

축열매디아 활용 직접부상방식을 이용한 하수찌꺼기의 건조기술 향상에 관한 연구

노성일^{a,b}, 김용용^c, 조성균^d, 신현곤^{e†}

Research on Improving Drying Technology For Sewage Waste Using Direct Flotation Using Heat Storage Media

Sung-Il Noh^{a,b}, Ung-Yong Kim^c, Sung-Gyun Jo^d, Hyun-Gon Shin^{e†}

(Received: Oct. 27, 2023 / Revised: Nov. 27, 2023 / Accepted: Nov. 29, 2023)

ABSTRACT: This study was conducted to improve energy efficiency and problems such as clumping and fouling in the glue zone that occur in the moisture content range of 40 to 60% when sewage dehydration residue is directly fed into the dryer. The temperature of the hot air is low at 270~300°C, and the paddle-type flotation method and dehydrated residue are applied to the circulated heat storage media to increase the contact area with the hot air, thereby reducing energy recovery and gas emissions. The water content of the dried residue is 2.7. ~7.5%, the heat of evaporation of moisture was 608.0~690.6 kcal/kg · H₂O, which confirmed an energy saving effect of about 8.8% compared to the heat of evaporation of moisture of 714.5 kcal/kg · H₂O when no heat storage media was used.

Keywords: Drying Technology, Direct Drying Method, Heat Storage Media, Sewage Sludge

초 록: 본 연구는 하수 탈수찌꺼기가 건조기에 직 투입되는 경우 함수율 40~60% 구간에서 발생하는 Glue Zone에서 뭉침 및 Fouling 현상 등의 문제점 및 에너지효율 개선을 하기 위해 수행하였다. 열풍 온도는 270~300°C로 낮게, 패들타입의 부상방식과 순환되어진 축열 매디아에 탈수찌꺼기가 도포되어 열풍과의 접촉면적을 증대시켜 에너지 회수 및 가스 배출량을 감소시켰으며, 건조 찌꺼기의 함수율은 2.7~7.5%, 수분 증발열량은 608.0~690.6kcal/kg · H₂O로 축열 매디아 미투입 시 수분 증발열량 714.5 kcal/kg · H₂O과 비교하여 약 8.8%의 에너지 절감 효과를 확인하였다.

주제어: 건조기술, 직접 건조, 축열매디아, 하수 찌꺼기

^a (주)화인테크 대표(CEO, Finetech Co., Ltd.)

^b 신한대학교 대학원 도시기반부동산학과 박사과정(Ph.D. student, Dept. of Department of City-based Real Estate, Shinhan University)

^c 신한대학교 도시기반부동산학과 교수(Professor, Dept. of Department of City-based Real Estate, Shinhan University)

^d (주)에이치엠텍 부사장(Vice President, HM Tech Co., Ltd.)

^e 신한대학교 에너지환경공학과 교수(Professor, Dept. of Energy & Environmental Engineering, Shinhan University)

† Corresponding author(e-mail: cospea@hanmail.net)

1. 서론

하수찌꺼기의 해양투기가 금지됨에 따라 다양한 육상처리 기술이 개발되었으며¹⁾, 건조기술은 타 처리기술에 비해 처리속도가 빠르고 부산물의 재이용이 용이하여 널리 활용되어지고 있다.^{2,3)} 현재 국내에서 운영되고 있는 간접 건조 방식은 열전달 면에 찌꺼기가 부착되어 열전달 효율 저하 및 건조물의 형태가 분말 형태로 건조물 이송이 어려운 단점이 있으며, 직접건조방식은 고온 열풍으로 인한 부식 발생, 배가스 발생, 화재 발생 등의 문제점이 존재한다.⁴⁾ 따라서, 본 연구에서는 이같은 문제점을 해결하기 위해 패들타입의 직접건조 방식^{5,6)}으로서 외부의 혼합기 없이 하수찌꺼기를 건조기에 직접투입하고 건조기 내부에 보유된 축열매디아에 도포되어 열풍과 접촉면적을 극대화 시키고, 건조성과 에너지절감효과를 시키는 방법을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 대상시설

본 연구의 대상시설은 인천시 소재 K 하수처리장 내 시설로 하였으며 탈수기 후단에 설치된 실증플랜트의 공정은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

