 용기의 상부에는 가스 배출구가 설치될 수 있다. 반응

용기의 외표면에는 단열재가 설치될 수 있고, 단열재는 솜 등으로 구성될 수 있으며, 단열재의 두께는 100±20 mm일 수 있다.

- [0028] 충전제는 반응 용기의 상부 공간에 충전되어 열 손실을 방지하고 응축수를 흡수하는 역할을 할 수 있다. 상부 공간은 혼합물 더미가 충전되지 않은 빈 공간으로서, 예를 들어 용기 전체 부피 중 20±10%를 차지할 수 있다. 충전제는 솜 등과 같이 단열성 및 흡수성을 갖는 재료로 구성될 수 있다.
- [0029] 천공판은 반응 용기의 하부에 설치되어 슬러지 매트릭스를 지지하고 공기를 분배하는 역할을 할 수 있다. 천공판은 예를 들어 용기 하면으로부터 용기 전체 높이 중 15±10%에 해당하는 높이에 설치될 수 있고, 천공판의 하부에 빈 공간일 수 있다. 천공판은 플라스틱이나 금속 등으로 제작될 수 있고, 구멍의 직경은 예를 들어 0.1 내지 5 mm일 수 있으며, 구멍의 개수는 예를 들어 10 내지 100개일 수 있다.
- [0030] 공기 공급라인은 반응 용기의 하부에 설치된 공기 유입구와 일단이 연결될 수 있고, 타단은 공기 공급기와 연결될 수 있다. 공기 공급기는 공기 펌프 등으로 구성될 수 있다. 공기 공급라인에는 공기 유량계 및 밸브 등이 설치될 수 있다. 생물건조 중에, 공기 유속은 4±1 L/min일 수 있다.
- [0031] 탈습기는 공기 공급라인의 중간에 설치되어 탈습된 주위 공기를 반응기의 하부에 공급할 수 있다. 탈습기는 예를 들어 실리카 겔과 같은 흡습제를 포함할 수 있다.
- [0032] 가스 배출라인은 반응 용기의 상부에 설치된 가스 배출구와 연결되어 반응 용기로부터 가스를 배출할 수 있다. 배출되는 가스는 공기를 비롯하여, 생물건조 과정에서 발생된 이산화탄소 등을 포함할 수 있다.
- [0033] 응축기는 가스 배출라인에 설치되어 반응기의 상부로부터 배출된 출구 가스가 응축기를 통과하여 가스 분석기에 도달하기 전에 공기 흐름에 의해 운반된 수증기를 응축할 수 있다. 응축기는 냉각수가 흐르는 코일 형태의 냉각판으로 구성될 수 있고, 응축기에는 냉각수를 재순환시키는 시스템이 연결될 수 있다.
- [0034] 가스 분석기는 가스 배출라인에 설치되어 응축기를 통과하여 수증기가 제거된 출구 가스를 분석할 수 있다. 가스 분석기는 예를 들어 가스 센서, 가스 크로마토그래피(GC) 등으로 구성되어 이산화탄소 등을 분석할 수 있다.
- [0035] 온도 센서는 반응 용기에 설치되어 생물건조 더미 등의 온도를 측정할 수 있다. 온도 센서는 열전대 등으로 구성될 수 있다. 온도는 데이터 기록기에 기록될 수 있다.
- [0036] 생물건조 중에 혼합물 더미를 4±2일마다 뒤집을 수 있다. 뒤집기는 생물건조 반응기에서 형성된 BVS, 습도, 용존 산소 등의 구배를 제거함으로써 미생물 활성을 향상시킬 수 있다. 뒤집기는 손이나 도구 또는 기계 등을 이용하여 수행할 수 있다.
- [0037] 생물건조의 조작(운전) 기간은 8±2일로서, 본 발명의 생물건조 방법은 기존 생물건조 방법에 비하여 조작 기간이 매우 짧고, 이러한 짧은 조작 기간 내에 높은 수분 제거율을 얻을 수 있다.
- [0038] 생물건조 중에, 45℃ 이상(80℃ 이하)의 고온 기간은 5일 이상(8일 이하), 최고 온도는 65℃ 이상(80℃ 이하), 8일째에 온도 누적(TC)은 200℃·일 이상(300℃·일 이하), 최대 CO₂ 농도는 7.5 vol% 이상(10 vol% 이하)일 수 있다. 이와 같이, 본 발명의 생물건조 방법은 기존 생물건조 방법에 비하여 8일 이내에 고온 기간이 길고 온도 누적이 크기 때문에, 짧은 조작 기간 내에 높은 수분 제거율을 얻을 수 있다.
- [0039] 생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 함수율은 50 wt% 이하(30 wt% 이상), 중량 손실 비율은 60% 이상(80% 이하), 수분 제거율은 70% 이상(90% 이하), 휘발성 고형물 손실률은 40% 이상(60% 이하), 건조 속도는 0.5 kg/일 이상(0.8 kg/일 이하)일 수 있다. 이와 같이, 본 발명의 생물건조 방법은 기존 생물건조 방법에 비하여 짧은 조작 기간 내에 함수율을 현저하게 낮출 수 있고, 높은 중량 손실 비율, 수분 제거율, 휘발성 고형물 손실률 및 건조 속도를 얻을 수 있다.
- [0040] 생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 조작 분류 단위(OTU)는 2000 이하(500 이상), Chao1의 군집 풍부도 지수는 2000 이하(500 이상), Shannon의 다양성 지수는 4 이하(2 이상)일 수 있다. 이와 같이, 본 발명의 생물건조 방법은 기존 생물건조 방법에 비하여 단순한 미생물 군집 구조를 나타낸다.
- [0041] 생물건조 8일을 기준으로, 혼합물의 저-발열량(LHV)은 9,000 kJ/kg 이상(12,000 kJ/kg 이하)일 수 있다. 이와 같이, 본 발명의 생물건조 방법은 기존 생물건조 방법에 비하여 높은 저-발열량(LHV)을 나타낼 수 있다.
- [0042] 생물건조를 거친 혼합물(생물건조 더미)은 우수한 발열량을 가져서 고체 연료로 유용하게 이용될 수 있다.
- [0043] 이하, 실시예를 들어 본 발명을 더욱 상세하게 설명한다.

[0044] [실시에]

[0045] 본 실시예에서는 DS 생물건조용 벌킹제로서 SCG 이용의 실현가능성을 조사하였고, 그 성능을 2개의 다른 벌킹제인 AS 및 SD와 비교하였다. 온도, 출구 가스 중 CO₂ 농도, 수분 제거율, VS 분해율 및 용존 유기물(DOM) 변화를 모니터링하였다. 추가 비교를 위해, 3개의 벌킹제를 이용한 DS 생물건조의 물질 및 열 수지를 확립하였다. 추가적으로, 생물건조 중에 성장된 미생물 군집을 파이로시퀀싱(pyrosequencing)으로 분석하였다. 생물건조 제품의 연료 특성을 조사하기 위해, 고-발열량(HHV) 및 저-발열량(LHV)을 또한 측정하였다. 이러한 조사에 근거하여, SCG가 DS 생물건조용으로 우수한 벌킹제인 것으로 결론 내렸다.

[0046] 1. 재료 및 방법

[0047] 1.1. 원료의 특성

[0048] DS는 한국 용인에 있는 폐수처리장의 벨트 프레스 설비로부터 얻었다. 본 실시예에서는 3개의 벌킹제를 준비하여 사용하였다. SD는 한국 용인의 전통시장에서 구입하여 추가 처리 없이 사용하였다. SCG는 지역 커피숍에서 수집하여 105℃에서 밤새 건조시켰다. 공기-건조 슬러지(AS)는 주위 대기 하에 DS를 펼치고 MC가 일정하게 될 때까지 수주 동안 건조시킴으로써 준비하였다. 표 1은 본 실시예에서 사용된 원료의 특성을 나타낸 것이다.

표 1

[0049]

	DS	AS	SCG	SD
MC(wt%)	85.30 ± 0.50	9.75 ± 0.08	3.40 ± 0.01	9.56 ± 0.13
VS(wt%, 건량 기준)	75.62 ± 0.05	76.17 ± 0.07	97.98 ± 0.01	97.09 ± 0.12
밀도(g/cm ³)	1.04 ± 0.62	0.52 ± 0.01	0.43 ± 0.01	0.18 ± 0.01
HHV(kJ/kg)	17,225 ± 55	17,434 ± 58	22,843 ± 37	19,135 ± 25
LHV(kJ/kg)	598 ± 8	15,513 ± 52	21,988 ± 36	17,088 ± 23
용존 유기물(DOM, mg/g)				
DOC(습량 기준)	2.79 ± 0.02	11.38 ± 0.06	30.44 ± 0.50	6.01 ± 0.16
DOC(건량 기준)	18.96 ± 0.11	12.60 ± 0.07	31.52 ± 0.52	6.64 ± 0.18
다당류(습량 기준)	0.46 ± 0.00	8.60 ± 0.08	24.60 ± 0.03	7.33 ± 0.10
다당류(건량 기준)	3.16 ± 0.00	9.53 ± 0.08	25.47 ± 0.03	8.10 ± 0.12
단백질(습량 기준)	0.95 ± 0.06	1.15 ± 0.07	0.39 ± 0.11	0.05 ± 0.02
단백질(건량 기준)	6.49 ± 0.44	1.27 ± 0.07	0.40 ± 0.11	0.06 ± 0.03
원소 함량(wt%, 건량 기준)				
C	38.55	36.14	51.62	47.72
H	5.85	5.42	7.12	6.15
N	6.01	6.15	2.05	0.15
S	1	1.05	0.33	미검출(ND)
O	24.65	26.67	35.8	42.04

[0050] 1.2. 실험 장비 및 공정 조작

[0051] 본 실시예에서 사용된 실험실 생물건조 반응기(도 1)는 100 mm 두께의 습으로 단열된 폴리메틸메타크릴레이트(PMMA)로 만들어진 밀폐된 28.3 L 원통 용기(내경 300 mm, 높이 450 mm)로 구성하였다. 반응기의 헤드 공간은 열 손실을 방지하고 응축수를 흡수하기 위해 습으로 충전하였다. 천공판을 반응기의 바닥에 배치하여 슬러지 매트릭스를 지지하고 공기를 분배하였다. 탈습된 주위 공기를 반응기의 바닥에 공급하였다. 반응기의 상부로부터 배출된 출구 가스는 응축기를 통과하여 가스 분석기(Multi-Master, Sensoronic Co., Korea)에 도달하기 전에 공기 흐름에 의해 운반된 수증기를 응축시켰다. 열전대를 슬러지 더미(pile)의 중간에 설치하였고, 온도는 데이터 기록기 상에 매 1시간마다 기록하였다.

