



Received: 2026/07/13
Revised: 2026/07/24
Accepted: 2026/07/30
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Min-Gyu Jeon

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5335
E-mail: mgjeon@navy.ac.kr

해양오염 방제용 하이드로사이클론 분리기의 최적화 설계에 관한 수치해석 연구

Abstract

해양에서 발생하는 원유 유출 사고는 해양 생태계와 연안 환경에 큰 피해를 초래하므로 신속하고 효율적인 방제기술이 요구된다. 기존의 오일펜스, 스키머 및 흡착제는 기상 및 해상 조건에 따라 회수 효율이 저하되는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 해양오염 방제선용 하이드로사이클론 분리기의 최적 설계 방안을 제시하고자 하였다. 입구 질량유량, vortex finder 길이 및 vane의 유무를 설계변수로 선정하여 수치해석을 수행하였으며, 각 조건에서의 오일 분리효율을 비교·평가하였다.

Oil-spill accidents in marine environments cause severe damage to marine ecosystems and coastal areas. Consequently, efficient oil-spill response technologies are necessitated. This study performs numerical simulations to optimize the design of a hydrocyclone separator for marine oil-spill response vessels. The effects of inlet mass flow rate, vortex-finder length, and vane installation on oil-separation efficiency are evaluated.

Keywords

하이드로사이클론 분리기(Hydrocyclone Separator), 오일 유출(Oil Spill), 수치해석(Numerical Analysis), RNG k- ϵ 난류모델(RNG k- ϵ Turbulence Model), 분리효율(Separation Efficiency)

Acknowledgement

이 논문은 2026년 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

Numerical Investigation into Optimal Design of Hydrocyclone Separator for Marine Oil-Spill Response

전민규*

해군사관학교 기계시스템공학과 부교수

Min-Gyu Jeon*

Associate professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

대한민국은 해양국가로서 해상교통을 통한 국제무역 의존도가 높으며, 국가 안보를 위한 군함 등을 지속적으로 운용중에 있다. 이처럼 다양한 목적을 가진 선박들이 연안에서 운항함에 따라 해양환경 보호와 방제기술 확보의 필요성이 강조되고 있다. 특히 간헐적으로 운항 중 충돌에 의한 원유 유출사고가 연안에서 발생하고 있어 해양오염 방제에 대한 필요성이 있다. 일반적으로 오일펜스와 스키머(skimmer)를 이용하여 유출된 원유를 회수[1-3]하고 있으며 이는 오일을 재처리할 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 해상 환경에 따라 높은 파고, 강풍, 조류에 영향을 많이 받아 운용이 어려운 단점도 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근에 유수 분리(oil-water separation) 기술을 응용하여 방제를 하고자 시도하고 있다. 그 중에서도 하이드로사이클론 분리기(hydrocyclone separator)는 밀도차이가 있는 유체를 원심력에 의해 연속적으로 분리할 수 있는 장치로 알려져 있다. 하이드로사이클론은 구조가 매우 단순하고 유지보수가 쉽고, 높은 유량조건에서도 연속적 운용이 가능하여 해양 방제선에 적용하기에 장점을 지니고 있다. 특히 해상 환경이 급변하는 상황에서도 안정적인 운용이 가능하여 해양오염 방제에 큰 장점을 지니고 있다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 국내에서 운용 중인 미세오일 처리 시스템의 운전 조건을 기준으로 하여 해양오염 방제선 적용을 위한 하이드로사이클론 분리기를 대상으로 수치해석을 수행하였다. Ansys fluent를 이용하여 RNG k- ϵ 난류모델[4]을 적용하여 오일을 입자로 가정하여 DPM(discrete phase model)을 이용[5]하여 분리거동을 분석하였다. 특히 하이드로사이클론의 분리 성능[6-9]은 입구 유량, 압력, 원통부 직경, 원추부 형상, vortex finder의 길이 및 직경 등 다양한 설계변수의 영향을 받으므로 실제 운용조건을 고려한 설계변수 최적화가 필수적이다. 따라서 열악한 환경이라 할 수 있는 강한 유속 상태의 입구 질량유량과 평시 입구 질량 유량을 비교 분석하고 vortex finder 길이에 따른 영향도를 분석한다. 추가로 swirling 유동을 유도하는 vane를 추가하여 내부 유동특성과 오일 분리효율을 비교하였다. 이를 통해 해양오염 방제용 하이드로사이클론의 최적 설계방안을 제시하고 향후 방제선에 적용 가능한 유수분리 장치의 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 수치해석 하이드로사이클론 분리기 수치해석

