

기포 유동층 반응기를 이용한 하수 슬러지와 석탄 및 우드 펠릿의 혼소 특성 및 슬래깅 성향 연구

안형준¹, 김동희^{1,2}, 이영재^{1,*}

¹한국생산기술연구원

충남 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89

²포항공과대학교 기계공학과

경북 포항시 남구 청암로 77

(2018년 6월 27일 접수; 2018년 7월 27일 수정본 접수; 2018년 8월 2일 채택)

Co-firing Characteristics and Slagging Behavior of Sewage Sludge with Coal and Wood Pellet in a Bubbling Fluidized Bed

Hyungjun Ahn¹, Donghee Kim^{1,2}, and Youngjae Lee^{1,*}

¹Korea Institute of Industrial Technology

89 Yangdaegiro-gil, Ipijang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan-si, Chungnam

²Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology

77 Cheongam-ro, Nam-gu, Pohang-si, Gyeongbuk

(Received for review June 27, 2018; Revision received July 27, 2018; Accepted August 2, 2018)

요 약

실험실 규모 기포 유동층 반응기를 이용한 하수 슬러지와 석탄 및 우드 펠릿의 혼소 실험 및 회분 분석을 통한 슬래깅 성향을 살펴보았다. 연료는 일반 건조 및 수열탄화를 통해 제작된 하수 슬러지와 아역청탄, 우드 펠릿이 적용되었다. 연소 실험은 당량비 및 산화제 유량, 초기 온도를 고정하고 2종의 하수 슬러지 연료와 석탄 또는 우드 펠릿을 발열량 기준 50 : 50 비율로 혼합한 총 4개의 조건에 대해 반응기 온도 및 배가스 조성을 측정하였다. 배가스 중 NO_x는 모든 조건에서 대부분 NO의 형태로 400 ~ 600 ppm 범위에서 측정되었다. SO₂는 원료 내 황 함량을 고려하면 하수 슬러지의 투입량이 큰 영향을 미쳤을 것으로 예상되는 가운데 수열탄화 연료가 일반 건조 연료에 비해 다소 낮은 경향을 보였다. 비산 회분 조성 분석 결과 하수 슬러지 연료가 슬래깅/파울링 가능성을 높일 것으로 생각되며, 수열탄화 연료가 일반 건조 연료에 비해 상대적으로 양호한 결과를 보일 것으로 예상되었다.

주제어 : 하수 슬러지, 수열탄화, 혼소, 슬래깅, 유동층

Abstract : The results of an experimental investigation on the co-firing characteristics and slagging behavior of dried and hydrothermal carbonization sewage sludge, sub-bituminous coal, and wood pellet in a fluidized bed were presented. Combustion tests were conducted in a lab-scale bubbling fluidized bed system at the uniform fuel-air equivalence ratio, air flow rate, and initial bed temperature to measure bed temperature distribution and combustion gas composition. 4 different fuel blending cases were prepared by mixing sewage sludge fuels with coal and wood pellet with the ratio of 50 : 50 by the heating value. NO_x was mostly NO than NO₂ and measured in the range of 400 to 600 ppm in all cases. SO₂ was considered to be affected mostly by the sulfur content of the sewage sludge fuels. The cases of hydrothermal carbonization sewage sludge mixture showed slightly less SO₂ emission but higher fuel-N conversion than the dried sewage sludge mixing cases. The result of fly ash composition analysis implied that the sewage sludge fuels would increase the possibility of slagging/fouling considering the contents of alkali species, such as Na, K, P. Between the two different sewage sludge fuels, dried sewage sludge fuel was expected to have the more severe impact on slagging/fouling behavior than hydrothermal carbonization sewage sludge fuel.

Keywords : Sewage sludge, Hydrothermal carbonization, Co-firing, Slagging, Fluidized bed

* To whom correspondence should be addressed.

E-mail: leeyj@kitech.re.kr; Tel: +82-41-589-8464; Fax: +82-41-589-8323

doi: 10.7464/ksct.2018.24.4.323 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

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

1. 서론

신재생에너지 공급의무화(Renewable Portfolio Standard, RPS) 및 폐기물 자원화 등과 관련하여 발전 분야를 포함한 연소·열에너지 시스템에서 연료 다변화의 필요성 및 대응 방안 요구가 점차 증가하고 있다. 특히 발전 분야에서 목질계 바이오매스의 사용이 크게 증가하며 기존 발전 시스템에서 석탄과의 혼소 또는 바이오매스 전소 발전 시스템의 신규 건설 사례 등이 늘어나고 있다. 목질계 바이오매스가 국내 신재생에너지의 상당량을 차지하는 가운데 최근 하수 슬러지 폐기물의 연료 자원화에 대한 연구 필요성이 증가하고 있다. 유럽 등 주요 선진국을 중심으로 하수 처리 및 배출 규제 강화로 하천 및 해양 배출, 매립, 소각 등 기존 처리 방법들이 점차 제한됨에 따라 열에너지 시스템의 연료화 활용 방안이 유력한 대안으로 대두되고 있다[1-7]. 국내의 경우 2012년부터 하수 슬러지의 해양 투기가 전면 금지되었다. 그 결과, 2015년 기준 전체 배출 하수 슬러지 중 연료화 및 비료화를 포함한 재활용이 약 57%를 차지하였으며 그 비중이 점차 증가 추세이다[8].

하수 슬러지의 에너지원 활용에 대한 잠재성 및 필요성에도 불구하고, 열에너지 시스템에서의 하수 슬러지 연료 활용에 대한 국내 연구는 상대적으로 충분하지 않다. 특히 하수 슬러지 내 약 80% 이상의 수분 함량은 연료화에 있어 큰 제한점으로 작용한다. 통상적인 건조 처리로는 수분 제거에 많은 에너지가 소모되며 결과적으로 연료화의 경제적 타당성을 크게 저해한다. 이와 관련하여, 최근 수열탄화(Hydrothermal carbonization, HTC) 기술을 이용한 하수 슬러지 고형 연료 생산이 시도되고 있다. 수열탄화 방법은 높은 함수율을 가지는 하수 슬러지를 고온(230~280 °C), 고압(10~20 bar) 조건의 반응기에서 가열한다. 가열된 하수 슬러지는 반응기 내에서 고온의 슬러리 상태가 되고, 높은 압력으로 인해 수분이 임계점(subcritical temperature, 374.2 °C) 이하에서 기화하여 목질계 원료인 셀룰로오스와 같은 긴 탄화수소 사슬을 열로 분해함으로써 저분자 탄화물로 변환된다. 그 과정에서 하수슬러지의 탈카르복실화(decarboxylation)와 탈수(dehydration) 반응을 유도하게 된다. 이러한 수열탄화 과정을 통해 O/C, H/C 비율은 낮아지고, 탄소 고정(carbon fixation) 현상으로 인하여 고정 탄소가 증가하며 발열량이 증가한다. 무엇보다도 원료 내 수분 제거를 위한 에너지 소모량을 줄일 수 있어 수분이 많은 바이오매스 연료의 고품질화를 위한 효과적인 방법으로 고려되고 있다[9-11].