[0052] 생물건조는 공급원료 10 kg으로 충전된 상술한 반응기에서 수행하였다. 생물건조용 공급원료를 준비하기 위해, DS 및 각 벌킹제를 4:1(w/w, 습량 기준)의 혼합비율로 60분 동안 철저히 손으로 혼합하였다. 벌킹제인 AS, SCG 및 SD와 혼합된 DS는 Trial A, Trial B 및 Trial C로 라벨링하였다. 생물건조 중에, 공기 유속은 4 L/min[0.075 m³/kg 총 고형물(TS)/h]으로 유지하였다. 생물건조 더미는 매 4일마다 손으로 뒤집었고, MC, VS, DOM 및 미생물 군집을 분석하기 위해 뒤집은 후 샘플을 취하였다.

[0053] 1.3. 파이로시퀀싱 및 데이터 처리

- [0054] 토양용 FastDNA SPIN Kit(MP Biomedicals, Solon, OH, USA)를 이용하여 제조의 설명서에 따라 젖은 샘플 100-200 mg으로부터 DNA를 추출하였다. 효율적인 증합효소 연쇄 반응(PCR)을 위해, 추출된 DNA를 MO BIO PowerClean DNA Clean-Up Kit(MO BIO Laboratories Inc., Carlsbad, CA, USA)로 정제하였다. 16S 박테리아 rRNA 유전자의 V1-V3 영역에 대해 서로 다른 바코드 및 증폭 절차를 갖는 융합 프라이머는 기존에 기술되었다. PCR 생성물은 QIAquick PCR 정제 키트(Qiagen GmbH, Germany)를 이용하여 정제하였고, PCR 증폭산물(amplicon)의 농도는 분광 광도계(NanoDrop ND-1000, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)를 이용하여 정량화하였다. 파이로시퀀싱은 454 GS 주니어 시퀀싱 시스템(454 Life Science, Branford, CT, USA)을 이용하여 ChunLab, Inc.(Seoul, Korea)에 의해 수행되었다. 얻어진 시퀀스 데이터는 CLcommunity 소프트웨어(Chunlab, Inc., Korea)를 이용하여 분석함으로써 미생물 군집 구조를 나타냈다.
- [0055] 증폭산물의 여과 공정을 통해, 300 bp보다 짧고 25 미만의 평균 품질 값을 갖는 시퀀스를 제거하였다. EzTaxon-e 데이터베이스 및 BLASTN과 결합된 강력한 전역 쌍 시퀀스 정렬(robust global pairwise sequence alignment)을 de Gannes 등에 따른 시퀀싱 판독의 분류 할당을 위해 사용하였다. Cai 등이 했던 것처럼, 시퀀스를 97% 동일성으로 조작 분류 단위(OTU)에 할당하였다. 알파-다양성 지수(diversity index)(Chao1의 군집 풍부도 지수(community richness index) 및 Shannon의 다양성 지수) 및 커버리지 추정치(coverage estimate)를 Mothur 프로그램에 기초하여 계산하였다.
- [0056] 1.4. 샘플 수집 및 분석 방법
- [0057] 생물건조 중 원료 및 혼합물의 MC 및 VS 함량은 20 g 샘플을 3번 수집하여 Yang 등의 방법에 따라 측정하였다. 발열량 또는 HHV는 산소통 열량계(Parr 6400, Parr Instrument Co., Moline, IL, USA)를 이용하여 측정하였고, 저-발열량(LHV)은 He의 방법에 따라 계산하였다. 벌크 밀도는 공지된 부피로 샘플의 질량을 칭량함으로써 측정하였다. C, N, H, S 및 O의 원소 조성은 샘플을 분쇄기로 0.2 mm 미만으로 분쇄한 후 원소 분석기(Flash EA1112, Thermo Finnigan-CE Instruments, Italy)를 이용하여 분석하였다. 용존 유기 탄소(DOC) 및 고분자 물질(다당류 및 단백질)을 포함하는 DOM의 농도 측정을 위해, 2 g 샘플을 탈이온수 20 mL에 실온에서 2시간 동안 현탁시켰다. 현탁액을 4,000 rpm에서 15분 동안 원심분리하고, 0.45 μ m 나일론 주사기 필터(GE healthcare life sciences, Little Chalfont, UK)를 통해 여과하였다. 여과액 중 DOC 농도는 TOC 분석기(TOC-V CPH, Shimadzu, Japan)를 이용하여 분석하였다. 다당류 및 단백질 함량은 각각 표준물질로서 포도당을 이용한 페놀-황산 방법에 의해 그리고 표준물질로서 소 혈청 알부민(BSA)을 이용한 수정 Bradford 방법에 의해 측정하였다.
- [0058] 1.5. 물질 및 열 수치
- [0059] 물질 수지를 위해, 혼합물과 물 및 VS 함량의 증량 변화를 보고된 방법에 따라 결정하였다. 증발된 물(m_{H20}) 및 분해된 VS(m_{VS})의 질량은 하기 수학적 식 1 및 2를 이용하여 계산하였다. VS 소모량에 대한 수분 제거량의 비율로서 정의된 생물건조 지수(BI)는 하기 수학적 식 3에 의해 계산하였다.
- [0060] [수학적 식 1]
- [0061]
$$m_{H20} = m_i \cdot MC_i - m_f \cdot MC_f$$
- [0062] [수학적 식 2]
- [0063]
$$m_{VS} = m_i \cdot (1-MC_i) \cdot VS_i - m_f \cdot (1-MC_f) \cdot VS_f$$
- [0064] [수학적 식 3]
- [0065]
$$BI = m_{H20}/m_{VS}$$
- [0066] 수학적식에서, m_{H20} 는 증발된 물의 질량(kg), m_i 는 생물건조 전 생물건조 매트릭스의 질량(kg), MC_i 는 생물건조 전 생물건조 매트릭스의 함수율(wt%), m_f 는 생물건조 후 생물건조 매트릭스의 질량(kg), MC_f 는 생물건조 후 생물건조 매트릭스의 함수율(wt%), m_{VS} 는 생물건조 중 소모된 VS의 질량, VS_i 는 생물건조 전 생물건조 매트릭스의 휘발성 고형물 함량(건량 기준, %), VS_f 는 생물건조 후 생물건조 매트릭스의 휘발성 고형물 함량(건량 기준, %)이다.
- [0067] 생물건조 중 열 수치 계산에 사용된 공식을 표 2에 나타냈다. 전체 열 흐름을 하기 수학적 식 4에 나타냈는데, 발생한 열은 생물건조 시스템에서 소모된 열과 동일한 것으로 가정하였다. 계산의 단순화 및 정확성을 위해, 공기

흐름, 수분 증발 및 매트릭스 온도 증가에 의한 생물학적 열 발생 및 소모 사이의 차이는 전도, 복사 및 뒤집기로 인한 열 손실(Q_{loss})로 간주하였다(표 2).

[0068] [수학식 4]

[0069] $Q_{bio} = Q_{dryair} + Q_{watvap} + Q_{water} + Q_{solid} + Q_{evapo} + Q_{condu} + Q_{radi} + Q_{turning}$

[0070] 수학식 4에서, Q_{bio} 는 생물학적으로 발생된 열(kJ), Q_{dryair} 는 입구 건조 공기에 의해 소모된 현열(sensible heat)(kJ), Q_{watvap} 는 수증기에 의해 소모된 현열(kJ), Q_{water} 는 물에 의해 소모된 현열(kJ), Q_{solid} 는 건조 고형물에 의해 소모된 현열(kJ), Q_{evapo} 는 증발된 물에 의해 소모된 잠열(kJ), Q_{condu} 는 전도에 의한 열 손실(kJ), Q_{radi} 는 복사에 의한 열 손실(kJ), $Q_{turning}$ 은 뒤집기에 의한 열 손실(kJ)이다.

[0071] 표 2는 열 계산을 위해 사용된 식을 나타낸 것이다.

표 2

[0072]

	설명	계산식
열 발생	BVS 분해에 의해 방출된 열	$Q_{bio} = H_i \cdot m_i \cdot (1-MC_i) - H_f \cdot m_f \cdot (1-MC_f)$
열 소모	건조 공기의 현열	$Q_{dryair} = m_{air} \cdot C_{dryair} \cdot (T_m - T_a)$
	수증기의 현열	$Q_{watvap} = m_{air} \cdot \omega \cdot C_{watvap} \cdot (T_m - T_a)$
	증발된 물의 잠열	$Q_{evapo} = m_{eva} \cdot L_{latwat}$
	물의 현열	$Q_{water} = m_{water} \cdot C_{water} \cdot \Delta T_m$
	건조 고형물의 현열	$Q_{solid} = m_{solid} \cdot C_{solid} \cdot \Delta T_m$
	뒤집기, 전도 및 복사에 의한 열 손실	$Q_{loss} = Q_{radi} + Q_{turning} + Q_{condu}$ $= Q_{bio} - (Q_{dryair} + Q_{watvap} + Q_{evapo} + Q_{water} + Q_{solid})$
계산을 위한 다른 식		
$\omega = (M_{H_2O}/M_{air}) \cdot [p_v/(P-p_v)]$, $p_v = p_{vs} \cdot RH$, $p_{vs} = 10^{[a/(T_a+c)+b]}$		
$L_{latwat} = [1093.7 - 0.5683 \times (T_m + 32) / 5 \times 9] \times (1055 / 455)$		
H_i 및 H_f 는 열량계로 측정하였다. Trial A, B 및 C에 대해, H_i 는 각각 17,208, 20,738 및 18,335 kJ/kg이었고, H_f 는 각각 15,589, 19,436 및 17,795 kJ/kg이었다.		