2.1 하이드로사이클론 수치해석 모델 선정

본 연구에서는 국내 D사에서 운용 중인 미세오일 처리시스템의 운용조건을 기준으로 하이드로사이클론 모델의 형상을 구현하였다. 하이드로사이클론의 형상에서 중요 변인은 입구 직경, 유출 직경, 원통길이, 원뿔 길이, 테이퍼 길이, 꼬리 길이, vortex finder의 길이, 원뿔 각도, 테이퍼 각도 등으로 구성된다. 유입된 유체는 접선방향으로 강한 회전 유동을 형성하고 원심력에 의해 밀도가 큰 해수는 외측으로 이동하여 underflow로 배출되고, 밀도가 작은 오일은 중심부로 이동하여 overflow로 배출되게 된다. 하이드로사이클론의 수치해석을 수행하기 위해 해수와 오일의 분리효율을 예측하기 위해 Ansys fluent(version 19.2)를 사용하였다. 하이드로사이클론 분리기 내부 유동을 해석하기 위해 element size를 0.002 m로 하여 elements 개수는 500,000개 이상으로 설정하였다. 강한 회전 운동을 하는 하이드로사이클론의 내부 유동을 해석하기 위해 swirling flow를 고려한 고급 난류모델인 RNG k- ϵ 모델을 사용하였다. 특히 본 연

구에서는 수치해석 경계조건으로 D사의 미세오일 분류기 데이터를 활용하였다. 예혼합된 해수와 오일을 하이드로사이클론 입구로 제공하였으며 입구 유속은 최대 10.2 m/s(입구 유량: 4.0625 kg/h)가 되도록 하였다. 출구 조건으로 vortex finder 부근의 overflow는 4.6 bar, 오일이 분리된 해수가 배출되는 출구의 underflow는 10.5 bar가 되도록 압력을 달리하여 pressure velocity scheme은 coupled algorithm을 적용하였다. 압력기반 solver를 이용하여 결합된 체계를 이용하여 정상 상태의 흐름에서 견고하고 효율적인 단상 구현을 할 수 있게 된다. 공간이산화 조건으로 PRESTO(pressure staggering option)를 사용하였고 second-order upwind scheme를 사용하였다. 추가로 오일을 입자로 가정하여 분리 효율을 예측하기 위해 DPM(discrete phase models)을 사용하였다. 이때 해수의 밀도는 1,068.0 kg/m³, 오일 입자의 밀도는 698.8 kg/m³로 사이즈는 50 μ m로 가정하였다.

2.2 하이드로사이클론 분리효율 평가

하이드로사이클론 분리기를 통해 해수와 오일을 분리하게 된다. 이 때 식 (1)의 분리 효율(E)을 평가하며 동일 시간 동안 계산된 입구에서 제공하는 질량 유량과 상부 출구로 배출되는 입자의 질량유량으로 계산된다. 여기서 분리 효율은 1에 가까울수록 최적화된 하이드로사이클론 분리기로 볼 수 있다.

$$E = \frac{m_o}{m_f} \times 100(\%) \quad (1)$$

여기서 m_o 는 오버플로우 출구로 유출된 오일 입자의 질량유량, m_f 는 인입구로 초기에 유입된 오일 입자의 질량유량이다.

3. 하이드로사이클론 설계 조건 분석

본 연구에서 하이드로사이클론 분리기의 설계를 하기 위해 입구 질량유량과 VF(vortex finder) 길이를 주요 설계변수로 두어 평가하였다. Fig. 1은 하이드로사이클론 분리기의 주요 설계변수를 설명한다. 측면 입구에서 예혼합된 해수와 오일이 유입되고, 분리된 오일은 VF를 통해 상부로 배출되고, 남은 해수

는 하부로 배출되게 된다. 입구로 유입되는 유체의 정보는 Table 1에 유속 조건에 따라 정리하였다. Flow rate 2는 최대 유량 조건으로 flow rate 1에 비해 강한 유속 환경을 모사한다.

