

อุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนชนิด 3 เฟส เพื่อการแยกของแข็งแขวนลอย
และนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย



นางสาวสุธินี ปฎิรูปานนท์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3-phase hydrocyclone for suspended
solid separation and oil recovery from wastewater

Miss Sutinee Patirupanon



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ไฮโดรโซโคลอนชนิด 3 เฟส เพื่อการแยกของแข็งแขวนลอยและนำกลับน้ำมันจากน้ำเสีย
โดย	นางสาวสุธินี ปฎิรูปานนท์
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ์ เพียรมนกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.มรุพัชร จำนงค์วงศ์)

5770478921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: OILY WASTEWATER / HYDROCYCLONE / 3-PHASE HYDROCYCLONE / OIL RECOVERY

SUTINEE PATIRUPANON: 3-phase hydrocyclone for suspended solid separation and oil recovery from wastewater. ADVISOR: ASST. PROF.CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., CO-ADVISOR: ASSOC. PROF.PISUT PAINMANAKUL, Ph.D., 173 pp.

This research aims to investigate the application of hydrocyclone for oil recovery from oily wastewater with suspended solid and to modify hydrocyclone in order to enhance its efficiency. The separation efficiency for suspended solid and oil of the original solid-liquid hydrocyclone were 34.87% and 15.64%, respectively. Due to its limited efficiency, the hydrocyclone was modified by two approaches. First was to lengthen the vortex finder at the overflow to create a stronger inner vortex within the hydrocyclone. Another approach was to install grit pot at the underflow. This grit pot can trap particles those rejected through the underflow. Oil particles then have more time for separating and returning to the overflow. The first approach enhanced suspended solid and oil separation efficiency up to 66.06% and 39.14%, respectively. While the use of the first approach together with the second approach enhanced suspended solid and oil separation efficiency up to 95.57% and 99.92%, respectively. As can be seen from the result, these two approaches can literally enhances the separation efficiency of hydrocyclone when applied for oily wastewater with suspended solid. However, the limitation of this hydrocyclone is that it cannot separate oil suspended solid and water within one cycle of operation. Therefore the use of 3-phase hydrocyclone might be a better option for oily wastewater with suspended solid treatment. Nonetheless, the result shows that the suspended solid and oil separation efficiency of 3-phase hydrocyclone were only 49.93% and 30.47%. The reason might be that the pressure used in the experiment was not high enough.

Department:	Environmental Engineering	Student's Signature
Field of Study:	Environmental Engineering	Advisor's Signature
Academic Year:	2016	Co-Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณต่อผู้ที่ให้ความอนุเคราะห์ดังต่อไปนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก และรองศาสตราจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้ที่ให้โอกาสและสละเวลาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการปฏิบัติ หลักการในการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งแก้ไขสิ่งบกพร่องมาตลอดระยะเวลาการทำงานวิจัย ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างมากในการทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชอาณาจักร ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ ตลอดจน รองศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล รองศาสตราจารย์ ดร.ปฎิภาณ ปัญญาพลกุล และ ดร.มรุพัชร จ้านงศ์วงศ์ ที่ได้ให้คำชี้แนะ และแก้ไขจนวิทยานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ห้องปฏิบัติการน้ำดี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่เป็นประโยชน์อย่างมากต่อการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ ดร.ณัฐวิญญ์ ชวเลิศพรศิยา นายรัชกาล พันธวิศิษฐ์ นางสาวสุภนิช เลิศลาภวิศิน นางสาวจิตราภา มงคลเนาวรัตน์ นายธวัชชัย จินตธีรชัย และนางสาวรามนรี เนตรวิเชียร ที่เป็นส่วนหนึ่งในงานวิจัย คอยให้คำปรึกษาและช่วยเหลือในระหว่างทำงานวิจัย จนงานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา น้องสาว และทุกคนในครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในทุกเรื่อง และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยตลอดมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 น้ำมัน.....	5
2.2 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน.....	6
2.3 รูปแบบของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	9
2.4 ภาพรวมของกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	11
2.5 การแบ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน	14
2.6 ไฮโดรไซโคลน	26
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	48
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย	60
3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	60
3.2 แผนการทดลอง	66

3.3 การดำเนินงานวิจัย.....	68
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล.....	80
4.1 ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์.....	80
4.2 ผลการทดลองการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 2 เฟส ชนิด แยกของแข็ง – ของเหลว....	83
4.3 ผลการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคของแข็งและน้ำมัน.....	89
4.4 ผลการศึกษาการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส.....	106
4.5 การเปรียบเทียบไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 ชนิด.....	112
4.6 การนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่.....	116
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ.....	118
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	118
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	120
รายการอ้างอิง.....	121
ภาคผนวก.....	124
ภาคผนวก ก. วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	125
ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง.....	130
ภาคผนวก ค. รายการตัวอย่างการคำนวณ.....	150
ภาคผนวก ง. แบบแปลนไฮโดรไซโคลน ชนิด 3 เฟส.....	154
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	173

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2-1 ปริมาณน้ำมันในแต่ละแหล่งที่มาของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน	7
ตารางที่ 2-2 ระดับการจัดการน้ำมันรั่วไหลที่มาจากปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม	8
ตารางที่ 2- 3 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทางกายภาพ	15
ตารางที่ 2- 4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันทางกายภาพจำแนกตามขนาดอนุภาค น้ำมัน	18
ตารางที่ 2- 5 สัดส่วนของไฮโดรไซโคลนแบบ Bradeley และ Rietema.....	33
ตารางที่ 2- 6 เปรียบเทียบการทำงานของไฮโดรไซโคลนแบบ Bradley และ Rietema	34
ตารางที่ 2- 7 สัดส่วนไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ Aurelle และ Ma.....	40
ตารางที่ 2- 8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส.....	59
ตารางที่ 3- 1 รายละเอียดจำเพาะของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส และไฮโดรไซโคลน ชนิด 3เฟส.....	62
ตารางที่ 3- 2 ตัวแปรที่ทำการควบคุมในการทดลองที่ 2.1	69
ตารางที่ 3- 3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.2.....	71
ตารางที่ 3- 4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.....	73
ตารางที่ 3- 5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.2.....	75
ตารางที่ 3- 6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.2.....	76
ตารางที่ 3- 7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4.....	78
ตารางที่ 4- 1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการล้าง	81
ตารางที่ 4- 2 ลักษณะสมบัติของน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	83
ตารางที่ 4- 3 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของไฮโดรไซโคลนที่ความดันง่าย เข้าแตกต่างกัน	85
ตารางที่ 4- 4 ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของน้ำปนเปื้อนน้ำมันที่ผ่านการแยกด้วยอุปกรณ์ ไฮโดรไซโคลน.....	89

ตารางที่ 4- 5 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่าย
เข้าแตกต่างกัน 94

ตารางที่ 4- 6 เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุงโดยเพิ่มความ
ยาวทางออกด้านบน และไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุงโดยเพิ่มความยาวทางออกด้านบนที่
ติดตั้ง Grit pot..... 104

ตารางที่ 4- 7 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟสที่
ความดันจ่ายเข้าที่แตกต่างกัน..... 112

ตารางที่ 4- 8 เงื่อนไข และสภาวะเดินระบบที่ดีที่สุดในการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์. 115



สารบัญภาพ

รูปที่ 2- 1 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว	10
รูปที่ 2- 2 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ	11
รูปที่ 2- 3 การจัดการน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามรูปแบบของน้ำมันในน้ำเสีย	11
รูปที่ 2- 4 แผนผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน	26
รูปที่ 2- 5 (ก) เส้นทางการไหลเข้าและออกและ (ข) รูปแบบการไหลภายในของอุปกรณ์ไฮโดร ไซโคลน	29
รูปที่ 2- 6 ทิศทางการไหลของความเร็ว 3 ชนิดในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน	30
รูปที่ 2- 7 แสดงการกระจายความเร็วในแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลน	31
รูปที่ 2- 8 การกระจายความเร็วแนวรัศมีในไฮโดรไซโคลน	32
รูปที่ 2- 9 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส	35
รูปที่ 2- 10 ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ระบบ 2 ไซโคลน	36
รูปที่ 2- 11 ทิศทางการไหลของของแข็ง และน้ำมันภายในไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส	37
รูปที่ 2- 12 ลักษณะทั่วไปของความเร็วแนวตั้งภายในไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส	37
รูปที่ 2- 13 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot	41
รูปที่ 2- 14 อุปกรณ์ Grit pot	42
รูปที่ 2- 15 กราฟเส้นโค้งประสิทธิภาพ และเส้นโค้งระดับชั้นที่ลดลง	45
รูปที่ 2- 16 ทิศทางการไหลของไฮโดรไซโคลน	46
รูปที่ 2- 17 ทิศทางการไหลของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot	47
รูปที่ 2- 18 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟสของ Bednaski and Listewnik	49
รูปที่ 2- 19 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟสของ Seureau	50
รูปที่ 2- 20 ลักษณะการไหลของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟสของ Seureau	50
รูปที่ 2- 21 รูปแบบการไหลตามแนวแกน	51

รูปที่ 2- 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ฉีดเข้าไฮโดรไซโคลนและประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และอนุภาคของแข็ง.....	52
รูปที่ 2- 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำมันและประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน	52
รูปที่ 2- 24 ผลกระทบของขนาดหยดน้ำมันที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยก.....	53
รูปที่ 2- 25 ผลกระทบของขนาดอนุภาคของแข็งที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยก.....	53
รูปที่ 2- 26 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน	54
รูปที่ 2- 27 ผลกระทบของชนิดของแข็งที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง	54
รูปที่ 2- 28 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส.....	55
รูปที่ 2- 29 แบบแปลนและตัวแปรต่างๆ ของไฮโดรไซโคลน.....	56
รูปที่ 2- 30 ผลกระทบระหว่างอัตราการไหลเข้าและประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และทราย.....	57
รูปที่ 2- 31 ผลกระทบระหว่างความเร็วขณะเข้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในสภาวะความเข้มข้นที่แตกต่างกัน.....	57
รูปที่ 2- 32 ผลกระทบระหว่างความเร็วขณะเข้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคทรายในสภาวะ ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน.....	58
รูปที่ 3- 1 โครงสร้างน้ำมัน (กระทรวงศึกษาธิการ, 2553)	61
รูปที่ 3- 2 รายละเอียดสัดส่วนของไฮโดรไซโคลน	63
รูปที่ 3- 3 ขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ได้มาจากการออกแบบ.....	63
รูปที่ 3- 4 อุปกรณ์ Grit pot.....	64
รูปที่ 3- 5 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบกระบวนการไฮโดรไซโคลน	65
รูปที่ 3- 6 แผนผังการทดลอง	67
รูปที่ 4- 1 น้ำปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการล้าง	80
รูปที่ 4- 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัวอย่าง	81
รูปที่ 4- 3 ผลการหาค่า Critical micelle concentration (CMC) ของสารลดแรงตึงผิว SDS	82
รูปที่ 4- 4 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค	85
รูปที่ 4- 5 อนุภาคก่อนเข้าและที่ออกจากไฮโดรไซโคลน.....	86

รูปที่ 4- 6 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค	87
รูปที่ 4- 7 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน.....	89
รูปที่ 4- 8 ลักษณะการไหลของไฮโดรไซโคลนก่อนการเพิ่มระยะ Vortex finder	90
รูปที่ 4- 9 ลักษณะการไหลของไฮโดรไซโคลนหลังการเพิ่มระยะ Vortex finder.....	91
รูปที่ 4- 10 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้น ต่างๆ.....	93
รูปที่ 4- 11 ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....	93
รูปที่ 4- 12 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันก่อนและหลัง เพิ่มระยะ Vortex finder	95
รูปที่ 4- 13 อนุภาคที่ออกมาจากไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟสที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะ ทางออกด้านบน (Vortex finder)	96
รูปที่ 4- 14 กลไกการไหลภายในไฮโดรไซโคลนหลังการเพิ่มระยะ Vortex finder	97
รูปที่ 4- 15 อุปกรณ์ Grit pot	98
รูปที่ 4- 16 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/l.....	100
รูปที่ 4- 17 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 150mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l	101
รูปที่ 4- 18 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 300mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l.....	102
รูปที่ 4- 19 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l.....	103
รูปที่ 4- 20 ปริมาณของอนุภาคที่แยกได้จากทางออกด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการ ปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการ ปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน และติดตั้ง Grit pot.....	105

รูปที่ 4- 21 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/l.....	108
รูปที่ 4- 22 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 150mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l	109
รูปที่ 4- 23 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 300mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l.....	110
รูปที่ 4- 24 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของน้ำเสีย สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l.....	111
รูปที่ 4- 25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุง ไฮโดร ไซโคลนแบบปรับปรุงที่ติดตั้ง Grit pot และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส.....	113
รูปที่ 4- 26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำมันระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุง ไฮโดร ไซโคลนแบบปรับปรุงที่ติดตั้ง Grit pot และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส.....	113
รูปที่ 4- 27 แสดงลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ทั้ง 4 ช่องทางการไหล.....	114
รูปที่ 4- 28 ขนาดอนุภาคน้ำมัน.....	114

บทที่ 1

บทนำ

1.1. ความเป็นมาและความสำคัญ

ประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนาที่มีการใช้น้ำมันปิโตรเลียมเป็นจำนวนมาก เพราะเป็นแหล่งพลังงานและเป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีอื่นๆ การปนเปื้อนของน้ำมันปิโตรเลียมในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งในแหล่งน้ำต่างๆจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงยาก สาเหตุของการปนเปื้อนส่วนใหญ่มาจากกิจกรรมการเดินเรือ การขนส่งและกักเก็บน้ำมัน กระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม และจากกิจกรรมภายในบ้านเรือนต่างๆที่ปล่อยออกมาก่อให้เกิดการปนเปื้อนและคราบน้ำมันที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำธรรมชาติ ทั้งในแม่น้ำ ทะเล ชายฝั่ง แม่น้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศ เนื่องจากน้ำมันเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก และเป็นสิ่งที่กีดขวางการทำงานของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพทุกชนิด เกิดผลเสียต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ ระบบห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตและสภาพแวดล้อมโดยรวม นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่เป็นพิษจำนวนมาก ยังสามารถละลายได้ในน้ำมันปิโตรเลียมได้ในปริมาณที่มากกว่าละลายได้ในน้ำ เป็นเหตุให้เกิดการสะสมของสารพิษอีกทางหนึ่งเช่น สารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (PAHs) และสารเมธิลเทอร์เชียรี-บิวทิล อีเธอร์ (MTBE) ซึ่งจัดเป็นสารก่อมะเร็ง (สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข, 2556)

ปัจจุบันการจัดการปัญหาที่เกิดจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในประเทศไทยมีอยู่หลากหลายแนวทางประกอบด้วย แนวทางการบำบัดทางกายภาพ แนวทางการบำบัดทางเคมี และแนวทางการบำบัดทางชีวภาพโดยที่ประเทศไทยยังคงใช้เทคโนโลยีและวัสดุ อุปกรณ์จากต่างประเทศ เช่น การใช้สารเคมีกำจัดคราบน้ำมันเพื่อให้น้ำมันเกิดเป็นตะกอนจมลงใต้ทะเล การกวาดคราบน้ำมัน และการใช้สารเคมีดูดซับน้ำมัน ส่วนกากตะกอนน้ำมัน น้ำที่ปนเปื้อนน้ำมัน และวัสดุที่ปนเปื้อนต่างๆ จะส่งไปให้ผู้รับเหมาเพื่อกำจัดต่อไป วิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง และไม่เหมาะสมต่อการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนที่กินบริเวณกว้าง เช่น แหล่งน้ำธรรมชาติ แหล่งน้ำบาดาล ดิน และตะกอน เป็นต้น ด้วยข้อจำกัดในด้านการสิ้นเปลืองปริมาณสารเคมี การสะสมของสารพิษในระยะยาวอันมาเนื่องจากอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biodegradation) ที่ค่อนข้างนานของสารอินทรีย์ประเภทน้ำมัน และค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูงในการจัดการปัญหาดังกล่าว (พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล, 2556) ดังนั้นในงานวิจัยชิ้นนี้

จึงเลือกที่จะศึกษาแนวทางการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เหมาะสมต่อการบำบัดในพื้นที่ปนเปื้อนที่กินบริเวณกว้าง เนื่องจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในพื้นที่เหล่านี้จะมีการปนเปื้อนของตะกอน และของแข็งแขวนลอยด้วยซึ่งทำให้วิธีการในการบำบัดน้ำเสียที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันแก้ปัญหาไม่ได้เท่าที่ควร