[0073] 표 2에서, H_i 는 생물건조 전 생물건조 매트릭스의 열 함량(kJ/kg), H_f 는 생물건조 후 생물건조 매트릭스의 열 함량(kJ/kg), m_{air} 는 건조 공기의 질량(kg), C_{dryair} 는 건조 공기의 비열(1.004 kJ/kg·°C), T_m 은 생물건조 매트릭스의 온도(°C), T_a 는 주위 온도(°C), ω 는 건조 공기 중 수증기의 중량 비율(kg/H₂O kg 건조 공기), C_{watvap} 는 수증기의 비열(1.841 kJ/kg·°C), ΔT_m 은 시간 요소에서 생물건조 매트릭스의 온도 변화(°C), m_{eva} 는 증발된 물의 질량(kg), L_{latwat} 는 수분 증발의 잠열(kJ/kg), m_{water} 는 생물건조 매트릭스 중 물의 질량(kg), C_{water} 는 물의 비열(4.184 kJ/kg·°C), m_{solid} 는 생물건조 매트릭스 중 건조 고형물의 질량(kg), C_{solid} 는 고형물의 비열(슬러지의 경우 1.046 kJ/kg·°C, 커피 찌꺼기 및 톱밥의 경우 2.2 kJ/kg·°C), Q_{loss} 는 전도, 복사 및 뒤집기에 의한 열 손실의 합(kJ), M_{H_2O} 는 물의 몰 질량(18 g/mol), M_{air} 는 공기의 몰 질량(29 g/mol), p_v 는 물의 증기압(mm Hg), P 는 대기압(mm Hg), p_{vs} 는 물의 포화 증기압(mm Hg), RH 는 상대습도(%), a , b 및 c 는 Antoine 식에서의 무차원 상수로서 각각 2,238, 8.896 및 273이다.

[0074] 2. 결과 및 토의

[0075] 2.1. 원료의 특성

[0076] DS를 공기-건조하여 준비한 AS는 DS와 비교하여 상당히 다른 DOM 특성을 나타냈는데(표 1), 그 다당류 함량은 증가한 반면에, 단백질 함량은 감소하였다. 보고된 바와 같이, 용존 고분자 물질의 구조 및 조성은 식품의 공기-건조 중에 변화하였다. 유사하게, 긴 공기-건조 기간 중에 물이 증발됨에 따라, DS의 슬러지 플록(floc) 및 수화

층은 수축 및 분해된 것으로 추측되었다. 이후, 플록에 포함된 다당류가 방출되어 물에 용해되었고, 그 결과 다당류 함량이 높아졌다. 또한, 슬러지 중 용해성 단백질은 공기-건조 중에 미생물에 의해 가수분해되어 단백질 함량이 감소한 것으로 추측되었다.

[0077] 표 1에 나타난 바와 같이, SCG 및 SD의 VS 함량, HHV 및 C 함량은 DS 및 AS보다 훨씬 높았다. 단백질은 DS의 주요 DOM이었고, 그 농도는 다당류 농도의 거의 2배이었다. 이것은 슬러지 처리장에서 DS 생물건조를 수행한 Zhang 등에 의해 보고된 DS의 DOM 특성과 유사하였다. 3개의 별킹제에서, 다당류는 전체 DOM의 80%를 넘게 차지하였다. 3개의 별킹제 중에서, SCG는 가장 높은 함량의 DOC 및 다당류를 나타냈다. DS 생물건조용 별킹제로 자주 사용되었던 SD는 무시할만한 단백질 함량과 함께 낮은 DOM 함량을 나타냈다. AS의 DOM 함량은 3개의 별킹제 중에서 중간이었다. DOM은 고상 유기물보다 미생물에 의해 더욱 쉽게 이용되는 것으로 고려된다. 따라서 SCG는 별킹제로 사용될 경우 DS 생물건조를 가속화시킬 수 있는 것으로 예상되었다. 또한, SCG의 높은 함량의 C(51.62 wt%, 건량 기준) 및 VS(97.98 wt%, 건량 기준) 및 HHV(22,843 kJ/kg)는 생물건조 제품의 연소에 유리할 것이다.

[0078] 2.2. 온도 및 CO₂ 변화

[0079] 온도는 수분 증발 및 VS 분해에 영향을 미치기 때문에 생물건조 공정에서 중요하다. 생물건조 공정을 더욱 명확하게 설명하기 위해, 16일 생물건조를 4개의 단계로 구분하였고, 이 기간 중에 매트릭스를 3번 뒤집었다. 온도가 유도기 없이 급격히 증가하였지만, 서로 다른 별킹제를 이용한 생물건조의 온도 프로파일은 아주 달랐다(도 2a). AS가 별킹제로 사용되었을 때(Trial A), 온도는 34시간 후에 68.1°C의 피크에 도달하였고, 고온 기간(≥ 45°C)이 약 2.5일 동안 계속되었다. 이후 온도는 첫 번째 뒤집기 전에 약 35°C의 낮은 수준까지 점차 감소하였다. 첫 번째 뒤집기 후에, 온도는 약간 다시 상승하였다(32.3°C). 두 번째 뒤집기 후에도 온도가 더 이상 증가하지 않았기 때문에, Trial A의 생물건조는 8일째에 중단된 것으로 생각되었다. 별킹제로서 SCG를 이용한 Trial B에서, 고온 기간은 5.8일 동안 지속되었고, 이것은 Trial A보다 훨씬 길었다. 4.5일째에 68.3°C의 두 번째 온도 피크 이후에, Trial B의 온도는 두 번째 뒤집기 전에 실온까지 점차 감소하였다. Trial A와 유사하게, 두 번째 뒤집기가 온도 프로파일에 주목할만한 영향을 미치지 않았기 때문에, Trial B의 생물건조도 8일째에 완료된 것 같았다. 이 조작 기간은 다른 연구보다 훨씬 짧았다. 별킹제로서 SD를 이용한 Trial C는 가장 낮은 온도 피크(61.7°C) 및 단계 1에서 가장 짧은 고온 기간(1.8일)을 나타냈다. 그러나, Trial C의 매트릭스 온도는 4일째 첫 번째 뒤집기 후에 다시 상승하였고 11일째에 50.6°C의 피크 온도에 도달하였다. 이후 온도는 다른 Trial보다 더 서서히 감소하여 생물건조의 종료 시에 약 30°C에 도달하였다.

[0080] 생물건조 터미 및 주위 온도 사이의 온도 차이의 합으로서 정의된 온도 누적(TC, °C·일)은 하기 수학적 식 5에 의해 계산되었고 도 2b에 나타났다. 단계 1 및 2에서, TC는 Trial B, Trial A 및 Trial C의 순서로 컸다. 8일째에, TC는 Trial A, B 및 C에 대해 각각 162.7, 249.8 및 155.7°C·일이었다. 단계 3 및 4에서, Trial A의 TC는 16일째에 192.3까지 서서히 증가한 반면에, Trial B는 증가하지 않았고, Trial C의 TC는 6일 후에 꾸준히 증가하여 319.7°C·일에 도달하였다.

[0081] [수학적 식 5]

[0082]
$$TC = \sum_{i=1}^n (T_m - T_a) \cdot \Delta t$$

[0083] 수학적 식 5에서, TC는 온도 누적, Δt는 시간 요소(일)이다.

[0084] 모든 Trial에서 생물건조의 초기에 온도의 급격한 증가는 BVS의 미생물 분해 및 대사 열의 방출에 기인한 것으로 생각되었다. Trial A 및 B는 Trial C보다 단계 1에서 더 긴 고온 기간을 나타냈는데, 이것은 아마도 SD와 비교하여 AS 및 SCG가 더 쉽게 생분해 가능한 VS를 함유하여 미생물 활성이 높은 수준으로 유지되었기 때문이다. 긴 고온 기간 후에 BVS가 고갈된 후에, Trial A 및 B의 생물건조는 8일째에 종료되었다. Trial B의 고온 기간은 Trial A보다 훨씬 길었는데, 이것은 바이오-열 생산을 위해 더 많은 BVS가 SCG에 의해 공급되었음을 나타낸다. Trial C의 경우, SD에 함유된 리그노셀룰로오스가 쉽게 생분해 가능하지 않았기 때문에, 첫 번째 단계에서의 고온 기간은 DS 중 BVS에 기인한 것으로 생각되었다. Trial C의 두 번째 온도 피크는 셀룰로오스 분해에 대한 미생물 활성이 서서히 발달되었기 때문일 수 있었다. 긴 유도기는 셀룰로오스-분해 박테리아의 발달에 필요하였고, 그 결과 Trial C에서 생물건조 기간이 더 길었다(도 2). 세 번째 뒤집기 후에(단계 4), 매트릭스 온도는 감소하였는데, 이것은 BVS가 Trial C의 생물건조 시스템에서 고갈되었음을 나타낸다. TC 커브(도 2b)에 나타나듯이, Trial B의 TC는 다른 것들보다 더 짧은 시간에 높은 수준에 도달하였음이 명백하였다. Trial C의 경우, Trial B의 TC에 가깝게 도달하는데 적어도 12일이 걸렸다. 이러한 결과들로부터, DS 생물건조는 별킹제로

서 SCG를 이용함으로써 짧은 시간에 달성된 긴 고온 기간 및 높은 TC로 인해 크게 가속되었던 것으로 결론 내렸다.

[0085] 온도와 함께, 생물건조 반응기로부터의 출구 가스 중 CO₂ 농도를 생물건조 중에 미생물의 호흡 활성을 모니터링하기 위해 또한 측정하였다(도 2c). 생물건조의 초기에, 모든 Trial에서 출구 가스 중 CO₂ 농도는 4-5 vol%이었고 이후 급격히 증가하였다. Trial A에서, CO₂ 농도는 16시간째에 7.85 vol%의 피크에 도달하였다. SCG가 별킹제로 사용된 경우(Trial B), 3개의 CO₂ 피크가 첫 번째 4일에서 나타났는데, 즉 피크 농도는 0.3, 0.7 및 2.3일째에 각각 7.54 vol%, 7.76 vol% 및 6.25 vol%이었다. CO₂ 농도는 8일째 이후에 0.5 vol%보다 낮았다. Trial C의 첫 번째 CO₂ 농도 피크(7.28 vol%)는 약 16시간째에 나타났다. 첫 번째 뒤집기 이후, 출구 가스 중 CO₂ 농도는 4일째 0.92 vol%에서 11일째 4.24 vol%로 다시 상승하였다. 생물건조의 초기에 높은 CO₂ 농도는 새로운 DS에 대한 활발한 미생물 분해 활성 때문인 것으로 생각되었다. 첫 번째 뒤집기 이후 CO₂ 농도의 증가는 뒤집기가 생물건조 반응기에서 형성된 BVS, 습도, 용존 산소 등의 구배를 제거함으로써 미생물 활성을 향상시켰음을 나타냈다. 온도와 함께, CO₂(도 2c) 프로파일은 Trial A 및 B의 생물건조가 8일째에 종료되었음을 확인해주었다. Trial C에서, 단계 3 및 4의 CO₂ 프로파일은 미생물이 이 기간 중에 SD의 BVS를 이용하였음을 나타냈다.