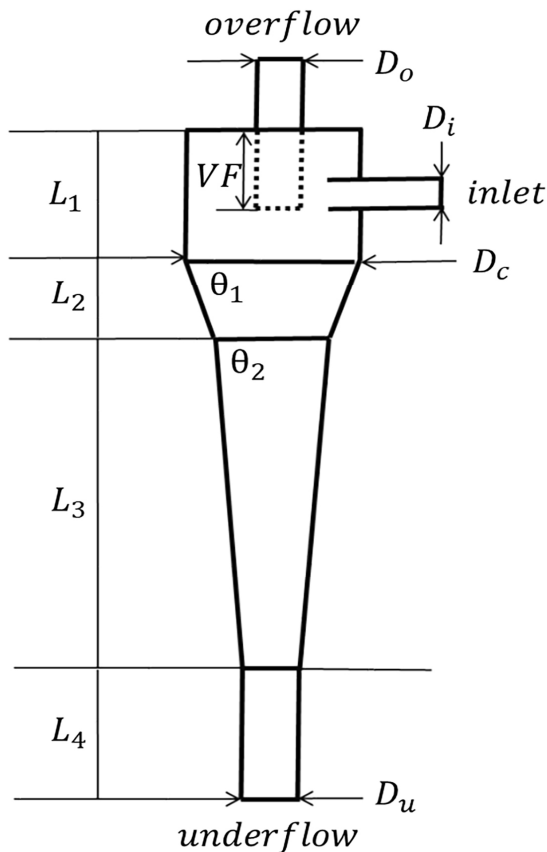


Fig. 1. A schematic of modified hydrocyclone

D_i : Inlet diameter
 D_o : Outflow diameter
 D_c : Characteristic diameter
 D_u : Underflow diameter
 L_1 : Cylinder length
 L_2 : Cone length
 L_3 : Taper length
 L_4 : Tail length
 VF: Vortex Finder length * VF diameter ($=D_o$)
 θ_1 : Cone degree
 θ_2 : Taper degree

Table 1. Mass flow rate condition (Inlet)

Contents	Flow rate 1 [kg/h]	Flow rate 2 [kg/h]
Blended	2547.813	4634.063
Oil in Water	5.096	9.268
Fresh Water	2542.717	4624.795

4. 하이드로사이클론 분리기 수치해석 결과 검토

Table 2는 각 Case별 경계조건을 정리하였다. Case 1, 2는 입구 질량 유량 변화를 평가하고, Case 2, 3, 4는 VF 길이 변화를 검토한다. 추가로 Case 5는 Case 2 조건에 vane을 8개 설치한 조건을 말한다.

Table 2. Geometric and physical parameters used in the numerical simulations

Case No.	Mass flow rate (Inlet)	D_i [m]	D_o [m]	D_u [m]	VF
1	Flow rate 1	0.02	0.012	0.018	0.02
2	Flow rate 2	0.02	0.012	0.018	0.02
3	Flow rate 2	0.02	0.012	0.018	0.015
4	Flow rate 2	0.02	0.012	0.018	0.07
5	Flow rate 2	0.03	0.012	0.018	0.047

* Common conditions for Cases 1-5

L_1 : 0.07 m
 L_2 : 0.048 m
 L_3 : 0.334 m
 L_4 : 1.086 m
 D_c : 0.07 m

Fig. 2와 Fig. 3는 이상적인 평균 유량조건인 flow rate 1인 Case 1에서의 오일 입자의 이동 경로와 속도 벡터를 보인다. Fig. 2와 같이 오일 입자는 하이드로사이클론 분리기의 하부로 이동하지 않고 모두 VF를 따라 overflow 방향으로 배출됨을 알 수 있다. 이상적인 평균 유량 조건으로 분리효율(E)은 99%로 가장 높게 평가되었다. 하지만 실제 해상환경은 열악한 조건은 고려하여야 하기에 최대 유량 조건에 대한 평가가 필요하다. Case 2-5는 최대 유량 조건인 flow rate 2 조건 하에 수치해석을 수행하였다. Case 2는 Case 1과 동일한 하이드로사이클론 설계에 flow rate 2 조건으로 최대 유량에서 수치해석을 수행하였다. 그 결과 Fig. 4의 속도벡터를 확인할 수 있으며 분리효율은 59%로 크게 감소함을 알 수 있다.

