

정적 챔버를 이용한 고농도 에탄올-디젤 혼합 연료의 분무 특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on the Spray Characteristics of High-Concentration Ethanol-Diesel Blended Fuels Using Constant Volume Chamber

정세원* · 임옥택** †

Se-Won Jeong* and Ock-Taeck Lim** †

(Received 21 November 2025, Revised 19 December 2025, Accepted 22 December 2025)

초록 : 본 연구는 고농도 에탄올-디젤 혼합 연료의 분무 운동량 및 미립화 거동을 실험적으로 규명하였다. 에탄올은 높은 산소 함량과 낮은 밀도, 점도, 표면장력으로 인해 연소 효율 향상과 배출가스 저감에 유리한 첨가제로 알려져 있으며, 본 연구에서는 이러한 특성이 고농도 혼합 조건에서 분무거동에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 이를 위해 정적 챔버(Constant Volume Chamber)에서 고속가시화 실험을 수행하였다. 에탄올 함량이 증가함에 따라 분무 침투 길이는 감소하였고 분무 둘레는 확대되었으며, 미립화 효율이 향상됨을 확인하였다. 이러한 변화는 에탄올의 낮은 밀도와 점도에 따른 분무 운동량 감소와 공기유입(air entrainment) 증대 효과에 기인하며, 결과적으로 연료-공기 혼합 균질도 및 확산성이 개선되었다. 결론적으로, 고농도 에탄올-디젤 혼합 연료는 낮은 점도·밀도, 높은 산소 함량, 큰 증발 잠열 특성으로 인해 디젤 엔진의 연소 효율을 높이고 배출가스를 저감 할 수 있는 유망한 대체 연료로 평가된다.

키워드 : 에탄올-디젤 혼합 연료, 분무 특성, 미립화 특성, CVC

Abstract : This study experimentally and numerically examined the spray momentum and atomization behavior of high-concentration ethanol-diesel blends. Due to ethanol's high oxygen content and low density, viscosity, and surface tension, it enhances combustion efficiency and reduces emissions. High-speed visualization in a Constant Volume Chamber revealed that increasing ethanol content reduced spray penetration while widening the spray perimeter, indicating improved atomization and mixing. These effects result from lower fuel momentum and enhanced air entrainment. Overall, high-ethanol diesel blends show strong potential as alternative fuels for improving combustion efficiency and emission reduction.

Key Words : Ethanol-Diesel Blends, Spray Characteristics, Atomization Characteristics, Constant Volume Chamber

** † 임옥택(<https://orcid.org/0000-0001-8130-0838>) : 교수,
울산대학교 기계공학부

E-mail : otlim@ulsan.ac.kr, Tel : 052-259-2852

*정세원(<https://orcid.org/0009-0008-8786-2012>) : 석사과정생,
울산대학교 기계공학부

** † Ock-Taeck Lim(<https://orcid.org/0000-0001-8130-0838>) :
Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan.

E-mail : otlim@ulsan.ac.kr, Tel : 052-259-2852

*Se-Won Jeong(<https://orcid.org/0009-0008-8786-2012>) : Graduate
student, Department of Mechanical Engineering, University of Ulsan.

1. 서 론

디젤 엔진은 높은 열효율,¹⁾ 우수한 연료 효율,²⁾ 그리고 강력한 출력 특성³⁾으로 인해 산업 및 농업 분야에서 널리 사용되고 있으나, 에너지 고갈과 환경 오염의 주요 원인으로 지적되고 있다.⁴⁾ 이에 따라 Euro VI 및 미국 EPA Tier 4 등 강화된 배출 가스 규제와 탄소중립 정책이 시행되면서, 산소를 함유한 재생 가능 연료인 바이오에탄올이 화석연료를 대체할 수 있는 유망한 대안으로 주목받고 있다.⁵⁾ 에탄올은 높은 산소 함량과 낮은 밀도·점도 특성으로 연소 효율을 향상시키고 배기가스 저감에 기여하며, 혼합 시 연료 물성 변화가 분무 운동량과 미립화 특성에 영향을 미친다. 디젤기관 의 연소·배기 특성이 실린더 내 분사된 연료-공기 혼합에 의해 좌우되므로, 분무 특성 연구는 미립화-혼합·착화를 정량적으로 규명하여 고효율·저배기 연소를 구현하기 위한 핵심 목적을 가진다.⁶⁾ 기존 연구들은 에탄올 함량이 증가할수록 착화 지연이 길어지고 NO_x, CO, HC 배출이 감소하며 분무 확산성이 향상됨을 보고하였으나, 대부분 저농도 혼합(10~30%) 조건에 한정되어 있었다.⁷⁾

본 연구는 실온에서 안정적인 고농도(최대 99.9%) 에탄올-디젤 혼합연료를 대상으로 고속 가시화 실험을 수행하여, 연료 물성 변화가 분무 운동량과 미립화 거동에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였다.