[0086] 2.3. 수분 제거, VS 분해 및 중량 손실

[0087] MC 및 VS의 변화를 생물건조 중에 또한 모니터링하였고, 별킹제가 이러한 파라미터들에 강하게 영향을 주었던 것으로 밝혀졌다(도 3). 생물건조의 16일 후에, Trial A, B 및 C의 MC는 각각 70.14 wt%, 68.25 wt% 및 71.63wt%로부터 59.12 wt%, 41.35 wt% 및 57.69 wt%로 감소하였다. 별킹제로서 SCG를 이용한 Trial B의 경우, 매트릭스 온도는 4일째 첫 번째 뒤집기 이후 두 번째 피크로 급격히 증가하였고(도 2a), 혼합물의 MC는 4일째 62.56 wt%로부터 8일째 46.16 wt%로 감소하였다. 위에서 이미 언급한 바와 같이, 온도 및 CO₂ 농도가 기저 수준으로 되돌아 갔기 때문에(도 2), Trial A 및 B의 생물건조는 8일째에 종료된 것으로 나타났다. Trial C의 경우, 생물건조 더미가 계속 따듯함에 따라, MC는 생물건조의 16일 동안 꾸준히 감소하였다(도 3a).

[0088] Trial A, B 및 C의 VS는 생물건조의 16일에 걸쳐 각각 75.11%, 90.11% 및 88.58%로부터 69.06%, 86.17% 및 82.78%까지 점차 감소하였다. Trial A에서, 공급원료가 낮은 VS 함량을 함유했지만, VS는 다른 단계들보다 단계 1(75.11%로부터 71.23%)에서 더 빠르게 감소하였음이 명백하였다. Trial B의 경우, VS의 감소는 Trial A보다 더 길게 지속되었다(0일째 90.11%로부터 8일째 85.89%). 반면에, Trial C는 단계 1 및 2 중에 VS의 현저한 변화를 나타내지 못했지만(0일째 88.58%로부터 8일째 87.90%), VS는 단계 3 및 4 중에 빠르게 감소하였다(8일째 87.90%로부터 16일째 82.78%).

[0089] 16일 생물건조 중에 생물건조 더미의 중량 변화를 표 3에 나타냈다. Trial A, B 및 C의 전체 중량 손실 비율은 각각 51.25%, 66.71% 및 55.58%이었다. Trial A, B 및 C의 수분 제거 비율, 즉 생물건조 공급원료에 함유된 초기 수분에 대한 제거된 수분의 질량 비율은 각각 58.91%, 79.66% 및 64.24%이었다. Trial A는 초기 수분 중 58.91%만 제거하였고, VS 손실 비율은 38.62%이었으며, 대부분은 단계 1에서 완수되었다. 3개의 별킹제 중에서, SCG는 가장 높은 수분 제거율을 달성하였고, VS 손실률도 가장 높았다(초기 VS 중 43.45%). Trial B에서, 초기 수분 중 85% 이상이 0-8일 중에 높은 건조 속도(0.61 kg/일)로 제거되었다. 8-16일의 나중 단계에서 제거된 소량의 물(수분 제거 중 11.05%)은 주로 공기-건조에 의한 것으로 생각되었다. Trial C의 수분 제거 비율(64.24%)은 Trial A보다 높았지만, Trial B보다는 낮았고, Trial C의 건조 속도는 생물건조가 16일 동안 계속되었기 때문에 낮았다(단지 0.29 kg/일). 표 3은 3개의 별킹제를 이용한 생물건조 중에 중량 변화를 나타낸 것이다.

표 3

[0090]

Trial	A	B	C
전체 중량 손실[kg (%)]	5.120 (100.00)	6.671 (100.00)	5.558 (100.00)
단계 1[kg (%)]	2.987 (58.39)	2.901 (43.49)	1.685 (30.31)
단계 2[kg (%)]	1.005 (19.64)	2.870 (43.02)	1.085 (19.51)
단계 3[kg (%)]	0.589 (11.51)	0.470 (7.05)	1.610 (28.96)
단계 4[kg (%)]	0.535 (10.46)	0.430 (6.45)	1.180 (21.22)
전체 수분 제거(kg)	4.239 (100.00)	5.424 (100.00)	4.601 (100.00)
단계 1[kg (%)]	2.572 (60.67)	2.336 (43.07)	1.584 (34.43)
단계 2[kg (%)]	0.751 (17.72)	2.489 (45.89)	0.935 (20.32)

단계 3[kg (%)]	0.449 (10.59)	0.291 (5.37)	1.238 (26.91)
단계 4[kg (%)]	0.467 (11.02)	0.308 (5.68)	0.844 (18.34)
전체 VS 소모(kg)	0.886 (100.00)	1.243 (100.00)	0.957 (100.00)
단계 1[kg (%)]	0.415 (46.84)	0.573 (46.10)	0.107 (11.18)
단계 2[kg (%)]	0.254 (28.67)	0.375 (30.17)	0.132 (13.79)
단계 3[kg (%)]	0.149 (16.82)	0.178 (14.32)	0.366 (38.24)
단계 4[kg (%)]	0.068 (7.67)	0.117 (9.41)	0.352 (36.78)
중량 손실 비율(%)	51.25	66.71	55.58
수분 제거 비율(%)	58.91	79.66	64.24
VS 손실 비율(%)	38.62	42.18	38.12
건조 속도(kg/일) ^a	0.27	0.34	0.29
건조 속도(kg/일) ^b	0.42	0.61	0.29
BI ^a	4.78	4.37	4.81
BI ^b	4.97	5.09	4.81

a: 건조 속도 및 BI는 16일 생물건조에 대해 계산되었다.
b: 건조 속도 및 BI는 유효 생물건조 기간에 대해 계산되었다(Trial A 및 B의 경우 8일, Trial C의 경우 16일).

[0091] Trial A의 낮은 수분 제거율은 AS에 함유된 BVS가 생물건조에 불충분할 수 있었음을 나타냈다. Trial A의 상대적으로 짧은 고온 기간(도 2a)은 이러한 설명을 또한 뒷받침하였다. Trial C에서, 건조 속도는 전체 기간에 걸쳐 안정적이었지만, 가장 높은 수분 제거율(34.43%)은 그 중 온도가 높았던 단계 1에서 얻어졌다(표 3). AS 및 SD와 비교하여, SCG를 이용한 생물건조의 16일 동안 달성되었던 수분 제거율은 각각 27.94% 및 17.89% 높았다. 수분 제거량을 생물건조의 8일 동안 비교할 경우, Trial B(제거된 수분 4.82 kg)는 Trial A(3.32 kg) 및 C(2.51 kg)를 압도하였다. 달리 말하면, Trial B에서 SCG는 높은 건조 속도를 유발했고, 그 결과 생물건조 공정은 크게 가속되었다(8일째에 종료). 모든 결과가 증명하듯이, SCG는 짧은 시간에 DS의 효율적인 건조를 가능하게 하는 우수한 벌킹제이었다.

[0092] 제거된 VS에 대한 제거된 수분의 질량 비율인 BI를 본 실시예에서 또한 계산하였다. Ma 등은 DS 및 식품 폐기물의 공동-생물건조로부터 얻어진 BI가 3.11-4.86이었음을 보고했지만, Zhao 등은 약 6의 BI를 얻었다. BI는 공기 유속, 초기 MC, 벌킹제 및 생물건조 공급원료에 의해 영향을 받을 수 있었다. 표 3에 나타낸 바와 같이, 벌킹제로서 SCG를 이용한 Trial B에서는, 16일 생물건조의 BI가 4.37이었는데, 이것은 Trial A 및 C보다 약간 낮았다. 그러나, 첫 번째 8일 동안 Trial B의 BI(5.09)는 다른 두 Trial보다 높았다. Huilinir 및 Villegas는 7.10의 BI를 보고하였다. 본 실시예에서는, 그러나, 극히 높은 공기 유속(0.18 m³/kg TS·h)이 낮은 유기물 손실의 주된 이유인 것 같았고, 잦은 뒤집기(하루에 한번)도 높은 수분 제거율을 유발하였다.

[0093] 본 실시예에서 얻어진 DS 생물건조의 결과를 다른 문헌들과 비교하였다(표 4). 리그노셀룰로오스 바이오매스(예를 들어, SD, 짚, 왕겨, 대팻밥 및 밀 잔류물)는 랩-스케일 반응기 및 생물건조 시설 모두에서 DS 생물건조용 벌킹제로서 자주 이용되었다. 생물건조 기간은 통상적으로 2 내지 3주이었고, 25.9-68.2%의 수분 제거율이 기존 연구에서 달성되었다. Huilinir 및 Villegas는 8일 동안만 DS를 생물 건조하였고, 그러나 수분 제거율은 단지 7.6% -26.4%뿐이었다. Zhao 등 및 Li 등은 이전에 보고된 연구 중에서 가장 높은 수분 제거율(각각 68.2% 및 66.4%)을 보고하였다. 그러나, 이들의 생물건조는 다른 것보다 훨씬 길게 계속되었다(18-20일). 본 실시예의 Trial B는 생물건조의 8일에 초기 수분 중 71.16%를 제거하였다. 이 수분 제거율은 표 4의 모든 연구 중에서 가장 높았다. 벌킹제로서 SCG를 이용한 본 실시예에서, 생물 건조된 제품의 최종 MC(46.16 wt%)도 다른 연구들보다 명백히 낮았다. Zhang 등 및 Winkler 등의 최종 MC는 50 wt% 미만이었지만, 이들의 초기 MC 또한 낮았다(50-55 wt%). Zhao 등 및 Li 등은 70% 부근의 높은 수분 제거율을 달성하였지만, 이들의 조작 시간(18-20일)은 본 실시예보다 훨씬 길었다. 모든 추측을 포함하여, SCG가 DS 생물건조에서 뛰어난 성능을 나타냈음이 명백하였다. 표 4는 여러 가지 벌킹제를 이용한 DS 생물건조에 대한 연구를 나타낸 것이다.

