에너지공학, 제23권 제3호(2014)
Journal of Energy Engineering, Vol. 23, No. 3, pp.235~240 (2014)
http://dx.doi.org/10.5855/ENERGY.2014.23.3.235

반탄화를 통한 음식물쓰레기의 연료화에서 온도에 대한 영향 비교

김현숙 · 유재민 · 박대원†
서울과학기술대학교 에너지환경대학원 에너지환경공학과
(2014년 7월 9일 접수, 2014년 9월 10일 수정, 2014년 9월 12일 채택)

Effect of temperature on torrefaction of food waste to produce solid fuel

Hyunsook Kim · Jaemin Yoo · Daewon Pak†
Graduate School of energy and Environment, Seoul National University of Technology & Science
(Received 9 July 2014, Revised 10 September 2014, Accepted 12 September 2014)

요약

본 연구에서는 음식물쓰레기를 반탄화 하여 생성된 생성물의 특성 및 온도에 대한 영향을 비교하여 연료화 가능성을 파악하고자 하였다. 반응온도를 180℃~270℃ 조절하고 열전달방식을 질소가스 열전달방식과 열매체유 열전달방식으로 나누어 실험한 결과 생성물의 생산 수율과 수분함량은 온도가 높아짐에 따라 감소하였고 특히 240℃이상에서는 수분감소 뿐만 아니라 열적변화도 확인 할 수 있었다. 반응온도가 낮을수록 열매체유 열전달방식이 수분감소에 더 좋은 열전달 효율을 보였지만 온도가 높아질수록 그 차이는 미미한 것을 확인할 수 있었다. 발열량의 경우 초기 660 Kcal/kg 에서 질소가스 열전달방식 6,400 Kcal/kg 간접방식 6,890 Kcal/kg 으로 상승 되었고, 원소분석결과 반응온도가 상승할수록 반탄화 생성물의 탄소원소의 함량증가와 산소원소 함량 감소를 확인 하였으며 석탄밴드 분석결과 저급석탄에 가까운 H/C와 O/C의 범위를 나타내었다. 음식물쓰레기를 반탄화를 통하여 연료개질이 가능하다는 것을 확인 할 수 있었으며, 반응온도가 높아질수록 저급석탄에 더 가까워짐을 확인 할 수 있었다.

주요어 : 반탄화, 음식물쓰레기, 발열량, 석탄밴드

Abstract - In this study, the torrefaction of food waste was conducted to characterize its product, to find out effect of the operating temperature and to assess the feasibility of being used as fuel. The operating temperature was varid from 180~270℃ and heat was provided by using nitrogen gas or waste oil heat carrier. The solid yield and moisture content were reduced were reduced as temperature increased. The moisture content reduction and thermochemical conversion were observed at higher than 240℃. At low operating temperature, heat transfer efficiency was higher with wast oil heat carrier. As temperature increases, there was not difference in heat transfer efficiency of two different heating methods. The lower heating value product was increased from 660 to 6,400 Kcal/kg with nitrogen gas and 6,890 Kcal/kg with waste oil heat carrier. The elemental analysis indicates that, as temperature increases, the carbon content of product increases and oxygen content decreases. From the analysis of O/C and H/C, the torrefaction product was close to low grade coal. The characteristics of fuel converted from the food subsequent thermochemical treatment.

Key words : Torrefaction, Food waste, Heating value, Coal band

†To whom corresponding should be addressed.
The Graduate School of Energy and Environment,
Seoul National University of Science and Technology
Tel : 02-970-6595 E-mail : daewon@seoultech.ac.kr