2. 분무 특성 실험

본 연구에서는 고농도 에탄올 혼합비(50~80%) 조건에서의 에탄올-디젤 혼합연료의 거시적 분무 특성을 상온 비연소 조건의 정적 챔버(CVC) 내에서 체계적으로 분석하였다. Table 1과 2는 각각 실험 조건과 혼합 연료의 물성치를 나타낸다. Fig. 1에 나타난 바와 같이, 본 실험 장치는 챔버, 연료 공급 시스템, 분사 제어 시스템, 광학 시스템, 그리고 데이터 수집용 PC로 구성되어 있다. 연료 혼합의 경우, 순수 디젤 연료와 동일한 LHV를 가질 수 있도록 화학양론 기반으로 계산하였으며, 단순

Table 1 Experimental Condition

Parameter	Value	Unit
Type of Fuels	D100, DE50, DE60, DE70, DE80	Based on LHV-Weight
Injection pressure	800, 1,200	bar
Injection duration	1,600	μ s
Type of injector	BOSCH Single Hole	
Ambient gas	N ₂ gas	-
Pressure of ambient	15, 30	bar
Rate of frame	36,000	fps
Exposure duration	1/3,000,000	

Table 2 Blend Ratio and Fuel Properties

Fuel	Blend Ratio		Fuel Properties		
	Diesel	Ehtnaol	Density (g/cm ³)	Kinematic Viscosity (mm ² /s)	Surface Tension (mN/m)
D100	100	-	0.830	3.4	33.2
DE50	50	50	0.813	2.0	25.495
DE60	40	60	0.808	1.82	24.816
DE70	30	70	0.798	1.64	24.137
DE80	20	80	0.793	1.47	23.458

히 연료의 Volume 기준이 아닌 실제 연소실에 분사되었을 때의 gram/injection를 측정하여 디젤과 에탄올의 질량 기반으로 혼합하였다. CVC는 고온·고압 조건을 견딜 수 있도록 원통형 구조로 설계되었다. 챔버 양측에는 석영(Quartz) 유리창이 설치되어 광 투과가 가능하며, 고속 카메라를 통한 분무 영상 촬영이 이루어질 수 있도록 하였다. 특히, 분사 트리거 버튼을 누르면 분사와 동시에 고속 카메라 촬영이 시작되도록 설정되어 있다. 본 연구에서는 Photron SA3 고속 카메라를 사용하였으며, 광학 시스템에서는 Z-형 새도그래프 기법을 적용하였다. 이 기법은 연소, 분무 해석 등에서 분사, 폭발과 같은 고속 현상을 시각화하는 광학 측정 방법으로, 밀도 변화에 따른 굴절률 변화를 감지하여 연료 분사 및 폭발 과정 중의 유동 특성을 효과적으로 관찰할 수 있다. 촬영된 이미지는 MATLAB 코딩을 이용하여 이미지 후처리를 진행하였으며, 분무의 거시적 특성을 해석하였다. 분

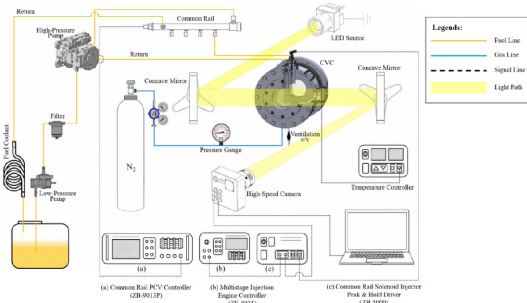


Fig. 1 Schematic Diagram of Optical System

석된 주요 분무 특성으로는 분무 침투 길이(SPL), 분무 면적(SA), 분무 형상의 둘레(SP)가 포함된다. 이러한 종합적 접근을 통해, 무수 에탄올 첨가가 고압 분사 조건에서의 분무 확산, 미립화 강도, 그리고 공기 유입 메커니즘에 미치는 영향을 정량적으로 규명하였으며, 연료 물성(밀도, 점도, 표면장력)의 변화가 분무 거동을 지배하는 물리적 관계를 명확히 제시하였다.