สำหรับแนวทางที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีตะกอนและของแข็งแขวนลอยรวมอยู่ด้วยคือแนวทางการบำบัดทางกายภาพ เนื่องจากการบำบัดทางกายภาพสามารถแยกสิ่งที่เป็นของแข็งปนมาในน้ำเสียออกจากน้ำเสียได้ค่อนข้างบริสุทธิ์ เช่น ของแข็งขนาดใหญ่ กระจาดพลาสติก กรวด ดิน ทราบ ไขมัน และน้ำมัน ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่มีในน้ำเสียเป็นหลัก ในแนวทางการบำบัดทางกายภาพยังมีวิธีการแยกของแข็งออกจากของเหลวด้วยกันหลายวิธี ยกตัวอย่างเช่น การตกตะกอน การแยกโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และการกรอง เป็นต้น โดยในการเลือกใช้แต่ละวิธีการนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของอนุภาคที่ต้องการแยกออกกระบวนการไฮโดรไซโคลอน เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางในกาแยกสารที่มีความหนาแน่นที่แตกต่างกันออกจากกันได้ และสามารถแยกได้ทั้ง ของแข็ง-ของแข็ง ของแข็ง-ของเหลว และของเหลว-ของเหลว ออกจากกันได้ในระยะเวลาน้อย ประหยัดพื้นที่ และมีประสิทธิภาพสูง จึงนิยมนำกระบวนการไฮโดรไซโคลอนมาใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวมากกว่าอุปกรณ์ที่ใช้แรงโน้มถ่วงในการตกตะกอน เนื่องจากความเร่งจากแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอนมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

จากข้อมูลเบื้องต้นทำให้เกิดแนวคิดที่จะนำกระบวนการไฮโดรไซโคลอนมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดยในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะประกอบไปด้วย ของแข็งแขวนลอย น้ำมัน และน้ำซึ่งไฮโดรไซโคลอนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อการแยกของแข็งแขวนลอย น้ำมัน ออกจากน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากไฮโดรไซโคลอนที่ใช้เป็นไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่จะพัฒนาอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนให้สามารถแยกของแข็งแขวนลอย น้ำมัน และน้ำเสียออกจากกันได้ในขั้นตอนเดียว โดยการนำไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส มาทำการปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการแยกให้ดีขึ้น และมีการพัฒนาออกแบบอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เนื่องจากในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน มีส่วนประกอบ คือ น้ำ น้ำมัน และของแข็งแขวนลอย ไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส จึงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถแยกส่วนประกอบทั้งหมดออกจากกันได้ในระยะเวลาร่วมกัน อีกทั้งกระบวนการไฮโดร

ไฮโดรเจนยังเป็นที่น่าสนใจในการนำมาประยุกต์ใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นให้ได้น้ำที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นนี้ มีคุณภาพที่เหมาะสมต่อการบำบัดในขั้นสูงขึ้น ซึ่งจะส่งผลดีต่อการปล่อยออกสู่สาธารณะ และอาจสามารถนำน้ำมันที่แยกได้ในขั้นนี้กลับมาใช้ใหม่ได้อีกด้วย

1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ไฮโดรไฮโดรเจนชนิด 3 เฟส เพื่อใช้ในการแยก น้ำ น้ำมันและของแข็งแขวนลอย

1.2.2 เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไฮโดรเจนชนิด 3 เฟส

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอุปกรณ์ไฮโดรไฮโดรเจนมาแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเพื่อนำกลับน้ำมันมาใช้ใหม่

1.2.4 เพื่อศึกษารูปแบบของไฮโดรไฮโดรเจน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยและน้ำมัน ระหว่างไฮโดรไฮโดรเจน 2 เฟส กับไฮโดรไฮโดรเจน 3 เฟส

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับทดลอง (Pilot scale) ดำเนินการภายใต้ อุดมทงูมิห้อง ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3.2 ถึงปฏิกรณ์ในการเดินระบบไฮโดรไฮโดรเจนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นถังกวนต่อเนื่อง (Continuous stirred tank reactor) ที่ต่อเข้ากับไฮโดรไฮโดรเจน

1.3.3 ใช้ไฮโดรไฮโดรเจน 2 เฟส ชนิดแยกของแข็ง- ของเหลว ตามคำแนะนำการออกแบบของ Bradley ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

1.3.4 ใช้ไฮโดรไฮโดรเจน 3 เฟส ตามคำแนะนำการออกแบบของ Aurelle และMa ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร

1.3.5 น้ำเสียที่นำมาใช้ในงานวิจัยเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่ได้จากการปั่นกวนน้ำมันปาล์ม
ทราย และน้ำประปา

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ทราบความเป็นไปได้ในการนำกระบวนการไฮโดรไซโคลอน 2 เฟส และไฮโดรไซโคลอน 3
เฟส มาใช้ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

1.4.2 ทราบพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของไฮโดร
ไซโคลอน

1.4.3 เข้าใจกลไกและตัวแปรต่างๆที่มีผลกระทบต่อการทำงานของไฮโดรไซโคลอน 2 เฟส และ
ไฮโดรไซโคลอน 3 เฟส ที่ใช้แยกน้ำมันออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

1.4.4 ทราบถึงแนวทางเบื้องต้นในการสร้างอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ที่เหมาะสม
กับการใช้แยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีประสิทธิภาพสูง

1.4.5 ทราบถึงแนวทางในการนำกระบวนการไฮโดรไซโคลอนมาใช้ในการแยกน้ำเสียปนเปื้อน
น้ำมัน และนำกลับน้ำมันมาใช้ได้ใหม่

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมัน

โดยทั่วไปแล้ว คำว่า น้ำมัน หมายความถึง สารประกอบ 2 ประเภท ได้แก่

2.1.1 น้ำมันแร่ (Mineral Oils) เป็นน้ำมันที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม (น้ำมันดิบ) มีองค์ประกอบโดยส่วนใหญ่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการนำมาใช้หล่อลื่นในงานหลายประเภท เพราะมีค่าความหนืดและความหนาแน่นที่สามารถกำหนดได้ซึ่งค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.79 - 0.95 กรัมต่อมิลลิลิตร (ชัยยุทธ, 2542) มีความเสถียรต่อความร้อนและปฏิกิริยาเคมีพอสมควร ราคาไม่แพงมาก และหาซื้อง่าย จึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย น้ำมันประเภทนี้เป็นน้ำมันพื้นฐานที่ใช้กันมากที่สุดเพราะนอกจากคุณภาพดีแล้วราคายังถูกอีกด้วย น้ำมันแร่ได้จากการเอาส่วนที่อยู่ก้นหอกกลั่นบรรยากาศมาผ่านกระบวนการกลั่นภายใต้สุญญากาศ (Vacuum distillation) แยกเอาน้ำมันหล่อลื่นชนิดใสและชนิดข้นออกมา ส่วนที่เหลือเป็นกากสามารถนำไปผลิตยางมะตอย ทั้งนี้ ชนิดและปริมาณของน้ำมันแร่ที่แยกออกมาได้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบตั้งต้นที่นำมากลั่น

2.1.2 น้ำมันที่บริโภคได้ ได้แก่ น้ำมันพืชและน้ำมันสัตว์ ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงอินทรีย์เคมีที่พืชและสัตว์สังเคราะห์ขึ้น และถูกนำไปสกัดออกมาใช้บริโภคหรือใช้เตรียมอาหารเพื่อเพิ่มรสชาติและแปรรูปให้ชวนรับประทานยิ่งขึ้น โดยเริ่มแรกที่มีการสกัดน้ำมันพืชนั้นก็เพื่อใช้ทดแทนหรือผสมกับน้ำมันสัตว์ให้มีปริมาณมากขึ้นเพียงพอต่อความต้องการ และก็พบว่าพืชหลายชนิดที่ใช้สกัดเอาน้ำมันได้ประกอบกับวิทยาการในการเพาะปลูก การสกัดและการแปรรูป ได้ก้าวหน้าตามลำดับ จึงได้นำน้ำมันพืชไปแปรรูปเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ นอกเหนือจากการบริโภคอีกหลายประการ เช่น ใช้ในการผลิตสี น้ำมันผสมสี เครื่องสำอาง ยารักษาโรค สบู่ ผงซักฟอก เส้นใยสังเคราะห์ หนังเทียม แผ่นพลาสติก น้ำมันเชื้อเพลิง และน้ำมันหล่อลื่น (ในภาวะที่เกิดการขาดแคลนน้ำมันดิบ) อาจกล่าวได้ว่า น้ำมันพืชได้เข้ามามีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน น้ำมันทั้งของพืชและสัตว์เป็นสารประกอบเชิงอินทรีย์ เกิดจากการรวมตัวของกรดคาร์บอกซิลิก (Carboxylic acid) หรือกรดไขมันหลายโมเลกุล โดยมีกลีเซอรอล หรือกลีเซอริน (Glycerol or Glycerine) เป็นตัวเชื่อมกรดไขมันแต่ละชนิดมีสูตรโครงสร้างของตัวเองโดยเฉพาะ และยังสามารถแยกออกเป็น 2 ชนิด คือ

- กรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งร่างกายดูดซึมเข้าไปและใช้ประโยชน์ได้น้อย จึงทำให้เกิดการสะสมตัวเกาะติดกับผนังด้านในของเส้นโลหิต เป็นสาเหตุให้เกิดการอุดตันและเปราะแตกได้ง่าย
- กรดไขมันไม่อิ่มตัว มีคุณค่าทางด้านโภชนศาสตร์สูง เนื่องจากถูกดูดซึมและย่อยได้ง่าย

2.2 น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสามารถแบ่งแหล่งที่มาของน้ำเสียได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนภาคครัวเรือน (Domestic sector) และส่วนภาคอุตสาหกรรม (Industrial sector) โดยภาคครัวเรือนมักก่อให้เกิดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากกิจกรรมภายในครัวเรือนอาทิการทำอาหาร ล้างจาน และซักผ้า เป็นต้น ส่วนภาคอุตสาหกรรมจะผลิตน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมาจากกระบวนการการผลิต กระบวนการชะล้าง และกระบวนการซ่อมบำรุง โดยปริมาณน้ำมันในน้ำเสียแต่ละประเภทจะแตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2-1



ตารางที่ 2-1 ปริมาณน้ำมันในแต่ละแหล่งที่มาของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน (Coca-Prados J., Gutiérrez-Cervello G. และ Benito, 2011)

ประเภทอุตสาหกรรม	ความเข้มข้นน้ำมัน (มก./ล.)
กระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (Petroleum refining)	200-4,000
กระบวนการตัด กิ่งโลหะ (Metal processing and finishing)	100-20,000
กระบวนการขึ้นรูปอะลูมิเนียม (Aluminum rolling)	5,000-50,000
กระบวนการทำสายไฟทองแดง (Copper wire drawing)	1,000-10,000
กระบวนการผลิตอาหาร (Food processing (fish and seafood))	500-14,000
กระบวนการกลั่นน้ำมัน (ที่รับประทานได้) (Edible oil refining)	4,000-6,000
กระบวนการผลิตสี (Paint manufacturing)	1,000-2,000
กระบวนการทำความสะอาดเรือ (Cleaning bilge water from ships)	30-2,000
กระบวนการล้างรถ (Car washing)	50-2,000
กระบวนการซ่อมบำรุงอากาศยาน (Aircraft maintenance)	500-1,500
กระบวนการฟอกหนัง (Leather processing (tannery effluents))	200-40,000
กระบวนการผลิตไม้ (Wood scouring)	1,500-12,500
กระบวนการรักษาสภาพไม้ (Wood preservation)	50-1,500

นอกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแล้ว ยังมีน้ำมันบางส่วนที่อยู่ในกระบวนการผลิตเกิดการรั่วไหลขึ้น ซึ่งสาเหตุที่เกิดการรั่วไหลของน้ำมันไปปนเปื้อนในแหล่งน้ำจนเกิดเป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้แก่ การขนถ่าย การผลิต และใช้งาน โดยเราสามารถจำแนกการรั่วซึมของน้ำมัน ออกเป็น 6 ประเภท ดังนี้

- 1) การซึมตามธรรมชาติ (Natural oil seepage)
- 2) การรั่วไหลจากการสำรวจ ขุดเจาะ และผลิต
- 3) การรั่วไหลจากการขนส่ง
- 4) การรั่วไหลจากการกลั่น
- 5) การปนเปื้อนจากการใช้น้ำมัน
- 6) การรั่วไหลจากซากเรืออัปปาง

สำหรับประเทศไทยได้มีการจัดระดับการรับมือเมื่อเกิดกรณีน้ำมันรั่วไหลออกเป็น 3 ระดับ (Tier) ดังนี้
ตารางที่ 2-2 ระดับการจัดการน้ำมันรั่วไหลที่มาปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อม (กระทรวงคมนาคม, 2545)

ระดับ (Tier)	ปริมาณที่น้ำมันรั่วไหล (ตัน)	สาเหตุโดยทั่วไปในการ รั่วไหล	ข้อกำหนด/กำหนดในการ รับผิดชอบ
Tier 1	ไม่เกิน 20 ตัน	เกิดขึ้นระหว่างการขน ถ่ายน้ำมัน	ผู้ที่ทำให้เกิดการรั่วไหลต้อง เป็นผู้รับผิดชอบในการขจัด คราบน้ำมัน
Tier 2	รั่วไหลมากกว่า 20 ตัน แต่ไม่ เกิน 1,000 ตัน	เกิดจากเรือชน	รัฐและเอกชนต้องร่วมมือกัน ในการขจัดคราบน้ำมัน ตาม แผนป้องกันและขจัดมลพิษ ทางน้ำเนื่องจากน้ำมัน แห่งชาติ
Tier 3	รั่วไหลมากกว่า 1,000 ตัน ขึ้นไป	เกิดจากอุบัติเหตุที่ รุนแรง	การขจัดคราบน้ำมันต้องได้รับ ความร่วมมือจากหน่วยงาน ต่างๆในประเทศและระดับ นานาชาติ

2.3 รูปแบบของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

น้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย โดยทั่วไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ได้แก่

2.3.1 น้ำมันที่ละลายน้ำ (Dissolved oil)

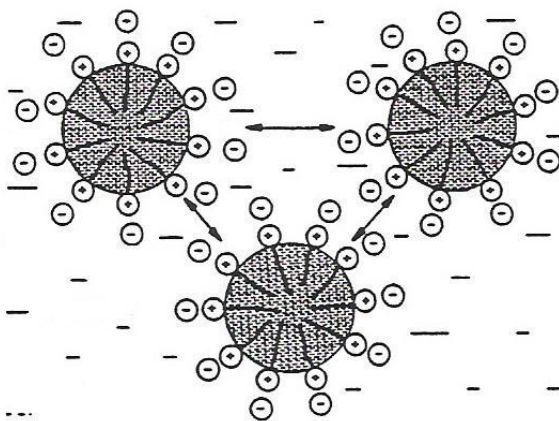
น้ำมันละลายน้ำเป็นน้ำมันที่สามารถละลายน้ำได้เล็กน้อยซึ่งมีผลมาจากน้ำหนักโมเลกุลที่ลดลงซึ่งจะทำให้ความสามารถในการละลายน้ำ (Solubility) เพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าน้ำมันที่มีมวลโมเลกุลต่ำจะสามารถละลายและระเหยได้ในขณะเดียวกัน น้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำอยู่ในรูปละลายน้ำได้ ส่งผลให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นและรสของน้ำที่เปลี่ยนไป ดังนั้นถือได้ว่าน้ำมันที่ละลายน้ำเป็นสารมลพิษที่อันตรายรูปแบบหนึ่ง

2.3.2 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว (Non-stabilized emulsion)

น้ำมันประเภทนี้เกิดจากอนุภาคอิมัลชันที่สามารถรวมตัวกันได้เองเมื่อสัมผัสกันและมีแนวโน้มที่จะรวมกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับของการกระจาย (Degree of dispersion) หรือขนาดของอนุภาคน้ำมัน ถ้าอนุภาคลอยและกระจายอยู่ในน้ำนานถือว่าอิมัลชันมีความคงตัวมากในขณะเดียวกันถ้าขนาดอนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กจะทำให้เวลาในการลอยขึ้นและรวมตัวกับอนุภาคน้ำมันอื่นๆจะสูงมากขึ้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องต่อความเสถียรของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสียประเภทนี้คือ ลักษณะการกวนผสมเช่นพลังงานที่ทำให้เกิดความปั่นป่วนและแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน แต่ความเสถียรของอนุภาคน้ำมันจะเกิดขึ้นเพียงชั่วคราวเท่านั้นเมื่อหยุดการปั่นกวนหยดน้ำมันเหล่านี้จะรวมตัวกันและกลับมาแยกชั้นเช่นเดิม

