



우분 고체연료 연소 보일러와 유기랭킨사이클을 결합한 난방 및 발전 시스템의 수치해석 모델 개발

신동환¹⁾ · 이형원¹⁾ · 정 훈²⁾ · 최준영¹⁾ · 조종영³⁾*

Development of a Numerical Analysis Model for Heating and Power Generation System Combining a Cattle Manure Solid Fuel Combustion Boiler and the Organic Rankine Cycle

Donghwan Shin¹⁾ · Hyeongwon Lee¹⁾ · Hoon Jung²⁾ · Joonyoung Choi¹⁾ · Jongyoung Jo³⁾*

Received 20 July 2023 Revised 7 November 2023 Accepted 29 November 2023 Published online 13 December 2023

ABSTRACT The necessity of energy utilization using livestock manure has been proposed with the decrease in domestic agricultural land. Livestock manure solid fuel has been investigated as a promising energy resource owing to its convenient storage and use in agricultural and livestock fields. Additional electricity production is possible through the integration of a biomass combustion boiler with the organic Rankine cycle (ORC).

In this study, a mathematical system model of the cattle manure solid fuel boiler integrated with the ORC was developed to analyze the components' performance under variable operating conditions. A sensitivity analysis was conducted to confirm the electrical efficiency of the ORC turbine and the applicability of this system. The minimum required waste heat recovery rate was derived considering the system marginal price and levelized cost of electricity of the ORC. The simulation results showed that, in Korea, more than 77.98% of waste heat recovery and utilization in ORC turbines is required to achieve economic feasibility through ORC application.

Key words Livestock manure(가축분뇨), Solid fuel(고체연료), Boiler(보일러), Organic Rankine cycle(유기 랭킨 사이클), Numerical analysis(수치해석)

1) Associate researcher, Energy & Environment Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

2) Chief researcher, Energy & Environment Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

3) Senior researcher, Energy & Environment Laboratory, Korea Electric Power Research Institute

*Corresponding author: jongyoung.jo@kepco.co.kr

Tel: +82-42-865-5421

Fax: +82-42-865-5409

Nomenclature

C_k : investment cost of the k^{th} year, \$

c_p : specific heat, kJ/kg · K

E_k : electrical generation of the k^{th} year, kWh

ΔH° : standard enthalpy of reaction, kJ/mol

h : enthalpy, kJ/kg

I : interest rate

- M_k : maintenance cost of the k^{th} year, \$
- \dot{m} : mass flow rate, kg/s
- P : power, kW
- \dot{Q} : rate of heat transfer, kW_{th}
- s : entropy, kJ/kg·K
- T : temperature, K
- η : efficiency

Subscript

- C : cold side
- H : hot side
- i : isentropic
- in : inlet
- m : mechanical
- out : outlet
- p : pump
- t : turbine
- th : thermal
- w : working fluid

1. 서론

우리나라는 에너지화 가능한 부존자원이 적어 전 산업계에서 대부분 수입산 원자재에 의존하고 있지만, 그 중 특히 농림어업 부분은 화석연료 의존도가 매우 높다.^[1] 2019년 기준 석유 57.3%, 전기 40.0%, 기타 2.6% 순으로 대부분 화석연료에 의존하고 있으며,^[2] 최근 농사용 기계설비 사용 연료가 석유에서 전기로 전환됨에 따라 석유와 전기 두 에너지원의 사용 비율 추세만 변화할 뿐 농림어업에서 자체적으로 발생한 바이오매스를 에너지원으로 사용하는 경우는 거의 없다.

국내 식문화는 곡류에서 육류 위주로 변화하고 있으며, 이에 따라 3대 육류(돼지, 소, 닭) 1인당 소비량은 2002년 33.5 kg/년에서 2022년 58.4 kg/년으로 약 74.3% 증가하였고, 쌀 등의 곡물 1인당 소비량은 2002년 167.2 kg/년에서 2022년 135.3 kg/년으로 약 19.1% 감소하였다.^[3] 국내 축산업 형태도 기업 및 대규모화 형태로 변화하고 있으며,^[4] 가축의 사육두수도 늘어 연간 5천만 톤 이상의 가축

분뇨가 발생하고 있다.^[5] 현재 발생한 가축분뇨는 대부분 퇴·액비화 처리하지만,^[6] 경작지 감소, 도시화, 토양 내 양분 과잉에 따른 비료 사용 면적 축소로 인해 퇴액비 양이 점차 증가하고 있다. 또한, 퇴·액비화 과정 및 토양 살포 후 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O)와 같은 온실가스가 발생하는 문제가 있어,^[7~9] 에너지자원화 등 다른 활용방안 마련의 필요성이 지속적으로 요구되는 상황이다.

가축분뇨를 에너지화하는 대표적인 방법은 고체연료화와 바이오가스화가 있다.^[10~12] 가축분뇨 고체연료는 가축분뇨를 건조 후 원형 그대로 혹은 펠릿 등의 형태로 가공하여 사용하며, 운송 및 보관이 용이하다는 장점이 존재하지만, 품질이 타 연료에 비해 상대적으로 불균일하고, 건조 과정에서 추가적인 에너지가 소비되며,^[13] 재의 함량이 높다는 단점이 존재한다.^[14] 바이오가스는 혐기성 소화 방식을 통해 생산하며,^[15] 일반적으로 메탄(CH₄), 이산화탄소(CO₂) 및 소량의 질소(N₂), 수소(H₂), 황화수소(H₂S), 수증기(H₂O) 등으로 이루어져 있다.^[16] 연소효율이 높고 균일한 연소 유지가 용이하다는 장점이 있으나, 운반 및 저장에 어렵고 단위체적당 발열량이 낮으며, 폭발 및 화재 위험성이 상대적으로 높다는 단점이 있다. 농가에서 가축분뇨를 에너지 자원으로 활용할 경우, 품질은 바이오가스에 비해 상대적으로 낮지만 보관 및 사용상의 이점이 있는 고체연료가 용이하며, 최근 가축분뇨 고체연료를 에너지원으로 활용하려는 연구가 점진적으로 확대되고 있다. Saidur *et al.* (2011)은 바이오매스를 보일러 열원으로 활용하기 위한 연구에서 가축분뇨를 포함하여 특성 분석을 수행하였으며,^[17] Szymajda *et al.* (2021)은 우분 및 우분 고체연료의 성분과 연소 특성 분석을 진행하였다.^[18] 이 등은 돈분과 우분으로 생산한 가축분뇨 고체연료의 특성을 개별적으로 분석하여 연료로써의 품질 향상을 위한 방안을 도출하였다.^[19,20] 아일랜드 BHSL사는 유동층 연소를 활용하여 열효율 86%의 계분 연소 보일러를 개발하였으며,^[21] 현재 최대 난방 출력 2,400 kW_{th}의 제품까지 출시하였다.^[22]