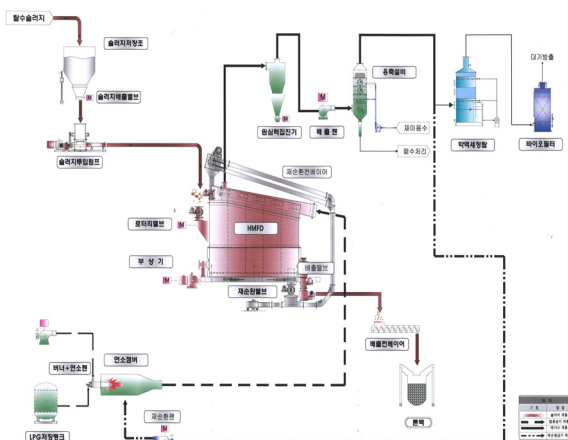
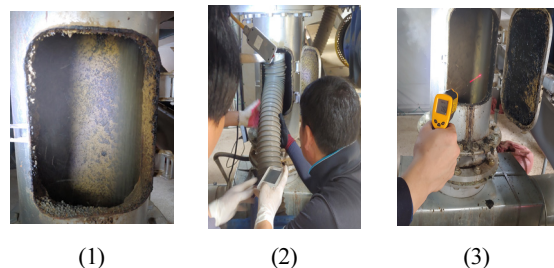


Fig. 1. Demonstration plant process chart.

2.2. 실험방법

본 실증플랜트는 건조된 찌꺼기 생산율, 즉 함수율과 공정부산물의 실험 결과를 얻고자 하였으며, 이를 위하여 아래 열거한 바와 같이 하수찌꺼기 건조성과 에너지 절감 효과를 집중적으로 분석하였다.

- (1) 현장 실험 동안 확인한 하수 찌꺼기 처리용량의 범위는 18,959~20,435 kg/d, 평균 19,785 kg/d이며, 전체 3개월간 연속운전시 처리용량의 범위는 19,206~20,291 kg/d, 평균 19,600 kg/d, 찌꺼기 공급량 감소 및 정지시간 제외 시에는 처리용량 범위 12,822~20,291 kg/d, 평균 19,377 kg/d으로서 일평균 19.2 ton/d 하수 찌꺼기를 연속 유입하여 실험하였다.
- (2) 건조기의 1일 투입량은 Load Cell 계측기로 투입 및 배출 찌꺼기의 량을 확인하였으며, Table 1 과같이 하수찌꺼기 성분, 함수율, 중금속, 입경분포, 건조기내 찌꺼기 혼합 실험을 통해서 하수찌꺼기 건조성능, 폐기물 재활용 기준 및 연료탄 품질기준⁷⁾ 적합성을 비교 수행하였다.
- (3) 탈수 찌꺼기 대비 축열매디아 재순환 비율에 따른 에너지 소비량의 상관 관계를 확인하기 위하여 축열매디아의 재순환율을 측정하였다 (Fig. 2). 또한 건조찌꺼기 재순환 컨베이어에서 3시간동안 5분간격으로 약 10초씩 12회에 걸쳐 시료를 채취하여 평균 순환율과 축열매디아의 온도를 측정하여 에너지 절감효과인 수분증발열량에 관한 실험을 수행하였다.



- (1) Heat Storage Media Collection Point
- (2) Check Return Volume
- (3) Temperature Measurement

Fig. 2. Check heat storage media transfer amount and temperature

Table 1. Measurement Analysis Items and Test Methods

Measurement Analysis Items		Test Analysis Method	
Swage sludge	Input	Load Cell Instrumentation	
	Moisture	Waste Process Testing Standards	
	Moisture	Waste Process Testing Standards	
	Ash	KS M 0100 : 2015	
Dehydrated Sludge	Flammable powder	Solid Fuel Product Quality Test Analysis Method (applied mutatis mutandis) (100-moisture-ash)	
	Heavy metal analysis	Hg, Cd, Pb, As	Solid Fuel Product Quality Test Analysis Method
		Cr, Cu	Waste Process Testing Standards
	Elemental analysis	C, H, O, N, S	Elemental Analyzer Solid Fuel Product
		Cl	Quality Test Analysis Method
	High/Low calorific value	KS E 3707 : 2016	
Dry Sludge	Particle Size Analysis	Sieve Analysis (10 mm)	
	Moisture	Waste Process Testing Standards	
	Ash	KS M 0100 : 2015	
	Flammable Powder	Solid Fuel Product Quality Test Analysis Method (applied mutatis mutandis) (100-moisture-ash)	
	Heavy metal Analysis	Hg, Cd, Pb, As	Solid Fuel Product Quality Test Analysis Method
		Cr, Cu	Waste Process Testing Standards
	Elemental Analysis	C, H, O, N, S	Elemental Analyzer
		Cl	Solid Fuel Product Quality Test Analysis Method
	High/Low Calorific Value	KS E 3707 : 2016	
	Material Balance and Heat Balance	Created From Driving Log and Test Analysis Results	
Heat storage Media	Temperature	Infrared Thermometer Measurement	
	Return Volume	Weighing The Conveyed Amount (30 Sec.)	