2.3.3 น้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว (Emulsion)

น้ำเสียจากชุมชนหรือจากอุตสาหกรรม โดยมากมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวอยู่เสมอ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวเป็นองค์ประกอบหลักของสารทำความสะอาดต่างๆ ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ โมเลกุลที่ชอบน้ำมันและโมเลกุลที่ชอบน้ำ จึงทำให้สารลดแรงตึงผิวจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2- 1 การผลักรันของอนุภาคน้ำมันเนื่องจากสารลดแรงตึงผิว (Aurelle Y, 1985)

อนุภาคน้ำมันที่เกิดขึ้นในอิมัลชันจะมีขนาดเล็กมาก ซึ่งโดยทั่วไปมักจะมีขนาดเล็กกว่า 5 ไมครอน ดังนั้นความเร็วในการลอยขึ้นจึงมีค่าต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับเคลื่อนที่แบบบราวเนียน (Brownian movement) และเนื่องจากข้อไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคน้ำมัน (Electrokinetic หรือค่า Zeta potential) ส่งผลให้มีแรงผลักระหว่างอนุภาค จึงทำให้ไม่เกิดการชนและการรวมตัวกัน ในระหว่างการเคลื่อนที่แบบบราวเนียน

นอกจากนี้ยังพบอีกว่า น้ำเสียมีการปนเปื้อนของสารลดแรงตึงผิวร่วม (Cosurfactant) ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับสารลดแรงตึงผิว คือจะไปแทรกตัวอยู่ระหว่างผิวสัมผัสของน้ำมันและน้ำ ผลที่เกิดขึ้นก็คือจะทำให้อิมัลชันมีเสถียรภาพสูงขึ้น เนื่องจากโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวร่วมจะเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และจะไปลดแรงผลักระหว่างโมเลกุลที่ชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิว (ซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว) อิมัลชันที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารลดแรงตึงผิวร่วมจะมีขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กมาก มีขนาดประมาณ 100 – 600 อังสตรอม

2.3.4 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ (Oil film)

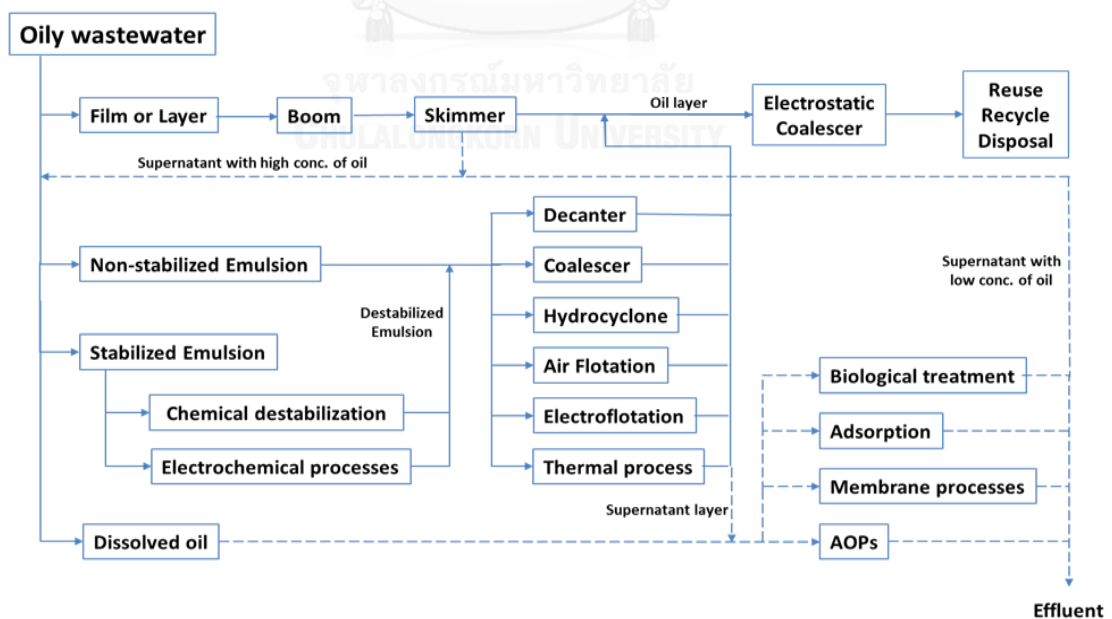
น้ำมันส่วนใหญ่มักจะมีน้ำหนักแน่นน้อยกว่าน้ำ จึงมักจะลอยอยู่บนผิวน้ำในลักษณะของฟิล์มบาง ซึ่งจะไปขัดขวางการถ่ายเทออกซิเจนและแสง ปัญหาของน้ำมันในลักษณะนี้ก็คือสามารถปนเปื้อนได้เป็นพื้นที่กว้างถึงแม้จะมีน้ำมันปริมาณน้อยก็ตาม เพราะจะมีการแพร่กระจายออกไปในลักษณะของแผ่นฟิล์มโมเลกุลเดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะแพร่กระจายได้เป็นพื้นที่กว้างมาก ซึ่งการปนเปื้อนในลักษณะนี้จะสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า คือจะสะท้อนเป็นฟิล์มสีรุ้งลอยอยู่บนผิวน้ำดังตัวอย่างในรูปที่ 2-2



รูปที่ 2- 2 น้ำมันที่ลอยเป็นฟิล์มอยู่บนผิวน้ำ

2.4 ภาพรวมของกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน

ในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ปัจจัยที่นำมาใช้ในการประเมินเลือกกระบวนการบำบัดคือ รูปแบบของน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียนั้นๆ จากรูปแบบน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 4 ประเภทที่ได้กล่าวมาในข้างต้น สามารถสรุปแนวทางการใช้ระบบบำบัดที่เหมาะสมได้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2- 3 การจัดการน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามรูปแบบของน้ำมันในน้ำเสีย
(พิสุทธิ เพียรมนกุล, 2556)

2.4.1 การกำจัดน้ำมันที่ละลายน้ำ

อนุภาคของน้ำมันประเภทนี้ขนาดเล็กลงมากจนเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ มีความเสถียรสูง ไม่สามารถใช้กระบวนการทางกายภาพในการแยกน้ำมันออกจากน้ำได้ การบำบัดน้ำมันที่ละลายน้ำโดยทั่วไปจะใช้วิธีการที่สามารถทำปฏิกิริยากับน้ำมันในระดับโมเลกุล เช่น การใช้ปฏิกิริยาทางเคมี คือ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes : AOPs) การดูดซับน้ำมันด้วยตัวกลางดูดซับ (Adsorption) และการย่อยสลายทางชีวภาพ (Biological treatment process) หรือการกรองผ่านเมมเบรน (Membrane process) เช่นการกรองด้วยอัลตราฟิวเทรชันเมมเบรน (Ultrafiltration : UF)

2.4.2 การจัดการน้ำในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันประเภทนี้จะแขวนลอยอยู่ในน้ำในลักษณะของเม็ดน้ำมัน สามารถใช้วิธีการทางกายภาพในการบำบัด โดยอาศัยหลักการเพิ่มความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมัน เพื่อให้ไขมันที่แขวนลอยอยู่ในน้ำรวมกลุ่มกันและแยกออกจากน้ำ การเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วลอยตัวนี้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 วิธี ได้แก่

- 1) การเพิ่มอุณหภูมิ (Thermal Process) เพื่อลดค่าความหนืดของเฟสต่อเนื่อง
- 2) การทำให้ลอย (Flotation) เพื่อเพิ่มค่าความแตกต่างของความหนาแน่นของสารกระจายและสารต่อเนื่อง เช่น การทำให้ลอยตัวด้วยอากาศละลาย (Dissolved Air Flotation : DAF) เป็นต้น
- 3) การเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugation) เพิ่มอัตราเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก (g) เพื่อแยกอนุภาคน้ำมันซึ่งมีความหนาแน่น (ความถ่วงจำเพาะ) น้อยกว่ากระแสของเฟสของไหลที่กำลังหมุนวนในอุปกรณ์เพิ่มแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เช่น การแยกด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) เป็นต้น
- 4) การทำให้รวมตัว (Coalescence) เพิ่มขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของอนุภาคอิมัลชัน (d_p) โดยการทำให้อนุภาคสารกระจายขนาดเล็กหลายอนุภาครวมตัวกันจนมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยการใช้ อุปกรณ์โคเอเลสเซอร์ (Coalescer) โดยการเพิ่มขนาดอนุภาคนี้อาจส่งผลต่อความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคเพิ่มมากขึ้น

ทั้งนี้หากไม่ได้ใช้วิธีเพิ่มความเร็วในการลอยตัวของอนุภาคน้ำมัน อาจใช้วิธี การตกตะกอน (Decantation) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคน้ำมันที่แขวนลอย ออกจากเฟสของไหลได้ โดยการกักของเหลวไว้ระยะเวลาหนึ่งในถังหรือบ่อตกตะกอน (Sedimentation tank/ Decantation tank) เพื่อลดความเร็วในการไหลของของไหลจนกระทั่งอนุภาคดังกล่าวสามารถถูกแยกออกด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity force) ในลักษณะของตะกอนที่บริเวณด้านล่างของถัง (ในกรณีที่อนุภาคดังกล่าวมีความหนาแน่นที่สูงกว่าเฟสของไหล) หรือขึ้นสู่ผิวหน้าของถัง (ในกรณีที่อนุภาคดังกล่าวมีความหนาแน่นที่ต่ำกว่าเฟสของไหล) ขึ้นอยู่กับลักษณะของอนุภาคที่ต้องการแยก

2.4.3 การจัดการน้ำมันในรูปอิมัลชันที่มีสารลดแรงตึงผิว

น้ำมันในประเภทนี้จะเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กและมีเสถียรภาพเกินกว่าที่จะแยกได้โดยกระบวนการทางกายภาพในแบบเดียวอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว จึงต้องมีการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันด้วยการเติมสารเคมี (Chemical destabilization) หรือใช้กระบวนการเคมีไฟฟ้า (Electrochemical destabilization) เพื่อให้หยดน้ำมันรวมตัวกันมีขนาดใหญ่จนเป็นเม็ดน้ำมัน จากนั้นจึงสามารถแยกน้ำมันออกด้วยวิธีทางกายภาพได้เช่นเดียวกับน้ำมันในรูปอิมัลชันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว ซึ่งโดยส่วนมากแล้ววิธีการทำลายเสถียรภาพที่เป็นที่นิยมคือ การเติมสารเคมี ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มได้แก่ 1)เกลือของโลหะ เช่น เฟอริกคลอไรด์ ($FeCl_3$) 2) กรดแก่ เช่นกรดไฮโดรคลอริก (HCl) และ 3) สาร Polyelectrolyte เช่นโพลีอิเล็กโทรไลต์ประจุบวก (Cationic Polyelectrolyte) เป็นต้น

2.4.4 การกำจัดน้ำมันที่ลอยบนผิวน้ำ

เนื่องจากน้ำมันในลักษณะนี้จะลอยอยู่เหนือผิวน้ำรวมตัวกันเป็นฟิล์มบางแยกออกจากน้ำอย่างชัดเจน การจัดการน้ำมันประเภทนี้สามารถทำได้โดยใช้ทุ่นน้ำมัน (Boom) จำกัดขอบเขตการแพร่กระจายของน้ำมันที่ลอยบนผิวน้ำให้มีความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น แล้วใช้ตัวกลางดูดซับน้ำมันออกจากน้ำโดยพื้นผิวของส่วนที่สัมผัสฟิล์มน้ำมันจะต้องมีความชอบน้ำมัน เช่น สกิมเมอร์ (Skimmer) และอุปกรณ์ดูดซับ (Adsorbent) ชนิดต่างๆ เป็นต้น

2.5 การแบ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน

การแบ่งประเภทเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกเทคโนโลยีที่เหมาะสมของน้ำเสียในแต่ละความเข้มข้น ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว ไม่ว่าจะ เป็นกระบวนการบำบัดทางกายภาพ เคมี กายภาพ-เคมี และชีวภาพ ก็มีข้อจำกัดในการบำบัดที่แตกต่างกันไป

2.5.1 กระบวนการบำบัดเบื้องต้น (Pre-treatment process)

กระบวนการบำบัดเบื้องต้นเป็นกระบวนการทางกายภาพที่มีเป้าหมายในการแยกน้ำมันและสารที่สามารถแยกออกได้โดยง่าย เช่น ตะกอนดิน หิน กรวด ทราย และอนุภาคขนาดใหญ่ที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำเสีย เพื่อนำน้ำมันส่วนใหญ่ที่อยู่ในน้ำเสียมาเข้ากระบวนการผลิตต่อไป

2.5.1.1 กฎของสโตค (Stoke's law)

กระบวนการบำบัดทางกายภาพ มีเป้าหมายในการนำมลพิษ หรือสารที่ปนเปื้อนในวัฏภาคน้ำออกมากโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะทางกายภาพของสารนั้นๆ กลไกที่นำมาใช้ในการบำบัดทางกายภาพจะอ้างอิงกับความแตกต่างระหว่างสมบัติทางกายภาพของสารและน้ำ เพื่อให้เกิดการแยกส่วนอย่างชัดเจน มลพิษที่อยู่ในน้ำเสียในแง่มุมของการบำบัดด้วยกระบวนการทางกายภาพ ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญที่ใช้ในกระบวนการแยกและบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามกฎของสโตคดังนี้

กฎของสโตค (Stoke's law) เป็นแนวความคิดในการอธิบายการเคลื่อนที่ของวัตถุทรงกลมตันในของไหลที่มีความหนืด ความเร็วของอนุภาคสุดท้ายที่ได้ (Terminal velocity) จะเป็นความเร็วที่ใช้ในการคาดการณ์การแยกตัวของสารจากวัฏภาคน้ำดังแสดงในสมการที่ (2-1)

$$W = \frac{\Delta\rho * g * d_a^2}{18\mu_c} \quad (2-1)$$

เมื่อ W = ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคที่จะแยกออกจากน้ำเสีย (เมตร/วินาที)

$\Delta\rho$ = ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว(กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

g = ค่าความเร่งโน้มถ่วงของโลก (9.81 เมตร/วินาที²)

d_d = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคน้ำมัน (เมตร)

μ_c = ความหนืดของน้ำเสีย (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)

จากสมการข้างต้น จะเห็นได้ว่ามีตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือ ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและน้ำเสีย ขนาดของอนุภาคน้ำมัน และความหนืด ซึ่งเป็นตัวแปรที่สามารถทำให้ความเร็วสุดท้ายของอนุภาคเพิ่มขึ้น ด้วยหลักการข้างต้นนี้ทำให้เกิดเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันดังแสดงในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2- 3 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทางกายภาพ (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2556)

ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	กระบวนการบำบัดที่เกี่ยวข้อง
ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่น($\Delta\rho$)	API, CPI, DAF, IAF, flotation
ความเร่งโน้มถ่วงของโลก (g)	Gravitational separator, hydro-cyclone
ขนาดของอนุภาคน้ำมัน (d_d)	Coalescer
ความหนืดของน้ำเสีย(μ_c)	Thermal treatment, surfactant injection

2.5.1.2 เทคโนโลยีสำหรับการบำบัดเบื้องต้น (Pre-treatment processes)

1) American Petroleum Institute (API Unit)

กระบวนการเบื้องต้นในการแยกของแข็งและน้ำมันออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน คือ API ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในโรงงานผลิตน้ำมันปิโตรเลียมมาก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่สามารถแยกของแข็งและน้ำมันส่วนใหญ่ออกจากน้ำเสียได้ จากหลักการความแตกต่างของความหนาแน่นของสสาร น้ำมันส่วนใหญ่จะลอยขึ้นสู่น้ำเนื่องจากมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ส่วนของแข็งและน้ำมันที่มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำจะตกตะกอนกลายเป็นตะกอนที่มีน้ำมันปนเปื้อน (Oily sludge) ขนาดอนุภาคน้ำมันที่เล็กที่สุดที่สามารถแยกด้วยกระบวนการนี้ได้คือ 150 ไมครอน

2) Hydrocyclone

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมออกจากกัน ซึ่งสามารถแยกของแข็งออกจากของแข็ง ของแข็งออกจากของเหลว และของเหลวออกจากของเหลว โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อเพิ่มความเร็วที่ใช้ในการตกตะกอน การทำงานของไฮโดรไซโคลนนั้นแตกต่างจากเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) ที่ต้องหมุนเพื่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง เนื่องจากในระหว่างการทำงานจะไม่มีชิ้นส่วนใดๆของไฮโดรไซโคลนเคลื่อนที่ อย่างไรก็ตามเครื่องแยกทั้งสองชนิดนี้ต่างก็ใช้หลักการแยกอนุภาคแบบเดียวกัน