유기랭킨사이클(Organic Rankine cycle, ORC)은 낮은 온도 영역에서 증발 가능한 유기혼합물을 작동유체로 이용하여 저등급 열에너지로도 전기 생산이 가능한 기술이다.^[23] 현장에서 발생한 폐열 온도 영역별 냉매 선택이 가능하며,^[24] 최근 지구온난화 지수가 낮은 친환경 냉매를 ORC

에 적용하는 연구가 활발하게 진행 중이다.^[25,26] 일반적으로 원예시설 농가에서 난방용 온수 보일러를 활용하여 온실 내부 난방을 할 경우, 최대 약 95°C의 온도로 실내 난방을 한다.^[27] 해당 온도 범위 내에서 증발하는 유기혼합물을 ORC 작동유체로 적용하면, 농가에서 난방열 일부를 활용하여 추가적인 전기 생산도 가능하다.

본 연구에서는 우분 고체연료 연소 보일러와 유기랭킨사이클을 결합한 형태의 농가 난방 및 발전 시스템 모델을 공정모사 프로그램인 Aspen Plus[®]을 이용하여 개발하였다. 실제 상용화된 제품의 사양을 토대로 모델링을 진행하였으며, ORC 터빈의 작동 압력 변화에 따른 터빈 출력, 터빈 전

기 효율, 작동 온도, 농가 열 사용률 등을 분석하였다. 또한, 2022년 계통한계가격(System marginal price, SMP)과 균등화발전비용(Levelized cost of electricity, LCOE)을 반영하여, 국내에서 본 시스템 적용이 가능한 ORC 폐열 최소 회수 및 활용 조건을 분석하였다. 본 연구 결과는 향후 국내 가축분뇨 에너지자원화를 위한 기반 자료로 활용될 수 있다.

2. 시스템 구성도

전반적인 시스템 구성은 Fig. 1과 같다. 우분 고체연료

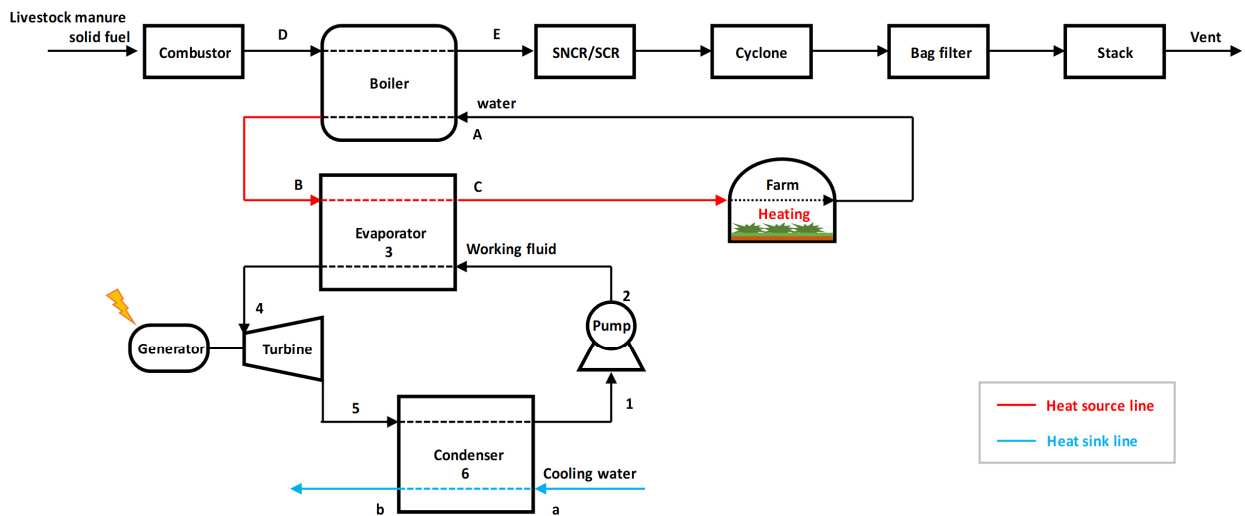


Fig. 1. Schematic diagram of farm heating system using livestock manure solid fuel boiler integrated with the ORC

