

2024년 환경플랜트 분야 연구 동향

정원식*†

Research Trends in the Environmental Plant 2024

Wonsik Chung*†

Key Words : Green Technology(친환경 기술), Secondary battery(이차전지), fluidized bed dryer(유동층건조기), heat pipe(히트파이프), nanoemulsion(나노에멀전), fuel efficiency improvement(연비개선), Research Trends(연구 동향)

ABSTRACT

This paper aims to analyze the latest research trends in the Environmental Plant sector by reviewing papers published in 2024 and studies presented at spring and autumn academic conferences. In the environmental plant field, research was presented on topics such as energy reduction technology for climate change reduction, road environment modules for abnormal climate, process optimization technology for traditional deodorizing equipment such as liquid washing, and nanoemulsion technology for the production of eco-friendly fuel oil. Due to the recent increase in demand for climate environment response technology development, research is mainly focused on eco-friendly and greenhouse gas reduction technology as key words. In particular, eco-friendly fuel technology and road environment modules for abnormal climates are technologies that were previously known but have been difficult to review due to legal issues or economic feasibility, and are considered to be fields that can be newly pursued. In 2025, the research direction of energy saving technology, eco-friendly technology, and process optimization using ICT is expected to continue, and excellent research results with greater diversity are expected to be published.

1. 서 론

최근 기후변화 대응을 위한 국제사회의 요구에 따라, 다른 분야와 연계되어 있는 환경플랜트 분야도 탈취설비, 친환경 에너지, 도로환경, 건조시스템 등 다양한 플랜트의 다양한 요구를 수용하면서 발전하고 있다.

본 논문은 2024년에 출판된 논문과 춘계 및 추계 학술대회에서 발표된 연구 결과 분석을 통해 환경플랜트 분야의 최신 연구 동향과 주요 성과를 파악함을 목적으로 한다. 유로5 및 유로6로의 전환에 따른 문제를 해결하기 위한 나노에멀전 기술, 폭염 및 한파 대응 히트파이프 기반 도로환경모듈, 약액세정식 탈취기 효율 개선 기술 그리고 이차전지 양극재 건조에 사용되는 유동층 건조시스템은 고효율과 균일한 건조를 위한 핵심 장비이며, 이와 관련된 소비에너지를 최소화하기 위한 시스템 연구 내용을 다룬다.

2024년에 발표된 주요 연구 키워드로는 이차전지, 유동층

건조기, 폭염, 한파, 히트파이프, 도로환경, 나노에멀전, 연비개선, 디젤유, 약액세정식 탈취기 등, 대체로 친환경 기술과 관련된 다양한 분야에서 다양한 연구가 활발히 진행되고 있는 것으로 분석된다. 특히, 친환경디젤연료유 기술이 에너지효율 개선과 대기환경개선에 관한 주제로 재등장했다는 점은 주목할 만한 변화이다.

2. 이차전지 건조시스템 분야

2.1 연구 동향

이차전지 건조시스템 분야는 1편의 연구논문이 학술대회를 통해 발표되었다. 유동층 건조공정은 고품질 피건조물 생산, 짧은 건조 시간, 낮은 에너지 소비 등의 장점이 있는 온도변동흡착공정 기반 유동층 건조시스템 개발에 관한 연구가 중점적으로 진행 중이다.

* 한국건설기술연구원 환경연구본부(Env. Research Department, KICT)

† 교신저자, E-mail : wsjeong@kict.re.kr

2.2 주요 연구 내용

임준호 등(1)은 기존 건조공정의 소비에너지를 최소화하기 위해 온도변동흡착(temperature swing adsorption, TSA) 공정 기반 유동층 건조(fluidized bed dryer, FBD) 시스템을 개발하였으며, NCM 배터리 양극재 중 황산망간 1수화물의 건조 특성을 이론 및 실험을 통해 분석하였다. 유동층 건조기의 해석모델은 쾌속해석모델(lumped model)과 3차원 CFD-DEM 연성 해석모델(computational fluid dynamics-discrete element method coupling model)을 포함하며, 이들의 타당성은 실험결과와의 비교를 통해 검증하였다.

또한 개발한 유동층 건조기 쾌속해석모델과 3차원 CFD-DEM 연성 해석모델은 항률건조와 감률건조 메커니즘을 고려하였다. 특히, 3차원 CFD-DEM 연성 해석모델은 황산망간 1수화물 입자를 해석 대상으로 고려하여 각 입자에 대한 건조 및 유동 특성을 분석하였다. 각 해석모델의 타당성은 유동층 건조기 실험결과와의 비교를 통해 검증하고 그 결과를 제시하였다.