추가 검토사항으로 VF 길이 변경에 따른 분리효율 변화를 검토하였다. Case 2는 0.02 m, Case 3은 0.015 m, Case 4는 0.07 m로 점차 길어지도록 설계

하였다. 그 결과 Fig. 5는 Case 3의 속도벡터를 보이며 분리효율은 5%로 급감하였다. Fig. 6는 Case 4의 속도벡터를 보이며 분리효율은 54%로 Case 3 대비 상승하였지만 Case 2보다 낮게 평가되어 VF의 길이는 인입구 직경(D_i)와 같을 때 가장 좋게 평가되었다.

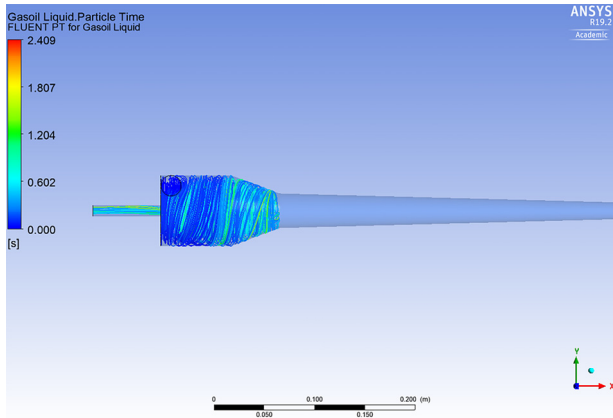


Fig. 2. Particle time of the vortex chamber (Case 1)

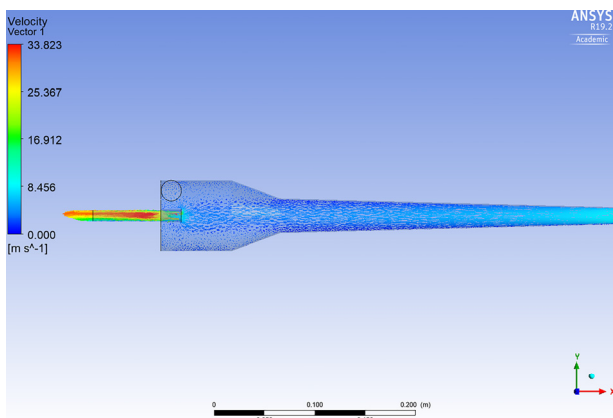


Fig. 3. The velocity vector of the XY plane (Case 1)

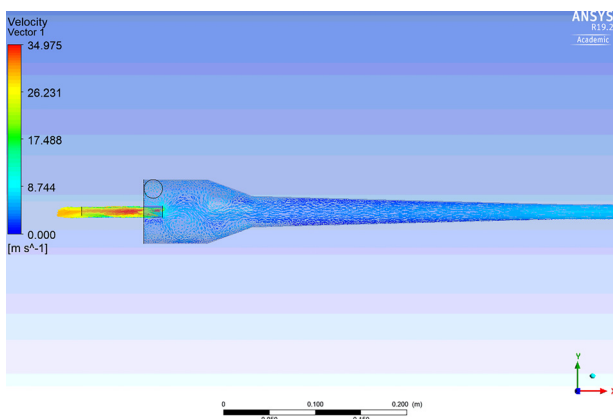


Fig. 4. The velocity vector of the XY plane (Case 2)

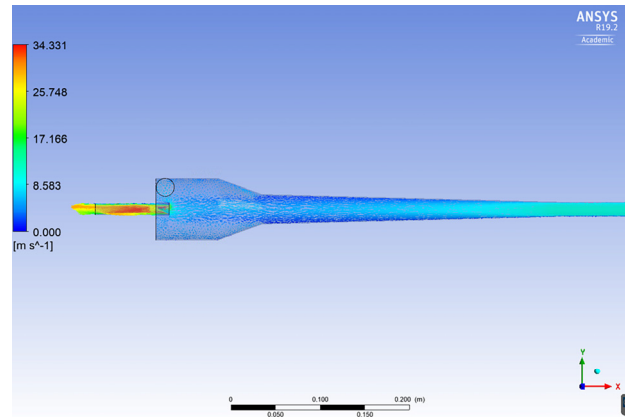


Fig. 5. The velocity vector of the XY plane (Case 3)