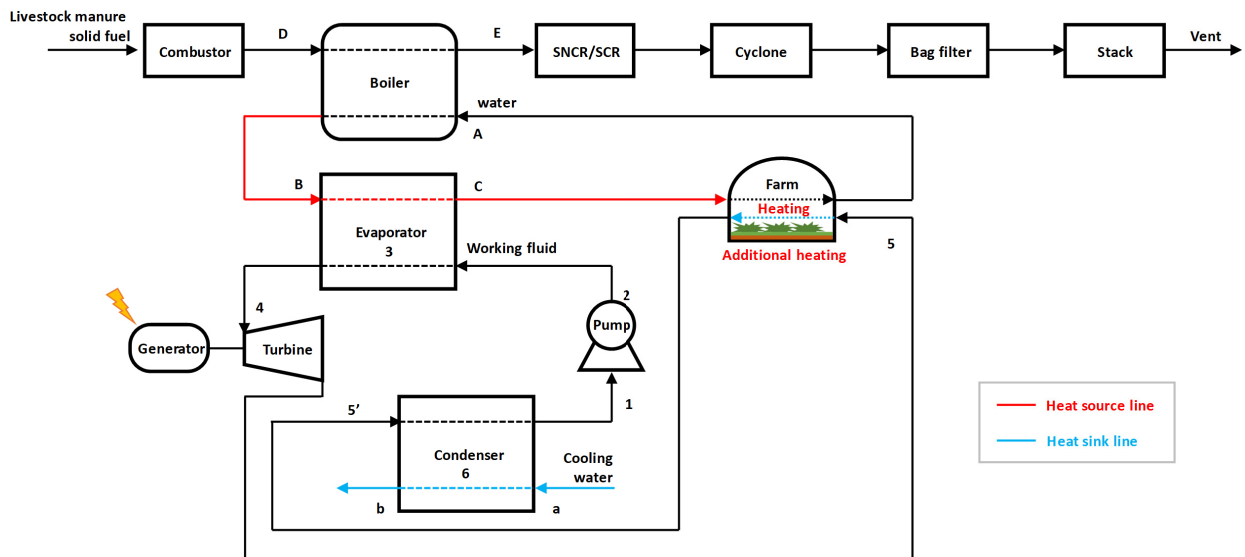


Fig. 2. Schematic diagram of farm heating system with ORC waste heat recovery

는 연소로에서 연소 후 보일러에 열을 공급한다(Point D → E). 보일러 순환수는 보일러에서 열을 공급받아 온수가 되고(Point A → B), ORC에 1차적으로 열전달을 한 후(Point B → C) 농가에 난방열을 공급한다(Point C → A). 연소 배기가스는 국내 대기환경 규정 충족을 위한 선택적 무촉매 환원법(Selective non catalytic reduction, SNCR) 혹은 선택적 촉매 환원법(Selective catalytic reduction, SCR) 설비, 사이클론, 백필터 등 대기오염 방지시설을 거쳐 외부로 배출된다. ORC 작동유체는 증발기에서 열전달을 통해 증발하며(Point 2 → 4), 터빈 블레이드를 회전시켜 발전한다(Point 4 → 5). 터빈 출구의 작동유체는 응축기에서 외부 냉각수를 통해 응축되고(Point 5 → 1), 펌프에서 가압된 후 다시 증발기로 공급된다(Point 1 → 2). 해당 구성도에서는 발생한 폐열을 외부 냉각수를 이용하여 방출하기 때문에 ORC에서 발생하는 열 손실이 크다. 만약 이 폐열이 농가에서 활용할 수 있는 온도 영역이면, Fig. 2와 같이 폐열을 농가에서 활용하는 시스템 구성이 가능하다.

3. 모델링

3.1 우분 고체연료

가축분뇨 고체연료는 사육 축종 및 환경에 따라 연료 조성, 품질 등 편차가 발생한다. 모델링을 위한 실험에서 사용된 연료는 경상북도 경주에서 생산한 길이 8 mm 펠릿형

Table 1. Properties of livestock manure solid fuel

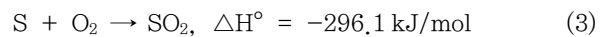
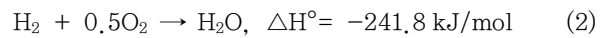
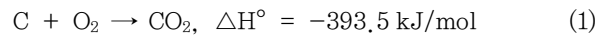
Parameters	Unit	Value
Water content	%	15.7
Total solid	%	84.3
Volatile solid	%	54.0
Fixed solid	%	30.3
Higher heating value	kJ/kg	12,719.4
Lower heating value	kJ/kg	11,338.6
Carbon	%	39.4
Hydrogen	%	5.2
Oxygen	%	23.0
Nitrogen	%	3.3
Sulfur	%	0.61
Chloride	%	1.35

우분 고체연료이며, 연료 물성은 아래 Table 1과 같다.^[28]

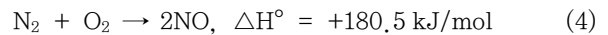
우분 고체연료 물성 시험은 고형연료제품 품질 시험·분석방법(환경부 고시 제2020-219호)을 표준으로 적용하였다.^[19,20]

3.2 우분 고체연료 연소 보일러

우분 고체연료 연소 보일러는 원예시설 농가에서 일반적으로 이용하는 실내 난방온도 범위 내 온수 생산이 가능한 난방 출력 2 MW_{th} 규모 국내 상용화 제품을 선정하여 모델링하였다.^[29] 연소로 내부에서 발생하는 연소 반응식은 다음과 같다.^[30,31]



연소 과정에서 질소산화물(NO_x) 등의 추가적인 연소 생성물이 발생하며, 해당 모델에서 고려한 반응은 다음과 같다.^[31,32]



모델링에 적용한 우분 고체연료 연소 보일러 사양은 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Reference operating conditions and constraints for simulation of the cattle manure solid fuel combustion boiler

Parameters	Unit	Value
Heating output	kW _{th}	2,000
Operating temperature	°C	850
Operating pressure	bar	1
Air/Fuel ratio	-	1.6
Hot water temperature	°C	95
Hot water temperature difference	°C	20
Effectiveness	-	0.88

3.3 ORC

3.3.1 ORC System

ORC는 우분 고체연료 연소 보일러로 생산한 온수를 열원으로 활용하여 작동유체 증발이 가능한 제품을 선정하여 모델링하였다.^[33] 우분 고체연료 연소 보일러 최대 출수 온도와 ORC 열원부 정격 입구 온도가 각각 95°C와 94°C로 거의 동일하며, 공급 열량은 ORC 요구 열량의 약 4.4배로 ORC 구동에 충분하다. 데이터 트에 명기된 성능과 개발한 모델의 동일 작동조건에서의 성능을 비교하여 유효성을 검증하였다. ORC 시스템 작동 조건은 아래 Table 3과 같다.

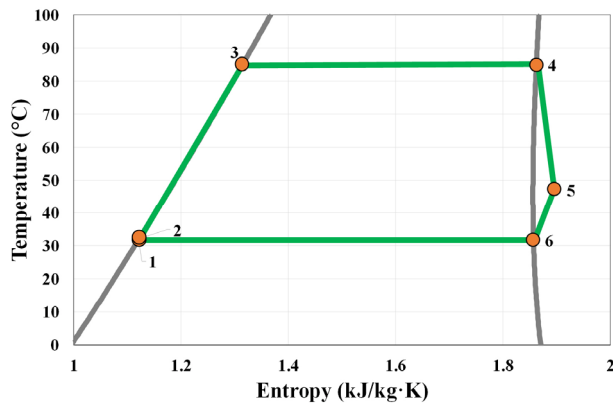


Fig. 3. ORC T-s diagram

Table 3. Reference operating conditions and constraints for simulation of the ORC

Parameters	Unit	Value
Heat source input	kW _{th}	450
Electric power output	kW	40
Working fluid flow rate	kg/s	1.70
Turbine inlet temperature	°C	85
Turbine inlet pressure	bar	4.77
Turbine outlet pressure	bar	1
Turbine isentropic efficiency	%	64.68
Heat source flow rate	kg/s	13.40
Heat source inlet temperature	°C	94
Heat source outlet temperature	°C	86
Heat sink flow rate	kg/s	18.65
Heat sink inlet temperature	°C	26
Heat sink outlet temperature	°C	31
Pump isentropic efficiency ^[34]	%	70
Mechanical efficiency	%	98

터빈 작동유체 종류 및 유량에 관한 자료는 공개되어 있지 않으나, 작동 조건에서의 터빈 압력 및 온도, 열원부와 냉각부 유량 및 온도 데이터를 토대로 다수의 R-141b와 소량의 타 냉매가 혼합된 형태로 예상된다.^[35,36] 본 연구에서는 작동유체를 R-141b로 가정하고 모델링을 진행하였다. 해당 ORC 시스템 T-s 선도는 Fig. 3과 같다.