유동층 건조기 내 황산망간 1수화물(초기함수율 10%)의 함수율에 대한 실험결과와 쾌속해석모델(Fig. 2a) 및 CFD-

DEM 연성 해석모델(Fig. 2b)의 결과를 나타낸다. 실험 및 해석 결과의 결정계수는 모두 0.99이며, 해석결과는 실험결과와 잘 일치함을 보여주었다.

TSA 공정 기반 유동층 건조시스템을 통한 피건조물의 함수율에 대한 실험결과와 쾌속해석모델의 결과를 나타낸다. 초기 함수율이 10%인 황산망간1수화물(300 g)은 일정한 속도로 건조되어 약 50분에 임계함수율(약 4%)에 도달하고(항률건조 구간), 이후 감률건조를 통해 약 180분에 평형함수율(약 0.2wt%)에 도달하였다. 이를 통해, 쾌속해석모델은 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있었다(결정계수: 0.98).

본 연구에서는 폐이차전지 양극재(황산망간 1수화물) 건조를 위한 TSA 공정 기반 유동층 건조시스템을 개발하고, 이를 통해 황산망간 1수화물의 건조 특성을 평가하였다. 또한, 유동층 건조기의 쾌속해석모델과 3차원 CFD-DEM 연성 해석모델을 개발하고, 실험결과와의 비교를 통해 타당성을 검증하였다. TSA 공정 기반 유동층 건조시스템의 성능 평가를 통해 황산망간 1수화물은 약 4%의 임계함수율까지 항률 건조된 후, 약 0.2%의 평형함수율까지 감률 건조되는 특성을 나타내었다. 본 연구에서 개발한 유동층 건조기의 쾌속해석모델과 3차원 CFD-DEM 연성 해석모델은 실험결과와 잘 일치하였으며, 향후 TSA 공정 기반 유동층 건조시스템의 격상 설계 및 성능 예측에 활용할 수 있다.

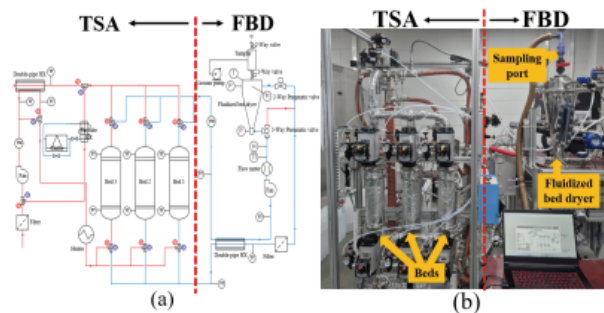


Fig. 1 Schematic and (b) photograph of the experimental set-up of TSA-based fluidized bed drying system

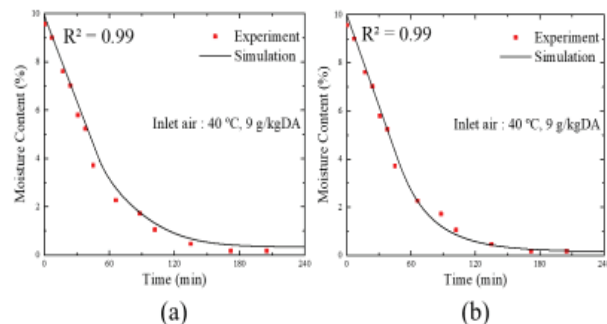


Fig. 2 Comparison of the measured and predicted(a: lumped model and b: CFD-DEM model) moisture content of $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ in the fluidized bed dryer(inlet air conditions: temperature of 40°C, humidity ratio of 9 g/kgDA, and flow rate of 50 L/min)