Lee et al. [12]는 선행 연구에서 유동층 내 수열탄화 하수 슬러지 고형 연료의 연소 특성을 살펴보기 위한 실험을 수행하였다. 해당 연구에서는 실험실 규모 유동층을 이용하여 수열탄화 연료와 우드 펠렛 간 서로 다른 혼합 비율에 걸쳐 배가스 조성 등을 확인하였다. 본 논문에서는 하수 슬러지 고형 연료에 대하여 현재 발전 분야에서 적용되는 대표적 고체 연료인 석탄과 우드 펠렛과의 혼소 특성 분석을 확장하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 하수 슬러지 연료는 일반적 건조 방법과 수열탄화 방법으로 처리된 두 가지로 준비하였으며, 석탄 및 우드 펠렛과의 혼소를 실험실 규모 유동층 반응기

시스템을 이용하여 수행하였다. 또한 연소 후 포집된 회분 분석을 통해 슬래킹/파울링 가능성을 예상해보고자 하였다.

2. 하수 슬러지 연료 특성 분석

2.1. 연료 선정 및 성분 분석

본 실험에서 사용된 하수 슬러지 고형 연료는 인천시에 위치한 하수 처리장에서 발생한 하수 슬러지를 대상으로 선정하였다. 하수 슬러지를 건조하기 위하여 통상적인 건조 방법과 수열탄화 방법을 통해 일반 건조 하수 슬러지 고형 연료(dried sewage sludge, DSS)와 수열 탄화 하수 슬러지 고형 연료(hydrothermal carbonization sewage sludge, HTCSS)의 총 두 가지 하수 슬러지 연료를 적용하였다. 또한 발전분야에서 대표적으로 사용되는 화석 연료와 바이오매스인 아역청탄(Coal)과 우드 펠렛(wood pellet, WP)을 선정하여 각각의 연료와의 혼소 시 연소 특성을 분석하였다.

Table 1은 실험에 사용된 연료의 공업 분석(proximate analysis, ASTM E 1915-97), 원소 분석(ultimate analysis, ASTM D 7582-15)과 발열량 분석(heating value analysis, KS E 3707) 결과를 나타낸 표이다. 공업 분석 결과 아역청탄인 Coal은 휘발분과 고정 탄소의 비율이 유사하였고, 매우 낮은 회분 함량을 보였다. 이와 달리 WP은 휘발분이 대부분의 가연분을 차지하고 있었고, 회분 함량은 석탄보다 더 낮은 1.4%를 보였다. 하수 슬러지 연료들은 WP와 마찬가지로 휘발분이 가연분의 대부분을 차지하고 있다. HTCSS의 경우 수열탄화 과정을 통해 DSS에 비해 O 및 H 함량이 감소하고 C가 증가한 것을 볼 수 있다. 하수 슬러지 연료들의 경우 원소 분석 상 dry ash free 기준으로 C 함량이 WP와 비슷하고 H는 조금 높으며 O는 더 적어 발열량 증가에 유리한 영향을 미칠 수 것으로 기대된다. 그러나 공업 분석 결과에서 볼 수 있듯이 하수 슬러지 연료의 회분 함량이 WP에 비해 상당히 높으므로 dry basis로는 실제 연료 내 단위 질량 당 C 및 H 함량은

Table 1. Proximate, ultimate and heating value analysis results of Coal, WP, HTCSS and DSS

Fuel	Coal	WP	HTCSS	DSS
Proximate analysis (dry basis, wt%)				
Volatile	47.3	88.7	65.9	73.5
Fixed Carbon	49.8	9.9	13.2	11.3
Ash	2.9	1.4	20.9	15.2
Ultimate analysis (daf basis, wt%)				
C	76.7	49.6	57.0	50.3
H	4.9	6.2	7.5	7.9
N	1.0	0.3	7.8	8.5
S	0.1	0.0	0.9	1.0
O	17.2	43.9	26.8	32.3
Heating value analysis (kcal/kg)				
HHV	5570	4680	4713	4594

WP보다 낮으며, 결과적으로 WP과 비슷한 수준의 발열량을 갖는 것으로 분석되었다. 또한 앞서 언급했던 수열탄화 반응을 통해 DSS보다 HTCSS에서의 발열량이 높아진 것을 확인할 수 있다.

2.2. 회 용점 분석

본 연구에 사용된 연료들의 슬래깅 경향성 판단을 위해 ISO 540에 따라 회 용점(ash fusion temperature) 분석을 수행하였다. 회 용점 분석은 삼각뿔 형태로 성형된 회의 온도 변화에 따른 변형 상태를 분석한다. 유동층 연소에서 회분 용융이 유발하는 슬래깅, 클링커 등의 연소 장애 현상은 원활한 운전을 방해하는 요소이다. 특히 하수 슬러지의 경우, 연소 과정에서 방출되는 휘발분은 하수 슬러지를 더욱 가열시킨다. 휘발분이 높은 비율을 차지하고 회 용점이 낮은 하수 슬러지의 특성 상, 회 용점은 더 큰 의미를 가진다[13]. Table 2는 각 연료의 회 용점 분석 결과를 나타내었다. 회 용점은 IDT (initial deformation temperature), ST (softening temperature), HT (hemispherical temperature), FT (fluid temperature), 총 4 단계로 평가되었다. DSS의 IDT가 특히 낮게 측정되었고, WP은 전체적으로 매우 높은 회 용점을 보였다.