Fig. 3에 표기된 사이클 순서와 번호는 Fig. 1과 동일하다. 작동유체는 증발기에서 열을 공급받아 포화증기로 상변화가 발생하며, 응축기에서는 열을 외부로 방출 후 포화액체로 상변화가 된다.

3.3.2 증발기, 응축기

증발기에서 열원부가 작동유체에 공급하는 열전달률은 아래 식과 같다.

$$\dot{Q}_H = \dot{m}_H \times c_{p,H} \times (T_{H,in} - T_{H,out}) \quad (7)$$

\dot{Q}_H 는 증발기 열전달률, \dot{m}_H 은 열원부 질량유량, $c_{p,H}$ 는 열원부 비열, T_H 는 열원부 온도이다. 열원부 입구온도는 Fig. 1에서 Point B이고, 출구온도는 Point C이다. 펌프에서 가압된 작동유체는 출구압력에 따라 포화온도가 변화하며, 증발기를 통해 포화증기로 상변화가 발생한다. 응축기에서 작동유체가 냉각부에 공급하는 열전달률은 아래 식과 같다.

$$\dot{Q}_C = \dot{m}_C \times c_{p,C} \times (T_{C,in} - T_{C,out}) \quad (8)$$

\dot{Q}_C 는 응축기 열전달률, \dot{m}_C 은 냉각부 질량유량, $c_{p,C}$ 는 냉각부 비열, T_C 는 냉각부 온도이다. 냉각부 입구온도는 Fig. 1에서 Point a이고, 출구온도는 Point b이다.

3.3.3 터빈

ORC 터빈 출력은 아래 식과 같다.

$$P_t = \eta_t \eta_m \dot{m}_w (h_{t,in} - h_{t,out}) \quad (9)$$

P_t 는 터빈 출력, η_t 는 등엔트로피 효율, η_m 은 기계 효율,

\dot{m}_w 는 작동유체 질량 유량, h_t 는 터빈 엔탈피이다. 터빈 입구는 Fig. 1에서 Point 4, 터빈 출구는 Point 5이다. 터빈 등엔트로피 효율은 제품 데이터 시트에 명기된 터빈 전기 효율을 토대로 도출하였다. 터빈 전기 효율은 아래 식과 같다.

$$\eta_t = \frac{P_t}{\dot{Q}_H} \quad (10)$$

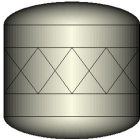
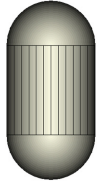
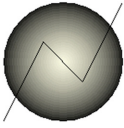
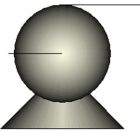
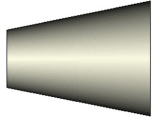
3.3.4 펌프

펌프 소비 동력은 아래 식과 같다.

$$P_p = \eta_t \eta_m \dot{m}_w (h_{p,in} - h_{p,out}) \quad (11)$$

P_p 는 펌프 동력, h_p 는 펌프 엔탈피이다. 펌프 입구는 Fig. 1에서 Point 1, 펌프 출구는 Point 2이다. 전체 시스템 공정별 사용 모델은 아래 Table 4와 같다.

Table 4. Description of aspen block models used in the system simulation

Aspen Plus block name	Scheme	Description of function
RStoic		- Volatile matter combustion of cow manure solid fuel - Fuel NOx formation ^[31]
REquil		- Thermal NOx formation ^[31]
Heater		- Heat exchanger (embedded fortran coding) - heat transfer from combustion gas to bottom ash, boiler, evaporator, condenser) ^[37]
Pump		- ORC Working fluid pressurization ^[38]
Turbine		- ORC turbine ^[38]

3.4 LCOE

우분 고체연료 연소 보일러에 ORC 적용 시, 설비 투자비, 운영비 등 추가적인 비용이 발생한다. ORC 설비 수명 동안 해당 비용이 반영된 kWh 당 실질발전비용 LCOE는 아래 식과 같다.

$$LCOE = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{C_k + M_k}{(1+i)^k}}{\sum_{k=1}^n \frac{E_k}{(1+i)^k}} \quad (12)$$

C_k 와 M_k 는 각각 k 번째 연도의 투자비와 운영비, E_k 는 k 번째 연도의 전력 생산량, i 는 이자율이다. LCOE 산출에 사용된 파라미터와 해당 조건에서의 LCOE는 아래 Table 5와 같다.

Table 5. LCOE parameters of ORC^[39]

Parameters	Unit	Value
ORC lifespan	year	20
Capacity factor	%	90
Common interest rate	%	3
ORC temperature	°C	85
LCOE (result)	\$/kWh	0.07

4. 시뮬레이션 결과

4.1 가정 및 유효성 검증

본 연구에서 적용한 주요 가정은 아래 목록과 같다.

- 1) 전체 시스템은 정상상태이다.
- 2) 응축기에서 응축된 작동유체는 전부 포화액체 상태이고, 증발기에서 증발한 작동유체는 전부 포화증기 상태이며, 열역학적 상변화 반응은 등온과정이다.
- 3) 전체 시스템에서 발생하는 압력강하와 열손실은 무시한다.
- 4) 공급 공기 조성은 질소 78.08 vol%, 산소 20.95 vol%, 아르곤 0.93 vol%, 이산화탄소 0.04 vol%이며, 순 환수는 물 100 vol%이다.

5) 보일러 온수의 농가 입출구 온도차 20°C가 되도록 순환수 유량이 공급된다.