3) อุปกรณ์สกิมเมอร์ (Oil skimmer)

อุปกรณ์สกิมเมอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รวบรวมน้ำมันที่อยู่บนผิวน้ำมาเก็บไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ในปัจจุบัน อุปกรณ์สกิมเมอร์ที่ใช้ในกรณีเหตุการณ์น้ำมันรั่วมีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่

- แบบที่ใช้ระบบสูบหรือแบบไฮดรอลิก (Pumping or hydraulic devices) น้ำมันจะถูกสูบออกไปหรือสกัดโดยอุปกรณ์ที่ควบคุมด้วยระบบไฮดรอลิก เช่น ฝายที่สามารถปรับได้ (Adjustable weir) ปัจจัยที่สำคัญคือ ความหนาของชั้นน้ำมัน ทำให้บางครั้งต้องเพิ่มกลไกที่ทำให้น้ำมันมีความหนาขึ้นก่อนที่จะเอาออกไป ยกตัวอย่างเช่น สกิมเมอร์แบบสูบ (Pump skimmer) และสกิมเมอร์แบบฝาย (Weir skimmer) เป็นต้น
- แบบที่ใช้สมบัติการดูดซับ (Adsorption property) ได้แก่ สกิมเมอร์แบบลูกกลิ้ง (Drum skimmer) สกิมเมอร์แบบดิสก์ (Disc skimmer) สกิมเมอร์แบบสายพาน (Belt skimmer) เป็นต้น อุปกรณ์ประเภทนี้จะอาศัยการดูดซับบนวัสดุของน้ำกับน้ำมันที่แตกต่างกัน ซึ่งเกี่ยวกับแรงตึงผิว (Interfacial tension) ของวัสดุนั้นๆ โดยที่การเลือกใช้วัสดุที่มีค่าแรงตึงผิววิกฤตต่ำ คือ มีค่าน้อยกว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำมันมากๆ ยกตัวอย่างเช่น วัสดุประเภท PTFE และฟลูออโรคาร์บอน จะยิ่งส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการแยก รวมไปถึงการคัดเลือกน้ำมันที่ดีขึ้น เนื่องจากค่าพลังงานพื้นผิวยิ่งต่ำจะส่งผลทำให้น้ำยิ่งเกาะติดยากขึ้น โดยเราอาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ประเภทนี้ได้รับความนิยมค่อนข้างมากในการประยุกต์ใช้งานในปัจจุบัน นอกจากนี้ ในปัจจุบันได้มีชุดอุปกรณ์ดูดซับน้ำมันในกรณีฉุกเฉิน (Emergency oil spill kit) ซึ่งจะประกอบไปด้วยชนิดผ้ากรองหรือดูดซับน้ำมันที่บรรจุอยู่ในถังพลาสติกเพื่อให้ในการแยกน้ำมันปนเปื้อนออกจากเฟสน้ำ

4) บ่อดักไขมัน (Grease trap)

บ่อดักไขมันเป็นอุปกรณ์เบื้องต้นที่ช่วยกำจัดน้ำมันส่วนใหญ่ในน้ำเสีย ซึ่งน้ำมันจะอยู่ในรูปไขมันอิสระ Free oil ซึ่งเมื่อเวลาผ่านไปสามารถแยกชั้นออกจากน้ำได้ น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะไหลลงสู่บ่อดักไขมันตะแกรงหรือ screening เป็นอุปกรณ์บำบัดเบื้องต้นเพื่อแยกอนุภาคขนาดใหญ่มาก เช่น เศษใบไม้ เป็นต้น จากนั้นน้ำเสียจะไหลไปยังบ่อดักตะกอนดินและทรายเพื่อให้ตะกอนที่มีน้ำหนักมากตกตะกอนก่อนที่จะเข้าไปสู่บ่อดักไขมัน บ่อดักไขมันเป็นส่วนที่ให้น้ำมันได้แยกตัวออกจากน้ำเสียจากสมบัติความแตกต่างของความหนาแน่น

2.5.2 กระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 (Secondary treatment process)

ภายหลังจากการแยกของแข็งและอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสียแล้ว กระบวนการถัดไปคือกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 โดยมีเป้าหมายในการลดปริมาณอนุภาคแขวนลอยและปริมาณน้ำมันส่วนใหญ่ที่เกินความสามารถการบำบัดของกระบวนการบำบัดขั้นต้น โดยในกระบวนการบำบัดขั้นที่ 2 นี้จะอาศัยเกณฑ์ความเข้มข้นของน้ำมันเป็นเกณฑ์ในการเลือกใช้เทคโนโลยีการบำบัด ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับความเข้มข้น กล่าวคือ น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันสูง (มากกว่า 2% v/v) น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันปานกลาง (0.5 – 2% v/v) และน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันต่ำ (น้อยกว่า 0.5% v/v)

2.5.2.1 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันสูง (High concentration oily wastewater)

น้ำเสียในกลุ่มนี้จะมีระดับความเข้มข้นน้ำมันสูง (มากกว่า 2% โดยปริมาตร) โดยกระบวนการที่เลือกใช้จะต้องมีประสิทธิภาพที่เพียงพอ คือ ประมาณ 70% – 90% เพื่อให้เกิดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ในการประยุกต์ใช้ และให้ความเข้มข้นหลังการบำบัดต่ำลงเพียงพอที่จะเข้าสู่กระบวนการบำบัดถัดไปกระบวนการที่เกี่ยวข้องในกลุ่มนี้ได้แก่ กระบวนการบำบัดทางกายภาพ และกระบวนการบำบัดทางเคมี

1) กระบวนการทางกายภาพ (Physical treatment process)

จากกฎของสโตค กระบวนการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันสามารถจำแนกตามความสามารถในการแยกอนุภาคน้ำมัน โดยใช้เกณฑ์ของขนาดอนุภาคน้ำมันที่เล็กที่สุดที่สามารถบำบัดได้มาใช้ได้ดังนี้

ตารางที่ 2- 4 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันทางกายภาพจำแนกตามขนาดอนุภาคน้ำมัน

กระบวนการบำบัด	ขนาดอนุภาคน้ำมันที่เล็กที่สุดที่สามารถบำบัดได้ (ไมโครเมตร)
Corrugated plates separator (CPI)	40
Induced gas flotation (no flocculants)	25
Induced gas flotation (with flocculants)	3-5
Hydrocyclone	10-15
Mesh coalesce	5
Media filter	5
Centrifuge	2
Membrane filter	0.01

- Corrugated Plates Interceptor (CPI)

กระบวนการนี้จะใช้หลักการเดียวกับกระบวนการ API แต่ว่าจะมีการติดตั้งแผ่นกันเพื่อให้อนุภาคน้ำมันขนาดเล็กมีเวลาในการรวมตัวกันมากขึ้น ทำให้ระบบ CPI นี้สามารถบำบัดน้ำมันขนาดเล็กกว่า 150 ไมครอนได้

- Dissolved air flotation (DAF)

DAF เป็นกระบวนการทำให้อากาศละลายในน้ำที่ความดันสูงประมาณ 4 – 5 บรรยากาศ จากนั้นเมื่อปล่อยน้ำที่อิ่มตัวด้วยอากาศที่ความดันสูงนี้ออกสู่ความดันบรรยากาศอย่างรวดเร็ว อากาศที่ละลายอยู่จะแยกตัวออกมาเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็ก โดยฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 30 – 100 ไมโครเมตร ซึ่งจะเกาะและพองสารที่เป็นของแข็งต่างๆ และ

อนุภาคน้ำมันให้ลอยขึ้นสู่ผิวน้ำ ระบบนี้เป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูง แต่มีข้อเสียเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงในการเดินระบบ เพราะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงเพื่อทำให้เกิดความดันตามต้องการ

- Induced air flotation (IAF)

กระบวนการ IAF เป็นการสร้างฟองอากาศที่ความดันบรรยากาศ โดยการทำให้เกิดฟองอากาศจากการทำงานของเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น การปั่นกวนน้ำเสีย หรือการพ่นอากาศผ่านหัวเติมอากาศเข้าสู่ น้ำเสียโดยตรง ฟองอากาศที่เกิดขึ้นจะเข้าไปเกาะกับน้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำเสียแล้วลอยตัวขึ้นสู่ผิวน้ำ จึงทำให้น้ำมันและอนุภาคแขวนลอยต่างๆ ถูกแยกออกจากน้ำเสียโดยแรงลอยตัวที่เกิดจากฟองอากาศ (สุรารักษ์ อวนญวน, 2552)

- Centrifuge

กระบวนการ Centrifuge จะใช้การแยกของผสมระหว่างของเหลวและของเหลว โดยใช้หลักการปั่นเหวี่ยงที่มีแรงเหวี่ยงมากกว่าแรงดึงดูดโลกมากกว่า 100 เท่า การปั่นเหวี่ยงนี้เหมาะสำหรับของเหลวผสมซึ่งง่ายต่อการแยกชั้นมีความหนืดสูงหรือความหนาแน่นแตกต่างกัน และของเหลวทั้งสองชนิดจะต้องไม่รวมตัวกันได้ง่ายเกินไปภายหลังการแยก ข้อดีของกระบวนการนี้คือดำเนินการง่าย ใช้เวลาน้อย และมีประสิทธิภาพในการแยกสูง แต่โครงสร้างระบบซับซ้อนและรับปริมาณน้ำที่ต้องการบำบัดได้น้อย

2) กระบวนการทางเคมี (Chemical treatment process)

กระบวนการบำบัดทางเคมีเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำที่มีความเข้มข้นน้ำมันสูง มีจุดมุ่งหมายในการลดเสถียรภาพของอนุภาคน้ำมันในน้ำเสีย เพื่อให้อนุภาคน้ำมันสามารถรวมตัวและสามารถแยกออกจากน้ำเสียได้ง่ายยิ่งขึ้น

- กระบวนการทำลายเสถียรด้วยเคมี (Chemical destabilization)

กระบวนการทำลายเสถียรภาพในกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมักจะใช้กับน้ำมันประเภทอิมัลชันซึ่งอนุภาคน้ำมันแสดงคุณสมบัติในรูปของสารละลายคอลลอยด์ อนุภาคคอลลอยด์กล่าวคือ มีอนุภาคขนาดเล็กโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 10^{-6} ถึง 10^{-3} มิลลิเมตร เนื่องจากอนุภาคมีขนาดเล็กจึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยน้ำหนักของตัวเองในเวลาจำกัด นอกจากนี้อนุภาคคอลลอยด์เมื่ออยู่ในน้ำจะมีประจุประจําตัว โดยกลุ่มที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) มีประจุบวก เช่น สารอินทรีย์ สบู่ หรือสารจําพวกสารลดแรงตึงผิว ส่วนกลุ่มที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) มีประจุลบ

เช่น หยดน้ำมันและเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวมีประจุทำให้อนุภาคที่มีประจุชนิดเดียวกันเกิดเป็นแรงผลักระหว่างอนุภาคมีเสถียรภาพสูง การที่จะแยกอนุภาคเหล่านี้ออกจากน้ำ จะต้องทำให้อนุภาคต่างๆ เกิดการรวมตัวกันและจับเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งโดยทั่วไปจะประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ (1) การทำลายเสถียรภาพ (Destabilization) และ (2) กระบวนการรวมตะกอน (Flocculation)

- กระบวนการโคแอกกูเลชัน

เป็นกระบวนการหนึ่งในการทำลายเสถียรภาพด้วยเคมี โดยทำให้สารแขวนลอยมีขนาดใหญ่ขึ้นส่วนประกอบของกระบวนการได้แก่

- (1) ถังกวนเร็ว (Rapid mixing tank) โดยจะมีการเติมสารรวมตะกอน (Coagulants) ในขั้นตอนนี้เพื่อกระจายสารเคมีไปยังส่วนต่างๆ ของน้ำได้อย่างรวดเร็วและทั่วถึง เพื่อให้เกิดการทำลายเสถียรภาพของหยดน้ำมันขึ้นโดยสารเคมีที่ใช้ เรียกว่า โคแอกกูแลนต์ (Coagulant) เช่น สารส้ม เพอร์ริกคลอไรด์ ปูนขาว เป็นต้น
- (2) ถังกวนช้า (Flocculation tank) จะได้รับน้ำต่อจากถังกวนเร็วเพื่อสร้างสัมผัสน้ำกับหยดน้ำมันหรืออนุภาคที่ถูกทำลายเสถียรภาพแล้วเกิดการรวมตัวเป็นฟล็อก
- (3) กระบวนการแยกฟล็อก หลังจากผ่านกระบวนการกวนช้าเพื่อให้เกิดการรวมตัวของตะกอนขึ้น ขั้นตอนการแยกสารคอลลอยด์/แขวนลอยจากน้ำเสีย จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นโดยรวมของตะกอน กระบวนการที่นิยมใช้ในการแยกฟลอคน้ำมัน อาทิ การทิ้งให้ลอย (Decantation) การทำให้ลอย (Flotation) และการกรอง (Filtration)

2.5.2.2 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นปานกลาง (Moderate oily wastewater)

น้ำเสียประเภทนี้将有ความเข้มข้นน้ำมันปนเปื้อนอยู่ในระดับปานกลาง กล่าวคือ มีค่าอยู่ในช่วง 0.5 – 2% โดยปริมาตร กระบวนการบำบัดที่เหมาะสม คือ กระบวนการบำบัดทางกายภาพและกายภาพ-เคมี เพื่อให้ปริมาณน้ำมันส่วนใหญ่ถูกกำจัดออกไปและความเข้มข้นน้ำมันที่เหลืออยู่ในน้ำสามารถถูกกำจัดด้วยกระบวนการต่อไป อาทิ กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง หรือ กระบวนการทางชีวภาพ กระบวนการที่เกี่ยวข้องได้แก่

1) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ

- **Membrane filtration (Microfiltration and Ultrafiltration)**

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรน เป็นกระบวนการที่สามารถแยกอนุภาคน้ำมันทางกายภาพ โดยไม่มีการทำลายโครงสร้างของน้ำมันได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในกระบวนการเมมเบรนน้ำเสียจะถูกป้อนเข้าไปในระบบ เรียกว่า Feed เมื่อผ่านเมมเบรนแล้วส่วนที่สามารถกรองผ่านเมมเบรนได้จะเรียกว่า Permeate หรือ Filtrate และส่วนที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้นั้นจะเรียกว่า Retentate หรือ Concentrate การเดินระบบเมมเบรนสามารถแบ่งตามลักษณะของการไหลของน้ำเสียที่เข้าสู่กระบวนการเมมเบรนได้ 2 ประเภท ได้แก่

- (1) การเดินระบบแบบอัดตัว (Dead-end Filtration) ที่ทิศทางไหลตั้งฉากกับผิวหน้าเมมเบรน ทำให้เกิดชั้นตะกอนอยู่ที่หน้าผิวเมมเบรน เรียกว่า ชั้นเค้ก แล้วเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการกรองก็จะลดลงตามลำดับเนื่องจากเกิดการอุดตันของเมมเบรน
- (2) การเดินระบบแบบไหลตามขวาง (Crossflow Filtration) มีทิศทางไหลขนานกับผิวหน้าเมมเบรน การเดินระบบนี้จะมีผลต่อการลดลงของการไหลของน้ำน้อยกว่าการเดินระบบแบบอัดตัว แต่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมตัวของชั้นเค้กมากเท่ากับการไหลแบบอัดตัวจึงอาจมีประสิทธิภาพต่ำกว่า

2) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ-เคมี

- **Electrocoagulation-flotation (ECF)**

การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการรวมตะกอน/ลอยตัวด้วยไฟฟ้า หรือกระบวนการ Electrocoagulation-flotation เป็นกระบวนการบำบัดที่อาศัยหลักการของการลอยตัวด้วยฟองอากาศและการทำลายเสถียรภาพของน้ำมันด้วยปฏิกิริยาทางไฟฟ้าเคมี โดยในกระบวนการจะประกอบไปด้วย ขั้วไฟฟ้าซึ่งส่วนมากจะเป็นโลหะอะลูมิเนียม และเหล็ก เนื่องจากเป็นธาตุองค์ประกอบที่สำคัญของสารทำลายเสถียรภาพ (Coagulants) เมื่อเดินระบบด้วยไฟฟ้า กระแสตรง ขั้วแอโนดก็จะกร่อนและปล่อยอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ หรือเหล็กไฮดรอกไซด์ออกมาเพื่อสร้างฟล็อก ส่วนฟองแก๊สที่เกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดระหว่างกระบวนการจะช่วยพาตะกอนให้ลอยอยู่บนผิวน้ำ ทำให้กำจัดตะกอนได้ง่ายเนื่องจากตะกอนที่ได้ลอยอัดแน่นอยู่ด้านบนและมีปริมาณน้ำในตะกอนมีน้อย