또한 Gray와 Moore가 제안한 IDT와 HT를 이용한 슬래깅 지표인 AFI (ash fusibility index)를 통해 슬래깅 가능성을 분석하였다[14].

$$AFI = \frac{(4 \times IDT + HT)}{5} \quad (1)$$

Table 3는 식 (1)을 통해 얻어진 AFI의 회 용점 경향성 판단

Table 2. Ash fusion temperature analysis result at oxidizing condition

Fuel	Temperature (°C)			
	IDT	ST	HT	FT
Coal	1249	1260	1268	1275
WP	1447	1508	1510	1511
HTCSS	1163	1201	1231	1286
DSS	948	1280	1325	1345

Table 3. Evaluation of slagging tendency as ash fusibility index (AFI)

Fuel	AFI	Slagging tendency
Coal	1252.8	Medium
WP	1459.6	Low
HTCSS	1176.6	High
DSS	1023.4	Severe

Evaluation standard of slagging tendency

Evaluation	Low	Medium	High	Severe
AFI	>1343	1232~1343	1149~1232	<1149

기준과 결과를 나타낸 표이다. 일반적으로 AFI가 높을수록 더 낮은 슬래깅 경향성을 보이며 상대적으로 연소 장애 현상 발생 가능성이 낮을 것으로 판단된다. WP은 가장 높은 AFI를 보이며 슬래깅 경향성 또한 낮음으로 평가되었다. 심지어 WP은 회분의 정량적인 양도 1.4%로 가장 낮기 때문에 회분으로 인한 연소 장애 발생이 거의 없을 것으로 판단된다. 다음으로 Coal이 중간으로 평가되었고, HTCSS는 높음으로 평가되었다. 하지만 DSS는 심각으로 평가되어 연소 장애가 발생할 확률이 가장 높은 것으로 평가되었다. HTCSS와 DSS는 회분의 함량도 높기 때문에 다른 두 연료에 비해 연소 장애 발생 가능성이 높다고 볼 수 있다.

2.3. 회 성분 분석

회분은 보일러 내에서 슬래깅과 파울링을 유발하여 연소기의 수명 및 발전 효율 저하를 일으키기 때문에, 연료 특성을 파악하여 슬래깅/파울링 가능성을 예측하는 것은 매우 중요하다. 앞서 분석하였던 회 용점은 회분 용융으로 인한 슬래깅 현상을 예측하기 위하여 진행되었고, 회 성분 분석을 통해 슬래깅/파울링 가능성을 예측하고자 하였다. Table 4는 유도결합플라즈마 발광분광분석법(inductively coupled plasma-optical emission spectrometry, ICP-OES)을 이용한 각 연료 회분의 분석 결과로부터 도출한 주요 산화물의 질량 분율을 나타낸 것이다. Table 4의 ICP-OES 분석 결과, Coal 회분은 Al₂O₃, SiO₂, 그리고 Fe₂O₃가 큰 비율을 차지하고 있고, WP 회분은 K₂O와 CaO가 대부분의 성분을 차지하고 있다. HTCSS와 DSS에서 전체적으로 석탄의 회분과 비슷한 성분을 가지고 있지만, P₂O₅가 30% 이상으로 매우 높은 함량을 보이고 있다.

Table 5는 유동층 연소에서 회분 거동과 퇴적 경향에 관련된 인자를 도출하기 위한 Equation (2)~(6)을 통해 얻은 인자들의 평가 결과이다. Equation (2)~(6)은 각각 B/A (base-to-acid ratio), S/A (silica-alumina ratio), I/C (iron-calcium ratio), TA (total alkali), BAI (bed agglomeration index)를 의미한다[12,15].

$$B/A = \frac{CaO + MgO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3}{SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2} \quad (2)$$

Table 4. Results of ash composition analysis for the fuel samples (wt%)

Fuel	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅
Coal	1.1	9.3	16.9	36.9	0.4
WP	0.7	6.0	1.9	4.0	2.6
HTCSS	1.1	6.7	15.0	18.9	30.4
DSS	1.9	5.9	8.1	25.7	37.0
Fuel	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂
Coal	1.9	16.7	16.2	0.2	0.6
WP	32.3	43.2	7.4	1.8	0.1
HTCSS	4.3	11.9	8.7	1.3	0.8
DSS	6.5	7.5	3.9	0.6	2.8

Table 5. Ash deposition tendency of fuel sample ashes

Index	Coal	WP	HTCSS	DSS	Tendency
B/A	0.8 M	15.1 H	0.9 M	0.7 M	Low <0.5 Medium 0.5<B/A<1.0 High >1.0
S/A	2.2 H	2.2 H	1.3 H	3.2 L	Low <0.31 or >3 High 0.31<S/A<3
I/C	1.0 H	0.2 L	0.7 H	0.5 H	Low <0.31 or >3 High 0.31<I/C<3
TA	3.0 H	33.0 H	5.0 H	8.0 H	Low <0.3 Medium 0.3<TA<0.4 High >0.4
BAI	5.5 H	0.2 H	1.6 H	0.5 H	High <10

$$S/A = \frac{SiO_2}{Al_2O_3} \quad (3)$$

$$I/C = \frac{Fe_2O_3}{CaO} \quad (4)$$

$$TA = Na_2O + K_2O \quad (5)$$

$$BAI = \frac{Fe_2O_3}{K_2O + Na_2O} \quad (6)$$

연료들의 슬래깅/파울링 경향성 평가에서는 전체적인 경향성은 높음(H)을 보였다. B/A에서는 WP의 높은 K₂O와 CaO로 인해 높음을 보였고, 나머지 대상 연료들은 모두 중간(M)을 보였다. 또한 S/A에서 DSS와 I/C에서 WP가 낮음(L)을 보인

것을 제외하면 모두 높음으로 평가되었다. 하지만 슬래깅/파울링 경향성을 보기 위한 기존의 인자들인 Equation (2)~(6)에는 인(phosphorus, P)에 해당하는 P₂O₅에 대한 고려가 없다. 인은 칼륨과 나트륨과 더불어 낮은 용점을 가지고 있으며, 슬래깅에 상당한 영향을 미칠 수 있다[16]. 특히 하수 슬러지에는 석탄과 목질계 바이오매스와는 다르게 인 산화물의 함량이 30% 이상으로 매우 높기 때문에, 하수 슬러지를 연료로 사용할 경우 필수적으로 고려되어야 한다. 따라서 회분 내 인이 많은 연료를 대상으로 한 지수 평가에서는 이에 대한 고려가 추가 되어야할 것으로 사료된다.