우분 고체연료 연소 반응은 연료 발열량 및 연소 실험에서 측정된 배기가스 조성을 토대로 유효성 검증을 수행하였으며, 결과는 아래 Fig. 4, 5와 같다. 유효성 검증 결과,

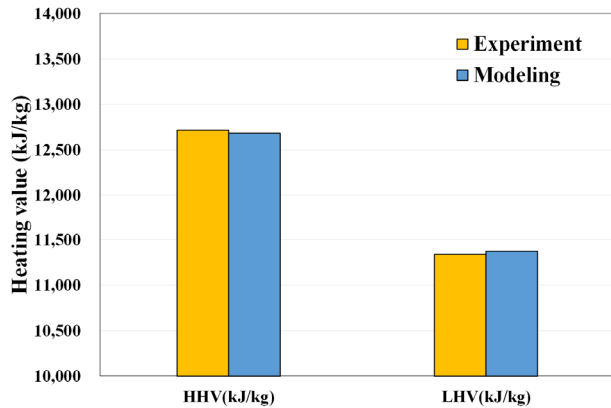


Fig. 4. Comparison between the experiment and simulation of the heating value

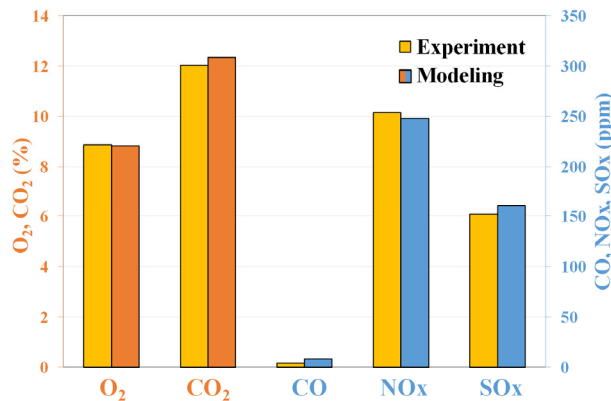


Fig. 5. Comparison between the experiment and simulation of the exhaust gas composition

Table 6. Comparison between the Ref. [33] and simulation

Parameters	Ref. [33]	Simulation	Deviation
Heat source input (kW _{th})	450	450.02	0.004%
Electric power output (kW)	40	40	0.00%
Working fluid flow rate (kg/s)	1.70	1.74	2.35%
Heat source outlet temperature (°C)	86	86.01	0.01%
Heat sink outlet temperature (°C)	31	31.26	0.84%

실험 데이터와 시뮬레이션 데이터 최대 오차는 연료 발열량 기준 ±34.36 kJ/kg, 배기가스 조성 기준 ±0.35%이다.

ORC 제품과 개발한 모델을 비교한 유효성 검증 결과는 Table 6과 같다.

4.2 터빈 입구 압력의 영향

ORC 터빈 작동조건 변화에 따른 정량적인 성능 분석을 위하여, Fig. 6과 같이 터빈 입구 압력별 터빈 출력 및 전기 효율을 확인하였다. 그래프 내 reference 표시는 기준 작동 조건인 Table 3에서의 결과이다.

터빈 입구압력이 2 bar에서 6 bar로 증가함에 따라 터빈 출력은 16.74 kW에서 46.68 kW로 증가하였으며, 전기 효율은 4.12%에서 10.07%로 증가하였다. 터빈 출력 증가에 따라 증발기 열원부로부터 전달받는 열전달률은 406.16 kW_{th}에서 463.59 kW_{th}로 증가한다. 터빈 입구압력 6 bar 이상에서는 작동유체 증발온도가 우분 고체연료 연소 보일러 온수 온도보다 높아 구동이 어렵다. 터빈 입구 압력 증가에 따른 보일러 순환수 및 ORC 작동유체의 온도 변화는 Fig. 7과 같다. 터빈 입구압력이 2 bar에서 6 bar로 증가함에 따라 작동유체 포화온도는 52.95°C에서 94.71°C로 증가하며, 터빈 출구온도는 40.11°C에서 60.76°C로 증가한다. 터빈으로 공급되는 열량 증가에 따라 농장으로 공급되는 온수 온도는 89.09°C에서 87.98°C로 감소한다. 우분 고체연료 연소 보일러 난방 출력 2,000 kW_{th} 기준, 터빈 입구압력이 2 bar에서 6 bar로 증가함에 따라 보일러 순환수 유량은 55,085.04 kg/h에서 52,928.85 kg/h로 감소

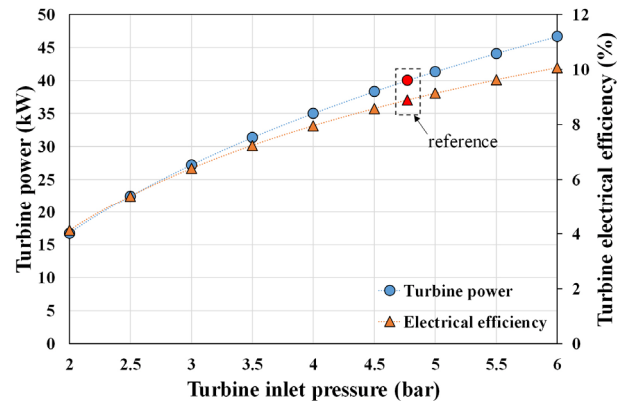


Fig. 6. Turbine power and electrical efficiency under various turbine inlet pressure

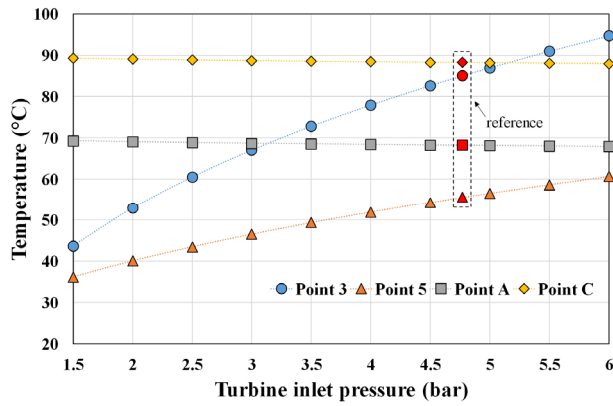


Fig. 7. Boiler recirculation water temperature and ORC working fluid temperature under various turbine inlet pressure

하고, 보일러 순환수로 공급되는 열량은 1,752.64 kW_{th}에서 1,755.14 kW_{th}로 증가하며, 농가에서 이용하는 열량은 1,346.47 kW_{th}에서 1,291.54 kW_{th}로 감소한다. 터빈 출력 증가에 따라 Point A의 온도와 농가에서 활용 가능한 열량이 감소한다.

4.3 보일러 난방 출력의 영향

우분 고체연료 연소 보일러와 ORC가 연계된 시스템에서 보일러 최대 난방 출력 변화에 따른 농장에서의 열전달률, 보일러 열효율, 농가에서의 열에너지 사용 비율을 분석하였으며, 결과는 Fig. 8과 같다.