1. 서 론

전 세계 인구증가 및 신흥경제국의 경제 발전에 따른 에너지 수요 급증으로 인하여 석유를 포함한 화석연료의 소비량은 계속적으로 증가하고 있으나, 아직 화석연료를 대체 할 수 있는 확실한 다른 에너지원의 개발은 미흡한 실정이다. 그 중 폐기물에너지화는 다른 신·재생에너지에 비해 단기간 내에 사용화 및 대량보급이 가능한 분야로, 국내의 경우 2008년 폐기물 에너지화 종합대책과 2009년 폐자원 및 바이오매스 에너지 대책의 실행계획을 수립하였으며, 2014년도 산업통상자원부에서 발표한 제 2차 에너지기본계획을 보면 2035년까지 신·재생에너지 보급 목표율 11% 설정하였으며 그중 폐기물 및 바이오매스 분야에 5.1%를 할당하였다.[1,2]

국민의 생활수준이 향상됨에 따라 생활폐기물의 발생량은 증가하고 있으며, 특히 음식물 쓰레기는 연간 3%씩 증가하고 있는 추세이다. 2011년 기준으로 일평균 13,537 ton의 음식물쓰레기가 발생하며, 이는 전체 생활 쓰레기의 27.7%에 해당한다. 음식물쓰레기는 수분이 80~85%에 달하고 유기성 폐기물로 부패하기 쉬운 특성을 가지고 있어 처리 처분에 많은 어려움이 있다. 또한 보관, 수거, 운반 과정에서 발생되는 악취와 침출수로 인하여 주변 환경을 오염시키고 다른 쓰레기와 혼합되면 일반 쓰레기까지 습윤 시키고 악취를 발생시켜 재활용성을 떨어뜨려 결과적으로 처리량을 증대시킨다.[3-5]

음식물쓰레기는 대향확보가 가능하고 유용한 유기성 자원임에도 불구하고 자원화 등에 따르는 기술적, 경제적 문제점과 상품으로서의 품질불량으로 인하여 재활용 측면에서 어려움을 겪고 있다. 사료화 방법은 음식물쓰레기와 이물질(이쑤시게, 부서진 유리조각 등)의 분리가 완전히 이루어지지 않을 경우, 이물질이 사료의 원료로 혼입되는 결과를 초래하여 가축의 내장기관에 치명적인 상처를 입힐 수 있는 위험과 음식물쓰레기의 부패에 따른 병원균 발생 등과 같은 근본적인 한계를 안고 있다. 퇴비화의 경우 음식물쓰레기가 함유하고 있는 염분과 염분 농도의 다양성에 따라 퇴비화 하였을 경우 퇴비의 품질을 보증하기 어려운 점이 있다. 그럼에도 불구하고 음식물쓰레기는 풍부한 유기성 성분을 가진 자원이며, 또한 건조될 경우 적당한 발열량을 가진 에너지원이다.[6]

반탄화(Torrefaction)는 반응온도 200~300℃ 범위의 무산소 조건에서 일어나는 바이오매스의 열화학적 전처리 공정으로, 부분적인 탈휘발분(Devolatilization) 및 열적 분해반응을 통하여 원래의 바이오매스가 지닌 질량의 70% 정도가 초기 에너지량의 90%를 보유하고 있는 Char의 형태로 남는다. 따라서 반탄화 반응을 통하여 생성된 Char는 원래의 바이오매스와 비교하여 에너지 밀도가 약 1.3배정도 증가하게 된다. 이러한 이유로 최근 여러 가지 바이오매스를 대상으로 한 반탄화 연구가 활발하게 진행되고 있다.[7]

하지만 반탄화를 이용하여 음식물쓰레기의 연료화에 관한 연구보다 온도를 500℃이상 오리는 탄화처리에 더많은 연구가 이루어 지고 있다. 이에 본 연구에서는 음식물쓰레기를 반탄화 하여 생성된 생성물의 특성 및 온도에 대한 영향을 비교하여 연료화 가능성을 파악하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 재료 및 반탄화 장치

시료는 서울시 S대학교 구내식당에서 발생된 음식물쓰레기를 대상으로 하였으며, 열매채유로 사용한 폐식용유 역시 동일한 곳에서 채취하였다. 시료가 균일한 조성을 가지도록 파쇄 하였으며 실험은 시료 채취일로부터 5일 이내 실시하였고, 부패에 의한 성상변화를 방지하기 위해 냉장보관 하였다. Table. 1에 본 실험에 사용된 음식물쓰레기의 물리·화학적 특성을 나타 내었다.