표 4

[0094]

별칭제	초기 MC (wt%)	최종 MC (wt%)	조작 기간 (일)	폭기 흐름 (m ³ /kg TS · h)	중량 손실 (%)
SD 및 짚	69.7	51.0-56.6	20	0.05-0.1 ^a	47.7-55.0
대팻밥	68.23	59.5-63.0	8	0.06-0.18	11.3-20.3
밀 잔류물	64.5	50.2	18	0.056 ^a	53.6
SD	66.6	54.46	13	0.085 ^a	37.8
짚	68.3	49.78	13	0.085 ^a	48.1
SD+짚	66.6	55.4	13	0.085 ^a	38.3
SD+생물건조 제품	66.1	54.7	20	자동-제어	-
파쇄 고무	61.5	50.6	13	0.035	14.7
공기-건조 슬러지	68.0	54.2	13	0.035	40.9
SD	78.2	76.9	13	0.035	15.1
생물건조 슬러지	69.7	60.8	13	0.035	29.3
짚	69.1-72.0	63.5-66.8	8	0.08	-
왕겨	51	37.8-33.1	22	자동-제어	-
목재칩+생물 건조 제품	55	45	10-12	자동-제어	39.7
AS	70.14	62.40	8	0.075	40.00
SCG	68.25	46.16	8	0.075	57.70
SD	71.63	57.69	16	0.075	55.60
별칭제	수분 제거율 (%)	VS 손실률 (%)	BI (g/g)	스케일	문헌
SD 및 짚	57.5-68.2	31.0-36.7	5.94-6.05	랩-스케일	Zhao 등(2010)
대팻밥	7.6-26.4	4.8-9.6	4.94-7.10	랩-스케일	Huilinir, Villegas(2015); Villegas, Huilinir(2014)
밀 잔류물	66.4	45.9	4.55	랩-스케일	Li 등(2015)
SD	49.3	19.4	6.48	랩-스케일	Zhao 등(2011)
짚	62.3	31	5.88		
SD+짚	48.8	24.5	5.13		
SD+생물건조 제품	-	-	-	랩-스케일	Cai 등(2016)
파쇄 고무	18.2	-	3.12	랩-스케일	Yang 등(2014)
공기-건조 슬러지	52.9	22.3	7.41		
SD	16.5	11.7	5.92		
생물건조 슬러지	38.3	14	8.32		
짚	25.9-31.0	9.8-17.6	-	랩-스케일	Zhao 등(2012)
왕겨	-	-	-	생물건조시설	Zhang 등(2015)
목재칩+생물 건조 제품	50.8	26	2.39	생물건조시설	Winkler 등(2013)
AS	46.18	29.16	4.97	랩-스케일	본 발명
SCG	70.87	33.14	5.09	랩-스케일	본 발명
SD	64.24	38.12	4.81	랩-스케일	본 발명

a: 평균 공기 유속은 간헐적인 폭기 속도로부터 계산되었다.

[0095] 생물건조 시설에서, 처리 용량은 경제적 및 환경적 고려에서 모두 중요하다. 벌킹제의 밀도가 높을 경우 더 많은 슬러지가 로딩될 수 있다. 표 1에서 나타낸 바와 같이, SCG의 밀도(0.43 g/cm³)는 가장 흔히 사용된 벌킹제인 SD(0.18 g/cm³)보다 높았다. 그러므로, DS 및 SCG를 혼합하여 준비된 생물건조 공급원료는 더 적은 부피를 차지할 것이고, 이에 따라 다른 가벼운 벌킹제를 이용한 공급원료보다 더 많은 DS 로딩이 가능하다.

[0096] 2.4. DOM 변화

[0097] 상술한 바와 같이, 온도 및 CO₂ 프로파일은 3개의 벌킹제 중에서 명백히 달랐다(도 2). 이러한 차이는 생물건조 중에 BVS 함량뿐만 아니라 DOM 변화에 기인한 것으로 추정되었는데, 이는 DOM이 생물건조 중에 미생물에게 직접적인 영양원으로서 역할을 하는 것으로 알려졌기 때문이다. 본 실시예에서는, 생물건조 더미의 수-추출물에서 DOC 및 고분자 물질(다당류 및 단백질)의 농도를 분석하였다. 도 4에 나타낸 바와 같이, DOC 및 고분자 물질의 함량은 단계 1에서 고온 기간 후에 모든 Trial에서 증가하였다. 이후, Trial A 및 B의 DOC 및 고분자 물질의 함량은 16일째까지 높게 유지되었다. Trial C의 경우, DOC 및 용존 단백질의 함량은 온도에 따라 변화였고, 다당류 함량은 8일째 이후에 계속하여 감소하였다. Trial C의 DOC 및 용존 고분자 물질의 함량은 전체 생물건조 기간 중에 Trial A 및 B보다 낮았음이 또한 명백하였다. 그러나, 대량의 고분자 물질, 특히 다당류가 첫 번째 고온 기간 이후에 방출되었다(도 4b). 특히, Trial B는 고온 기간 중에 가장 높은 DOC 및 고분자 물질 함량을 나타냈다.

[0098] 표 1에 나타낸 바와 같이, AS에 함유된 DOC 및 용존 탄수화물의 농도는 SD보다 높았지만, SCG보다는 낮았다. 단계 1에서 Trial A의 최대 온도 및 고온 기간은 3개의 Trial 중에서 중간이었다. 4일째에 첫 번째 뒤집기 이후에, Trial A의 온도는 다시 증가하지 않았는데(도 2a), 이것은 Trial A의 BVS가 고갈되었음을 나타냈다. 흥미롭게도, 그러나, 도 4가 나타내듯이, DOC 및 고분자 물질 함량은 Trial A의 생물건조 더미에서 높았다. Trial A에서 4일째 이후에 DOM의 높은 함량은 단계 1에서 고온 기간 중에 미생물 세포 용해의 결과일 수 있었다. 벌킹제로서 SD를 이용한 Trial C에서 DOC 및 용존 다당류와 단백질의 함량은 다른 2개의 Trial보다 낮았고, 온도는 첫 번째 뒤집기 이후에 지속적이지만 서서히 증가하였다. 다당류 함량이 4일째부터 12일째까지 높았기 때문에, 미생물은 첫 번째 뒤집기 이후에 SD의 셀룰로오스 및 헤미-셀룰로오스를 이용한 것으로 생각되었다. 셀룰로오스 및 헤미-셀룰로오스의 생분해는 시간-소모적인 것으로 알려졌는데, 그 이유는 대부분의 셀룰로오스 및 헤미-셀룰로오스 분해 미생물이 서서히 성장하기 때문이다. Trial A와 달리, Trial C의 DOM 변화는 온도 프로파일과 일치하였다(도 2a 및 4). SCG는 많은 VS를 함유한 것으로 알려졌는데, 이중 대부분은 쉽게 생분해 가능한 물질(예를 들어, 탄수화물, 단백질 및 지질)이다. SCG가 DS 생물건조를 위해 공급될 경우, 높은 함량의 DOC 및 고분자 물질은 생물건조 더미의 온도를 순간적으로 증가시켰고, SCG의 풍부한 BVS는 고온 기간을 길게 유지하였다(도 2a). 그 결과, 대량의 물이 초기 8일에 제거되었다(표 3). 8일째 이후에, 생물건조 더미의 낮은 MC는 미생물 활성을 억제하였고, 따라서 DOM은 소모되지 않은 것 같았다.

[0099] 요컨대, SCG는 높은 함량의 DOC 및 고분자 물질을 갖는 우수한 재료이었다. SCG와 DS를 혼합함으로써, 고온 기간을 길게 유지하고 짧은 시간에 생물건조 매트릭스로부터 물을 제거하는 것이 가능하였다.

[0100] 2.5. 생물건조 중에 열 발생 및 이용

[0101] 3개의 벌킹제를 이용한 생물건조 중에 열 발생 및 이용은 표 2의 식을 이용하여 계산하였고 표 5에 요약하였다. 많은 연구는 DS 생물건조 혼합물의 연소열에 대해 Zhao 등에 의해 측정된 21,000 kJ/kg의 추정치를 이용하였다. 이 수치가 열 수지를 수립하는데 널리 사용되었지만, 생물건조 혼합물의 연소열은 화학 조성에 따라 변하는 것이 또한 명백하다. 본 실시예에서 생물학적 열을 정확하게 계산하기 위해, 생물건조 혼합물의 발열량을 측정하였고(표 2) Q_{bio}를 계산하는데 사용하였다. 표 5는 3개의 벌킹제^a를 이용한 생물건조의 열 수지를 나타낸 것이다(kJ).

표 5

[0102]

	Trial A	Trial B	Trial C
Q _{bio}	16,033 (100%)	21,582 (100%)	18,585 (100%)
Q _{dryair}	1,133 (7.06% ^b)	1,741 (8.07%)	2,311 (12.43%)
Q _{watvap}	103 (0.65%)	294 (1.36%)	308 (1.66%)
Q _{solid}	198 (1.23%)	323 (1.50%)	394 (2.12%)

Q_{water}	1,815 (11.32%)	1,776 (8.23%)	2,299 (12.37%)
Q_{evap}	10,471 (65.31%)	12,345 (57.20%)	11,660 (62.74%)
$Q_{loss} (Q_{radi}+Q_{turning}+Q_{condu})$	2,313 (14.43%)	5,103 (23.65%)	1,614 (8.68%)
a: Trial A 및 B의 열 수치는 초기 8일의 생물건조 데이터를 이용하여 계산되었고, Trial C의 경우 16일 데이터가 이용되었다. b: 생물학적 열(Q_{bio})에 대한 열 소모의 백분율			

[0103] 생물건조 중에, Trial A, B 및 C로부터 각각 16,033, 21,582, 및 18,585 kJ의 생물학적 열(Q_{bio})이 생성되었다. SCG의 높은 발열량 및 높은 BVS 함량으로 인해, Trial B의 Q_{bio} 가 가장 높았다. 생성된 Q_{bio} 는 주로 물을 증발시키고(Q_{evap}), 생물건조 혼합물에 함유된 물(Q_{water}) 및 건조 고형물(Q_{solid})의 온도를 증가시키며, 공기흐름에서 수증기($Q_{watervap}$) 및 건조 공기(Q_{dryair})를 가열하는데 소모되었으며, Q_{evap} , Q_{water} 및 Q_{solid} 는 Q_{bio} 중 각각 57.20-65.31%, 8.23-12.37% 및 1.23-2.12%를 차지하였다.

[0104] Trial A 및 B의 건조 효율(Q_{bio} 에 대한 Q_{evapo} 의 비율)은 Zhao 등 및 Ma 등의 범위 내(60.6-72.6%)에 있었고, Li 등(54.64%)보다 약간 높았다. 한편, Trial A 및 C보다 Trial B에서 더 많은 에너지가 수분 증발에 소모되었지만, Q_{bio} 의 23.65%가 복사, 전도 및 뒤집기에 의해 손실되었기 때문에, Trial B의 건조 효율은 다소 낮았다. 잘 알려진 바와 같이, 복사 및 전도에 의한 열 전달은 발열체의 온도에 지배된다. 도 2에 나타난 바와 같이, Trial B의 온도가 가장 높았고, 따라서 더 많은 열이 이러한 에너지-전달 메커니즘에 의해 손실된 것으로 생각되었다. 생물건조 반응기의 단열이 개선될 수 있을 경우, 열 손실은 감소할 것이고 더 많은 에너지가 수분 증발에 이용될 수 있다.