보일러 출력이 1,000 kW_{th}에서 2,500 kW_{th}로 증가함에 따라 온실에 공급되는 열전달률은 441.89 kW_{th}에서 1,738.44 kW_{th}로 증가하나, 보일러 후단 배기가스의 온도가 94.52°C

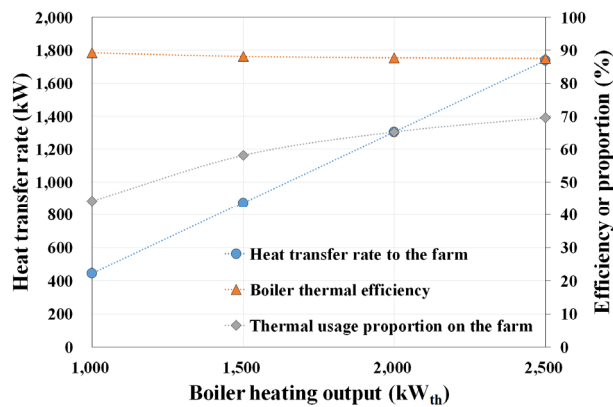


Fig. 8. Heat transfer rate to the farm, boiler thermal efficiency, and thermal usage proportion on the farm under various boiler heating output

에서 109.68°C로 증가하여 보일러 열효율은 89.19%에서 87.54%로 감소한다. ORC 출력 변동은 없고 보일러 출력만 증가하기 때문에, 연소로에서 발생한 열에너지 중 농장에서 활용하는 비율은 44.19%에서 69.54%로 증가한다.

4.4 ORC 최소 폐열 회수량 분석

중·저온 열원을 이용한 ORC 폐열은 온도가 낮아 일반적으로 효율성이 낮지만, 낮은 온도 영역에서도 난방이 가능한 농가 입장에서는 해당 폐열의 활용이 가능하다. ORC 폐열 공급량이 증가할수록 경제성은 향상되지만, 배관 등 전체 시스템 구성이 복잡해질 수 있다. 이에 따라, 2022년 SMP를 고려한 시스템 ORC 최소 폐열 회수 조건을 분석하였다. Table 2, 3에 명기된 기준 작동 조건에서의 결과이며, Table 5의 LCOE를 적용하여 ORC 설비 투자비 및 운영비를 반영하였다. 가축분뇨 고체연료 가격은 국내 가축분뇨 처리업 인허가 업체의 실제 판매가격인 120원/kg을 기준으로 하였다. 환율은 기획재정부 통화별 환율 조사통계를 기준으로 하였으며, ORC에서 생산된 전력은 전부 판매하는 것으로 가정하였고, Fig. 2 구성을 기준으로 분석하였다. 분석 결과는 아래 Fig. 9와 같다.

기준 작동 조건에서 ORC 가동 시, 160 kg/h의 연료가 소비된다. 이 경우, 생산된 40 kW 전력을 2022년 평균 SMP인 193 원/kWh에 판매하면 14,986 원/h의 손실이 발생한다. 해당 금액 충당을 위해서는 ORC 폐열의 77.98% 이상 회수 및 재활용이 필요하다. 2022년 SMP는 최소 128.84 원/kWh에서 최대 267.55 원/kWh이며, 이에 따른 ORC

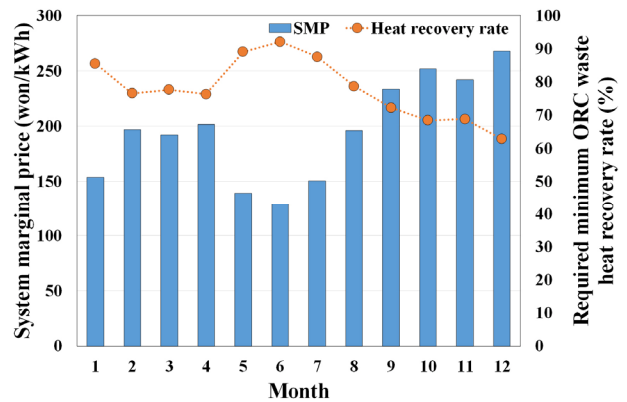


Fig. 9. Required minimum ORC waste heat recovery rate under monthly SMP (2022)

폐열 회수 요구량은 62.74%에서 92.10%로 변화함을 확인하였다. 현재 국내에서 우분 고체연료 연소 보일러 난방 출력 대비 필요 입력량 약 1/4 규모의 ORC를 연계하여 활용할 경우, 최소 절반 이상의 ORC 폐열 회수 및 농가 활용이 필요함을 알 수 있다.

4.5 시스템 분석

정격 작동 조건에서의 시스템 에너지 흐름도는 아래 Fig. 10과 같다. 가축분뇨 고체연료 연소를 통해 발생한 2,000 kW_{th} 열은 보일러에서 열교환을 통해 1,755 kW_{th} 온수로 전환된다. 이 과정에서 약 66 kW_{th}의 열이 소각재와 미연소 연료 현열로 배출되며, 179 kW_{th}의 열은 배기가스 현열로 배출된다. 온수 열출력 1,755 kW_{th} 중 1,305 kW_{th}는 농가로 바로 공급되며, 450 kW_{th}는 ORC로 공급된다. 40 kW 전력 생산 후 발생한 폐열 중 320 kW_{th}는 농가에서 활용되며 남은 90 kW_{th}는 응축기에서 소비된다. Fig. 1 구성도에서는 410 kW_{th} 폐열이 모두 응축기에서 소비된다. 정격 작동 조건에서의 ORC 시스템 T-s 선도는 Fig. 11과 같다. Fig. 2 구성에서의 선도이며, 증발기와 응축기에 공급된 온수와 냉수 온도 변화도 표기하였다. 증발기로 공급된 온수는 작동유체와 열교환을 통해 95°C에서 88.25°C로 감소하며(Point B → C), 응축기에 공급된 냉수는 작동유체와 열교환을 통해 26°C에서 27.17°C로 증가하며(Point a →

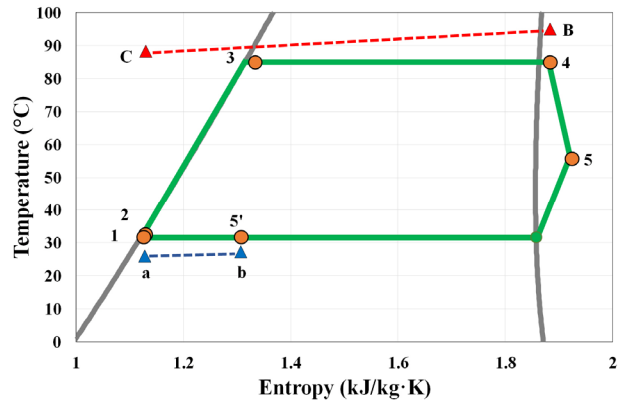


Fig. 11. ORC T-s diagram under reference operating condition

b), 터빈 출구측 작동유체 열은 농가에서 우선 활용한 후 응축기로 공급되기에(Point 5 → 5'), 응축기로 버려지는 폐열은 감소한다.