3. 기포 유동층 반응기 실험

3.1. 실험실 규모 기포 유동층 시스템

본 실험에 적용된 실험실 규모의 기포 유동층 시스템의 개략도는 Figure 1과 같다. 반응기는 직경 0.1 m, 높이 1.2 m로 반응기 하단에 층 물질의 유동을 위한 분산판이 설치되어 있다. 연료 공급을 위하여 single screw type의 feeder를 설치하고, 연료 공급 라인의 역류를 방지하여 원활하게 공급하기 위하여 질소 라인을 설치하였다. 연료는 분산판을 기준으로 높이 250 mm의 반응기 측면에서 투입되고 있다. 반응기 내 압력 및 가스 유동은 압력 센서 및 후단 ID fan을 통해 조절되며 연료별 실험 조건 간 내부 유동이 유사하도록 일정하게 유지하였다. 반응기의 온도 분포는 반응기의 높이 100, 200, 300, 600, 800 mm에 각각 K-type 열전대를 설치하여 확인하였다. 또한 사이클론과 응축기를 이용하여 연소 가스 내 입자 포집 및 배가스 냉각이 이루어졌다. 연소 가스 성분은 ID fan 후단에서 연소가스 분석기(testo 350, testo, Germany)를 이용하여 O₂, CO₂, CO, SO₂, NO, NO₂에 대하여 연속 측정이 이루어졌

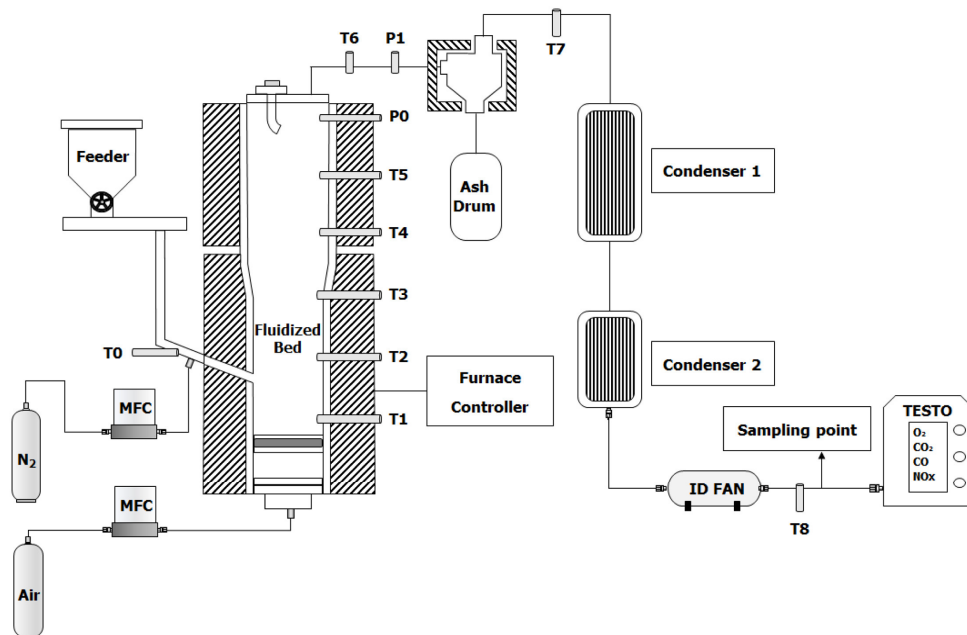


Figure 1. Schematic diagram of the lab-scale bubbling fluidized bed system.

Table 6. Experimental conditions

Case	Fuel	Feeding rate (g min ⁻¹)	Thermal input (kW)
C1	DSS + Coal	8.8	3.3
C2	HTCSS + Coal	8.1	3.1
C3	DSS + WP	11.3	3.9
C4	HTCSS + WP	10.2	3.6

다. O₂ 및 CO₂는 vol.% 단위로, 그 외에는 ppm 단위로 측정하였으며 NO_x는 NO와 NO₂의 합으로 표시되었다.

본 실험에 사용된 층 물질의 평균 입도는 입도 분포를 기반으로 390 μm로 확인하였고, 구형도는 0.62인 land sand로 가정하였다. 배수량 측정 방식으로 측정된 층 물질의 bulk density는 1400 kg m⁻³이었다. 층 물질의 범위는 Geldart B에 해당한다. 최소 유동화 속도(U_{mf})는 별도 실험을 통해 운전 조건에 해당하는 800 °C에서 약 0.21 m s⁻¹로 측정되었다.

Table 6에 기포 유동층 반응기의 실험 조건을 요약하였다. 본 연구에서는 고체 연료로 많이 사용되는 석탄과 우드 펠릿의 혼소를 통해 두 종류의 하수 슬러지 고품 연료의 연소 특성을 분석하는 것을 초점으로 하고 있다. 혼소율은 열량 기준으로 50:50으로 설정하였으며, 모든 실험 케이스에서 식 (7)로 정의된 당량비를 0.61, 공기 유량을 100 L min⁻¹으로 고정하였다. 해당 유량은 운전 조건의 유속과 최소 유동화 속도의 비

로 표현되는 유동화 수(n=U/U_{mf}) 4에 해당한다. 따라서 투입 열량은 케이스마다 차이가 있다. 반응기의 초기 온도는 전기로를 이용하여 800 °C까지 예열하였으며, 700~900 °C 범위에서 운전될 수 있도록 제어되었다. 산화제는 800 °C 기준으로 약 4 U_{mf}가 되도록 모든 조건에서 동일하게 투입하였다. 또한 연료 공급 장치인 스크류 피더에서의 고온 가스 역류 방지를 위해 질소를 1.5 L min⁻¹ 주입하였다. 모든 데이터는 반응기의 온도와 압력이 안정화 된 이후 최소 1시간 이상의 데이터를 측정하였다.

$$\phi = \frac{(m_{fuel}/m_{air})_{actual}}{(m_{fuel}/m_{air})_{stoich.}} \quad (7)$$

3.2. 반응기 온도 측정 결과

Figure 2는 기포 유동층 반응기 시스템에 설치된 열전대의 온도 측정 결과이다. 그림에 나타난 것과 같이 온도와 압력의 측정 결과는 운전 조건 별로 다소 차이는 있으나 전체적인 경향은 정성적으로 매우 유사하게 보이고 있다. 가장 높은 온도를 보이는 T4, T5는 분산판을 기준으로 반응기 600, 800 mm에 위치하고 있고, 이 영역에서 주로 연소 반응이 일어나기 때문에 사료된다. T1, T2, 그리고 T3는 반응기 하단으로 층 물질과 연료가 만나서 연소 및 열전달이 직접적으로 이루어지는 구간으로, 전체적으로 약 800 °C 대를 유지하고 있다. 반응기에서 나온 연소 가스는 후단 설비인 사이클론과 콘덴