[0105] 2.6. 박테리아 군집

[0106] 생물건조는 고도의 역학 공정이고, 여기서 미생물이 중요한 역할을 한다. 본 실시예에서, 3개의 벌킹체를 이용한 DS 생물건조 중에 미생물 군집의 계통 발생적 구성을 파이로시퀀싱을 통해 분석하였다. 먼저, 얻어진 시퀀스는 Chao 1 및 Shannon의 다양성 지수를 계산하는데 사용되었다. 표 6에 나타난 바와 같이, DS 및 3개의 벌킹체로부터 취한 샘플의 유효 값(valid read)은 50,000 내지 74,000의 범위에 있었다. 대부분의 유효 값은 SD로부터 얻어졌고, SCG는 최소 값을 생성하였다. 따라서 SCG의 Chao 1 및 Shannon 지수는 생물건조 공급원료의 원료 중에서 이례적으로 낮았다. 또한, 97% 동일성을 갖는 OUT의 수치는 DS에서 가장 높았고 SCG에서 가장 낮았다. 생물건조 공급원료의 개별 성분이 넓게-변하는 군집 특성을 나타냈지만, 모든 Trial, 심지어 SCG를 함유하는 Trial B의 새로운(표 6에서 Day 0을 말함) 생물건조 공급원료의 OTU, Chao 1 및 Shannon은 서로 유사하였다. 이 유사성은 DS가 새로운 생물건조 공급원료에서 미생물의 주요 소스이었음을 나타냈다. 생물건조가 진행됨에 따라, 모든 Trial의 미생물 군집 구조가 낮아진 다양성 지수로 표시된 것처럼 단순해졌다. 특히, Trial B는 8일째에 가장 단순한 미생물 군집 구조를 나타냈는데, 아마도 그 이유는 생물건조 더미가 장기간의 고온을 겪었기 때문일 것이다. Trial A의 경우, 고온 기간이 짧았기 때문에, 다양성 지수는 약간 감소하였다. 4일째에, Trial C는 0일째보다 높은 다양성을 나타냈는데, 아마도 그 이유는 미생물 다양성이 긴 냉각기(1일째부터 4일째까지) 중에 회복되었기 때문일 것이다. 그렇지만, Trial C의 생물다양성은 두 번째 온도 피크 이후 감소하였는데, 이것은 고온 기간이 호열성 박테리아를 번성시킬 수 있었지만, 미생물 다양성을 감소시켰음을 나타냈다. 유사한 결과가 Cai 등 및 Zhang 등에 의해 수행된 생물건조 공정 중에도 관측되었다. 표 6은 생물건조 매트릭스의 다양성 지수를 나타낸 것이다.

표 6

Sample	Valid reads	OTUs ^a	Chao1	Shannon	Coverage (%)
AS	60,516	3,172	3,195	5.08	99.60
SCG	50,150	531	537	1.84	99.83
SD	78,581	3,215	3,274	5.72	99.57
DS	73,688	3,736	3,771	6.02	99.58
Trial A (Day 0)	64,711	3,351	3,385	5.99	99.57
Trial A (Day 4)	64,134	3,063	3,082	5.29	99.68
Trial B (Day 0)	61,646	3,413	3,442	5.99	99.56

Trial B (Day 4)	46,394	2,351	2,364	5.08	99.65
Trial B (Day 8)	45,616	1,043	1,056	3.82	99.48
Trial C (Day 0)	69,349	3,643	3,674	5.89	99.57
Trial C (Day 4)	52,488	3,521	3,552	6.41	99.45
Trial C (Day 12)	50,799	2,216	2,244	4.92	99.56
a: 조작 분류 단위.					

[0108] 도 5는 박테리아 군집의 계통 발생 근사도를 나타낸다. 표 6의 생태학적 지수로부터 예상된 바와 같이, 3개의 벌킹제 및 DS의 미생물 군집 구조는 매우 달랐고, 새로운 생물건조 혼합물 및 DS는 계통도에서 매우 가깝게 무리를 이루었는데, 이것은 DS가 미생물의 주요 소스이었음을 다시 나타냈다. 생물건조 중에, 미생물이 온도, 영양 조건, 경쟁자 등의 변화를 겪음에 따라, 미생물 군집은 변하였다. 4일째에, Trial B의 계통도 거리는 초기 공급원료에서 가장 멀었는데, 이것은 SCG에 함유된 풍부한 BVS가 초기 4일 중에 미생물 군집의 가장 빠른 변화를 유도하였기 때문이다. 이러한 결과로부터 추론되듯이, SCG는 DS 생물건조를 가속시키는데 우수하였다.

[0109] DS 생물건조 중에 미생물 군집을 더 잘 이해하기 위해, 얻어진 시퀀스는 문(phylum) 및 속(genus) 수준에서 동정되었다. 도 6에 나타낸 바와 같이, *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, *Chloroflexi* 및 *Firmicutes*는 생물건조 매트릭스에 존재하는 가장 지배적인 문이었다. 생물건조의 초기 4일 중에, *Chloroflexi*의 백분율은 모든 Trial에서 명백하게 감소하였는데, 즉 Trial A에서는 20.06%에서 7.93%로, Trial B에서는 20.20%에서 4.21%로, Trial C에서는 23.98%에서 14.73%로 감소하였다. Trial A 및 B에서, *Proteobacteria*의 백분율도 각각 0일째에 27.56% 및 27.29%에서 4일째에 10.55% 및 4.99%로 감소하였고, 반면에 Trial C에서는 전체 생물건조 공정 중에 거의 일정하게 유지되었다. 대조적으로, *Firmicutes*는 초기 4일 중에 Trial A(10.70%에서 56.40%로) 및 Trial B (9.99%에서 71.96%로)에서 명백하게 증가하였지만, Trial C에서는 많이 변하지 않았다. *Actinobacteria*는 Trial A 및 B 모두에서 주목할만한 변화를 나타내지 못했지만, Trial C에서는 0일째 15.33%에서 12일째에 45.28%로 증가하였다.

[0110] Trial A 및 B에서 풍부해진 *Firmicutes* 및 Trial C에서 풍부해진 *Actinobacteria*는 호열성 균으로 인식되었다. 생물건조 더미에서 온도 상승을 고려하면, 호열성 군집의 변화는 놀랍지 않았다. 그러나, 흥미롭게도, Trial C는 다른 미생물 군집의 변화를 나타냈다. Trial A 및 B 그리고 Trial C 사이의 문의 차이는 2개의 인자에 기인한 것으로 생각되었다. 첫째, 다른 벌킹제를 갖는 생물건조 혼합물은 미생물 성장에 다른 영양물을 제공하였다. 또 다른 가능성은 생물건조 매트릭스의 온도와 관련될 수 있었다. 도 2에 나타낸 바와 같이, Trial C의 온도는 Trial A 및 B와 다르게 변하였다. Trial C의 최대 온도 및 고온 기간은 Trial A 및 B보다 낮고 짧았다. 이러한 온도 환경의 차이로 인해, 다른 미생물 군집이 유도되었다.

[0111] 미생물 군집 구조의 심층 분석을 위해, 1%보다 높은 존재비(abundance)를 갖는 속이 선택되었다. 도 7에 나타낸 바와 같이, DS 및 초기 혼합물의 미생물 군집 구조는 0일째에 거의 동일하였다. 생물건조가 계속됨에 따라, *Bacillus*는 Trial A에서 0일째에 0.09%에서 4일째에 36.56%로 풍부해져서, 가장 풍부한 속이 되었다. 한편, 새로운 생물건조 공급원료에서는 거의 발견되지 않았던 *Cerasibacillus*, *Sinibacillus*, *Tepidimicrobium* 및 *Pseudogracilibacillus*를 포함하는 다른 호열성 속은 Trial A, B 및 C에서 상대 존재비가 각각 1.44%, 3.17%, 2.52% 및 3.84%로 증가하였다. Trial A와 유사하게, 벌킹제로서 SCG를 이용한 Trial B에서 *Bacillus*는 0일째에 0.1%에서 4일째에 35.94%로 증가하였고, 고온 기간이 8일째에 중단될 때까지 높은 수준으로 유지되었다. Trial A 및 B의 고온 단계에서 지배적인 속인 *Bacillus*는 중간 정도의 열적 환경(50-60°C)에서 번성하고 다양한 열 안정성 효소를 분비하는 것으로 알려져 있다. *Geobacillus*, *Planifilum*, *Streptomyces*, *Symbiobacterium*, *Thermobifida* 및 *Ureibacillus*와 같은 다른 호열성 박테리아도 풍부해졌다. *Thermobifida*는 식물 세포벽을 분해할 수 있는 것으로 보고되었고, SCG가 고 비율의 식물 세포벽 다당류를 함유하기 때문에, Trial B에서 풍부해졌다. *Streptomyces*는 고 레벨의 열 안정성 및/또는 알칼리-내성 크실라나아제(xylanase) 및 셀룰라아제를 생산하는 것으로 알려져 있는데, 이것은 *Streptomyces*가 Trial B에서 헤미-셀룰로오스 및 셀룰로오스의 대사에서 중요한 역할을 할 수 있었음을 나타낸다. Trial C에서, 고온 기간이 초기 1.8일 동안 계속되었지만, 미생물 군집 구조는 4일째에 급격한 변화를 겪지 않았다. *Comamonas*, *Aeromonas* 및 *Flavobacterium*을 포함하는 몇 개의 속만이 4일째에 2.39-3.55%의 상대 존재비로 풍부해졌다. 그러나, 미생물 군집 구조는 12일째에 크게 변했는데, 4개의 속인 *Streptomyces*(27.05%), *Chitinophaga*(7.80%), *Actinomadura*(6.59%) 및 *Pseudoxanthomonas*(5.51%)는 Trial C의 생물건조 더미에서 12일째에 지배적으로 되었다. 이러한 결과가 증명하듯이, Trial A 및 B의 호열성 박테리아는 Trial C보다 훨씬 빠르게 발달하였다. 한편, Trial A와 비교하여, Trial B에서 호열성 속이 더

풍부해졌는데, 이것은 SCG가 호열성 박테리아를 발달시키는데 AS보다 더 효과적이었음을 나타낸다.

[0112] 모든 이러한 결과들이 나타내듯이, 별킹제에 함유된 유기물질은 미생물 군집 구조의 차이를 유발하였다. 열 안정성 효소 활성을 갖는 다양한 호열성 박테리아가 Trial B에서 잘 발달하였기 때문에, SCG가 다른 2개의 별킹제보다 더 잘 수행하였다.