5. 결론

본 연구에서는 우분 고체연료 연소 보일러와 유기랭킨사이클이 결합된 시스템 모델 개발 및 시스템 해석을 수행하였으며, 결론은 아래와 같다.

- 1) ORC 터빈 입구 압력이 2 bar에서 6 bar로 증가함에

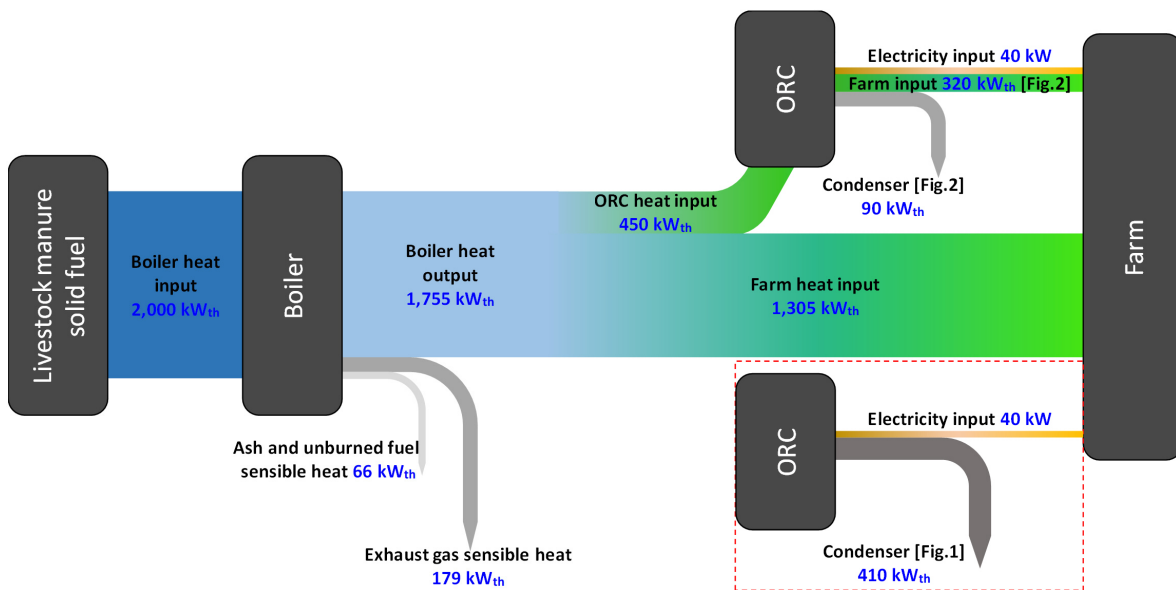


Fig. 10. Energy flow diagram under reference operating condition

- 따라, 터빈 출력은 16.74 kW에서 46.68 kW, 전기 효율은 4.12%에서 10.07%로 증가한다.
- 2) 위와 동일한 조건에서 터빈 출구 온도는 40.11°C에서 60.76°C로 증가하며, 농장에 공급되는 온수 온도는 89.09°C에서 87.98°C로 감소한다.
 - 3) ORC 필요 열원 공급량 대비 보일러 정격 난방 출력이 2.2배에서 5.6배로 증가함에 따라, 보일러 열효율은 89.19%에서 87.54%로 감소하나, 보일러 열 생산량 대비 농장에서 활용되는 열에너지 비율은 44.19%에서 69.54%로 증가한다.
 - 4) SMP와 LCOE를 반영한 시스템 분석 결과, 국내에 본 시스템 적용을 위해서는 최소 62.74%에서 최대 92.10%의 ORC 폐열을 회수하여 농가에서 활용해야 한다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20227410100080).

References

- [1] Kim, Y.J., Kim, J.J., and Han, H.S., 2013, "The current status of agricultural energy production and consumption", Korea Rural Economic Institute, <https://repository.krei.re.kr/bitstream/2018.oak/20655/1/%EB%86%8D%EC%97%85%EC%9A%A9%20%EC%97%90%EB%84%88%EC%A7%80%20%EC%83%9D%EC%82%B0%C2%B7%EC%9D%B4%EC%9A%A9%EC%8B%A4%ED%83%9C.pdf>.
- [2] Korea Energy Economics Institute and Korea Energy Agency, 2022, "2020 Energy consumption survey", Accessed 19 July 2023, <https://www.energy.or.kr/front/board/List9.do>.
- [3] Korea Rural Economic Institute, 2023, "Agricultural outlook 2023 Korea", file:///C:/Users/KSNRE/Downloads/E04-2023-1.pdf.
- [4] Kang, M.S., Kim, K.H., Koo, K.W., and Park, S.H., 2023, "A study that certification RE100 of pig breeding house by utilization livestock manure", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, **72**(3), 453-458.
- [5] Ministry of Environment, 2023, "Statistics of livestock manure generation and treatment in 2020", Accessed 19 July 2023, https://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10263&seq=8039.
- [6] Cho, E.S., Yi, S.R., Yoon, Y.M., Shin, D.W., and Hwang, B.E., 2019, "A study on sustainable livestock manure management", Korea Environment Institute.
- [7] Yang, S.H., Park, K.H., Cho, S.B., Hwang, O.H., and Kwak, J.H., 2010, "Research on greenhouse gas emissions from livestock manure treatment processes", Rural Development Administration, <https://scienceon.kisti.re.kr/commons/util/originalView.do?cn=TRKO20120000010&dbt=TRKO&rn=>.
- [8] Kebreab, E., Clark, K., Wagner-Riddle, C., and France, J., 2006, "Methane and nitrous oxide emissions from canadian animal agriculture: A review", Canadian Journal of Animal Science, **86**(2), 135-157.
- [9] McGinn, S.M., 2006, "Measuring greenhouse gas emissions from point sources in agriculture", Canadian Journal of Soil Science, **86**(3), 355-371.
- [10] Dagnall, S., Hill, J., and Pegg, David, 2000, "Resource mapping and analysis of farm livestock manures-assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes", Bioresour. Technol., **71**(3), 225-234.
- [11] Caetano, B.C., Santos, N.D.S.A., Hanriot V.M., Sandoval, O.R., and Huebner, R., 2022, "Energy conversion of biogas from livestock manure to electricity energy using a stirling engine", Energy Conversion and Management: X, **15**, 100224.
- [12] Afazeli, H., Jafari, A., Rafiee, S., and Nosrati, M., 2014, "An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes", Renewable and Sustainable Energy Reviews, **34**, 380-386.
- [13] Oshita, K., Toda, S., Takaoka, M., Kanda, H., Fujimori, T., Matsukawa, K., and Fujiwara, T., 2015, "Solid fuel production from cattle manure by dewatering using liquefied dimethyl ether", Fuel, **159**, 7-14.
- [14] Jeong, K.H., Lee, D.J., Lee, D.H., and Lee, S.H., 2019, "Combustion characteristics of cow manure pellets as a solid fuel source", Journal of the Korea Organic Resources