2.3. 분석항목

본 연구에서 수행한 분석 항목은 Table 1과 같다.

금속을 분석한 결과 찌꺼기 재활용 기준을 만족하는 것으로 나타났다(Tables 2, 3).

3. 결과 및 고찰

3.1. 건조 찌꺼기의 성상 및 고품연료

탈수 찌꺼기 및 건조 찌꺼기의 3성분(수분, 회분, 가연분)은 Table 1과 같은 분석방법으로 3개월간 15회 분석 하여 건조 전 수분은 80.4%, 회분은 14.9%, 저위발열량 385.7 kcal/kg, 나타났으며, 건조 후 함수율은 7.6%, 회분 16.4%, 저위발열량 4,066.7kcal/kg, 건조 찌꺼기는 폐기물의 연료재활용 기준⁸⁾에 만족하였으며, 실증 플랜트를 통해 건조한 찌꺼기의 중

3.2. 건조물 입도 분석결과

육안상 초기 투입된 건조 찌꺼기에 비해 입도가 커졌으나, 실증플랜트를 500시간 가동하는 동안 건조물의 입도의 현재와 큰 차이를 나타내지 않았으며, 건조기에 탈수찌꺼기가 직투입되는 경우 함수율 40~60% 구간에서 발생하는 Glue Zone에서 멍침 및 Fouling 현상이 발생하여 건조효율 저하 및 고장을 일으켜 Table 4 기존 건조기술의 경우 건조기 투입 전 건조물을 찌꺼기 투입량 대비 3~3.5배 외부에서 혼합하여 함수율을 30% 이하로 유지하는 것으로 조사되었으며, 본 실험에서는 패들의 회전운동을 이용

Table 2. Industrial Analysis Results of Residues Before and After Drying^{9,10)}

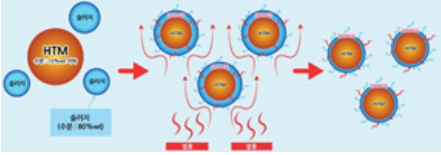
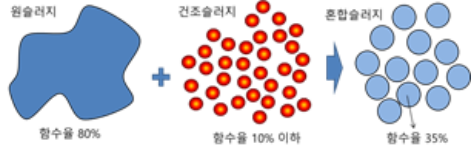
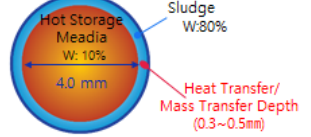
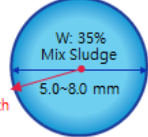
Item	Unit	Reference value	Measures		Test Method
			Before Drying	After Drying	
Moisture	%	10 ≥	80.4	7.6	Waste Process Testing Standards
Ash	%	35 ≥	14.9	16.4	KS M 0009 : 2010
Low Calorific value	kcal/kg	3,000	385.7	4,066.7	KS E 3707 : 2016
S	%	2 ≥	0.68	0.71	Elemental Analyzer

※ Analysis Agency: Korea Testing & Research Institute

Table 3. Heavy Metal Analysis Results of Residue Before and After Drying^{9,10)}

Item	Unit	Reference value	Measures		Test Methods
			Before Drying	After Drying	
Pb	mg/kg	200	9.0	10.5	Solid Fuel Product Quality Testing and Analysis Methods
As	mg/kg	13	1.85	1.58	
Hg	mg/kg	1.20	0.01	Not Detected	
Cd	mg/kg	9.0	1.39	0.57	