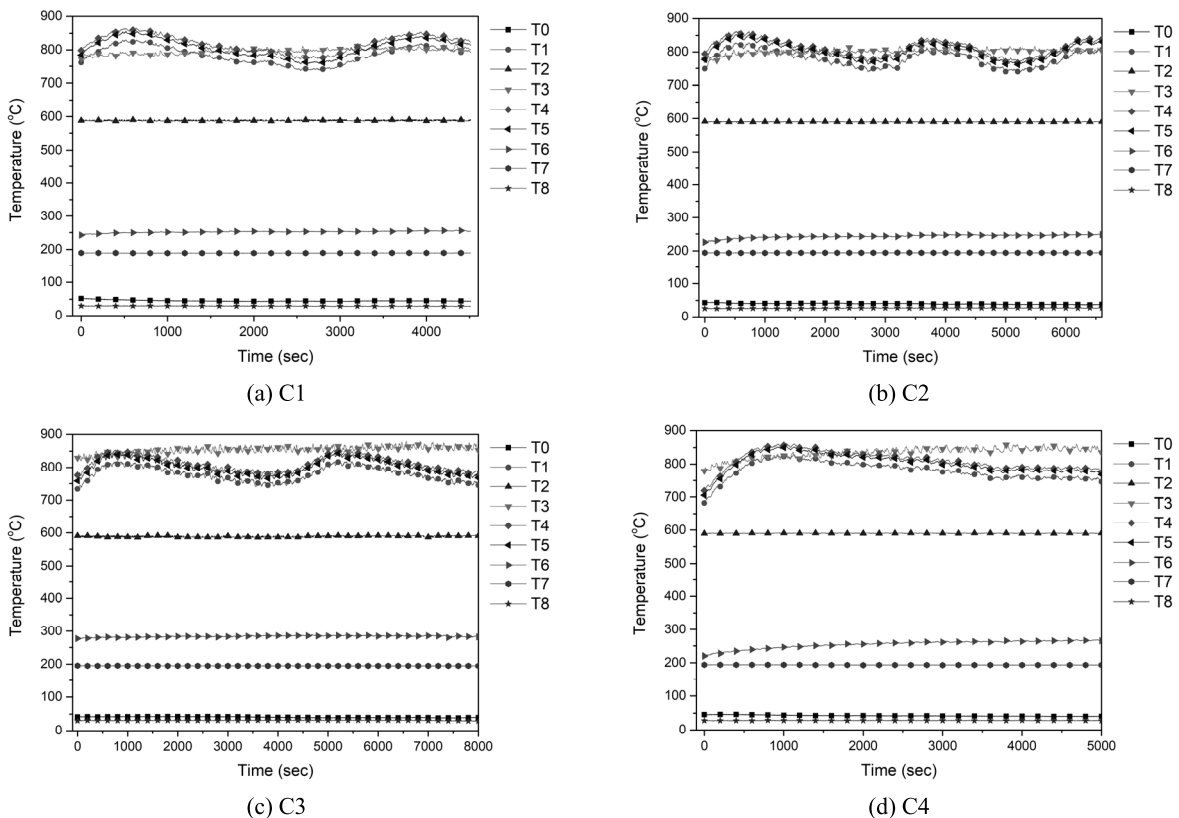


Figure 2. Measured temperature profiles of the tested conditions.

Table 7. Mean temperature at measured points

Parameter	Unit	Case			
		C1	C2	C3	C4
T2	°C	587.9	590.2	587.5	590.1
T3		795.9	799.7	849.3	832.5
T4		820.0	817.3	808.9	814.5
T5		807.9	808.76	799.2	806.5
T6		253.2	245.1	280.9	255.6
T7		189.5	194.5	195.3	193.6
T8		29.2	26.6	30.8	28.1

서를 지나면서 냉각되어 T8에서는 상온으로 배출되고 있음을 확인할 수 있다.

Table 7은 실험 조건 별로 주요 측정 위치별 온도의 평균값을 나타낸 표이다. 본 실험실 규모 유동층 반응기는 외부 전기를 통해 초기 반응기 온도를 유지하도록 설정되었다. 한편 본 실험에서 고려된 투입 열량은 약 3~4 kW 수준으로, 연료의 발열량 보다는 전기를 통한 열량이 높은 수준이다. 따라서 분산판을 통한 공기 투입이 이루어지는 반응기 하부에서는 증발열의 일부 냉각으로 인해 상대적으로 낮은 온도가 형성되다가 연소가 활발히 진행되는 상부로 갈수록 상대적으로 높은 온도를 보이고 있으나 전체적으로 각 운전 조건별 온도 측정 결과에는 큰 차이는 없는 것으로 확인되었다. 반응기 높이 별 온도를 살펴보면 반응기로 연료가 투입되는 위치인 T3에서 C3, C4 케이스의 온도가 C1, C2 케이스보다 더 높았다. 이는 석탄 및 목재 펠릿 간 혼소 기준 연료에 따른 투입 열량 차이 및 연료 특성 차이로 보인다. 또한 석탄 대비 WP의 높은 휘발분으로 인해 석탄보다 더 낮은 온도 구간에서 대부분의 휘발분 연소가 이루어졌을 것으로 예상된다.