3. 이상기후대비 도로환경 분야

3.1 연구 동향

폭염 및 한파 등 이상기후 대비 도로환경 분야는 1편의 연

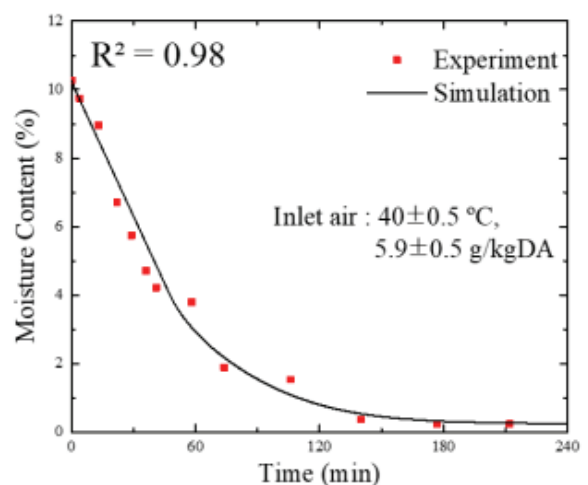


Fig. 3 Comparison of the measured and predicted (lumped model) moisture content of $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ in the TSA-based fluidized bed drying system(inlet air conditions: temperature of 40.5±0.5°C, humidity ratio of 5.9±0.5 g/kgDA, and flow rate of 50 L/min)

구논문이 학술대회를 통해 발표되었다. 열 피해 저감을 위한 도로 소재와 모듈에 대한 다양한 연구가 수행되고 있으며, Pan 등(3)은 지표면 근처 공기의 냉각효과 발생을 위해 새로운 고열전도성 포장체 구조를 제안하였다. Kong 등(4)은 하이브리드 광물충진제를 이용한 아스팔트 포장 냉각 기법을 개발하였다. 또한 미국과 일본에서는 열선을 이용한 도로 상의 살얼음 제거 기술을 개발 중에 있다.

3.2 주요 연구 내용

2024년에 발표된 연구를 보면, 이지은 등(5)은 도시에서 발생하는 잉여 에너지 회수 및 공급을 통해 에너지 소비를 최소화할 수 있는 지중매설형 히트파이프 기반 도로환경모듈을 개발하고, 폭염과 한파조건에 대한 모듈의 성능을 평가하였다. 도로환경모듈은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 아스팔트 포장 모듈, 히트파이프 그리고 열교환기 모듈로 구성된다. 아스팔트 포장 모듈은 아스팔트 표층(WC-2)과 중간층(MC-1)으로 구성되며, 폭과 너비는 100 mm, 두께는 각각 50 mm이다. 실험에 사용된 히트파이프의 직경은 8 mm이며, 2개의 히트파이프는 50 mm 간격으로 아스팔트 표층 하부에 100 mm 삽입하였다. 여기서, 열교환기 모듈 내 삽입된 히트파이프의 길이는 20-80mm로 하여 응축부(폭염) 또는 증발부(한파) 길이에 따른 도로환경모듈의 성능 최적화를 수행하였다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이, 폭염 조건하에서 아스팔트포장의 표면온도는 정상상태에서 약 54℃이며, 이후 도로환경모듈의 열교환기 모듈로 20℃의 냉각수를 공급하고, 아스팔트포장 표층의 상부, 중간부 및 하부 그리고 히트파이프의 증발부 및 응축부 온도를 측정하였다. Fig. 2를 통해 알 수 있듯이, 아스팔트포장 표층은 아스팔트포장 하부에 설치된 히트파이프를 통해 냉각됨에 따라 도로 표층 상부는 54.0℃에서 45.6℃로 약 8.4℃ 그리고 아스팔트포장 표층의 중간부와 하부는 각각 약 12.2℃, 13.9℃ 냉각되었다.

Fig. 6은 한파 조건하에서 도로환경모듈의 열교환기모듈로 다양한 온도의 온수를 공급하였을 때, 정상상태에서 아스팔트포장 표층의 상부 온도를 나타낸다. 공급 온수온도가

15℃와 30℃일 때, 표층 상부 온도는 각각 약 -6.5℃, 0.8℃이며, 이는 도로 살얼음을 제거 및 방지에 적합하지 않음을 알 수 있다. 한편, 열교환기 모듈로의 공급 온수온도가 40℃와 50℃일 때, 아스팔트포장 표층의 상부 온도는 각각 약 4.0℃, 8.0℃로 한파 시 도로 살얼음을 제거 및 방지할 수 있다.