[0113] 2.7. 생물건조 제품의 발열량

[0114] 생물건조는 물을 제거하고 폐기물의 열 함량을 증가시키는 것을 목표로 한다. 이와 관련하여, 생물건조 혼합물의 HHV 및 LHV를 생물건조 중에 측정하였다. 표 7에서 나타낸 바와 같이, Trial A, B 및 C의 LHV는 생물건조의 16일 이후에 각각 36.3%, 96.8 및 73.9%로 증가하였다. SCG를 이용한 Trial B의 최종 제품의 LHV는 10,162 kJ/kg이었는데, 이것은 Trial A 및 C보다 훨씬 높았다. 유사하게, 8일째에(MC 46.16 wt%) Trial B의 LHV는 9,284 kJ/kg이었는데, 이것은 Trial A 및 C보다 각각 2.1 및 1.8배 컸다. 표 7은 생물건조 제품의 발열량을 나타낸 것이다.

표 7

[0115]

시간 (일)	Trial A(별킹제로서 AS)		Trial B(별킹제로서 SCG)		Trial C(별킹제로서 SD)	
	HHV(kJ/kg)	LHV(kJ/kg)	HHV(kJ/kg)	LHV(kJ/kg)	HHV(kJ/kg)	LHV(kJ/kg)
0	17,208±26	3,547±8	20,738±125	5,164±40	18,335±97	3,577±28
4	16,069±59	4,418±21	19,786±96	5,990±36	17,967±138	4,391±45
8	15,589±58	4,447±22	19,436±18	9,284±10	18,128±7	5,029±2
12	15,440±59	4,529±22	19,052±253	9,463±136	17,890±37	5,674±14
16	15,103±94	4,834±38	18,925±104	10,162±61	17,795±39	6,221±17

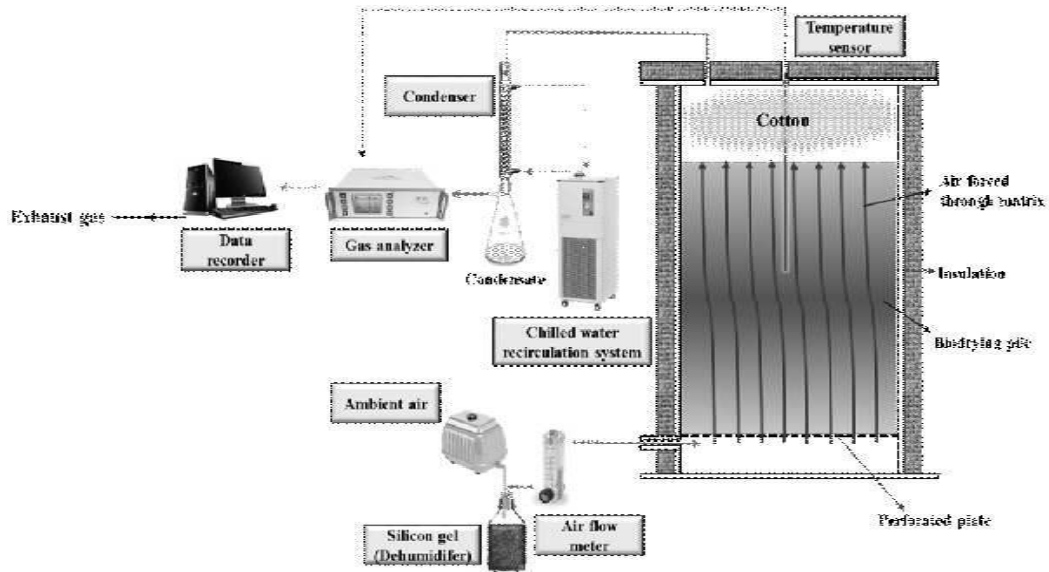
[0116] 생물건조 중에, HHV는 VS 소모로 인해 감소하였고, 반면에 LHV는 물이 제거되었기 때문에 증가하였다. Trial A에서 초기 공급원료의 HHV는 다른 2개보다 낮았는데, 이것은 AS가 SCG 및 SD와 비교하여 VS를 덜 함유하였기 때문이다(표 1). 바이오매스에서 VS 이외의 고형물은 불연성인 것으로 생각되었기 때문에, VS 함량은 생물건조 제품의 열 함량에서 중요하다. 그럼에도, 생물건조 제품은 4,000 kJ/kg보다 높은 LHV를 함유하였고, 이것은 자립 연소의 한도로 간주되었기 때문에, 모든 Trial의 생물건조 제품은 자립 연소에 충분하였다. HHV가 높았지만, MC가 여전히 높았기 때문에(도 3a), Trial C의 생물건조 제품의 LHV는 낮았다. Trial B의 경우, SCG의 LHV가 AS(Trial A) 및 SD(Trial C)보다 훨씬 높았기 때문에(표 1), 생물건조 제품의 LHV는 높았다. 그러므로 DS 생물건조에서 SCG의 사용은 생물건조를 가속시켰고(도 3 및 표 3) 생물건조 더미의 최종 MC를 낮추었을 뿐만 아니라, 고-에너지 생물건조 제품을 제공하였음이 명백하였다(표 7).

[0117] 3. 결론

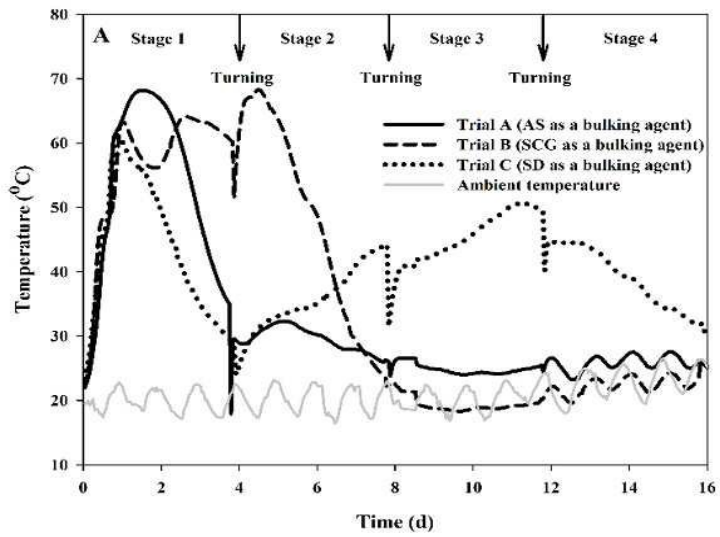
[0118] 본 발명에서는 SCG를 DS의 생물건조에 대한 지원제로서 처음으로 주목하였다. 다양한 화학 분석을 통해, SCG는 높은 BVS 및 열 함량을 갖는 유기 폐기물로서 평가 받았다. SCG가 DS 생물건조용 별킹제로서 사용되었을 경우, 긴 고온 기간(5.8일) 그리고 출구 가스 중 높은 CO₂ 농도에 의해 나타난 높은 미생물 활성이 관측되었다. 그 결과, DS의 생물건조는 높은 수분 제거율(70.87%) 및 뚜렷하게 짧은 조작 기간(8일)의 측면에서 향상되었다. 자주 이용되었던 별킹제인 AS 및 SD와 비교하여, 이러한 우수한 특징은 높은 DOM 농도 그리고 SCG에 함유된 풍부한 BVS에 의해 유도된 것으로 생각되었던 호열성 미생물의 빠른 발달에 기인하였다. SCG를 이용한 생물건조 제품의 LHV는 9,284 kJ/kg이었는데, 이것은 AS 및 SD를 이용한 생물건조 제품보다 각각 2.1 및 1.8배 컸다. 이러한 발견이 암시하듯이, SCG는 DS 생물건조용으로 유망한 별킹제이어서, 효율적인 수분 제거뿐만 아니라 고-에너지 고체 연료의 생산을 가능하게 하였다.