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการนี้ ได้แก่ (1) pH ของน้ำเริ่มต้น (2) ค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ (3) ระยะห่างระหว่างขั้ว (4) ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ และ (5) ความเข้มข้นของน้ำมัน

2.5.2.3 น้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันต่ำ (Low concentration oily wastewater)

น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันในระดับต่ำ (น้อยกว่า 0.5% โดยปริมาตร) เป็นน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดเบื้องต้นมาแล้วทำให้คุณภาพน้ำทางกายภาพและเคมีมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานน้ำทิ้งแต่ด้วยผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมของน้ำมันจึงจำเป็นต้องได้รับการจัดการ วัตถุประสงค์ของการจัดการน้ำเสียที่มีความเข้มข้นน้ำมันต่ำนี้ เพื่อกำจัดหรือเปลี่ยนรูปน้ำมันให้เหลือผลกระทบน้อยที่สุด รวมไปถึงทำให้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้แล้วสามารถปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ตามข้อกำหนดทางกฎหมาย และไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม กระบวนการที่ใช้จัดการในกรณีนี้เป็นได้ทั้งกระบวนการทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ตัวอย่างกระบวนการที่เกี่ยวข้องได้แก่

1) กระบวนการบำบัดทางกายภาพ

- Membrane filtration (Nanofiltration and Reverse Osmosis)

กระบวนการกรองด้วยเยื่อแผ่น (Membrane process) สำหรับระดับความเข้มข้นน้ำมันต่ำที่เหมาะสมคือ กระบวนการ Nano filtration (NF) และ Reverse osmosis (RO) เนื่องจากน้ำมันที่ระดับความเข้มข้นต่ำมักจะอยู่ในรูปของอิมัลชัน (Emulsion) หรือน้ำมันละลายน้ำ (Dissolved oil) ซึ่งมีขนาดอนุภาคเล็กมาก กระบวนการกรองที่นำมาใช้จะอยู่ในช่วงของ NF และ RO หลักการทำงานเป็นเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นในหัวข้อของ MF และ UF โดยในส่วนของ NF จะมีช่วงขนาดของรูพรุนจะอยู่ในช่วง 0.001 ไมครอน ความดันที่ใช้จะมากกว่า 600 kPa โดยเมมเบรน NF สามารถกำจัดไอออนบางประเภทเช่น ไอออนชนิดวาเลนซ์คู่ในอัตราสูงกว่าไอออนวาเลนซ์เดี่ยว ทำให้สามารถลดความกระด้างของน้ำได้ด้วย ส่วนกระบวนการ RO หรือ Reverse osmosis จะให้ความดันเข้าไปในสารละลายเข้มข้น โดยความดันที่ใส่เข้าไปต้องมากกว่าความดันออสโมสิสของสารละลายจากผลของความดันนี้ ทำให้มีเพียงน้ำที่ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรน ซึ่งจะต้องใช้ความดันสูงประมาณ 1,380 – 6,890 kPa กระบวนการนี้สามารถแยกโลหะละลายในน้ำได้อีกด้วย อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีข้อจำกัดคือ น้ำเสียเริ่มต้นที่เข้ามาควรจะต้องผ่านกระบวนการกำจัดสารแขวนลอยและคอลลอยด์ออกเสียก่อน เพื่อป้องกันการอุดตันอย่างรวดเร็วของเมมเบรน

- กระบวนการการดูดซับ (Adsorption)

การดูดซับ (Adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิว ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (Mass transfer) จากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนพื้นผิวที่เป็นที่เกาะจับเรียกว่า สารดูดซับ (Adsorbent) การเกิดกระบวนการถูกดูดซับเรียกว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption process) การดูดซับด้วยของแข็ง เช่น ถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของแข็งนั้น การดูดซับจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้ามาจับกับผิวของของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลในของเหลวได้

กลไกการดูดซับ (Adsorption mechanism) สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

- 1) การดูดซับทางกายภาพ (Physical-sorption) เกิดจากผลต่างของพลังงานและแรงดึงดูดทางไฟฟ้าโมเลกุลของสารถูกดูดซับจะยึดติดกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับชนิดนี้เป็นแบบหลายชั้น คือแต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดขึ้นบนชั้นของโมเลกุลที่เกิดก่อนหน้านั้น โดยที่จำนวนชั้นที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนในของเหลว การผันกลับ (Reversibility) ของการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของสารดูดซับและโมเลกุลที่ถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดน้อยจะทำให้เกิดการหลุดออกไปของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (Desorption)
- 2) การดูดซับทางเคมี (Chemical-sorption) เกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับและสารดูดซับ ทำให้เกิดสารประกอบเคมีขึ้นกระบวนการนี้จะเป็นแบบชั้นเดียว และไม่สามารถผันกลับได้เพราะว่าพลังงานจะถูกใช้ไปในการสร้างสารประกอบทางเคมีขึ้นที่พื้นผิวที่ถูกเกาะจับ

วัสดุที่ใช้ในกระบวนการดูดซับได้แก่

- (1) สารอนินทรีย์ (Inorganic adsorbent) พื้นที่ผิวของสารดูดซับชนิดนี้มีค่าต่ำคือ มีค่าอยู่ในช่วง 20 - 200 ตารางเมตรต่อกรัม และมีความสามารถในการดูดซับโมเลกุลหรือคอลลอยด์เพียงไม่กี่ชนิด ซึ่งเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่โดยการใช้ความร้อน ตัวอย่างของสารดูดซับประเภทนี้ ได้แก่ ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ $Mg(OH)_2$ ถ่านกระดูก (Bone Char) Zeolite และ Activated silica

(2) ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) จัดเป็นสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีพื้นที่ผิวสัมผัสสูงมาก คืออยู่ในช่วง 600 – 1000 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับได้เป็นอย่างดี ถ่านกัมมันต์จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย และด้วยคุณสมบัติในการดูดซับมลสารได้หลากหลายและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายกระบวนการต่าง ๆ ทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ถ่านกัมมันต์มี 2 แบบ ได้แก่ แบบเกล็ด (Granular) และแบบผง (Powder)

(3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthesized organic resin) มีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วง 300 – 500 ตารางเมตรต่อกรัม โดยทั่วไป มักสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ โดยมีความสามารถในการนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration) สูงกว่าการใช้สารดูดซับประเภทอื่น ๆ โดยใช้สารราคาถูก เช่น เกลือแกง

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

- (1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ
- (2) ความสามารถในการละลาย และขนาดของสารที่ถูกดูดซับ
- (3) อุณหภูมิ
- (4) ความปั่นป่วน
- (5) ค่าพีเอช

2) กระบวนการบำบัดทางเคมี

- กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง Advance oxidation processes (AOPs)

กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้สามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 กลไกคือ

(1) กระบวนการสร้างอนุมูลอิสระ (Free radical generation)

อนุมูลอิสระที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ ไฮดรอกซิลแรดิคัล Hydroxyl radical (OH^*) ซึ่งเป็นสารที่มีความสามารถในการออกซิไดซ์สูงเป็นอันดับสองรองจากฟลูออรีน โดยทั่วไปไฮดรอกซิลแรดิคัล (OH^*) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูงนี้จะไปทำลายโมเลกุลของสารประกอบที่เป็นพิษ ทำให้น้ำเสียมีความสะอาดมากขึ้น โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดคือระดับความเข้มข้นของสารออกซิแดนซ์ (ไฮดรอกซิลแรดิคัล) ที่ใช้และความเข้มข้นของสารที่ถูกออกซิไดซ์ (น้ำมันในน้ำ)

กระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอนุมูลอิสระ ได้แก่ Fenton reaction $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$ $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ และ UV/TiO_2 โดยสามารถแยกประเภทตามการเกิดไฮดรอกซิลแรดิคัลได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่สร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลจากแสงยูวี (UV-based process) และกลุ่มที่สร้างไฮดรอกซิลแรดิคัลจากสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2 -based process)

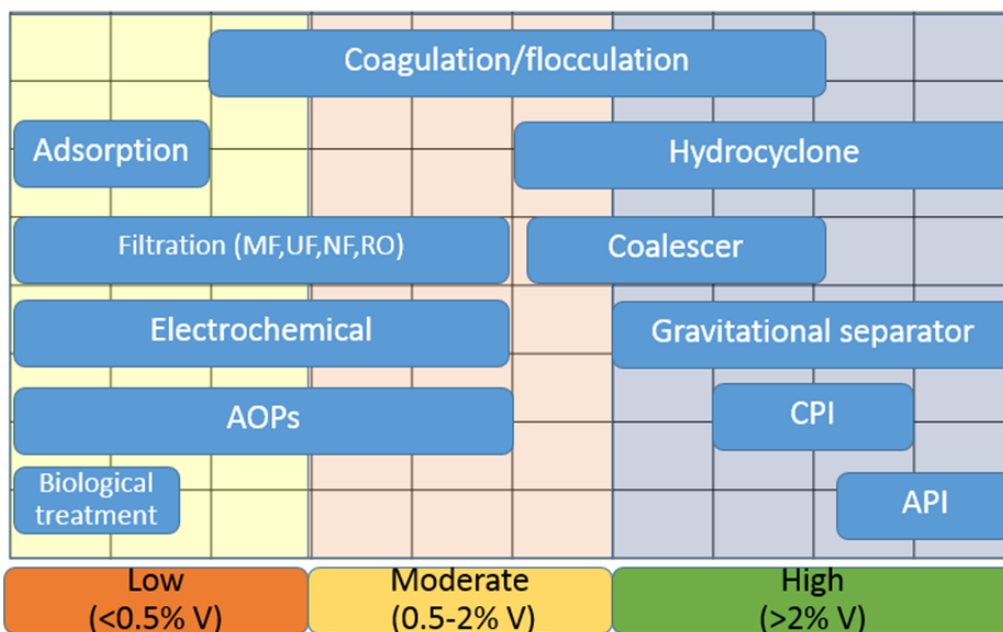
(2) กระบวนการออกซิไดซ์กับสารในน้ำเสีย (Free radical oxidation)

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิลขึ้น สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำเสียจะถูกออกซิไดซ์ ซึ่งทำให้มีโครงสร้างที่เล็กลง

3) กระบวนการบำบัดทางชีวภาพ

กระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันด้วยกระบวนการทางชีวภาพ มักจะนำมาใช้เป็นลำดับสุดท้ายของระบบบำบัดน้ำเสียโดยจะเป็นการบำบัดที่สามารถกำจัดน้ำมันออกจากน้ำได้โดยการย่อยสลายทางชีวภาพ เพื่อลดความเป็นพิษของน้ำมัน โดยในการบำบัดทางชีวภาพนั้นจะใช้ระยะเวลาาน จึงจำเป็นต้องมีการบำบัดขั้นต้นก่อน และมีข้อจำกัดคือปริมาณน้ำมันที่ปนเปื้อนในน้ำเสียต้องมีปริมาณน้อย (น้อยกว่า 0.5% โดยปริมาตร) เช่น การบำบัดด้วยกระบวนการแอนแอโรบิกฟลูอิดไดซ์เบดที่อุณหภูมิสูง (anaerobic thermophilic fluidized bed) (Peres et al., 2007)

จากกระบวนการในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีความเข้มข้นของน้ำมันแตกต่างกัน ดังที่ได้กล่าวมานั้นสามารถจำแนกกระบวนการการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2- 4 แผนผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตามระดับความเข้มข้นของน้ำมัน (พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล, 2556)

2.6 ไฮโดรไซโคลน

2.6.1 ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลน

ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกสารที่มีความหนาแน่น (หรือขนาดในกรณีของแข็ง) แตกต่างกัน โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่แบบหมุนให้เกิดแรงเหวี่ยงที่แตกต่างกันไปตามรูปร่างของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากแรงเหวี่ยงดังกล่าวเกิดจากความเร็วการไหลของของเหลวที่เข้าสู่ระบบ กระบวนการไฮโดรไซโคลนสามารถแยกสารออกจากกันได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ 1) การแยกของแข็ง-ของเหลว 2) การแยกของเหลว-ของเหลว และ 3) การแยกของแข็ง-ของแข็ง (ในกรณีที่มีขนาดและน้ำหนักแตกต่างกัน)

หลักการที่มีความสำคัญต่อการออกแบบไฮโดรไซโคลนคือ กฎของสโตค (Stoke's law) เป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการหาความเร็วในการแยกของอนุภาค สำหรับการออกแบบอุปกรณ์การแยกต่างๆ เช่น ถังตกตะกอน กฎของสโตคมีสมมติฐานว่าอนุภาคที่แขวนลอยมีรูปร่างเป็นทรงกลม และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา เช่น ถังตกตะกอน ความเร่งโน้มถ่วงของโลกจะทำให้อนุภาคตกตะกอนลง ซึ่งการเคลื่อนที่ลงของอนุภาคจะมีแรงต้านในทิศทางตรงกันข้ามกับการเคลื่อนที่ซึ่ง

เรียกว่าแรงลาก (Drag force) และแรงต้านจากความหนืดของของเหลว (Viscosity) สำหรับแรงโน้มถ่วงที่กระทำต่ออนุภาคนั้น สามารถหาได้จากความหนาแน่นของอนุภาค หากมีความหนาแน่นมากจะส่งผลให้แรงกระทำต่ออนุภาคมากตามไปด้วย ความเร็วในการแยกของอนุภาคจะบ่งบอกถึงความเป็นไปได้ในการแยกอนุภาคแขวนลอยออกจากน้ำโดยกฎของสโตคสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2-2)

$$v_p = \frac{\Delta\rho g d_p^2}{18\mu} \quad (2-2)$$

เมื่อ v_p = ความเร็วการตกตะกอน (เมตร/วินาที)

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81เมตรต่อวินาที²)

$\Delta\rho$ = ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)

d_p = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (เมตร)

μ = ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (นิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร)

จากสมการจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค มีต่างๆดังนี้

- 1) ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง โดยหากเพิ่มความเร่งของอนุภาคให้สูงกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ก็จะทำให้ความเร็วในการแยกของอนุภาคสูงขึ้น
- 2) ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นระหว่างเฟสกระจาย (ρ_p) เช่น อนุภาคของแข็ง และเฟสต่อเนื่อง (ρ_w) เช่น น้ำ หรือก็คือ $\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$ ซึ่งของผสมที่มีความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นสูงกว่าก็จะแยกออกจากกันได้ง่ายยิ่งขึ้นในทางกลับกัน หากเฟสทั้งสองมีความหนาแน่นใกล้เคียงกันมากหรือไม่แตกต่างกันเลยก็ไม่สามารถแยกออกได้ด้วยการแยกทางกายภาพ
- 3) ความหนืดของของไหล (μ) จะส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค (v_p) โดยหากค่าความหนืดของของไหลสูง จะส่งผลให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ ในทางตรงกันข้าม

หากความหนืดของของไหลมีค่าต่ำ จะส่งผลให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง แนวทางหนึ่งที่ประยุกต์ใช้การเปลี่ยนแปลงความหนืดเพื่อการแยกอนุภาค คือ การเพิ่มอุณหภูมิ ให้ความหนืดของเฟสต่อเนื่องทำให้มีความหนืดต่ำลง และเพิ่มความเร็วในการแยกของอนุภาค

- 4) ขนาดของอนุภาคของแข็ง (d_p) เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ตัวแปรนี้อยู่ในรูปยกกำลังสอง แสดงให้เห็นว่าถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ จะส่งผลให้ความเร็วในการแยก (v_p) เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นหากสามารถเพิ่มขนาดของอนุภาคของแข็งได้ จะส่งผลให้การแยกเกิดขึ้นได้ง่ายยิ่งขึ้นมาก