본 연구를 통해 주어진 폭염 조건하에서 아스팔트포장 표층의 상부 온도는 약 54℃인 반면에, 열교환기 모듈로 20℃의 냉각수를 공급한 히트파이프 기반 도로환경모듈 적용 시 아스팔트포장 표층 상부는 약 8.4℃ 냉각되었다. 한파 조건하에서 도로환경모듈의 열교환기 모듈로 40℃와 50℃의 온수를 공급하였을 때, 아스팔트포장 표층의 상부 온도는 각각 약 4.0℃와 8.0℃로 도로 살얼음을 제거 및 방지가 가능함을

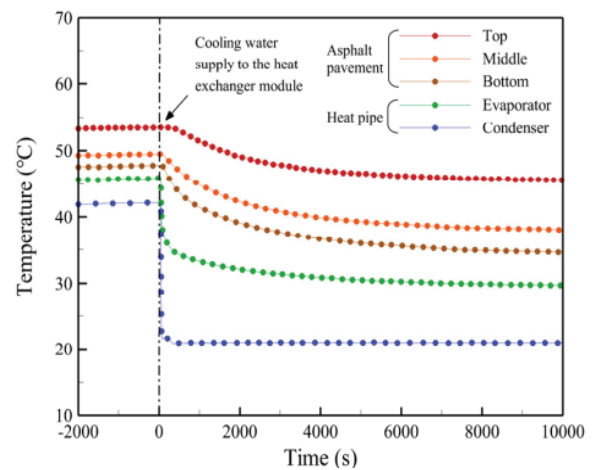


Fig. 5 Temporal temperature profiles of asphalt pavement and heat pipe of the climate-resilient asphalt pavement module under heat wave conditions

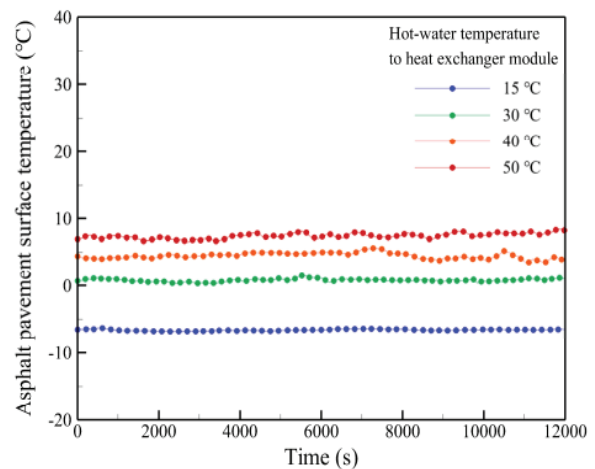


Fig. 6 Temporal temperature profiles of the asphalt pavement surface of the climate-resilient asphalt pavement module at various hot-water temperatures (to heat exchanger module) in the range of 15-50℃ under cold wave conditions

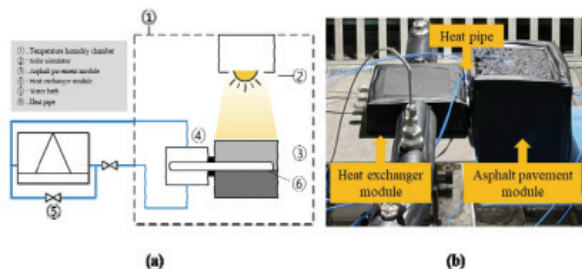


Fig. 4 (a) Schematic and (b) photograph of the climate-resilient asphalt pavement module

확인하였음을 보고하였다.

4. 탈취설비 분야

4.1 연구 동향

탈취설비 분야는 1편의 연구논문이 학술대회를 통해 발표되었다. 약액세정식은 대기오염방지 및 악취저감 설비로 가장 폭넓게 사용되는 방식이며, 신규세정액 개발, 공정 최적화, 고성능소재사용 등의 효율성 향상과 비용절감 및 친환경 약품 사용 등의 환경친화성 분야에 연구가 진행 중에 있다.

4.2 주요 연구 내용

이동우 등(3)은 공정 개선 및 최적화 분야로 회전분사식 임펠라 노즐을 적용하고, 가변설정 약품공급제어가 가능한 기술을 개발하고 소개하였다.

Fig. 7은 기존 방식과 회전분사 방식의 분사특성을 나타내었으며, 대구경 노즐적용으로 노즐 막힘이 없고 동력소모가 작으며, 약액비산에 따른 약품손실이 작음을 제시하고 있다.