2-2. 반탄화 장치 및 실험방법

Fig. 1은 실험실 규모의 회분식 반탄화 장치의 모식도를 나타낸 것으로 실제 온도와 설정 온도의 오차

Table 1. Physicochemical characteristics of food waste

		Food waste
Proximate analysis (wt %)	Moisture	77.1
	Volatile matter	20.2
	Fixed carbon	1.6
	Ash	1.1
Elemental analysis (wt %) [1]	C	48.26
	H	5.68
	O	42.02
	N	2.55
	S	0.39
Lower Heating value (Kcal/kg) [1]		668

Note[1] Dry basis

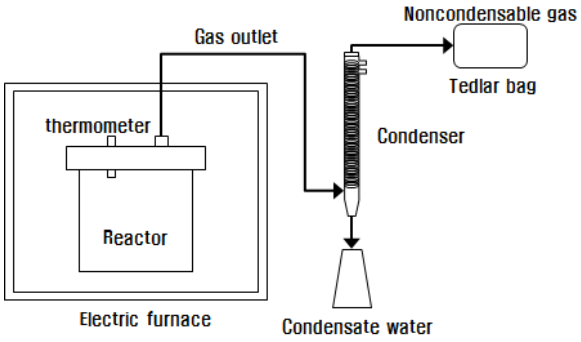

Fig. 1. Lab-scale torrefaction reactor

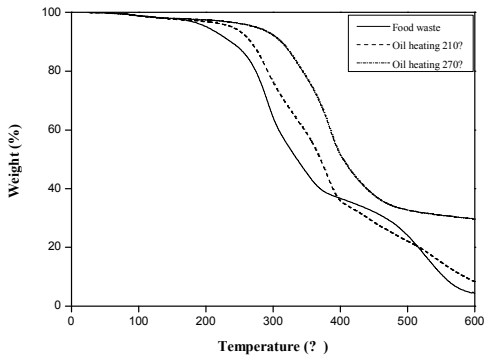

Fig. 2. TGA curves of raw material and torrefied product (Reaction time 60min, Dry basis)

범위를 최소한으로 줄이기 위하여 온도 조절 제어장치가 장착된 전기로(Electronic furnace)와 반응기(Reactor), 응축기(Condenser)로 구성되어 있으며, 테프론(Teflon)소재의 가스켓을 이용하여 반응기를 밀폐하였고, 반응기 내부 공기를 질소가스로 치환하여 실험하였다.

반탄화 온도조건(300℃ 이하)을 고려하여 반응온도를 180℃, 210℃, 240℃, 270℃로 하였으며, 충분한 반응이 일어 날 수 있도록 반응시간을 1시간으로 조절하여 실험하였다. 또한 열전달 방식별 반탄화 반응의 영향을 파악하고자 질소가스와 열매체유를 사용하여 실험을 진행하였다. 질소가스 열전달방식은 음식물쓰레기 100 g을 반응기에 넣은 후 질소가스로 반응기 내부를 치환 한 뒤 실험을 하였고, 열매체유 열전달방식은 음식물쓰레기100 g과 열매체유 200 ml를 혼합하여 반응기에 넣은 후 남은 반응기 공간을 질소로 치환하였다.

반응기 온도는 전기로를 사용하여 승온속도 5℃/min으로 조절하였고, 최종온도에서 반응시간 동안 유지한 후 실험을 종료 하였으며, 간접방식으로 생성된 반응물은 2,500 RPM에서 10 min동안 원심분리를 통하여 열매체유와 반응물을 분리하였다.