Table 4. Differences from Existing Drying Technologies¹²⁾

Demonstration Plant	Division	Existing Technology
Internal Mixing 1:2~25 Ratio		External mixing 1:3~3.5 Ratio
Internal Return of Dried Material to Sludge Inlet	Mixing Method	Dehydrated Sludge After Mixing the Dried Material, Transfer it to The Dryer.
	Mixed Schematic Diagram	
	Heat Transfer and Material Movement Depth	

하여 건조물을 부유 및 회전시킴으로써 열풍과의 접촉면적 증대 및 점진적으로 그레놀 형태로 성형이 되어지는 것을 결과를 확인 하였다. 연구대상 시설에서 건조찌꺼기에 대한 입도분석(Fig. 3)은 H시험연구원에서 채취한 것으로 건조찌꺼기로 10 mm 체가름분석을 통해 확인하였고, 3회의 분석 결과 모두 100% 통과율을 나타냈다. 고품연료 성능 기준을¹¹⁾ 만족하는 것을 확인하였다. 건조된 찌꺼기는 그레놀 형태로 배출되며, 그레놀의 입경 분포는 2.8~4.0 mm가 57.0 %로 가장 많은 분포를 나타내었으며, 1.0~2.0



Fig. 3. Discharge dry residue form

mm는 19.1%로 두 번째로 많은 분포를 나타내었다. 0.5 mm 이하의 건조물은 측정되지 않았으며, 건조찌꺼기를 화력발전소 연료로 이용할 수 있는 결과를 확인하였다.

3.3. 건조에 따른 찌꺼기 함수율 변화

19회에 걸쳐 시험 운전을 진행하였으며, 시험 운전 동안 총 450ton의 찌꺼기를 처리하였다. 처리된 찌꺼기의 함수율은 평균 75.1%, 표준편차 1.45로 나타났으며, 건조 찌꺼기 함수율은 평균 7.4%, 표준편차 1.81 이었다(Fig. 4).

3.4. 건조기 내 찌꺼기 혼합 Test

부상기에 패들 각도는 20°, 160°로 엇갈리게 설치함으로써 건조기 내 찌꺼기의 체류시간 증대 및 건조 효율 향상되었으며, Fig. 5는 Lab-Test 건조기를 3구간으로 구분하여 각기 다른 색의 내용물을 채운 후 부상기를 2분간 가동 시 도포 정도를 확인한 것으로 전단과, 후단의 내용물이 완전 도포됨을 확인

하였다.

3.5. 에너지 소비량 실험

도포된 찌꺼기의 평균 함수율은 건조 전 탈수찌꺼기 약 80%나타났으며, 온도는 약 40~45°C로 측정되었으며, 이에 의해 일반건조기의 혼합과는 전혀 다른 도포의 명제를 확인 할 수 있었다. 축열 매디아의 활용에 따른 에너지 소비량 감량은 적외선 온도계를 통해 재순환되는 축열 매디아의 온도를 측정 한 결과 약 65~75°C로 측정되어졌다. 축열매디아를 재순환하지 않고 실험 하였을 때 수분 증발 열량은 714.5 kcal/kg-H₂O 측정되었으며, 탈수찌꺼기 대비 약 1:2.5의 비율로 축열 매디아를 재순환시에는 651.8 kcal/kg-H₂O로 약 8.8%의 에너지 저감 효과를 나타냈다(Fig. 6, Fig. 7).

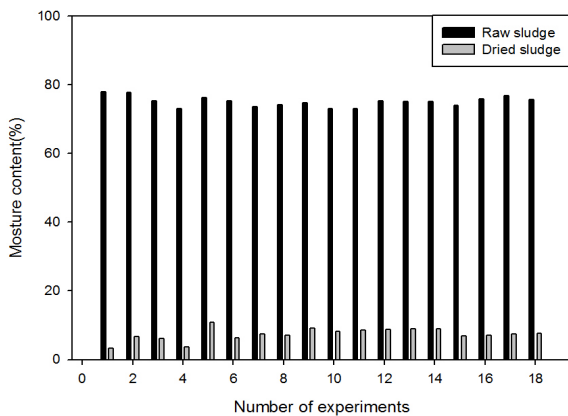


Fig. 4. Change in moisture content of residue according to drying

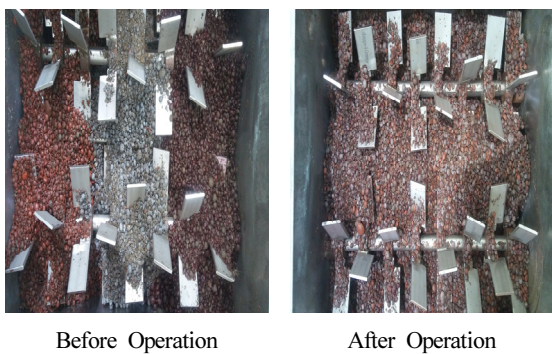


Fig. 5. Internal mixing and shear movement of downstream dried material by paddle.