3. 분무 가시화 실험 결과

3.1 분무 특성 실험 결과

1) 에탄올 함량에 따른 분무 침투 길이

분무 침투 길이(SPL)는 인젝터 노즐 출구로부터 분무 선단이 도달한 최대 축 방향 거리로 정의되며, 분사 압력, 주변 압력, 그리고 연료 물성의 상호작용에 의해 결정된다. 실험 결과, Fig. 2에서 분사 압력이 증가할수록 노즐 출구에서의 압력차가 커져 분무 운동량이 증가하고, 이에 따라 SPL이 길어지는 경향을 보였다. 반면, 동일한 조건에서 에탄올 함량이 증가하면 연료의 밀도, 점도, 표면장력이 모두 감소하여 분무 운동량이 약화되고, 액적의 미립화와 증발이 촉진되어 SPL이 짧아졌다. 800~15 bar 조건에서 D100의 SPL은 약 126.7 mm였으나, 에탄올 함량이 증가함에 따라 침투 길이는 지속적으로 감소하여 DE80에서는 약 111.8 mm로 나타났다. 이는 절대적으로 약 14.9 mm, 즉 11.8%의 침투 거리 감소에 해당하며, DE50~DE70 조건에서도 7~10% 수준의 감소율을 보여 에탄올 혼합비 증가와 SPL 단축 간의 선형적 경향이 확

인되었다. 이러한 경향은 에탄올이 낮은 점도와 밀도로 인해 분무의 관성력을 줄이기 때문이다.⁸⁾ 또한 낮은 주변 압력(15 bar)에서는 기체 밀도가 낮아 공기 저항이 적고, 분무가 더 멀리 전진하여 때로는 챔버 벽에 도달하기도 했다. 반면, 30 bar 조건에서는 주변 기체의 밀도가 높아져 분무 선단의 전진이 억제되고, 분무가 외측으로 퍼지며 분무각이 넓어지는 ‘벽 효과(wall effect)’가 발생하였다. 이러한 결과를 종합하면, SPL은 분사 운동량, 연료 물성, 주변 유동 저항의 복합적인 함수로 설명될 수 있다. 높은 분사 압력은 SPL을 증가시키는 반면, 높은 주변 압력과 에탄올 혼합은 강화된 미립화와 공기 저항으로 인해 SPL을 단축시킨다.⁶⁾

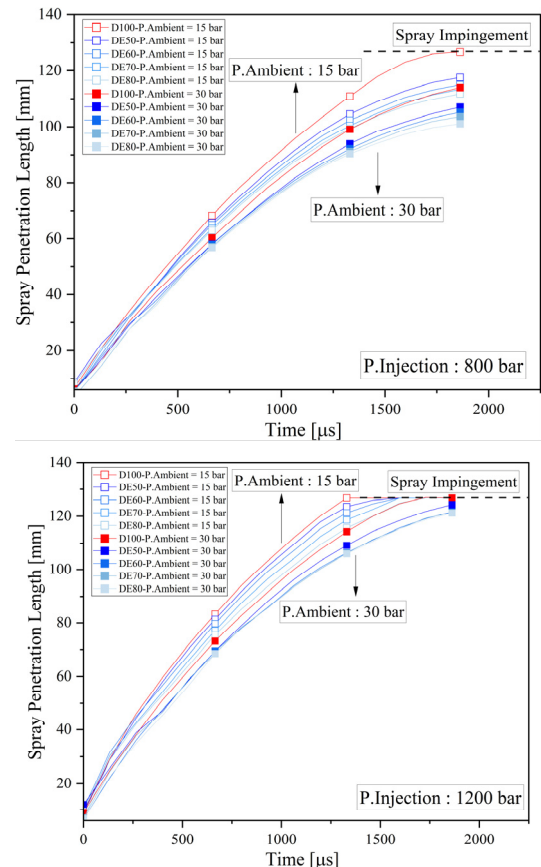


Fig. 2 Variation of Spray Penetration Length of Ethanol-Diesel Blended Fuels with Injection Pressure

에탄올을 혼합연료는 이러한 특성으로 인해 미세한 액적 형성, 빠른 연료-공기 혼합, 균질한 연소를 유도하여 PM 및 soot 배출을 줄이는 데 효과적이다. 따라서 산소 함유 연료인 에탄올을 디젤에 혼합하는 것은 연소 효율 향상과 배출 저감이라는 두 가지 목표를 동시에 달성할 수 있는 유망한 기술적 접근임이 확인되었다.