จากหลักการ 4 ข้างต้นจะเห็นว่า อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนจะอาศัยหลักการเพิ่มความเร่งของอนุภาคด้วยการไหลในแนวสัมผัสกับเส้นรอบวง ทำให้อนุภาคเกิดความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone) ของไหลที่สัมพันธ์กับความเร็วการไหลของน้ำในแนวเส้นสัมผัสเส้นรอบวง ดังสมการที่ (2-3)

$$\zeta = \frac{v_y^2}{gR} \quad (2-3)$$

เมื่อ ζ = ความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลอน

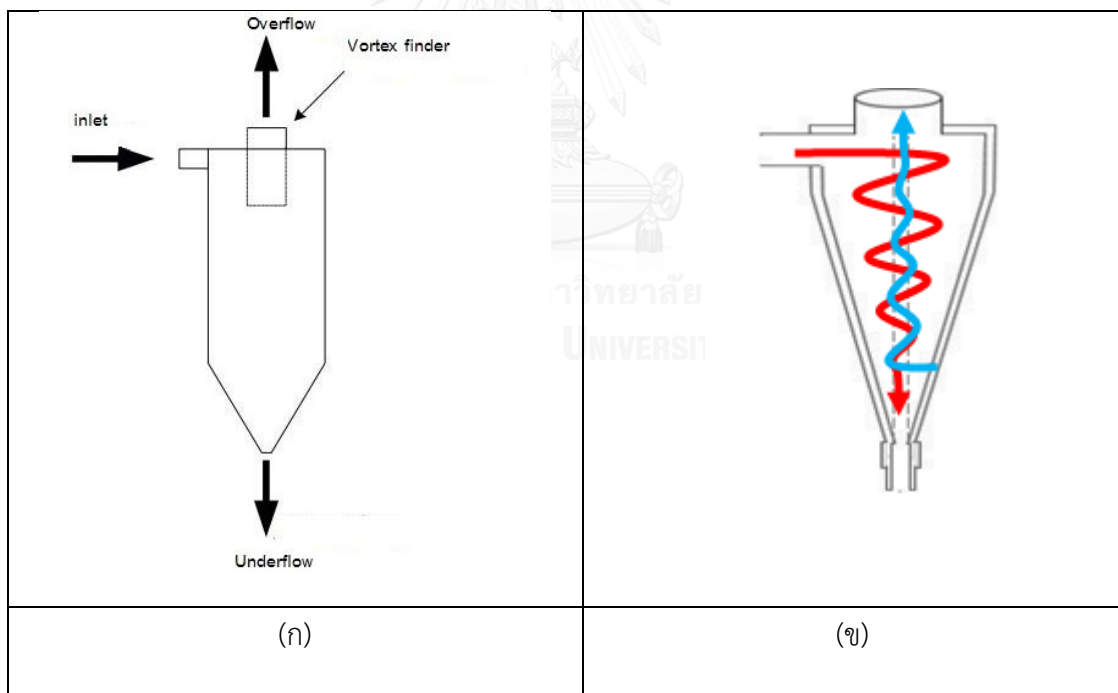
v_y = ความเร็วสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน

R = รัศมีของไฮโดรไซโคลอน (บริเวณที่เป็นทรงกระบอก)

อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนโดยทั่วไปมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 10 มิลลิเมตรถึง 2.5 เมตร ขนาดของอนุภาคที่สามารถแยกได้อยู่ในช่วง 2 - 250 ไมโครเมตร และอัตราการไหลที่ให้อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 7200 ลูกบาศก์เมตร ค่าความดันลด (Pressure drop) ระหว่างช่องทางจ่ายน้ำเข้ากับช่องทางน้ำไหลออกในสภาพการทำงานจริงจะอยู่ในช่วง 0.5 - 4 บาร์ ซึ่งในการทำงานของไฮโดรไซโคลอนนั้น จะไม่มีส่วนใดส่วนหนึ่งของไฮโดรไซโคลอนเคลื่อนไหว แต่จะเป็นการเคลื่อนที่ของของผสมที่เข้าสู่ระบบ

การแยกของผสมด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนจะมีการไหลเกิดขึ้นทั้งหมด 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2-5 ได้แก่

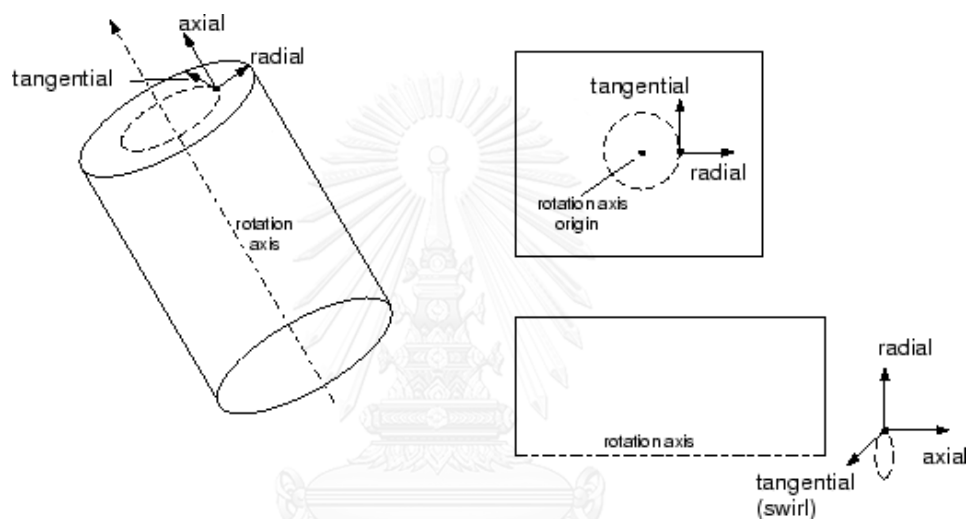
- 1) ของผสมที่จ่ายเข้าไป (Feed in) จะอยู่ทางด้านข้างของไฮโดรไซโคลนเพื่อให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสสัรบวงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกตัวออกมาใกล้ผนังของไฮโดรไซโคลน และหลุดออกไปที่ทางน้ำออกด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลยังทางออกด้านบน
- 2) ทางออกด้านบน (Overflow) เป็นทางออกของน้ำหรือของเหลวที่มีความหนาแน่นต่ำหรืออนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กซึ่งจะออกมาทางทางออกด้านบน (Vortex finder)
- 3) ทางออกด้านล่าง (Underflow) เป็นทางออกของน้ำหรือของเหลวที่มีความหนาแน่นสูง หรืออนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่



รูปที่ 2- 5 (ก) เส้นทางการไหลเข้าและออกและ (ข) รูปแบบการไหลภายในของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

2.6.2 แนวทางการออกแบบกระบวนการไฮโดรไซโคลน

ตัวแปรสำคัญในการออกแบบกระบวนการไฮโดรไซโคลน คือ ค่าความเร็วการไหลในทิศทางต่างๆ ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน (Velocity in hydrocyclone) เนื่องจากจะต้องออกแบบให้ความเร็วการไหลอยู่ในช่วงที่เหมาะสม โดยความเร็วการไหลในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2-6 ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2- 6 ทิศทางการไหลของความเร็ว 3 ชนิด ในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

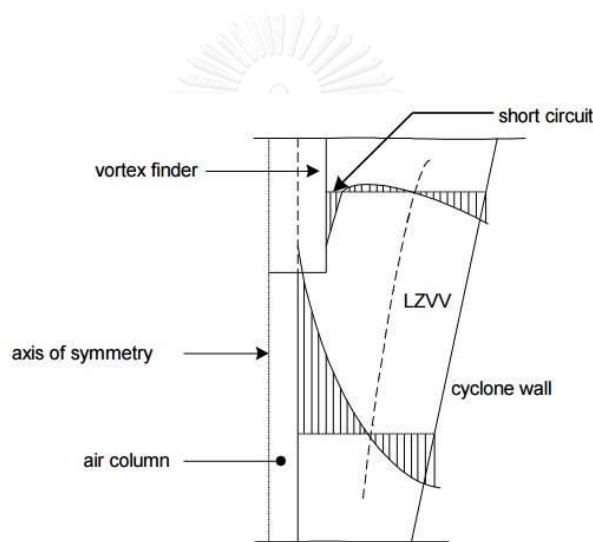
1) ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน (Tangential velocity)

ความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V) คือ ความเร็วเชิงเส้นของของไหลที่เข้าสู่อุปกรณ์บริเวณทางเข้า มีทิศทางสัมผัสกับผิวรอบของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ค่าความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-4)

$$V = 0.676 \left[\frac{Q/2}{\pi D_i^2 / 4} \right] \left[\frac{D_n}{R} \right]^{0.65} \quad (2-4)$$

2) ความเร็วในแนวแกน (Axial velocity)

ความเร็วในแนวแกน (W) คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง ดังแสดงในรูปที่ 2-7 การไหลในส่วนที่หมุนวนด้านนอก (Outer vortex) ที่ลดลง และการไหลหมุนวนภายใน (Inner vortex) ที่เพิ่มขึ้น ทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วในแนวแกนกับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity) หรือ LZV ตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่ระหว่างการไหลแบบหมุนวนภายนอกและการไหลแบบหมุนวนภายใน และมีบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจร (Short-circuit flow) ที่บริเวณด้านบนของไซโคลนตรงขอบด้านนอกของช่องท่อออกด้านบน (Vortex finder) ซึ่งจะเกิดขึ้นเป็นปกติภายในไฮโดรไซโคลน ค่าความเร็วในแนวแกนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2-5)

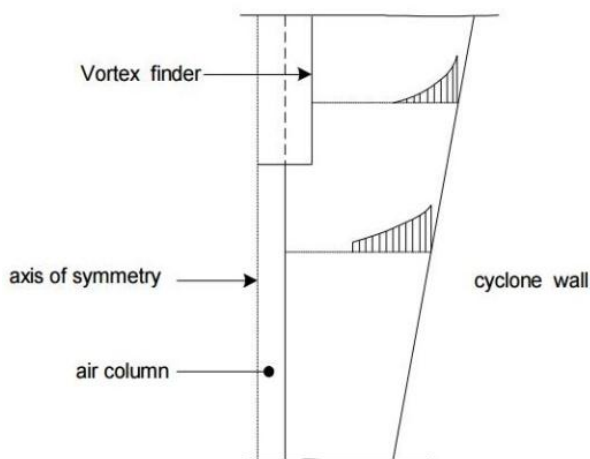


รูปที่ 2- 7 แสดงการกระจายความเร็วในแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky L, 2000)

$$\frac{W}{W_z} = -3.33 + 12 \frac{R}{R_z} - 8.63 \left(\frac{R}{R_z} \right)^2 + 1.19 \left(\frac{R}{R_z} \right)^3 \quad (2-5)$$

3) ความเร็วในแนวรัศมี (Radial velocity)

ความเร็วในแนวรัศมี (U) มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลนดังรูปที่ 2-8 เป็นความเร็วการไหลภายในไฮโดรไซโคลนที่มีค่าความเร็วน้อยที่สุดจากความเร็วทั้งหมดซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ (2-6) ความเร็วในแนวรัศมีจะมีค่ามากที่สุดบริเวณเหนือขอบของ Vortex finder ใกล้ผนังของไซโคลน และสัมพันธ์กับความเร็วของของไหลที่เข้าสู่ระบบ (v)



รูปที่ 2- 8 การกระจายความเร็วแนวรัศมีในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky L, 2000)

$$U = \frac{\Delta p d^2}{18\mu} \times \frac{v^2}{R} \quad (2-6)$$

ค่าความเร็วทั้ง 3 ชนิดนี้จะถูกนำไปใช้ร่วมกับค่าสัดส่วนไซโคลนมาตรฐาน (Standard cyclone proportions) เพื่อออกแบบอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน โดยการนำค่าความเร็วมาออกแบบขนาดทางเข้าของไฮโดรไซโคลน

2.6.3 ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ปัจจุบันไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบแยกของแข็ง-ของเหลว มีที่นิยมใช้กัน 2 แบบ คือ ไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบโดย Bradley และ Rietema หากไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 แบบ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากัน พบว่าไฮโดรไซโคลนของ Bradley จะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงกว่าในแง่ขนาดตัด ส่วนไฮโดรไซโคลนของ Rietema จะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงกว่าในแง่ของมวลของแข็งที่ถูกแยกออกมา ซึ่งสัดส่วนของไฮโดรไซโคลน และตารางการเปรียบเทียบการทำงานของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 แบบ แสดงได้ดังตารางที่ 2-5 และตารางที่ 2-6 ตามลำดับ (Castilho และ Medronho R.A. , 2000)

ตารางที่ 2- 5 สัดส่วนของไฮโดรไซโคลนแบบ Bradeley และ Rietema

Cyclone Type	D_i/D_c	D_0/D_c	D_u/D_c	L/D_c	H/D_c	มุมของส่วนกรวย (องศา)
Bradley	0.133	0.2	0.07	0.33	6.85	9
Rietema	0.28	0.34	0.2	0.4	5	20

โดย

D_c = เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน

D_i = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้าไฮโดรไซโคลน

D_0 = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน

D_u = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่างไฮโดรไซโคลน

H = ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน

L = ความยาวของ Vortex finder

ตารางที่ 2- 6 เปรียบเทียบการทำงานของไฮโดรไซโคลนแบบ Bradley และ Rietema

พารามิเตอร์	Hydrocyclone Type	
	Bradley	Rietema
เส้นผ่านศูนย์กลาง	เท่ากัน	เท่ากัน
ความดันลด	เท่ากัน	เท่ากัน
ความสามารถในการรับอัตราการไหล	น้อยกว่า	มากกว่า
ขนาดตัด(d_{50})	เล็กกว่า	ใหญ่กว่า

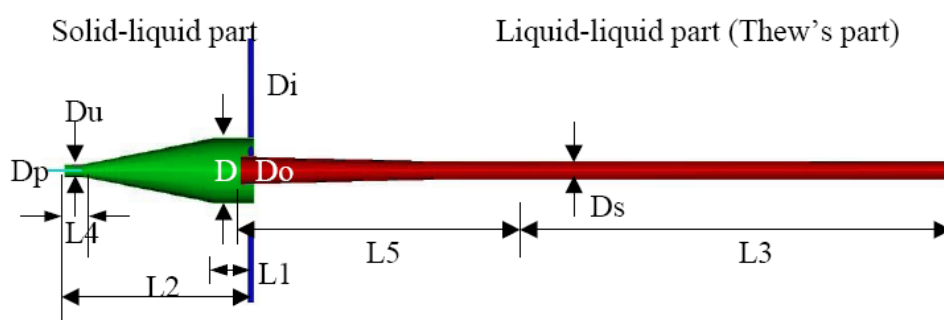
ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้เลือกใช้ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบแยกของแข็ง-ของเหลวมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร โดยใช้สัดส่วนในการออกแบบ ของ Bradley เนื่องจากในงานวิจัยชิ้นนี้เราสนใจในเรื่องของคุณภาพน้ำขาออกมากกว่า ปริมาณน้ำที่บำบัดได้ โดยสามารถดูได้จากตารางที่ 2-6 จะเห็นได้ว่าไฮโดรไซโคลน ของ Bradley สามารถรับขนาดตัด (d_{50}) ได้เล็กกว่าของ Rietema จึงทำให้น้ำขาออกมีคุณภาพมากกว่า

2.6.4 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

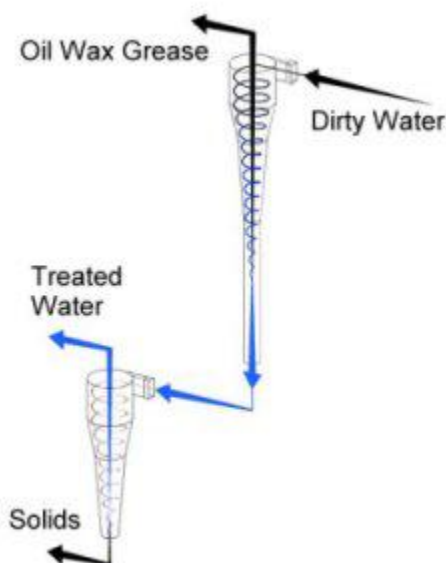
เนื่องจากข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ไม่สามารถแยกอนุภาคที่เป็นของแข็งของเหลว และ น้ำมัน ออกจากกันได้ในระบบการเดียว ในอดีตจึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่มีหน้าที่แยกระหว่างของแข็งและของเหลว และไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่มีหน้าที่แยกระหว่างของเหลวและน้ำมันมาต่อเข้าด้วยกันเพื่อใช้แยกอนุภาคทั้ง 3 ดังกล่าว ซึ่งการทำงานในลักษณะนี้นอกจากจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานและเวลาแล้ว ยังส่งผลให้สิ้นเปลืองพื้นที่ติดตั้งอีกด้วย ในเวลาต่อมาได้มีการนำเสนอไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่สามารถแยกอนุภาคที่เป็นของแข็งของเหลว และ น้ำมัน ออกจากกันได้ในระบบการเดียว โดยทฤษฎีการออกแบบที่ได้รับการยอมรับและได้รับความนิยมในการนำมาใช้เป็นพื้นฐานสำหรับงานวิจัยต่างๆในภายหลัง ได้แก่ทฤษฎีของ