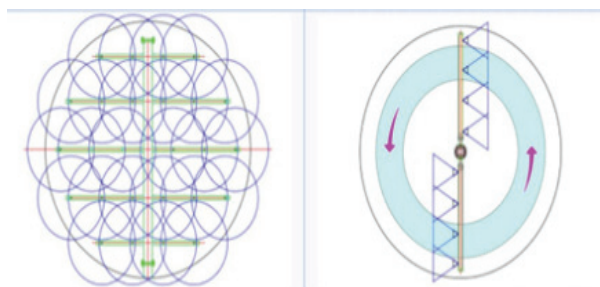


Fig. 7 Characteristics of Fixed Spray System and Rotary Spray System

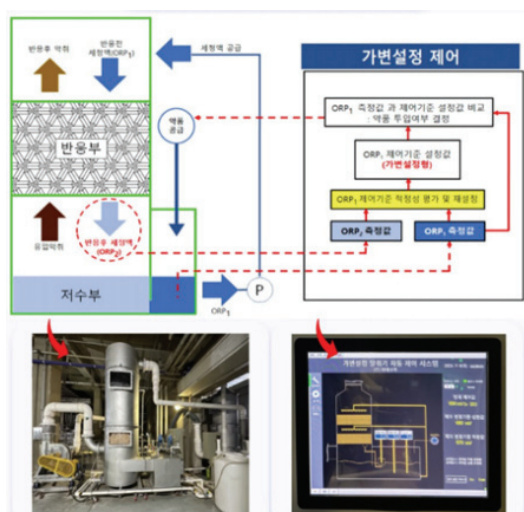


Fig. 8 Variable Control Method for Chemical Injection System

Fig. 8은 약품제어를 위한 가변설정 운전특징에 대하여 나타내고 있으며, 유입 악취농도 변화에 대응하여 최적의 ORP 값으로 유지시킴으로 상시 안정적인 처리효율을 유지함을 제시하였다.

5. 친환경연료유 나노기술 분야

5.1 연구 동향

친환경연료유 나노기술 분야는 1편의 연구논문이 학술대회를 통해 발표되었다. 나노에멀전 기술을 적용한 디젤연료유의 품질을 향상시키는 기술은 연소효율을 20% 이상 향상시키고, 배출가스농도는 20% 저감시키는 친환경기술이다. 또한 플라스틱 유화플랜트에서 300ppm 이하로 처리하기 어려운 중질유 수준의 염소성분을 100ppm 이하의 경질유 수준으로 처리할 수 있는 친환경 기술로 다양한 분야에서 연구가 진행 중에 있다.

5.2 주요 연구 내용

정원식은 고염소성분의 제거가 효율적이고 경질유 서준으로 처리할 수 있는 친환경 나노기술을 소개하고 있다. 나노에멀전장치는 펌프의 전단임펠러에 의한 충격 파 생성으로 물리화학적 혼합과 공동화 현상을 통해 나노버블 및 OH라디칼을 생성하게 되며, 생성된 이후에는 산화환원반응이 일어나 세정수 교체주기를 늘릴 수 있는 장점이 있으며 이런 원리를 간략하게 보면 Fig. 9와 같다. 기능으로는 물리적 반응으로 표면장력의 감소로 탈유화 기능을 가지며, 수산화기 생성 및 산화환원반응, 유체의 분자고리 단절 또는 결합, 그리고 안정화된다.

디젤 100L에 순수 물 30L를 첨가하여 유화제 등 다른 첨가제 없이 장치로만 나노에멀전화 시킨 후 45일간 침전 시킨 결과, 물 7.5L는 침전 분리되었으며, 나머지 22.5L는 연료

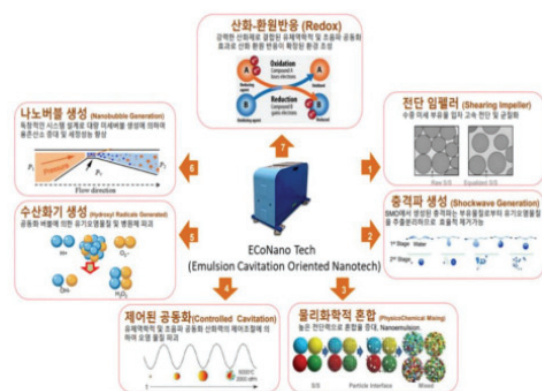


Fig. 9 Mechanism of Nanoemulsion Technology

유로 완전 유화되었다. 생산된 유화액은 불용성으로 영구적 안정성이 요구될 때는 안정화제의 첨가는 필요하나, 현장에서 사용 시는 사용직전에 나노에멀전 연료유를 제조하여 사용할 수 있다. 오일액적 50-100um 내 물액적의 사이즈와 개수를 비교해보면, 기존 연료유 물 액적 10um 이상에 100-200개 수준인 반면, 나노에멀전 연료유에는 130nm 입경의 물액적이 1천만 개 이상 균질하게 분산 혼합되어 있어 연소 효율이 획기적으로 향상된다.