2) 에탄올 함량에 따른 분무 형상의 면적

분무 면적(SA)은 연료 분무의 발달 정도와 공기 혼합 효율을 평가하는 핵심적인 거시적 지표로, SA가 클수록 연소실 내에서 연료와 공기의 혼합이 균질하게 이루어져 보다 안정적인 연소가 가능하다. 본 연구에서는 MATLAB 기반의 이미지 처리 알고리즘을 활용하여 고속 색도 그래프 영상을 분석하고, 검출된 픽셀 수를 실제

면적(mm²) 단위로 변환하여 정량화하였다. 이때 SA는 분무의 실제 3차원 형상이 아닌 2차원 투영면적을 기준으로 산출된 상대 비교값이다.

Fig. 3의 각 실험조건에서 SA를 나타낸다. 모든 연료에서 분사 후 시간이 지남에 따라 SA가 지속적으로 증가하였으며, 분사 압력이 높을수록 분무 운동량이 커져 SA가 확대되었다. 특히 D100은 높은 밀도와 운동량 플렉스로 인해 1,200 bar 조건에서 가장 큰 SA를 나타냈다. 반면, 주변 압력이 15 bar에서 30 bar로 증가하면 기체 밀도 상승으로 인해 축 방향 침투가 억제되고 방사 방향 확산이 강화되어, D100과 DE 계열 혼합연료 모두 약 3~8%의 SA 감소를 보였다. 이러한 결과는 에탄올 혼합이 미립화를 촉진하면서도 전체 분무 형상을 급격히 변화시키지 않음을 의미한다. 즉, 짧은 분무 침투 길이(SPL)와 넓은 분무각(SCA)의 균형을 통해 연료-공기 혼합이 충분히 확보되며, 이에 따라 증발과 연소의 균질도가 개선된다. 결국 에탄올-디젤 혼합연료는 인젝터나 연소실 구조의 복잡한 개조 없이도 soot 저감과 열효율 향상을 동시에 달성할 수 있는 차세대 저배출 디젤 엔진용 대체 연료로서의 잠재력을 확인시켜 준다.

3.2 미립화 특성 실험 결과

1) 착화 지연 시간에서의 분무 형상의 둘레

기존 분무 해석에서는 SPL, SCA, SA가 분무의 거시적 형상과 확산 특성을 평가하는 주요 지표로 사용된다. 그러나 이들 변수는 분무 경계의 미세한 불규칙성이나 난류에 의한 불안정성을 충분히 반영하지 못하는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 분무 경계의 복잡성과 불규칙성을 정량적으로 평가할 수 있는 새로운 지표인 분무 경계 길이(SP)를 도입하였다. SP는 미립화가 활발할수록 증가하여 액적 파쇄 강도와 분무 불안정성을 보다 민감하게 표현할 수 있다. 일반적으로 분무 면적(SA)이 증가하여 분무가 넓게 확산될수록 분무 둘레(SP) 또한 함께 증가하는 상관관계를 보인다. 그러나 SA는 분무가 완전 발달 후에 차지하는 전체 면적만을 반영하기 때문에, 경계의 미세 분열이나 난류에 의한 세부 구조 변