3.3. 연소가스 조성 측정 결과

Figure 3과 Table 8는 가스 측정 위치에서 가스 분석기를 통해 측정된 조건 별 배가스 조성 및 그 평균값을 나타내고 있다. 우선 CO의 경우 C3과 C4의 WP 혼소 케이스가 C1 및 C2의 석탄 혼소 케이스에 비해 매우 증가한 측정 결과를 보였다. 배가스 내 CO 함량은 기본적으로 연료 특성에 크게 좌우된다. WP와 하수 슬러지 연료의 경우 석탄에 비해 휘발분 함량이 많으며 대체로 석탄에 비해 낮은 온도에서 탈휘발이 시작된다. 따라서 WP와 하수 슬러지 혼소의 경우 고온에 투입된 연료 입자들로부터 많은 양의 휘발분이 빠르게 발생함에 따라 반응기 내에서 완전 연소까지 전환되지 못한 일부 CO가 배출될 가능성을 높인다고 할 수 있다. CO의 배출에는 실험 장치 특성에 따른 영향도 존재한다고 볼 수 있다. 우선 스크류 피더를 이용한 연료 투입 방식의 경우 장치 특성에 따른 불규칙한 연료 투입이 발생할 수 있다. 이로 인해 실험 중 균일한 공연비 유지의 어려움이 증가하여 반응기 내에서 국부적으로 연료 과잉 조건이 존재하고 CO의 발생을 증가시

Table 8. Mean flue gas emissions at sampling point

Emission	Unit	Case			
		C1	C2	C3	C4
O ₂	vol.%	11.2	11.5	8.8	7.4
CO ₂		7.2	6.9	9.0	10.2
CO	ppm	28.1	177.9	1093.7	1005.6
NO _x		465.7	533.8	441.6	450.2
NO		465.7	532.2	441.6	450.2
NO ₂		0	1.7	0	0
SO ₂		225.0	118.2	274.7	215.0

킬 수 있다. 이러한 상황은 반응기 내 균일한 연소 반응 진행과 안정적인 반응기 제어에 불리한 영향을 주는 요인이다 [17]. 또한 실험 조건 하 연소 성분들의 체류시간 등에 있어 반응기 높이 및 크기의 제약과 관련된 영향도 고려될 필요가 있다.

SO₂의 경우, 석탄을 베이스로 하수 슬러지 연료를 혼소한 C1과 C2에서는 HTCSS를 혼소한 C2의 SO₂ 배출이 DSS를 혼소한 C1의 약 절반 수준인 것을 확인하였다. 투입된 혼합 연료 내 황 함량은 C2가 C1보다 적었으며 그 차이는 0.1% 수준이었다. WP 베이스의 혼소 케이스인 C3과 C4를 비교해보면, 앞서 C1과 C2의 비교 결과와 같이 HTCSS를 사용한 C4에서 약간 낮은 수치를 보이고 있다. 대부분 연료 내에 포함되어 있는 황 혹은 산화물에 포함되어 있는 황에 의해서 결정되는데, 본 연구에서는 산화제로 공기를 사용하였기 때문에 산화물에 포함되어 있는 황의 영향은 없다고 할 수 있다. 이와 같은 판단에서 연료 내에 포함되어 있는 황에 의해 전체적인 SO₂ 배출이 결정되었다고 할 수 있다. Table 1에서의 성분 분석 결과에서 볼 수 있듯이, 하수 슬러지 연료 간 HTCSS는 DSS보다 0.12% 낮은 황 함량을 보이며 혼소 간 전반적인 SO₂ 배출량 차이에도 영향을 미칠 것으로 예상하였다. 또한, CaO와 MgO 등의 탈황 작용을 감안하면 연료 내 황 함량 외에 Table 4에서와 같은 alkali metal 등 기타 성분에 의한 추가적인 영향도 생각해볼 수 있다.

NO_x의 경우 모든 케이스에서 400~600 ppm 범위의 측정 결과를 보였으며 대부분 NO의 형태로 배출되었다. 본 연구에서 반응기의 온도는 앞서 언급된 바와 같이 반응기 위치에 상관없이 900 °C를 넘지 않는 조건에서 연소 실험이 수행되었으므로 Thermal NO_x의 생성은 그리 높지 않을 것으로 생각되었다. 이와 같은 연소 환경에서 Fuel N이 NO_x 생성에 더 큰 영향을 미칠 것으로 예상할 수 있다 [18]. 원소 분석 결과에서 HTCSS와 DSS의 N 성분은 7~8% 수준으로 Coal과 WP의 0.3~1.0%에 비하여 높은 것을 볼 때 전반적인 NO_x 배출 수준은 하수 슬러지 연료에 의해 크게 좌우되었을 것으로 생각할 수 있다. 또한 NO_x 생성은 연료 특성에도 좌우되는데, 바이오매스의 fuel-N은 주로 Protein-N 및 Amino-N 형태로서 석탄의 질소 성분과 다른 형태로 존재하며, 바이오매스가 석탄에 비