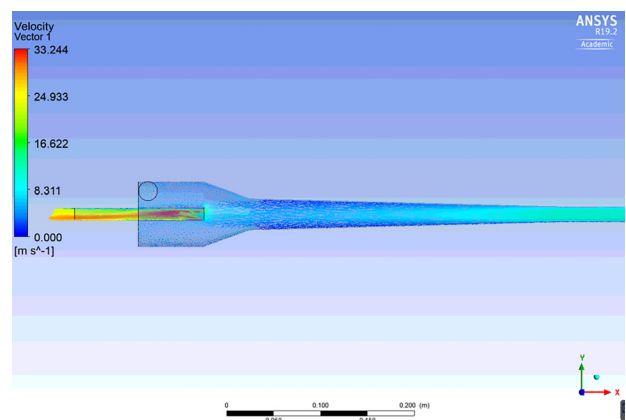


Fig. 6. The velocity vector of the XY plane (Case 4)

Case 1-4는 전통적인 라이너 타입 형상에 따라 분리효율을 검토하였다. Flow rate 2 조건에서도 강건한 하이드로사이클론 설계를 하기 위해 유동학적 관점에서 유로를 보다 효율적으로 제공할 수 있는 vane 구조를 추가하여 Case 5 조건하에서 평가하였다. Fig. 7과 같이 Case 2의 설계에 8개의 vane을 설치하여 swirling 유동을 강제적으로 유도하였으며 인입구 바로 아래지점에 위치하였다. 그 결과 Fig. 8과 같은 속도벡터를 구할 수 있었으며 분리효율은 최대 유속인 flow rate 2인 조건임에도 불구하고 78%로 높게 평가되었다.

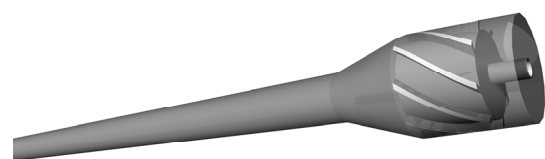


Fig. 7. Spiral structure using vanes

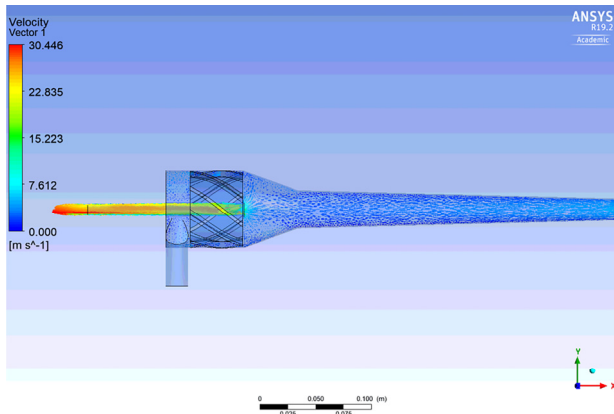


Fig. 8. The velocity vector of the XY plane (Case 5)

5. 결론

본 연구에서는 해양오염 방제선에 적용 가능한 하이드로사이클론 분리기의 분리성능 향상을 위해 Ansys fluent를 이용한 수치해석을 수행하였다. 난류모델은 RNG k- ϵ 모델을 적용하였으며, 오일을 입자로 가정한 DPM(discrete phase model)을 이용하여 입구 질량유량, vortex finder(VF) 길이 및 vane 구조에 따른 분리효율을 비교·분석하였다. 본 연구의 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 평균 운전조건인 flow rate 1에서는 기존 하이드로사이클론에서 오일 입자가 모두 overflow를 통해 배출되어 약 99%의 분리효율을 나타냈다. 이는 설계 유량 조건에서는 기존 형상이 우수한 유수분리 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 최대 운전조건인 flow rate 2에서는 기존 형상의 분리효율이 59%로 크게 감소하였다. 이는 유입 유량 증가에 따라 내부 와류가 불안정해지고 원심력에 의한 오일 입자의 분리 성능이 저하되어 일부 오일 입자가 underflow로 배출되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실제 해양환경과 같이 높은 유량이 발생하는 조건에서는 기존 형상만으로는 충분한 분리성능을 확보하기 어려움을 확인하였다.
- (3) Vortex finder 길이에 따른 영향을 분석한 결과, vortex finder의 길이가 인입구 직경(D_i)과 동일한 경우 가장 높은 분리효율을 나타냈다. Vortex finder 길이를 짧게 설계한 경우 분리

효율은 5%까지 급격히 감소하였으며, 길이를 증가시킨 경우에는 분리효율이 일부 향상되었지만 기존 형상보다 낮은 성능을 나타냈다. 이는 vortex finder 길이가 내부 와류 형성과 오일 입자의 이동 경로에 직접적인 영향을 미치는 중요한 설계변수임을 의미한다.