2-3. 분석항목

기초적인 특성 파악을 위해 공업분석은 ASTM D3172, D3174, D3175에 의해 실시하였으며, Leco AC 500을 이용하여 발열량을 측정하였다. 또한 원소분석기(MACRO, Elementar, German)에 의해 C, H, N, S을 측정하였다.

열중량분석은 건조한 시료를 분쇄하여 사용하였으며, 600℃까지 불활성조건 (N_2가스 주입)에서 측정하였다. 이 때 승온속도를 10℃/min으로 조절 하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 반탄화 온도에 따른 열중량분석 변화 및 연료성상 변화

Fig. 2는 건조한 음식물쓰레기와 반탄화 반응온도 210℃와 270℃에서 생성된 생성물의 TGA분석 그래프를 나타낸 것이다. 탈 휘발이 완료되는 280℃에서 음식물쓰레기는 23%의 무게 감소를 보이고 있고, 반응온도 210℃ 반응물은 18%, 반응온도 270℃반응물은 7%의 무게 감소를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 반탄화로 인하여 휘발분의 탈 휘발과 함께 일부 헤미셀룰로오스가 분해되었기 때문으로 보여 진다.[8]

불활성 조건이 종료되어 회분과 고정탄소만 남아있는 600℃에서는 음식물쓰레기는 대부분 무게 감소가 일어나 약 96%의 감소를 보이고 있으며, 반응온도 210℃ 반응물은 90%의 무게감소를 270℃ 반응물은 73%의 무게 감소를 보이고 있다.

반탄화 온도별 생성물의 기초특성을 Table. 2에 나타내었다. 반응온도가 상승할수록 고정탄소, 회분의 함량이 증가하는 경향을 보였지만, 측정된 값이 질소가스 열전달방식은 270℃에서 12%, 간접방식의 경우 8.6%로 wood briquette 의 경우 (반응온도 270℃, 반응시간이 1시간) 고정탄소가 38%로 측정(원시료 19%)되는 것과 비교 하면 측정된 값이 목재바이오매스보다 높지 않음을 확인 할 수 있었지만[9], 비목재

Table 2. Proximate analysis of torrefied product (Reaction time 60min)

			180℃	210℃	240℃	270℃
Proximate analysis (wt %)	N_2 Gas heating	Moisture	12.0	3.1	1.4	1.1
		Volatile matter	81.4	87.1	87.4	79.4
		Fixed carbon	2.3	4.6	5.1	12.3
		Ash	4.3	5.2	6.1	7.2
	Oil heating	Moisture	4.5	1.4	2.8	2.2
		Volatile matter	89.4	91.5	89.9	84.1
		Fixed carbon	2.1	3.1	2.5	8.6
		Ash	4.0	4.0	4.8	5.1

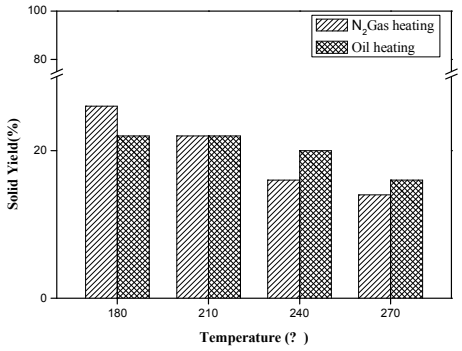

Fig. 3. Solid Yield of torrefied product (Reaction time 60min)

바이오매스인 water hyacinth의 경우 동일조건에서 13.09% 고정탄소 함유를 보이고 있다.[10] 회분의 증가는 반탄화가 진행될수록 대부분의 수분 감소로 인해 상대적으로 무기물 즉 회분의 비율이 높아진 것으로 보여 진다.[2] 휘발분의 경우 온도가 증가 할수록 상승 하였다가 270℃에서 다시 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 수분함량차이에 의한 상대적 비율이 달라졌기 때문으로 생각되어 진다.