Aurette และ Ma (Aurette Y. และ Ma F., 1994) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำทฤษฎีของ Aurette และ Ma มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ สำหรับรายละเอียดของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส และ ทฤษฎีการออกแบบดังกล่าวมีดังนี้

สำหรับไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟสของ Aurette และ Ma นั้นถูกพัฒนาขึ้นมาจากการนำไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟสที่ทำหน้าที่แยกของเหลวออกจากของเหลวซึ่งถูกคิดค้นโดย Thew (Thew M.T., Colman D.A. และ Comey, 1980) มารวมเข้าด้วยกันกับไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ทำหน้าที่แยกของแข็งออกจากของเหลวซึ่งถูกคิดค้นโดย (Rietema K., 1960) ในไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส นี้กระแสน้ำวน (Vortex) ที่ถูกสร้างขึ้นจากน้ำที่ไหลเข้า (Inlet flow) ในส่วน Rietema (ส่วนที่ใช้แยกของแข็งและของเหลว) จะถูกใช้เป็นแรงขับเคลื่อนอนุภาคไปยังส่วน Thew (ส่วนที่ใช้แยกของเหลวและของเหลว) รูปที่ 2-9 แสดงรูปทรงและสัดส่วนโดยรวมของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ดังกล่าว โดยหากสังเกตรูปที่ 2-10 จะพบว่าไฮโดรไซโคลอนชนิดนี้จะไม่มีท่อเชื่อมระหว่างไฮโดรไซโคลอนทั้ง 2 ส่วน เข้าด้วยกัน (Inter-connection pipe) ซึ่งแตกต่างจากไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ระบบ 2 ไฮโดรไซโคลอนโดยทั่วไป (2-cyclone system) ดังแสดงในรูปที่ 2-10 ซึ่งตามทฤษฎีแล้วนั้นการไม่มีท่อเชื่อมระหว่างไฮโดรไซโคลอนทั้ง 2 ส่วน จะส่งผลให้การสูญเสียพลังงานภายในระบบลดลง ดังนั้นประสิทธิภาพโดยรวมของไฮโดรไซโคลอนจึงมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นรวมทั้งยังเป็นการประหยัดพื้นที่ติดตั้งอีกด้วย

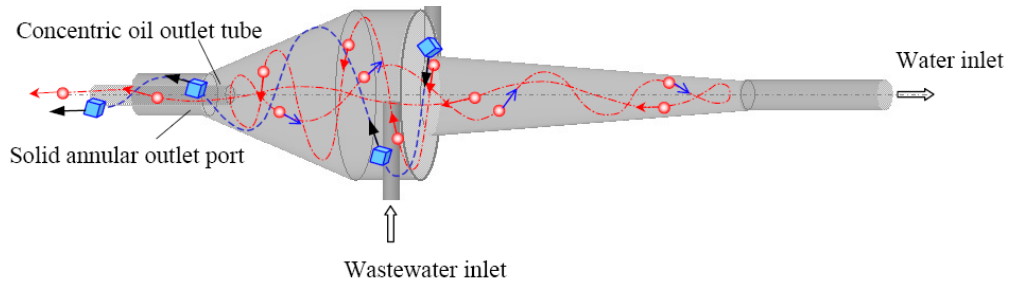


รูปที่ 2- 9 ไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส (Aurette Y. และ Ma F., 1994)

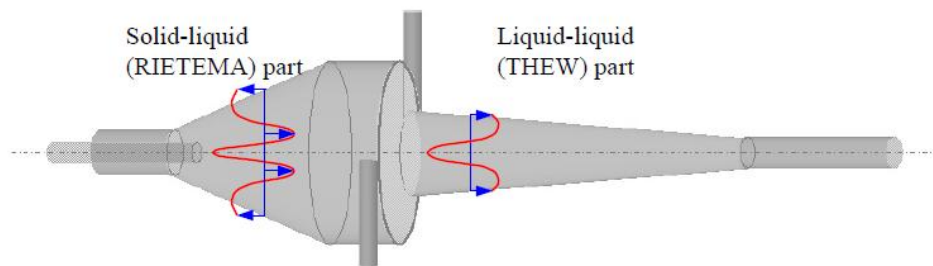


รูปที่ 2- 10 ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ระบบ 2 ไซโคลน (Rietema K., 1960)

สำหรับหลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้เริ่มต้นจากการที่น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะถูกฉีดเข้าไปในตัวไฮโดรไซโคลนผ่านทางเข้าน้ำ (Wastewater inlet) ทั้ง 2 ด้าน หลังจากนั้นของแข็งในน้ำเสียปนเปื้อนจะถูกแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal force) เหวี่ยงให้ออกไปชิดกับผนังของไฮโดรไซโคลน และสุดท้ายก็จะถูกขับออกจากไฮโดรไซโคลนผ่านทางช่องทางออกของแข็ง (Solid annular outlet port) ที่อยู่ทางด้านปลายของส่วน Rietema สำหรับน้ำมันจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปตามแนวแกนของตัวไซโคลนจากส่วน Rietema ไปยังส่วน Thew จากนั้นน้ำมันจะจับตัวกันจนมีขนาดใหญ่ และเกิดเป็นแกนน้ำมัน (Oil core) โดยที่แกนน้ำมันนี้จะหมุนวนตามแนวแกนย้อนกลับไปยังส่วน Rietima ซ้ำอีกครั้ง และสุดท้ายจะถูกขับออกจากไฮโดรไซโคลนผ่านทางช่องทางออกของน้ำมันที่มีศูนย์กลางซ้อนทับกับช่องทางออกของแข็ง (Concentric oil outlet tube) รูปที่ 2-11 แสดงให้เห็นเส้นทางการไหลของน้ำมัน และของแข็งแขวนลอยตั้งแต่ช่วงที่ถูกฉีดเข้าถึงช่วงที่ถูกขับออก โดยทั่วไปหลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้ ยังคงคล้ายคลึงกับไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส อย่างไรก็ตาม ผลจากแบบจำลองของ Aurelle และ Ma แสดงให้เห็นว่า ความเร็วแนวตั้งในส่วนของ Rietima เปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยซึ่งเป็นผลมาจากแกนน้ำมันที่อยู่จุดกึ่งกลาง (Central oil core) ดังปรากฏในรูปที่ 2-12



รูปที่ 2- 11 ทิศทางการไหลของของแข็ง และน้ำมันภายในไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส
(Rietema K., 1960)



รูปที่ 2- 12 ลักษณะทั่วไปของความเร็วแวนดิงภายในไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส
(Rietema K., 1960)

2.6.4.1 แบบจำลองสำหรับส่วนที่ใช้แยกของเหลวและของเหลว

Aurelle และ Ma ระบุว่ารูปแบบการเคลื่อนที่ และการก่อตัวของแกนน้ำมันภายในไฮโดรไซโคลนส่วนที่ใช้แยกของเหลวและของเหลวนั้นมีความคล้ายคลึงกับไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ถูกคิดค้นขึ้นโดย Thew (Thew M.T., Colman D.A. และ Comey, 1980) แต่ไม่ได้มีการนำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เอาไว้อย่างเป็นทางการ อย่างไรก็ตามจากรูปแบบการเคลื่อนที่ที่เหมือนกับไฮโดรไซโคลนของ Thew ก็อาจอนุมานได้ว่าแรงขับเคลื่อน (Driving force) ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส นี้มีความคล้ายคลึงกับไฮโดรไซโคลนของ Thew ดังนั้นการวิเคราะห์การเคลื่อนที่

ของไฮโดรไซโคลนของ Thew ที่ทำโดย Aurelle และ Ma ก็สามารณนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส นี้ได้เช่นกัน

จากสมมุติฐานที่ว่าทั้งไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มีแรงขับเคลื่อนที่เหมือนกัน ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความเร็วในช่องทางเข้าของตัวไฮโดรไซโคลนเองสามารถสรุปได้เป็นสมการดังนี้

$$\alpha_{3\phi} \times V_{i(3\phi)} = \alpha_{\text{Thew}} \times V_{i(\text{Thew})} \quad (2-7)$$

$$\alpha_{3\phi} \times \left(\frac{4Q}{\pi(D_{i(3\phi)})^2} \right) = 0.5 \times \left(\frac{4Q}{\pi(D_{i(\text{Thew})})^2} \right) \quad (2-8)$$

$$\alpha_{3\phi} \times \left(\frac{4Q}{\pi\left(0.25\left(\frac{ND}{0.43}\right)^2\right)} \right) = 0.5 \times \left(\frac{4Q}{\pi\left(0.25\left(\frac{ND}{0.5}\right)^2\right)} \right) \quad (2-9)$$

$$\alpha_{3\phi} = 0.5 \times \left(\frac{0.5}{0.43} \right)^2 = 0.675 \quad (2-10)$$

เมื่อ ND = ค่า D_0 ในรูปที่ 2-9
 α = สัดส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน (Tangential velocity) กับ ความเร็วรับเข้า (Inlet velocity)

ตัวห้อย “3 ϕ ” และ “THEW” บ่งบอกถึงตัวแปลที่เป็นของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส และไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ของ Thew ตามลำดับ

แบบจำลองนี้ได้รับการยืนยันด้วยข้อมูลที่ได้จากการทดลองของ Aurelle และ Ma แล้วว่าสามารถใช้งานได้จริง ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองนี้สามารถใช้นำมาประสิทธิภาพการกำจัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ได้แม่นยำที่ระดับ $\pm 20\%$

2.6.4.2 แบบจำลองสำหรับส่วนที่ใช้แยกของแข็งและของเหลว

Aurette และ Ma ไม่ได้เสนอแบบจำลองสำหรับไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ในส่วนที่ใช้แยกของแข็งและของเหลวไว้เช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามจากสัดส่วนเรขาคณิตของส่วนที่ใช้แยกของแข็งและของเหลวนี้มีความคล้ายคลึงกับไฮโดรไซโคลอนที่ถูกคิดค้นขึ้นโดย Reitema (Rietema K., 1960) ดังนั้นการตั้งสมมติฐานให้แรงขับเคลื่อนของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ในส่วนที่ใช้แยกของแข็งและของเหลวนี้มีค่าเท่ากับกับไฮโดรไซโคลอนของ Reitema ก็สมารถกระทำได้ เป็นผลให้แบบจำลองที่แนะนำให้เสนอโดย Reitema (1960) ก็สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส นี้ได้เช่นกัน

Reitima แสดงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอน ในรูปแบบของ $d_{50\%}$ และ ค่าตัวเลข Cy_{50} ดังแสดงในสมการที่ (2-11)

$$\frac{d_{50}^2(\rho_{ss}-\rho_c)(L_2-L_4)\times\Delta\rho}{\eta_c\rho_cQ} = Cy_{50} \quad (2-11)$$

$$\eta_{d,ss} = 1 - e^{-\left(\frac{d}{d_{50\%}} - 0.115\right)^3} \quad (2-12)$$

Reitima แนะนำให้ใช้ค่า CY_{50} ที่ประมาณ 3.5 ซึ่ง Aurette และ Ma ก็ได้นำค่าดังกล่าวมาใช้ในการออกแบบไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส นี้เช่นกัน ดังนั้นในการออกแบบจึงควรใช้ค่า $CY_{50} = 3.5$ เพื่อคำนวณประสิทธิภาพของส่วนที่ใช้แยกของแข็งและของเหลวตามที่ Reitima ได้แนะนำไว้ ซึ่งสัดส่วนของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ที่ Aurette และ Ma ได้ออกแบบไว้ แสดงได้ดังตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2- 7 สัดส่วนไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ Aurelle และ Ma

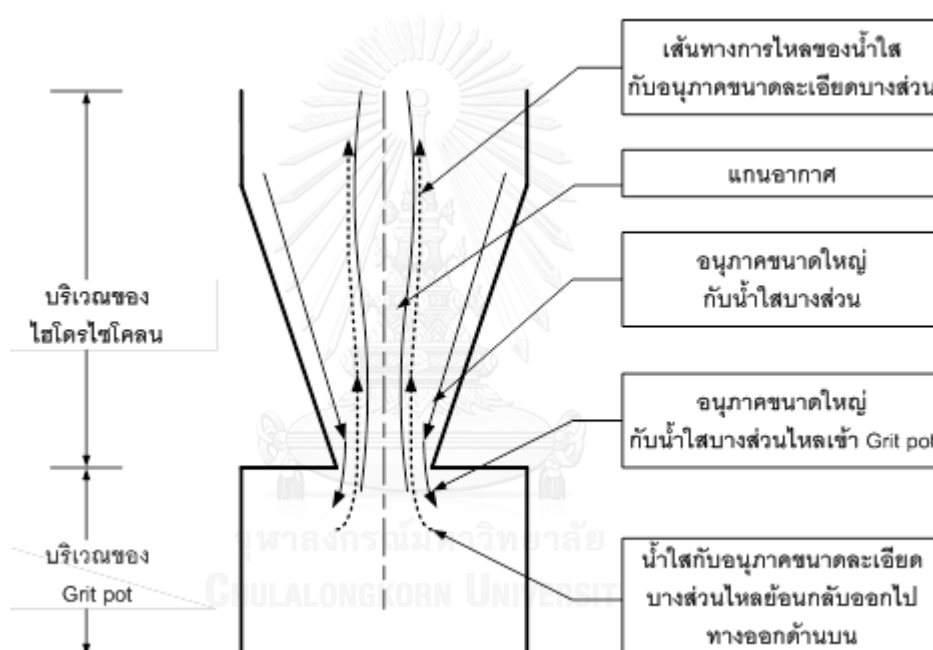
ตัวแปร	สัดส่วนไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส
D_i/D	0.25
D_0/D	0.43
D_s/D	0.28
D_u/D	0.19
D_p/D	0.034
L_1/D	0.4
L_2/D	5
L_3/D	15
L_4/D	0.3
มุมของส่วนกรวยของไฮโดรไซโคลนชนิดแยก ของแข็ง-ของเหลว	12°
มุมของส่วนกรวยของไฮโดรไซโคลนชนิดแยก ของเหลว-ของเหลว	1.5°

2.6.5 ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot (Hydrocyclone equipped with Grit pot)

Grit pot เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็กที่ติดตั้งอยู่บริเวณทางออกด้านล่าง (Underflow) ของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน อนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนซึ่งไหลออกทางออกด้านล่างจะเข้าสู่ Grit pot และเกิดการตกตะกอนอยู่ภายใน เมื่ออนุภาคเกิดการสะสมจนถึงระดับสูงสุดที่ Grit pot จะรับได้ก็จะต้องถูกปล่อยออก (Drain off) แล้วนำไปบำบัดต่อไป อย่างไรก็ตาม หากอนุภาคของแข็งที่สะสมอยู่ใน Grit pot มีความเข้มข้นมาก จะขัดขวางอนุภาคใหม่ๆ ที่ไหลออกมาจากทางออกด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน จึงทำให้อนุภาคของแข็งเหล่านี้ไหลย้อนขึ้นไปยังทางออกด้านบน (Overflow) ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนลดต่ำลง ดังนั้น เวลาพักของตะกอนภายใน Grit pot จึงขึ้นอยู่กับเวลาที่ต้อง

ปล่อยตะกอนเข้มข้นของอนุภาคของแข็งออกไป ความเข้มข้นของอนุภาคที่จ่ายเข้า และลักษณะการตกตะกอนของอนุภาคของแข็ง รวมถึงตัวแปรทางกายภาพอื่นๆ (สนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์, 2552)

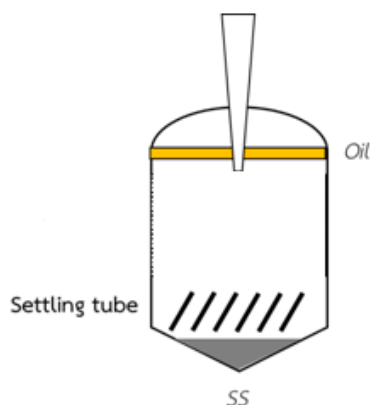
ทิศทางการไหลภายในอุปกรณ์ Grit pot สามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2-13 กล่าวคือ บริเวณส่วนบนของ Grit pot นั้นการไหลเข้า Grit pot จะเท่ากับการไหลย้อนจาก Grit pot เข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน โดยการไหลย้อนกลับจะไหลผ่านช่องแคบรอบแกนอากาศ ทำให้อนุภาคขนาดเล็กไหลย้อนกลับไปในไฮโดรไซโคลน และอนุภาคที่เหลืออยู่ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนอยู่ภายใน Grit pot



รูปที่ 2- 13 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot (สนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์, 2552)