- (4) 최대 유량 조건에서도 분리효율을 향상시키기 위하여 인입구 하부에 8개의 vane을 설치하여 회전유동을 강제적으로 형성하도록 설계하였다. 그 결과 분리효율은 기존 형상의 59%에서 78%로 향상되어 약 32%의 성능 개선 효과를 확인하였다. 이는 vane 구조가 내부의 회전유동을 강화하여 원심력을 증가시키고, 오일 입자가 overflow 방향으로 효과적으로 이동하도록 유도한 결과로 판단된다.
- (5) 이상의 결과를 종합하면 하이드로사이클론의 분리성능은 입구 유량과 vortex finder 길이에 크게 영향을 받으며, 특히 최대 유량 조건에서는 vane 구조를 적용한 새로운 형상이 기존 라이너 타입 하이드로사이클론보다 우수한 분리성능을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 제안된 vane 적용 하이드로사이클론은 실제 해양오염 방제선에서 발생할 수 있는 다양한 운전조건에서도 안정적인 유수분리가 가능한 설계안으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Diep Ngoc Long Huynh, Xuan Phuong Nguyen, Nguyen Dang Khoa Pham, Thi Thai Le, Xuan Thanh Tran, Cherdvong Saengsupavanich, & Anh Tuan Hoang, 'Booms and Skimmers for Oil Spill Recovery: Perspective Analysis from Lab Scale to Practical Applications,' Marine Pollution Bulletin, VOL. 224, 2026, Article 119128.
- [2] Dagmar Schmidt Etkin & Tim J. Nedwed, 'Effectiveness of Mechanical Recovery for Large Offshore Oil Spills,' Marine Pollution Bulletin, VOL. 163, 2021, Article 111848.
- [3] Victoria Broje & Arturo A. Keller, 'Improved Mechanical Oil Spill Recovery Using an Optimized Geometry for the Skimmer Surface,' Environmental Science & Technology, VOL. 40, NO. 24, 2006, pp. 7914-7918.
- [4] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, & C. G. Speziale, 'Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique,' Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, VOL. 4, NO. 7, 1992, pp. 1510-1520.

- [5] Teja Reddy Vakamalla, Veera Bhadra Rao Koruprolu, Rakesh Arugonda, & Narasimha Mangadoddy, 'Development of Novel Hydrocyclone Designs for Improved Fines Classification Using Multiphase CFD Model,' *Separation and Purification Technology*, VOL. 175, 2017, pp. 481–497.
- [6] J. P. S. Oliveira, R. A. Medronho, F. P. Santos, & T. S. Klein, 'CFD Multiphase Modeling of Liquid–Liquid Hydrocyclones: A Review,' *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, VOL. 145, 2025, pp. 33–62.
- [7] Okwunna Maryjane Ekechukwu, Taimoor Asim, & Haval Kukha Hawez, 'Recent Developments in Hydrocyclone Technology for Oil-in-Water Separation from Produced Water,' *Energies*, VOL. 17, NO. 13, 2024, Article 3181.
- [8] C. A. O. de Araujo, C. M. Scheid, J. B. R. Loureiro, T. S. Klein, & R. A. Medronho, 'Hydrocyclone for Oil–Water Separations with High Oil Content: Comparison Between CFD Simulations and Experimental Data,' *Journal of Petroleum Science and Engineering*, VOL. 187, 2020, Article 106788.
- [9] Zhao Shuai, Zhou Weili, Ding Laiyuan, Kong Dejun, & Yu Wenwen, 'Numerical Simulation and Experimental Research on the Oil Removal Efficiency During the Oily Wastewater Separation by Hydrocyclone,' *Scientific Reports*, VOL. 16, 2026, Article 1850.