실험 전 약 78%이던 음식물쓰레기의 수분함량이 반응온도가 180℃ 일 때 10%에 근접한 값을 보였으며, 온도가 상승할수록 1%에 가까운 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 열매체유 전달방식의 경우 180℃에서 이미 10% 미만의 함수율을 보이는 것을 보아 반응온도가 낮을 경우 질소가스 열전달방식보다 간접방식이 열전달에 더 효율적이라는 것을 확인 할 수 있었다.

3-2. 반탄화 온도에 따른 고형연료의 생성수율 변화

반탄화 후 각 온도별, 열전달방식별 반응물의 생성수율은 Fig. 2에 나타 내였으며, 반응 전 후의 형상은 Fig. 3에 나타 내였다. 반응온도가 높아질수록 생성수율은 저감하는 것으로 나타났으며, 이는 음식물쓰레기가 가지고 있던 약 78%의 수분이 방출된 것이 가장 큰 원인이며, 또한 240℃ 이상에서부터는 수분건조 후 휘발성분이 탈 휘발 되어 무게 감소가 일어 난 것으로 보여 진다. 열전달방식에 따라 큰 차이 없이 비슷한 수율을 얻을 수 있었으며, 180℃의 경우 수분배출이 더 많이 일어나 열매체유 전달 방식이 좀 더 낮은 수율을 보이고 있다.

Fig. 4은 반탄화 전과 후의 형상을 나타낸 것으로 온도가 높아짐에 따라 탄소성분이 고정되어 검정색에 가까운 것을 확인하였다.

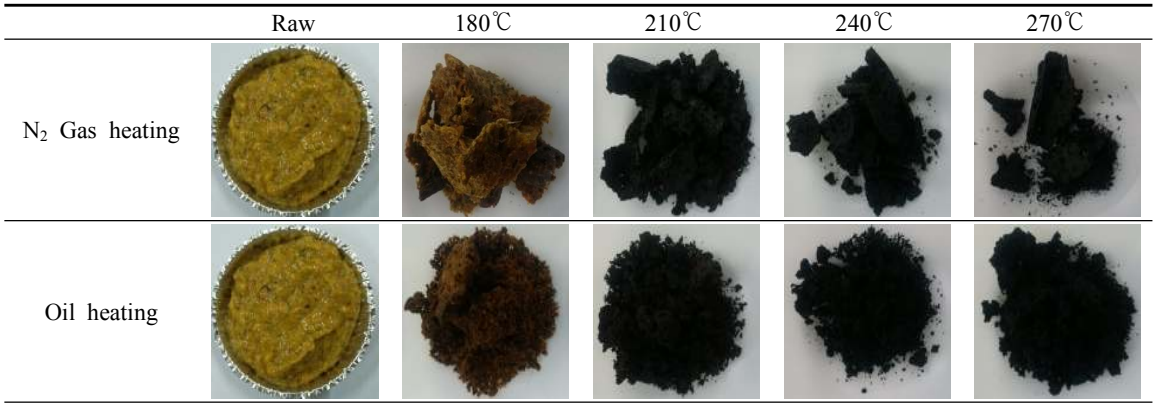

Fig. 4. Image of torrefied product (Reaction time 60min)

Table 3. Elemental analysis and lower heating value of torrefied product (Reaction time 60min)

		Elemental analysis (wt %) [1]					Lower Heating value (Kcal/kg) [1]
		C	H	O	N	S	
N_2 Gas heating	180℃	46.94	5.69	40.09	2.59	0.45	4,170
	210℃	51.75	5.23	34.55	2.88	0.43	4,970
	240℃	58.76	5.32	25.44	3.9	0.48	5,830
	270℃	63.35	5.77	19.39	3.85	0.44	6,430
Oil heating	180℃	53.78	6.54	32.99	2.11	0.52	5,660
	210℃	55.92	6.48	31.02	2.09	0.48	6,110
	240℃	61.04	6.35	24.43	2.94	0.48	6,430
	270℃	65.07	6.22	20.35	2.79	0.47	6,890