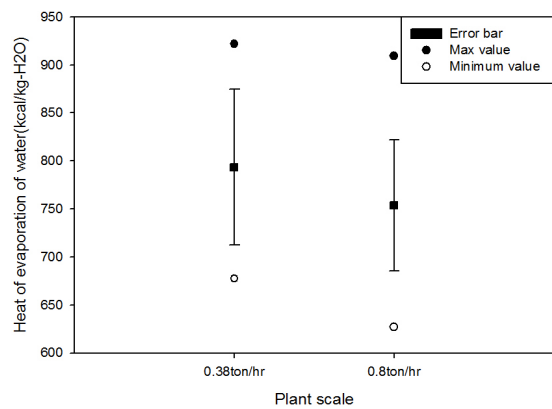


Fig. 6. Change in waste drying efficiency according to heat storage media recirculation.

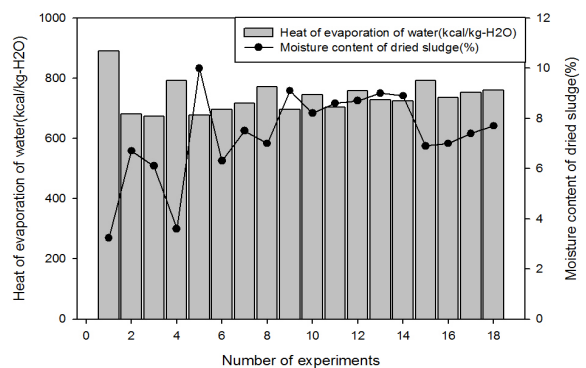


Fig. 7. Change in moisture evaporation heat according to moisture content of dried residue.

Table 5. Changes in Application Thickness and Moisture Content According to Heat Storage Media Input Ratio

Division		Input Ratio				
Input Ratio	Dehydrated Sludge	1	1	1	1	1
	Heat Storage Media	1	1.5	2	2.5	3.0
Effect	Application Thickness (mm)	0.6~0.8	0.5~0.6	0.4~0.5	0.2~0.3	0.1~0.2
	Moisture Content (%)	20	15	10	8	7

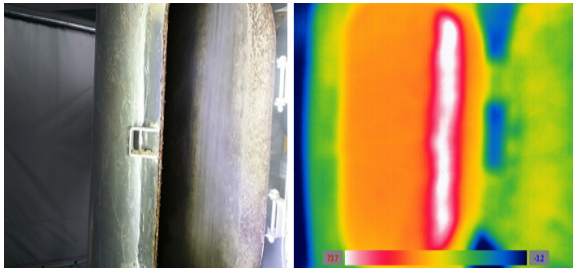


Fig. 8. Thermal image of heat storage media.

본 연구 결과의 Table 5는 기존 건조기술에 비해 축열매디아를 이용한 건조실험결과 찌꺼기 재순환 비율이 1~1.5배 낮은 것을 확인 하였으며, 재순환의 목적이 혼합에 의한 고점성 구간 회피조가 아닌 도포에 의한 건조시간 단축으로 슬러지의 건조 문제를 해결 할 수 있을 것으로 확인 하였다.

3.6. 수분응축 실험 결과

Demonstration Plant 제작시 건조기 양 측면을 재킷 형태로 구성하여 건조기 측면에 간접 열을 전달 받을 수 있도록 하여 온도 저하로 인한 건조기 내에서 수분의 재 응축이 발생하지 않도록 구성하였으며, 패들 하부로 유입된 열풍은 건조기 측면을 따라 이동하며, 패들에 의해 중앙에서 수직 상승하여 피 건조물과의 건조접촉을 통해 배가스 배출구로 배출되므로 건조기 측면은 외부와의 방열에 의한 온도 저하 발생으로 인하여 증발된 수분이 재 응축 되지 않는 결과를 얻을 수 있었다(Figs. 8, 9).