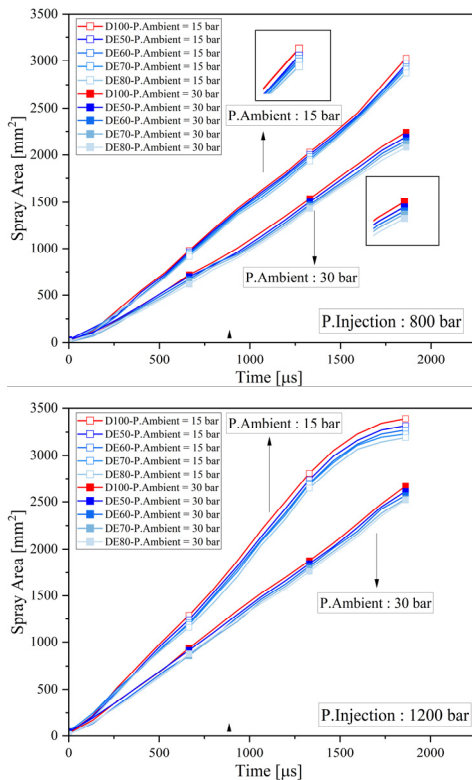


Fig. 3 Variation of Spray Area of Ethanol-Diesel Blended Fuels under Different Pressure Conditions

화를 구분하지 못하는 반면, SP는 동일한 SA에서도 경계 굴곡의 증가 또는 미세적 파쇄의 정도를 직접적으로 알 수 있다. 따라서 SP는 기존 거시적 지표(SPL, SCA, SA)가 설명하지 못하는 분무 경계의 정성적, 정량적 변화를 보완하여 에탄올 혼합에 따른 혼합 경계면 발달을 보다 정밀하게 해석할 수 있는 유효한 지표로 기능할 수 있다.

Fig. 4는 800 bar 분사 압력과 30 bar 분위기 압력 조건에서 분사 후 600 μ s 시점의 에탄올-디젤 혼합연료(D100-DE80) 분무 구조를 비교한 결과를 보여 준다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 촬영된 분무 이미지를 기반으로, 에탄올-디젤 혼합연료(D100, DE50, DE60, DE70, DE80)의 분무 둘레(Spray Perimeter) 변화를 나타낸 그래프이다. 측정은 분사 시작 후 600 μ s 시점에서 수행되었으며, 분사 압력(800, 1,200 bar)과 주변 압력(15, 30 bar)을 변화시키며 진행되었다. 전반적으로 에탄올 함량이 증가할수록 분무 경계 길이는 증가하는 경향을 보였으며, 800 bar-30 bar 조건에서 분무 둘레는 D100의 약 50.1 mm에서 DE80의 약 55.9 mm로 약 11.7% 증가하

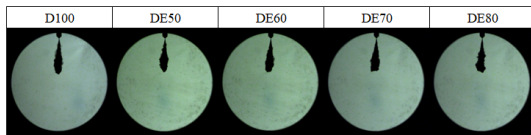


Fig. 4 Comparison of Spray Perimeter at 600 μ s at Ignition Delay Timing

Table 3 Nomenclature

CI	Compression Ignition
CVC	Constant Volume Chamber
D100	Pure Diesel
DE50	Diesel 50 % - Ethanol 50 % blends
DE60	Diesel 40 % - Ethanol 60 % blends
DE70	Diesel 30 % - Ethanol 70 % blends
DE80	Diesel 20 % - Ethanol 80 % blends
SPL	Spray Penetration Length
SA	Spray Area
SP	Spray Perimeter

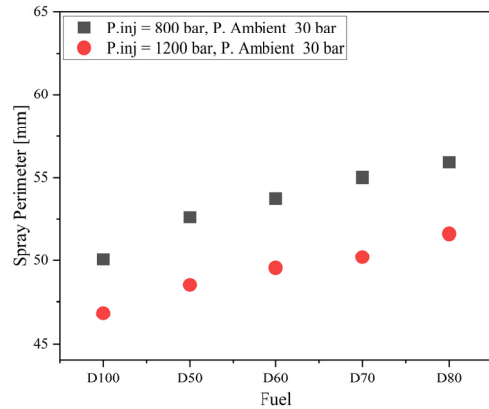


Fig. 5 Spray Perimeter of Ethanol-Diesel Blended Fuels at Various Blend Ratio under Ambient Pressure of 30 bar