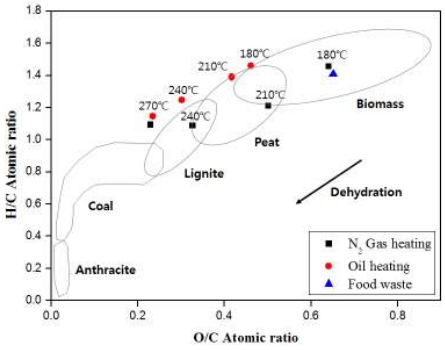

Fig. 5. Van krevelen Diagram of torrefied product (Reaction time 60min)

3-3. 반탄화 온도에 따른 원소성분변화

반응온도가 상승 할수록 탄소원자의 비율이 올라가며 270℃에서 가장 높은 탄소원소 함량을 보였다. 산소원자의 경우 반탄화가 진행됨에 따라 수분이 배출되면서 비율이 감소하는 것을 보였다. 탄소원자 비율의 상승과 수분함량의 감소로 인해 반응온도가 상승할수록 저위발열량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 270℃에서 질소가스 열전달방식은 6,400 Kcal/kg 간접방식은 6,890 Kcal/kg의 가장 높은 저위발열량을 얻을 수 있었는데, 이는 갈탄의 발열량과 비슷한 수치로 반탄화를 통하여 저급석탄에 가까운 발열량(4,000~6,000 Kcal/kg)을 얻을 수 있다는 것을 확인 할 수 있었다. 간접방식으로 생산된 반응물의 발열량이 더 높은 것은 반탄화 반응물에 소량의 매체유가 포함이 되어있기 때문으로 생각되어 진다.

발열량, 원소분석, 고정탄소 등의 비율이 270℃에서 가장 많은 변화를 보였으며, 이는 음식물쓰레기 내 채소와 같은 식물성쓰레기를 구성하는 주요 성분 중 헤미셀룰로오스가 대부분 분해되었고, 셀룰로오스의 분해가 시작되어 산소와 방향족화합물의 방출이 시작되었기 때문이라고 보여 진다.[9,11]

Fig. 4 에 원시료와 반응온도에 따른 반응물의 O/C와 H/C의 원자수비 관계를 석탄밴드로 나타내었다. 석탄밴드는 석탄화 과정 중 생물학적 변화와 가압건류에 의해 탈 탄산 및 탈수작용으로 인해 낮은 값을 보이며 그 값이 낮을수록 고등급으로 판단한다.[2]

반탄화가 진행이 될수록 반응물의 석탄 밴드가 개선되는 것을 확인 할 수 있었으며, 탈수이동경로를 따라 이동하는 것을 확인 할 수 있었다. 일반적으로 저등급 석탄의 H/C범위가 0.8~1.3, O/C 범위가 0.2~0.38인 점을 생각한다면[12], 반탄화 반응을 통하여 음식물쓰레기가 저급석탄으로 연료개질이 가능하다는 것을 확인 할 수 있었다.

4. 결론

음식물쓰레기에 대하여 온도조건과 가열방식에 따른 반탄화를 진행하였고, 이로부터 반탄화 생성물의 특성변화를 파악을 통한 전처리 효과에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. TGA그래프 분석 결과 반탄화 반응온도가 높아질수록 열분해가 시작되는 온도가 약 100℃ 정도 상승하였고, 불활성 분위기가 종료되는 600℃에서 잔존하는 무게량도 원시료 보다 270℃에서 반탄화한 생성물이 약25%정도 더 많이 남아있었다.
2. 반탄화 반응온도가 180℃일 때는 열에 의한 수분감소만 일어났지만, 240℃ 이상부터는 수분감소와 더불어 열적변화도 일어남을 확인할 수 있었으며, 낮은 온도 조건에서 반탄화를 진행