생산된 연료유를 적용할 경우의 연소효율 및 배출가스 저감 효과를 Fig. 11에 도시하였다.

나노에멀전 장치를 적용한 연료유 품질 전환기술을 적용한 결과, 디젤을 다량으로 사용하는 사업장이나 석유대체연료를 개발 및 생산하는 업체에서 본 기술을 적용할 경우 품질 향상을 통한 경제성까지 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 그 사용처를 간단하게 요약하면 다음과 같다.

- 1) 디젤 연료유 품질 개선을 통한 연소효율 및 배출가스 저감이 필요한 사업장
- 2) 유화플랜트 등 석유대체연료 사업자의 염소처리 등 품질 확보가 필요한 사업장
- 3) 블렌딩 사업을 통한 고품질 연료유 생산이 필요한 투자자나 사업장



Fig. 10 Fuel Oil Test Scene with Nano Emulsion

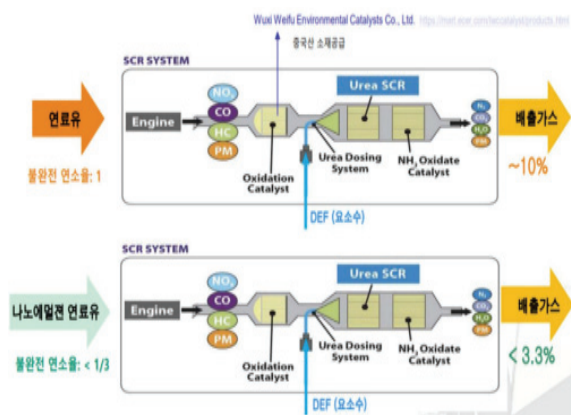


Fig. 11 Combustion Efficiency and Emission Reduction Effect

- 4) SCR시스템을 적용하는 사업장은 NOx 배출량을 90% 저감시켜 BS6 표준을 준수 가능함

6. 결 론

본 논문은 2024년에 환경플랜트 분야에서 발표된 논문에 기반한 관련분야 연구 동향을 분석하고 주제별 주요 연구 성과를 소개했다. 환경플랜트 분야는 기후변화저감을 위한 에너지 저감 기술, 이상기후대비 도로환경모듈, 전통적인 탈취 설비인 약액세정식의 공정 최적화 기술, 친환경연료유의 생산을 위한 나노에멀전 기술 등의 주제로 한 연구들이 발표되었다. 최근의 기후 환경 대응 기술개발 수요 증가로 인해, 친환경 및 온실가스 감축 기술을 핵심 키워드로 하는 연구들이 주를 이루는 추세이다.

특히, 친환경연료유 기술이나 이상기후 대비 도로환경모듈 등은 기존에 알려져 있었으나 법적인 문제나 경제성 등의 검토에서 어려움을 겪은 기술들로 새롭게 추진해 볼 수 있는 분야로 판단된다. 2025년에도 에너지저감기술, 친환경기술, ICT접목한 공정 최적화 등의 연구 방향성은 지속될 것으로 보이며, 더 많은 다양성을 갖춘 우수 연구 결과들이 발표되기를 기대한다.

References

- (1) Im, J.H., Lim, Y.G., Ham, M.G., Kim, J.S., Myagmarsukh, Z., and Kim, Y.D., "Development of fluidized bed drying system for drying secondary battery cathode material," Korean Society for Fluid Machinery, 2024, Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (2) Lee, J.E., Lim, Y.G., Kim, J.S., and Kim, Y.D., "Development of climate-resilient pavement module using buried heat pipe for heat wave and cold wave," Korean Society for Fluid Machinery, 2024, Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (3) Lee, D.W., and Park, K.T., "Efficiency Improvement of Chemical Deodorizer Using Rotating Sprayer and Automatic Chemical Dose Optimization," Korean Society for Fluid Machinery, 2024, Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.
- (4) Chung, W.S., "Nano-emulsion technology for conversion of eco-friendly diesel fuel oil," Korean Society for Fluid Machinery, 2024, Proceedings of the KSFM 2024 Summer Annual Meeting.