였다. 이는 에탄올의 낮은 점도와 표면장력으로 인해 액적 파쇄가 촉진되고 공기와의 접촉 면적이 확대되어 측방 확산이 강화되기 때문이다. 동일한 연료 조건에서 분사 압력이 증가하면 분무 둘레는 감소하였고, D100 기준으로 800 bar 대비 1,200 bar에서 약 6.6% 감소하였다. 이는 고압 분사 시 제트의 관성 운동량 증가로 축 방향 침투가 강화되어 방사 방향 확산이 상대적으로 억제되기 때문이다. 한편, 주변 압력이 증가할수록 기체 밀도와 전단력이 커져 연료-공기 혼합과 측방 확산이 촉진되며 분무 경계 길이가 증가하였다. 이러한 결과는 연료 물성과 분사 조건이 분무 거동에 미치는 영향을 정량적으로 보여 주며, 혼합비 및 분사 전략 최적화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 정적 용기(Constant Volume Chamber)를 이용하여 고농도 에탄올-디젤 혼합연료의 분무 특성을 체계적으로 분석하였다. 에탄올 함량이 증가함에 따라 분무 침투 길이는 감소하고, 분무 둘레는 증가하여 공기 혼합과 확산이 향상될 수 있음을 시사하였다. 이는 에탄올 혼합이 분무 외곽의 미세 분열을 촉진하고, 상대적으로 세분화된 액적 구조를 형성함을 의미한다. 또한,

동일한 분사 조건에서 에탄올 혼합 연료는 순수 디젤 대비 균질한 분무 확산과 향상된 미립화 경향을 보였다. 이러한 분무 특성의 변화는 고농도 에탄올 혼합 시 연료-공기 혼합을 개선할 수 있는 잠재적 가능성을 보여 준다. 이를 확정적으로 판단하기 위해서는 후속적인 엔진 연소 실험과 배출 가스 분석이 수행되어야 한다. 본 연구의 결과는 에탄올-디젤 혼합 연료의 분무 거동 이해를 확장하고, 향후 연소 및 배출 특성을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

This result was supported by the "Regional Innovation System & Education (RISE)" through the Ulsan RISE Center, funded by the Ministry of Education (MOE) and the Ulsan Metropolitan City, Republic of Korea.(2025-RISE-07-001). This work was supported by the National Research Foundation Korea(NRF) grant funded by the Korea government.(MSIT) (No. RS-2023-00281590).

Author contributions

S. W. Jeong; Writing-original draft, Methodology, Investigation, Data curation. O. T. Lim; Supervision, Resources, Funding acquisition, Conceptualization.

References

1. Z. Zhang et al., 2021, "The effects of Fe_2O_3 based DOC and SCR catalyst on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fueled with biodiesel", *Fuel*, 290, 120039. (DOI:10.1016/j.fuel.2020.120039)
2. S. Chen, J. Tian, J. Li, W. Li and Z. Zhang, 2021, "Investigation of the performance and emission characteristics of a diesel engine with different diesel-methanol dual-fuel ratios", *Processes*, 9(11), 1944. (DOI:10.3390/pr9111944)
3. T. Cai, D. Zhao, B. Wang, J. Li and Y. Guan, 2020, "NO emission and thermal performances studies on premixed ammonia-oxygen combustion in a CO_2 -free micro-planar combustor", *Fuel*, 280, 118554. (DOI:10.1016/j.fuel.2020.118554)
4. Z. Zhang et al., 2022, "Investigation on the effects of non-uniform porosity catalyst on SCR characteristic based on the field synergy analysis", *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(1), 107056. (DOI:10.1016/j.jece.2021.107056)
5. S. A. Kim and W. G. Wang, 2018, "A study on the combustion stability and characteristics for D.O-methanol blending oil in diesel engine", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 22(1), 48-55. (DOI:10.9726/kspse.2018.22.1.048)
6. S. A. Kim and W. G. Wang, 2014, "A study on the spray characteristics of CRDI system with ambient pressure", *Journal of the Korean Society for Power System Engineering*, 18(6), 21-28. (DOI:10.9726/kspse.2014.18.6.021)
7. H. Kuszewski, A. Jaworski and M. Mądziel, 2021, "Lubricity of ethanol-diesel fuel blends-study with the four-ball machine method", *Materials*, 14(10), 2492. (DOI:10.3390/ma14102492)
8. I. K. G. T. A. Putra, H. X. D. Nguyen, Q. K. Tran and O. Lim, 2025, "Optical and computational investigations: Assessing the impact of absolute ethanol mixtures on diesel spray behavior", *Fuel*, 390, 134756. (DOI:10.1016/j.fuel.2025.134756)