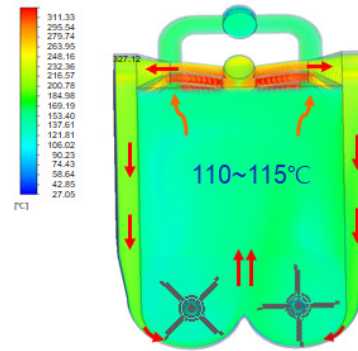


Fig. 9. Change in temperature inside the dryer(When hot air flows in at 327°C).

4. 결론

4.1. 찌꺼기 건조성능결과

- (1) 실험 대상 설비에서 생산된 건조 찌꺼기의 함수율을 분석한 결과, 2.7~7.5%, 평균 4.6% 수분 제거량은 14,841~16,372 kg/d로 평균 15,431 kg/d 분석되었다.
- (2) 건조 찌꺼기의 저위발열량은 3,844~4,103 kcal/kg 이며 평균 3,959, 황은 0.88~1.32% 평균 1.13, 10 mm 체통과량을 통한 입도 분석 결과 모두 100%로 통과하였다. 중금속함량 분석 결과, 수은 0.41~1.18 mg/kg, 평균 0.72, 카드뮴 0.72~4.23 mg/kg, 평균 3.15, 납 8.3~61.4mg/kg, 평균 39.2 비소 0.85~3.11 mg/kg 평균 2.10이며, Cr, Cu는 0.03 mg/L, 0.119 mg/L로서 각각 폐기물 재활용 기준 및 연료탄 품질기준을 만족한 것으로 확인하였다.

4.2. 에너지 절감 효과

탈수 찌꺼기 대비 1:2.5의 비율로 축열 매디아를

재순환함에 따라 에너지 절감 효과를 확인하였다.

- (1) 축열 매디아의 34,790~51,379 kg/d, 평균 반송량 44,244kg/d, 온도는 74.0~89.0 °C로 81.8°C 측정되었으며, 탈수 찌꺼기 대비 축열 매디아 평균 반송비는 1.75~2.60, 평균 2.24로 확인 하였다.
- (2) 축열 매디아 투입 시 수분 증발열량은 608.05~690.67kcal/kg · H₂O로 평균 651.81kcal/kg · H₂O 확인되었으며, 현장 실험 기간과 동일한 하절기에 축열 매디아 미투입 시 평균 수분 증발열량 714.5 kcal/kg · H₂O과 비교하여 약 8.8%의 에너지 절감 효과를 확인하였다.

사 사

본 논문은(주)화인테크(주)에이치엠텍의 지원을 받아 수행 되었습니다.

References

1. Ministry of Environment, "Study on measures to ban sludge dumping in the ocean", pp. 147. (2013).
2. Jae-gi Kim, University of Seoul doctoral thesis "Analysis Of Energy Conversion Methodologies For Thermal Treatment Of Swage Sludge", pp. 35~39. (2008).
3. Ministry of Environment, "Performance evaluation and improvement plan study of sewage waste reduction project", pp. 36~37. (2019).
4. Bae, J. G., "Domestic sewage sludge treatment status and solutions", J. of the Korea Water and Wastewater Works Association, Summer Issue, pp. 33~34. (2023).
5. Goyang City, "Sewage sludge treatment facility construction project feasibility study and basic plan establishment", pp. 457~474. (2017).
6. Ministry of Environment Domestic Sewage Division, "Research on optimal sewage sludge treatment technology", pp. 13-31. (2010).
7. Ministry of Environment, "Quality standards for sewage waste fuel coal", GR M 9018, (2019).
8. Ministry of Environment, "Recycling of waste as fuel in accordance with the Waste Management Act5 Enforcement Rules [Appendix 5-3]". (2023).
9. Ministry of Environment, "Waste Recycling Standards". (Related to Article 14-3, Paragraph 1) R-9-5 type recycling standards (2023).
10. Ministry of Environment "Waste Process Testing Standards". (2017).
11. Ministry of Environment "Solid Fuel Product Quality Test and Analysis Method". No. 2020-219. (2020).
12. Korea Environmental Industry and Technology Institute, "Direct and flotation drying technology using dried sludge as heat storage media", pp. 4~35. (2020).