- Recycling Association, **27**(2), 31-40.
- [15] Zhang, Q., Hu, J., and Lee, D.J., 2016, "Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates", *Renewable Energy*, **98**, 108-119.
- [16] Santos, N.D.S.A., Roso, V.R., Malaquias, A.C.T., and Baêta, J.G.C., 2021, "Internal combustion engines and biofuels: Examining why this robust combustion should not be ignored for future sustainable transportation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **148**, 111292.
- [17] Saidur, R., Abdelaziz, E.A., Demirbas, A., Hossain, M.S., and Mekhilef, S., 2011, "A review on biomass as a fuel for boilers", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**(5), 2262-2289.
- [18] Szymajda, A., Laska, G., and Joka, M., 2021, "Assessment of cow dung pellets as a renewable solid fuel in direct combustion technologies", *Energies*, **14**(4), 1192.
- [19] Lee, S., Yu, B., Ju, S., Kang, Y., and Jung, G., 2016, "Characteristics analysis for solid fuel from swine manure", *JOURNAL OF KSWM*, **33**(7), 654-658.
- [20] Lee, S., Yu, B., Ju, S., Kang, Y., and Jung, G., 2016, "Characteristics of solid fuel from cattle manure", *New. Renew. Energy*, **12**(4), 64-69.
- [21] Dimache, A., O'Conner, J., and Kearney, D., 2014, "Environmental analysis of the use of poultry manure as fuel for combustion on broiler farms: A case study", *BHSL*, <https://core.ac.uk/download/pdf/51065513.pdf>.
- [22] BHSL, "FBC 2400 CHP", <http://bhsl.com>.
- [23] Yamada, N., Tominaga, Y., and Yoshida, T., 2014, "Demonstration of 10-Wp micro organic rankine cycle generator for low-grade heat recovery", *Energy*, **78**, 806-813.
- [24] Gao, H., Liu, C., He, C., Xu, X., Wu, S., and Li, Y., 2012, "Performance analysis and working fluid selection of a supercritical organic rankine cycle for low grade waste heat recovery", *Energies*, **5**(9), 3233-3247.
- [25] Braimakis, K., Mikelis, A., Charalampidis, A., and Karellas, S., 2020, "Exergetic performance of CO₂ and ultra-low GWP refrigerant mixtures as working fluids in ORC for waste heat recovery", *Energy*, **203**, 117801.
- [26] Bahrami, M., Pourfayaz, F., and Kasaeian, A., 2022, "Low global warming potential (GWP) working fluids (WFs) for organic rankine cycle (ORC) applications", *Energy Reports*, **8**, 2976-2988.
- [27] Prieto, J., Ajnannadhif, R.M., Olmo, P.F., and Coronas, A., 2023, "Integration of a heating and cooling system driven by solar thermal energy and biomass for a greenhouse in mediterranean climates", *Appl. Therm. Eng.*, **221**, 119928.
- [28] Oa, S.W., 2022, "Evaluation of CO₂ concentration of combustion gas in livestock excreta solid fuel", Woosong University Report.
- [29] Kyuwontech, "THANQ Biomass boiler", <http://kyuwontech.co.kr>.
- [30] Rosendahl, L., 2013, "Biomass combustion science, technology and engineering", A volume in Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, UK.
- [31] Sotudeh-Gharebaagh, R., Legros, R., Chaouki, J., and Paris, J., 1998, "Simulation of circulating fluidized bed reactors using ASPEN PLUS", *Fuel*, **77**(4), 327-337.
- [32] Ma, W., Ma, C., Liu, X., Gu, T., Thengane, S.K., Boursalas, A., and Chen, G., 2021, "NO_x formation in fixed-bed biomass combustion: Chemistry and modeling", *Fuel*, **290**, 119694.
- [33] Zuccato energia, "ZE-40-ULH", <http://zuccatoenergia.it>.
- [34] Im, S., Kim, H.G., and Yu, S., 2015, "Feasibility of a solar thermal organic rankine cycle power plant for an apartment complex with aspen plus[®]", *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - B*, **39**(4), 317-324.
- [35] Rohmah, N., Pikra, G., and Salim, A., 2013, "Organic rankine cycle system preliminary design with corn cob biomass waste burning as heat source", *Energy Procedia*, **32**, 200-208.
- [36] Khennich, M., and Galanis, N., 2012, "Optimal design of ORC systems with a low-temperature heat source", *Entropy*, **14**(2), 370-389.
- [37] Shin, D., and Kang, S., 2018, "Numerical analysis of an ion transport membrane system for oxy-fuel combustion", *Applied Energy*, **230**, 875-888.
- [38] Esquivel-Patiño, G.G., Serna-González, M., and Nápoles-Rivera, F., 2017, "Thermal integration of natural gas combined cycle power plants with CO₂ capture systems and organic Rankine cycles", *Energy Convers. Manag.*, **151**, 334-342.
- [39] Ji, D., Cai, H., Ye, Z., Luo, D., Wu, G., and Romagnoli, A., 2023, "Comparison between thermoelectric generator and organic Rankine cycle for low to medium temperature heat source: A Techno-economic analysis", *Sustain. Energy Technol. Assess.*, **55**, 102914.