할 시 질소가스 열전달가열방식보다 열매체유 전달방식이 열전달 효율이 더 좋다는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 공업분석 및 원소분석을 통하여 반탄화 생성물을 분석한 결과 반응온도가 높아질수록 고정탄소의 함량과 발열량이 증가하였으며, 휘발분의 함량이 소폭 감소하였다. 수분 증발에 의하여 산소 원소 함량 감소가 이루어 졌으며, 또한 이로 인해 탄소원소의 함량은 증가한 것으로 보여진다. 270℃에서 반탄화한 생성물의 발열량은 질소가스 열전달방식 6,400 Kcal/kg, 간접방식 6,900 Kcal/kg 으로 저급석탄과 비슷한 열량이 측정되었다.
4. 석탄밴드를 통한 반탄화 생성물의 화학적 변화 특성을 확인 한 결과 반탄화 온도가 높아질수록 저등급 석탄의 H/C범위와 O/C 범위에 가까워지고 있는 것을 볼 수 있었으며, 탈수이동경로를 따라 이동하는 것을 확인 할 수 있었다.

이를 통하여 240℃이하에서는 주로 수분감소가 일어나며 240℃이상에서는 수분 감소뿐만 아니라 화학적 변화가 일어나고 있음을 확인 할 수 있었다. 저온에서 반탄화 할 경우 간접방식이 더 효율이 좋다는 것을 확인 할 수 있었으며, 고온의 반응조건에서는 열전달 방식에 따른 차이가 미미하다는 것을 확인 할 수 있었다.

반탄화를 통하여 음식물쓰레기의 부피 및 수분함량 감소와 더불어 저급석탄에 가까운 발열량과 탄소밴드를 얻어 반탄화로 인한 연료화 효과를 얻을 수 있었으며, 반응온도가 높아질수록 저등급석탄에 더 가까운 생성물을 얻을 수 있었다.

감 사

이 논문은 2014년도 SL공사의 환경에너지대학원 인재양성 프로그램에서 지원받아 수행된 연구입니다.

References

1. 산업통산자원부, 제2차 에너지 기본계획, 2014
2. 이윤경; 김재형; 강설송; 김경아; 박대원, 반탄화를 이용한 하수슬러지 연료화에 관한연구, 에너지공학회, 제22권, 2013, 12
3. 김석환, 유온감압증발을 이용한 음식물류폐기물의 연료화 연구, 서울과학기술대학교 석사학위논문, 2012, 02
4. 환경부, 2011년 폐기물 통계, 2012
5. 조건희, 음식물쓰레기를 活用한 液狀飼料 및 有機質肥料 使用實態에 關한 硏究, 청주대학교 석사학위논문, 2012, 02
6. 김우종, 음식물 찌꺼기 자원과 폐합성수지 혼합 RDF제조 기술연구, 경북대학교 박사학위논문, 2008, 06
7. 박영수; 김양진; 김나랑; 구재회; 채재우; 남상의; 최지호, EFB(Empty Fruit Bunch) 반탄화 시 생성된 Char의 수율 및 특성에 대한 운전변수의 영향, 한국폐기물자원순환학회, 2012
8. 박상우; 양재경; 백경렬, 반탄화 바이오매스의 연료비와 연소특성 조사, 한국폐기물자원순환학회지, 제30권, 2013, 6
9. Felix Fonseca felfli 외 2명, Wood Briquettte torrefaction, Energy for Sustainavle Development, Volume Ⅳ No.3, 2005, 9
10. Anuphon Pimchuai 외 2명, Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties, Energy and Fuels, 2010
11. 김남찬; 엄민섭; 김성환, 온도변화에 따른 음식물류폐기물의 탄화특성에 관한 연구, 한국환경분석학회지, 제12권, 2009
12. 박상우; 장철현, 탄화에 의한 하수슬러지의 연료개질 특성, 한국폐기물자원순환학회지, 제 27권, 2010년 12월, 677