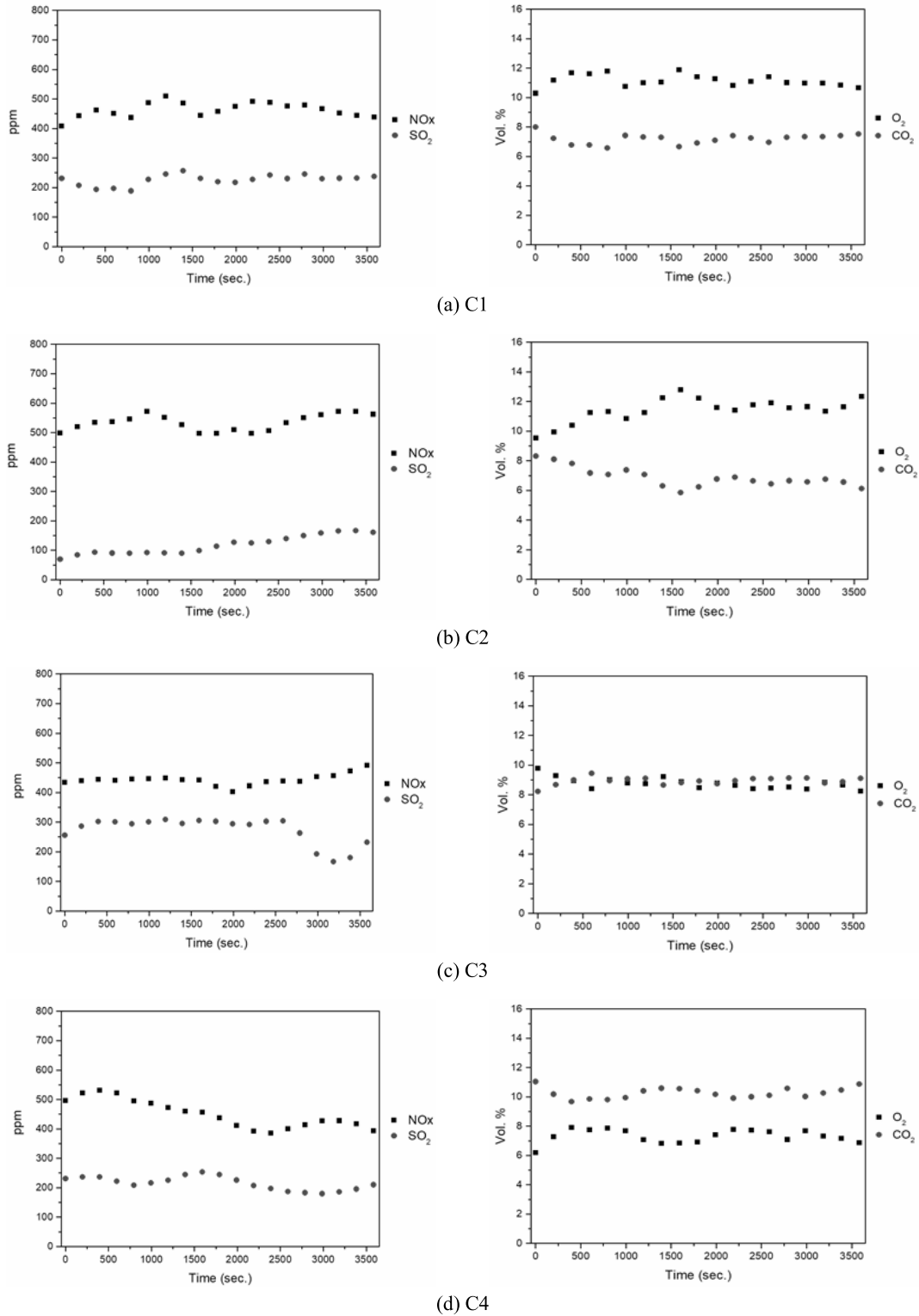


Figure 3. Measured emission profiles of the tested conditions.

해 온도 상승에 따른 fuel-N 배출이 더 쉽게 발생하는 것으로 알려져 있다[19]. 또한 좌 입자 내 Ca, K, Fe, Mg 등은 촉매효과를 통한 NO_x 생성 억제와 관련되어 있는 것으로 알려져 있으므로, SO₂와 마찬가지로 연료 내 기타 성분들에 의한 영향 역시 고려될 필요가 있다[20].

실험 케이스 별 fuel-N의 NO_x로의 전환률은 C1부터 C4까지 각각 7.96, 11.47, 6.91, 9.10%로 계산되었다. 대체적으로 같은 기준 연료에서 HTCSS 혼소가 DSS 혼소 보다 더 높은 fuel-N 전환률을 보였으며, 이는 C1과 C2, C3와 C4 케이스 간 NO_x 조성 결과 비교와도 연관해서 살펴볼 수 있다. 종합적

으로, 본 실험 조건의 하수 슬러지 연료 혼소 시 수십 ppm 수준의 환경 물질 배출 관련 기준 대비 높은 SO₂ 및 NO_x 수치를 보이고 있다. 따라서 상업 설비에서의 활용을 위해서는 적절한 혼소 비율 및 운전 조건 확인 과정과 후처리 설비 등 배출 저감 방안이 필요할 것으로 예상된다.

3.4. 연소 후 회분 분석 결과

Table 9은 실험 조건 별 연소 후 포집된 비산회분의 ICP-OES 분석 결과로부터 도출한 주요 산화물의 질량 분율을 나타낸 것이다. 이를 바탕으로 B/A, S/A, I/C, TA 그리고 BAI 등 연소 회분의 Deposition 관련 인자를 Table 10과 같이 도출하였다. 분석 결과 다소간의 차이는 있으나 실험 조건 별로 큰 차이를 보이지는 않았다고 할 수 있다. 모든 조건에 대해서 S/A 및 I/C가 회분의 Deposition에 대해 높은 가능성을 보이고 있으며, TA 역시 평가 기준값에 비해 높아 파울링의 가능성이 높을 것으로 보인다. 또한, BAI가 10보다 현저히 작아 층 물질의 응집이 발생할 가능성이 높을 것으로 예상된다. 하지만 B/A 결과가 HTCSS의 혼소 조건인 C2와 C4는 중간으로 평가되었으며, DSS의 혼소 조건인 C1과 C3는 높음으로 평가되었다. 이를 통해 회분의 슬래깅/파울링 가능성은 HTCSS가 DSS보다 B/A 측면에서 조금 더 좋은 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 관련 지수들로부터 슬래깅/파울링 가능성은 전체적으로 높게 평가되었지만 실제로 본 연구에서의 실험에서는 층 물질의 응집은 쉽게 발생하지 않았다. 이는 실험실 규모 기포 유동층 실험 조건 상 반응기 내 층 물질 온도가 다른 연소 시스템에 비해 높지는 않았고 연료량 역시 층 물질의 응집을 발생시킬 정도의 투입량은 아니었기 때문으로 판단된다.

실험 조건 별 연소 후 회분의 미연 탄소 함량 분석 결과 DSS를 혼소한 C1과 C3에서 각각 1.7 및 3.2 wt%였고 HTCSS를 혼소한 C2와 C4에서는 0.4 wt% 수준이었다. 이를 바탕으로 ash tracer method를 이용하여 도출한 연소효율 역시 모든 조건에서 99% 이상으로 대부분 투입 연료의 연소가 완료되

었음을 확인하였다[21].

4. 결론

본 연구에서는 폐기물 자원화 및 대체연료 활용과 관련하여 일반 건조 및 수열탄화 하수 슬러지 고품연료와 석탄 및 우드 펠렛과의 유동층 혼소 실험을 통한 연소 특성 및 회분 특성 분석이 이루어졌다. 실험에 적용된 회 용점 분석 결과 하수 슬러지 연료가 석탄 및 우드 펠렛에 비해 높은 슬래깅 경향성을 보이며 고온 시스템 내 연소 장애가 발생할 가능성이 높을 수 있음을 확인하였다. 이는 하수 슬러지 연료의 성분, 특히 Na, K, P 등 회 용점을 낮추는 데에 영향을 주는 원소들의 함량과 밀접한 관계가 있을 것으로 예상되었다. 실험실 규모 기포 유동층 연소 실험 결과에서는 대체적으로 충분한 연소가 이루어진 가운데 배가스 내 NO_x의 경우 모든 조건에서 비슷한 수준을 확인하였으며 SO₂의 경우 HTCSS 혼소에서 더 낮은 배출량을 보였다. 또한 실험 후 포집된 비산 회분의 성분 분석 결과, HTCSS가 DSS보다 슬래깅/파울링 가능성이 조금 더 좋은 특성을 보일 것으로 예상되었다.