도면

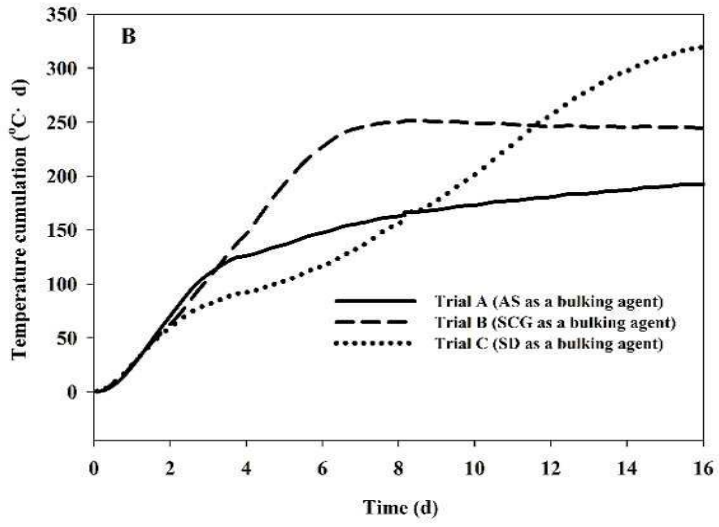
도면1



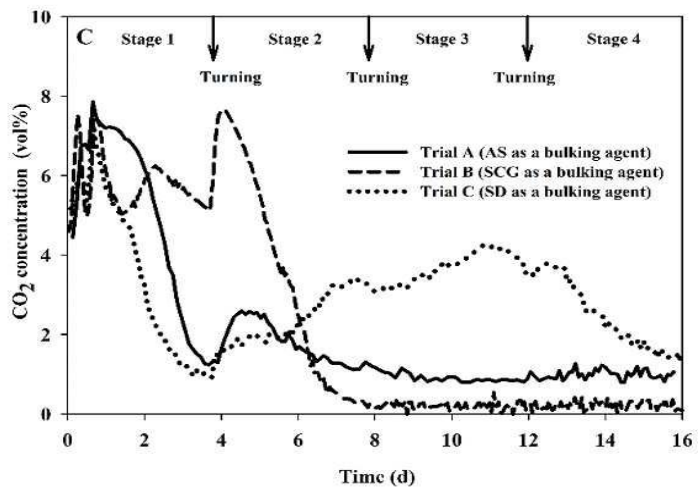
도면2a



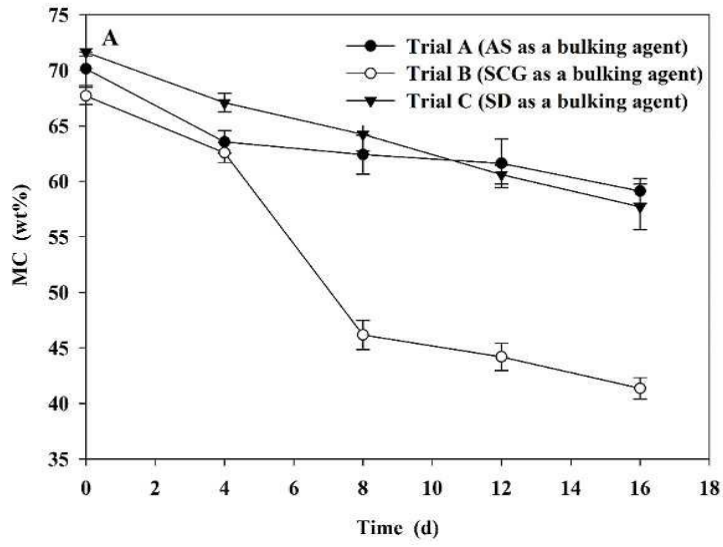
도면2b



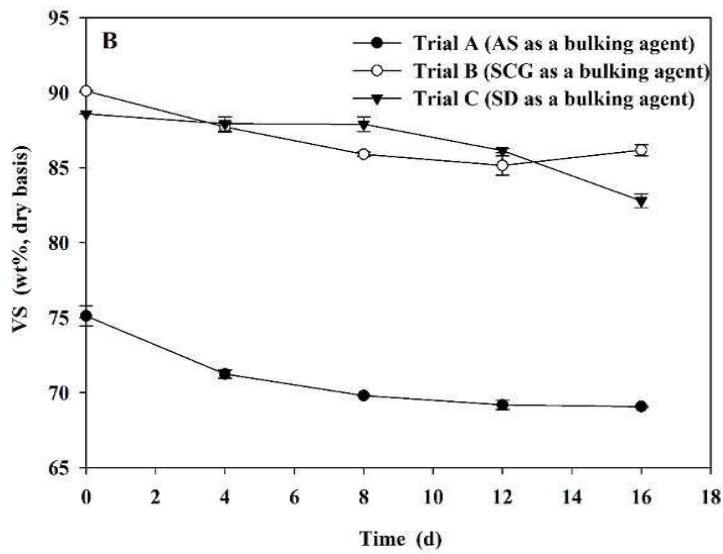
도면2c



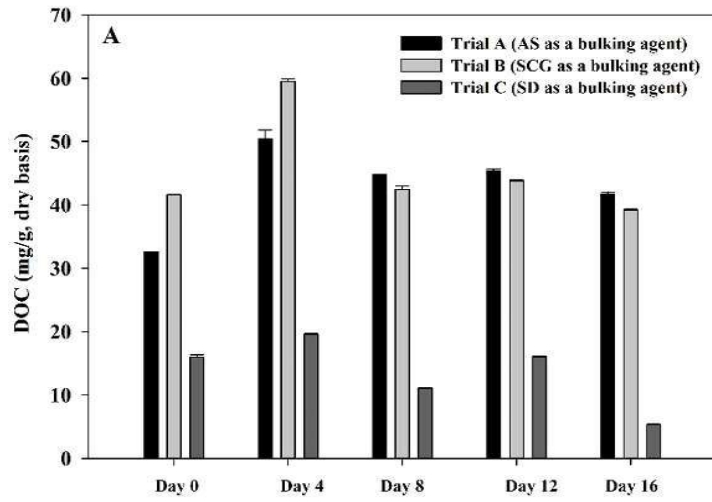
도면3a



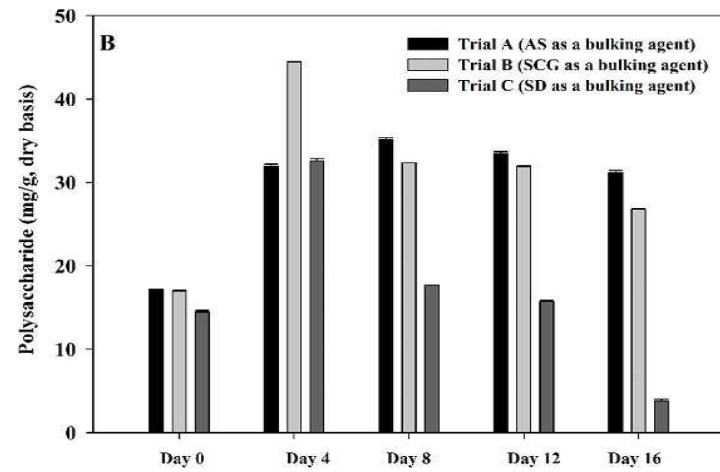
도면3b



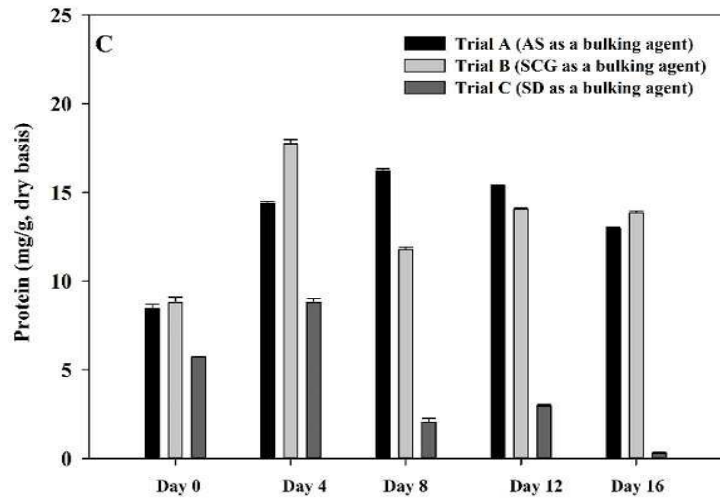
도면4a



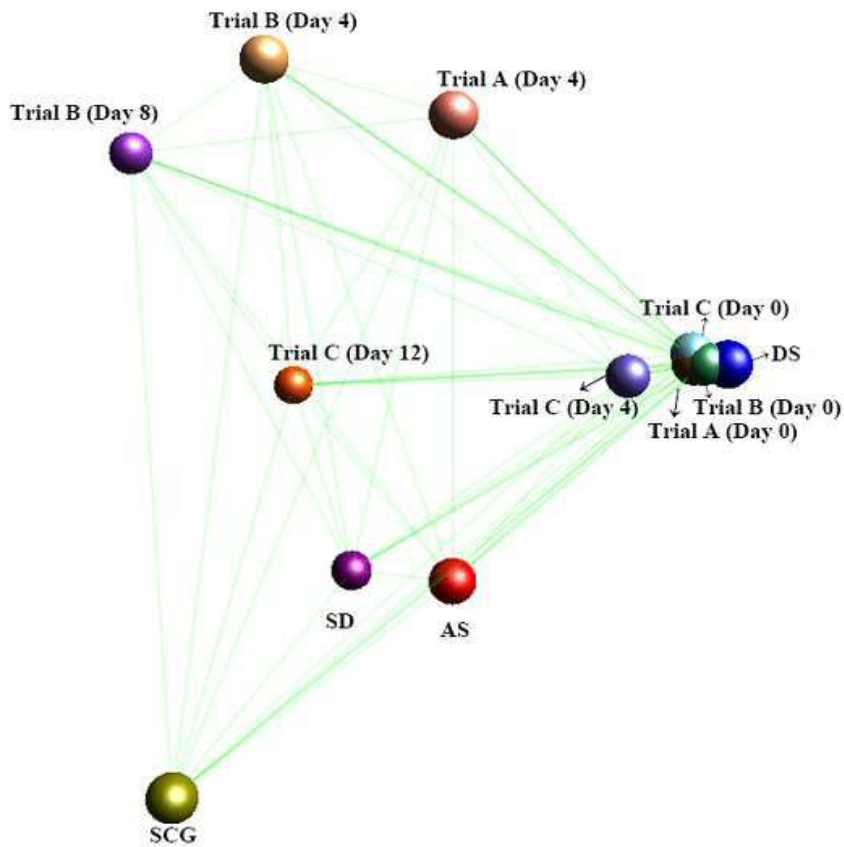
도면4b



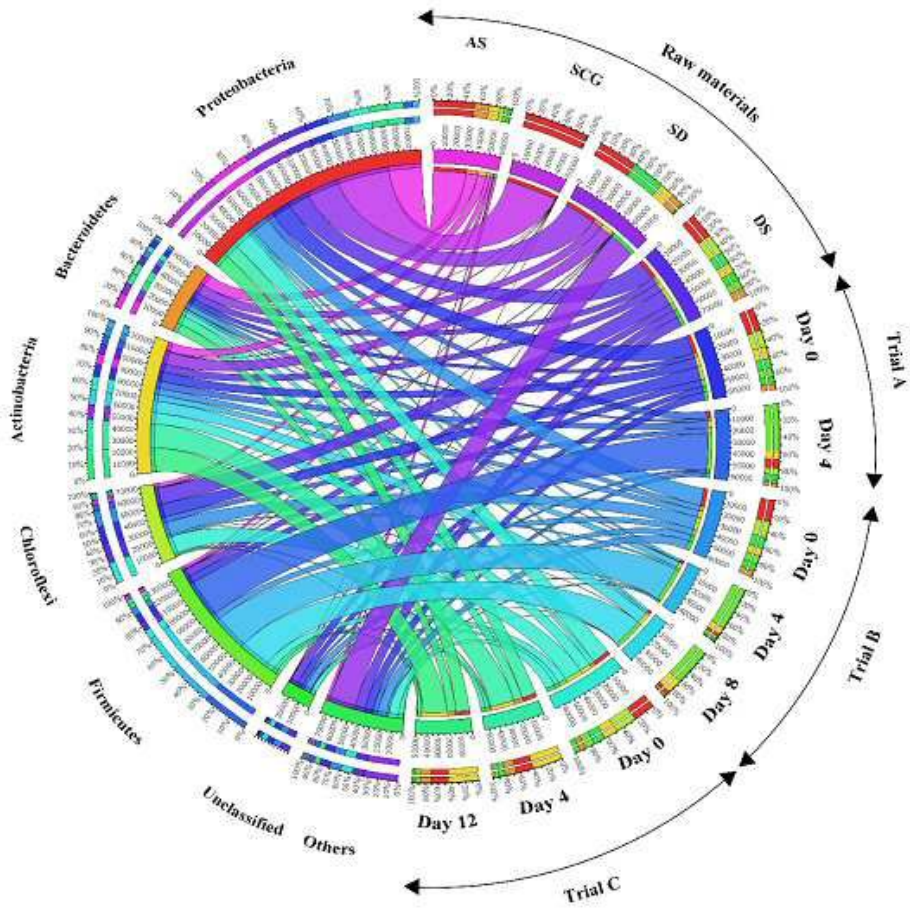
도면4c



도면5



도면6



도면7