감사

본 연구는 산업통상자원부에서 지원하는 에너지기술개발 사업 (20153010102130)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Ogada, T., and Werther, J., "Combustion Characteristics of Wet Sludge in a Fluidized Bed," *Fuel*, **75**(5), 617-626 (1996).
- Werther, J., and Ogada, T., "Sewage Sludge Combustion," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **25**(1), 55-116 (1999).
- Stasta, P., Boran, J., Bebar, L., Stehlik, P., and Oral, J., "Thermal Processing of Sewage Sludge," *Appl. Therm. Eng.*, **26**(13), 1420-1426 (2006).
- Liu, X., Chang, F., Wang, C., Jin, Z., Wu, J., Zuo, J., and Wang, K., "Pyrolysis and Subsequent Direct Combustion of Pyrolytic Gases for Sewage Sludge Treatment in China," *Appl. Therm. Eng.*, **128**, 464-470 (2018).
- Wang, Z., Ma, X., Yao, Z., Yu, Q., Wang, Z., and Lin, Y., "Study of the Pyrolysis of Municipal Sludge in N₂/CO₂ Atmosphere," *Appl. Therm. Eng.*, **128**, 662-671 (2018).
- Zhu, J., Yao, Y., Lu, Q., Gao, M., and Ouyang, Z., "Experimental Investigation of Gasification and Incineration Characteristics of Dried Sewage Sludge in a Circulating Fluidized Bed," *Fuel*, **150**, 441-447 (2015).
- Li, H., Jiang, L., Li, C., Liang, J., Yuan, X., Xiao, Z., Xiao, Z., and Wang, H., "Co-pelletization of Sewage Sludge and Biomass: The Energy Input and Properties of Pellets," *Fuel Process Technol.*, **132**, 55-61 (2015).
- Cho, K., Statistics of Sewerage 2015, Ministry of Environment,

Table 9. Results of ash composition analysis for the tested cases (wt%)

Case	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂
C1	1.8	13.6	10.1	17.4	22.2	5.9	22.1	0.2	0.6	5.9
C2	1.8	8.7	13.0	20.9	30.2	4.7	15.2	0.1	0.8	3.9
C3	2.1	6.1	10.0	20.6	30.0	7.5	17.9	0.2	0.7	3.6
C4	1.5	6.7	13.0	24.5	32.3	4.2	11.2	0.4	0.9	4.5

Table 10. Ash deposition tendency of the tested cases

Fuel	B/A	S/A	I/C	TA	BAI
Coal	1.7 H	1.7 H	0.2 L	8.0 H	0.8 H
WP	0.9 M	1.6 H	0.2 L	6.0 H	0.6 H
HTCSS	1.2 H	2.1 H	0.2 L	11.0 H	0.3 H
DSS	0.7 M	1.9 H	0.4 H	6.0 H	0.8 H

- 1622-1639 (2016).
9. Funke, A., and Ziegler, F., "Hydrothermal Carbonization of Biomass: A Summary and Discussion of Chemical Mechanisms for Process Engineering," *Biofuels Bioprod. Bioref.*, **4**, 160-117 (2010).
 10. He, C., Giannis, A., and Wang, J., "Conversion of Sewage Sludge to Clean Solid Fuel using Hydrothermal Carbonization: Hydrochal Fuel Characteristics and Combustion Behavior," *Appl. Energy*, **111**, 257-266 (2013).
 11. Kim, D., Lee, K., and Park, K., "Hydrothermal Carbonization of Anaerobically Digested Sludge for Solid Fuel Production and Energy Recovery," *Fuel*, **130**, 120-125 (2014).
 12. Lee, Y., Kim, J., Kim, D., and Lee, Y., "Experimental Study of Co-firing and Emission Characteristics Fueled by Sewage Sludge and Wood Pellet in Bubbling Fluidized Bed," *Clean Technol.*, **23**(1), 80-89 (2017).
 13. Cui, H., Ninomiya, Y., Masui, M., Mizukoshi, H., Sakano, T., and Kanaoka, C., "Fundamental Behaviors in Combustion of Raw Sewage Sludge," *Energy Fuels*, **20**(1), 77-83 (2006).
 14. Gray, R. J., and Moore, G. F., "Burning the Sub-bituminous Coals of Montana and Wyoming in Large Utility Boilers," ASME Paper, 74-WA/FU-1 (1974).
 15. Vamvuka, D., Pitharoulis, M., Alevizos, G., Repouskou, E., and Pentari, D., "Ash Effects during Combustion of Lignite/ Biomass Blends in Fluidized Bed," *Renew. Energy*, **34**(12), 2662-2671 (2009).
 16. Eriksson, G., Grimm, A., Skoglund, N., Bostrom, D., and Ohman, M., "Combustion and Fuel Characterisation of Wheat Distillers Dried Grain with Solubles (DDGS) and Possible Combustion Applications," *Fuel*, **102**, 208-220 (2012).
 17. Areeprasert, C., Scala, F., Coppola, A., Urciuolo, M., Chirone, R., Chanyavanich, P., and Yoshikawa, K., "Fluidized Bed Co-Combustion of Hydrothermally Treated Paper Sludge with Two Coals of Different Rank," *Fuel Process Technol.*, **144**, 230-238 (2016).
 18. Duan, L., Duan, Y., Zhao, C., and Anthony, E. J., "NO Emission during Co-Firing Coal and Biomass in an Oxy-Fuel Circulating Fluidized Bed Combustor," *Fuel*, **150**, 8-13 (2015).
 19. Glarborg, P., Jensen, A. D., and Johnsson, J. E., "Fuel Nitrogen Conversion in Solid Fuel Fired Systems," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **29**(2), 89-113 (2003).
 20. Rokni, E., Ren, X., Panahi, A., and Leventis, Y. A., "Emissions of SO₂, NO_x, CO₂, and HCl from Co-Firing of Coals with Raw and Torrefied Biomass Fuels," *Fuel*, **211**, 363-374 (2018).
 21. El-Samed, A. K., Hampartsoumian, E., Farag, T. M., and Williams, A., "Variation of Char Reactivity Dyring Simultaneous Devolatilization and Combustion of Coals in a Drop-Tube Reactor," *Fuel*, **69**(8), 1029-1036 (1990).