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำ Grit pot มาติดตั้งที่ทางออกด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส โดย Grit pot ที่นำมาติดตั้งนั้นอาจจะทำการติดตั้งแผ่นช่วยตกตะกอน (Settling plate/tube) แสดงดังรูปที่ 2-14 เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอย ซึ่ง Grit pot จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์รองรับอนุภาคของแข็งที่ปนเปื้อนน้ำมันมากก็เก็บไว้ เพื่อที่จะให้น้ำมันที่ปนเปื้อนมากับอนุภาคของแข็ง ลอยขึ้นมาติดบนผิวน้ำ โดยคาดว่าวิธีการนี้จะสามารถทำให้กำจัดอนุภาคของแข็งที่แยกได้ ทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากไม่มีน้ำมันมาปนเปื้อน และนอกจากนั้นอาจจะมีน้ำมัน

บางส่วนที่ลอยขึ้นมาติดบนผิวน้ำ ไทลหมุนวนย้อนกลับขึ้นไปออก ทางออกด้านบนของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนอีกด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับไฮโดรไซโคลนอีกทางหนึ่ง



รูปที่ 2- 14 อุปกรณ์ Grit pot

2.6.6 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน (ฉัญจรณ์ สวัสดิวงษ์, 2553)

การแยกของไฮโดรไซโคลนนั้นไม่สามารถทำการแยกอนุภาคออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากในขั้นตอนการแยกนั้นอาจมีอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำหลุดติดออกไปกับน้ำใสที่ทางออกด้านบนและมีของเหลวหลุดออกไปพร้อมกับอนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงทางออกด้านล่าง ดังนั้นในการหาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน จึงต้องแบ่งการหาประสิทธิภาพออกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 เป็นการหาประสิทธิภาพในแง่ของการพิจารณาการแยกมวลของอนุภาคของแข็ง ซึ่งได้แก่ การหาประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) การหาประสิทธิภาพลด (Reduce efficiency) และการหาประสิทธิภาพลำดับชั้น (Grade efficiency) ส่วนแบบที่ 2 เป็นการหาประสิทธิภาพในแง่ของการพิจารณาขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลน หรือเรียกว่าขนาดตัด (Cut size)

2.6.6.1 การหาประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพรวม คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว ที่มีการพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาณอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow)

กับปริมาณของอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน (Inlet) โดยสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ (2-13)

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2-13)$$

โดยที่ $M_u = Q_u \cdot C_u$ (2-14)

$$M = Q_f \cdot C_f \quad (2-15)$$

เมื่อ $E_T =$ ประสิทธิภาพรวม

$M_u =$ มวลของแข็งที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านล่าง (มวลต่อเวลา)

$M =$ มวลของแข็งที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน (มวลต่อเวลา)

$Q_u =$ อัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (ปริมาตรต่อเวลา)

$Q_f =$ อัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน (ปริมาตรต่อเวลา)

$C_u =$ ความเข้มข้นของผสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)

$C_f =$ ความเข้มข้นของผสมที่เข้าไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของผสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow) เท่ากับความเข้มข้นของผสมที่จ่ายเข้าสู่อินเล็ต แสดงว่าไม่เกิดการแยกอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน เพียงแต่เกิดการแบ่งการไหล (Flow split) ออกเป็นสองทางเท่านั้น ดังนั้นประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลนควรมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$C_u = C_f \quad (2-16)$$

แทนสมการที่ (2-16) ลงไปที่สมการ (2-13)

จะได้ว่า $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$ (2-17)

เมื่อทำการแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Q_u) หากรด้วยอัตราการไหลเข้าสู่อินเล็ต (Q_f) พบว่ามีค่ามากกว่าศูนย์เสมอ ดังนั้นการหาประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน (E_T) จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการแสดงประสิทธิภาพจริงของไฮโดรไซโคลน จึงได้มีการนิยามประสิทธิภาพ

ของไฮโดรไซโคลนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ซึ่งเรียกว่า ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

2.6.6.2 การหาประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

ประสิทธิภาพลด คือ ประสิทธิภาพที่ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวของไฮโดรไซโคลน โดยมีการคำนึงถึงผลในการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วยเนื่องจากในการแยกของไฮโดรไซโคลนนั้นไม่ได้มีเพียงอนุภาคของแข็งไหลออกไปทางด้านล่าง (Underflow) อย่างเดียวตามจุดประสงค์ในการแยกแต่กลับมีน้ำใสไหลออกไปทางด้านล่างด้วย ดังนั้นจึงต้องมีการนำสัดส่วนของของเหลวที่ไหลออกทางด้านล่างมาคำนวณประสิทธิภาพด้วย โดยจะทำให้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) น้อยลงและสอดคล้องกับความเป็นจริง ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ในการบอกประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนมากกว่าประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

โดยประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แสดงได้ดังสมการ

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2-18)$$

เมื่อ E'_T = ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลน

E_T = ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน

R_f = อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ระหว่างอัตราการไหลที่ไหลออกทางด้านล่างและอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

ซึ่งอัตราส่วนการไหล (R_f) สามารถแสดงได้ดังสมการ

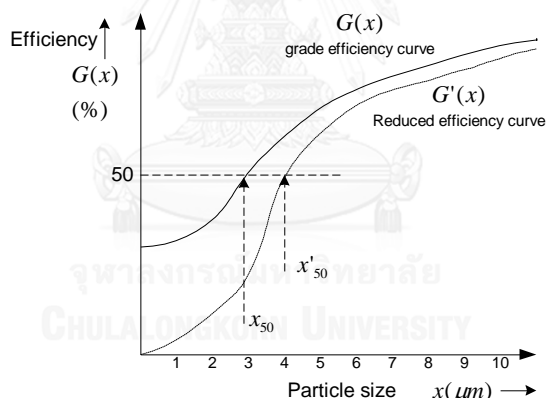
$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2-19)$$

ในกรณีที่ $C_u = C_f$ ดังที่กล่าวไปแล้วในสมการที่ (2-16) ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพเท่ากับศูนย์ นั่นคือ $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$
 แทนสมการ $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$ ลงในสมการที่ (2-18) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{E_T - E_T}{1 - E_T} = 0 \quad (2-20)$$

2.6.6.3 การหาประสิทธิภาพลำดับชั้น (Grade efficiency)

การหาประสิทธิภาพแบบลำดับชั้นนั้นจะหาจากขนาดของอนุภาคของของแข็ง ซึ่งจะแตกต่างจากการหาประสิทธิภาพรวม และประสิทธิภาพพลต เนื่องจากประสิทธิภาพระดับชั้นนั้นเป็นการนำค่าประสิทธิภาพของทุกขนาดอนุภาคของของแข็งมาแสดงเป็นเส้นกราฟ เรียกว่า เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) โดยทั่วไปมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S) ดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2- 15 กราฟเส้นโค้งประสิทธิภาพ และเส้นโค้งระดับชั้นที่ลดลง (Svarovsky L, 2000)

2.6.6.4 ขนาดตัด (Cut size)

ขนาดตัด คือ ขนาดของอนุภาคของแข็งที่ไฮโดรไซโคลอนที่สามารถแยกได้ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ขนาดตัดสามารถหาได้จากขนาดของอนุภาคของแข็งที่อยู่บนตำแหน่งของเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) เมื่อต้องการแยกอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กมาก ซึ่งอาจมีบางไฮโดรไซโคลอนที่ให้ขนาดตัดที่ร้อยละ 95 แต่โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้ขนาดตัดที่ 50

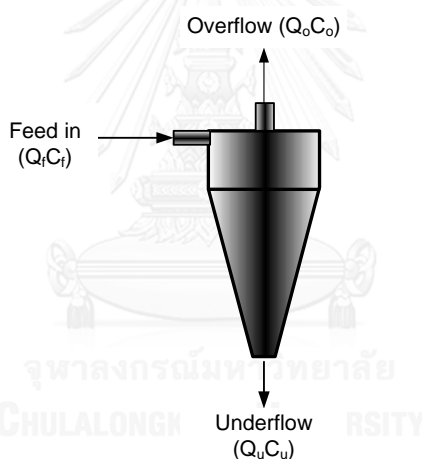
เปอร์เซ็นต์ หรือเรียกว่า Equiprobable size กล่าวคือ ขนาดของอนุภาคของแข็งที่มีโอกาส 50 เปอร์เซ็นต์ ที่จะถูกแยกโดยด้วยไฮโดรไซโคลน ซึ่งจะถูกแยกออกมาทางช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการหาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน 2 แบบ คือ แบบธรรมดา และแบบติดตั้ง Grit pot โดยในการหาประสิทธิภาพของแต่ละแบบแสดงได้ดังนี้

1) การหาประสิทธิภาพผลของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

การหาประสิทธิภาพผลของการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาจะใช้สมการสมดุลมวล (Mass balance) ในการคำนวณ

กล่าวคือ จากสมดุลมวลของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ดังแสดงตามรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 ทิศทางการไหลของไฮโดรไซโคลน (สนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์, 2552)

$$\text{จะได้} \quad Q_f C_f = Q_o C_o + Q_u C_u \quad (2-21)$$

จากสมการที่ (2-18) ประสิทธิภาพผล (Reduced total efficiency) $E_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$

เมื่อ $E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f}$ และ $R_f = \frac{Q_u}{Q_f}$

แทนค่าต่างๆลงในสมการที่ (2-18) จะได้

$$E_T' = \frac{Q_u(C_u - C_f)}{C_f(Q_f - Q_u)} \quad (2-22)$$

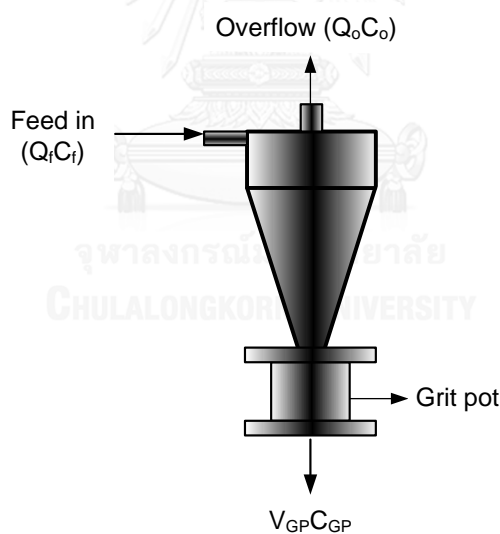
เมื่อ $Q_f - Q_u = Q_0$

ดังนั้น ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา แสดงได้ดังสมการ

$$E_T' = \frac{Q_u(C_u - C_f)}{Q_0 C_f} \times 100 \quad (2-23)$$

2) การหาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนแบบติดตั้ง Grit pot

การหาประสิทธิภาพของการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลอนแบบติดตั้ง Grit pot สามารถหาได้จากสมดุลมวล (Mass balance) เช่นเดียวกัน จากสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้ง Grit pot ดังรูปที่ 2-17 ได้ว่า



รูปที่ 2-17 ทิศทางการไหลของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้ง Grit pot (สนธิลักษณ์ สุขะสุนธ์, 2552)

$$Q_f C_f T_f = Q_o C_o T_o + V_{GP} C_{GP} \quad (2-24)$$

เมื่อ T = เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่างจาก Grit pot

V_{GP} = ปริมาตรของ Grit pot

C_{GP} = ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งใน Grit pot

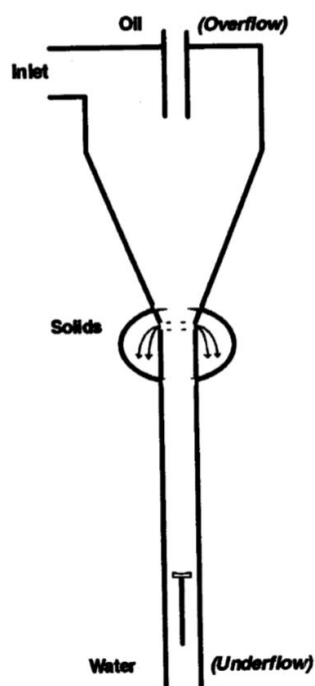
ดังนั้น ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบติดตั้ง Grit pot แสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{Q_f C_f T_f - Q_0 C_0 T}{Q_f C_f T_f} \times 100 \quad (2-25)$$

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นอกเหนือจากไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Aurelle และ Ma แล้วยังมีไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส รูปแบบอื่นๆ ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยนักวิจัยในอดีต ซึ่งถึงแม้ว่าไฮโดรไซโคลนเหล่านี้จะไม่ได้ได้รับความนิยมเท่ากับชนิดที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Aurelle และ Ma แต่ทว่าการศึกษาถึงทฤษฎีวิธีการทดลอง รูปทรงของไฮโดรไซโคลน รวมถึงผลที่ได้จากการทดลองของไฮโดรไซโคลนเหล่านี้ก็มีความจำเป็นที่จะต้องกระทำ เพื่อผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาจะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ และทดลองไฮโดรไซโคลนในงานวิจัยนี้ต่อไป

(Bednareki S. และ Lietewnik J., 1987) ได้พัฒนาไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ขึ้นเป็นครั้งแรกเพื่อใช้สำหรับแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ถูกปล่อยออกมาจากเรือเดินทะเล ในไฮโดรไซโคลนชนิดนี้น้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจะถูกฉีดเข้าไปในส่วนกระบอกก่อนที่จะไหลผ่านไปยังส่วนกรวยซึ่งเป็นส่วนที่กระบวนการแยก (Separation) เกิดขึ้น ระหว่างกระบวนการแยกของแข็งจะถูกขับออกทางด้านล่างของส่วนกรวยโดยมีภาระชนะทรงกลมรองรับอนุภาคของแข็งเหล่านั้นไว้ น้ำมันจะถูกขับออกด้านบนของส่วนกรวย และน้ำจะถูกขับออกไปทางด้านล่างสุดของส่วนไฮโดรไซโคลนดังรูปที่ 2-18

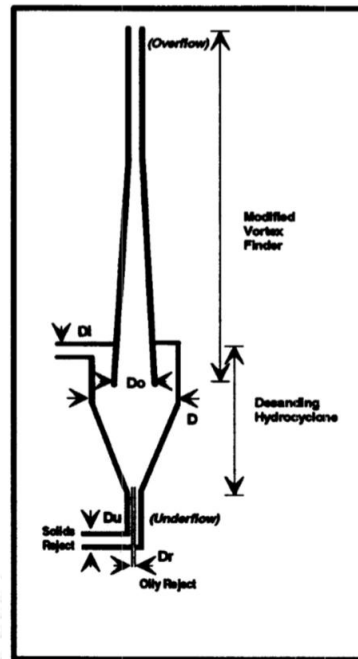


รูปที่ 2- 18 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ Bednaski and Listewnik
(Bednareki S. และ Lietewnik J., 1987)

ผลการทดลอง

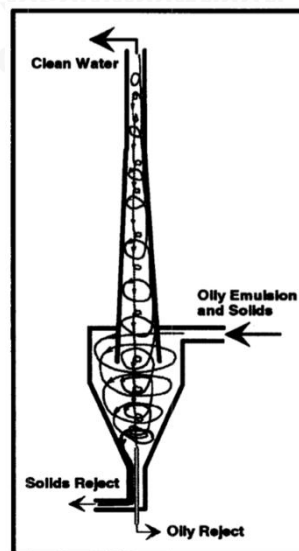
ประสิทธิภาพในการแยกน้ำออกจากน้ำมัน (Deoiling) ของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้อยู่ที่ประมาณ 80% ซึ่งถือว่าต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนชนิดอื่นๆที่ถูกพัฒนาขึ้นมาในภายหลัง โดยสาเหตุเกิดจากไฮโดรไซโคลนชนิดนี้ถูกออกแบบในลักษณะกรวยเดี่ยว (Single cone) จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแยกต่ำเมื่อใช้แยกอนุภาคและของเหลวที่แตกต่างกันมากกว่า 2 ชนิด จุดบกพร่องอีกจุดหนึ่งของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้คือ การชนะทรงกลมที่ใช้ดักจับอนุภาคของแข็งไม่สามารถดักจับอนุภาคของแข็งได้หมดส่งผลให้ของแข็งบางส่วนตกไปรวมกับน้ำที่ทางออกด้านล่าง

(Seureau J.J., Aurelle Y. และ Hoyack M.E. , 1994) ได้นำเสนอไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่ถูกออกแบบในลักษณะ 2 โคลน (Two cone) ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างไฮโดรไซโคลน 2 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับแยกน้ำมัน (Deoiling hydrocyclone) และ ไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับแยกอนุภาคของแข็ง (Desanding hydrocyclone) ตัวของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 2-19



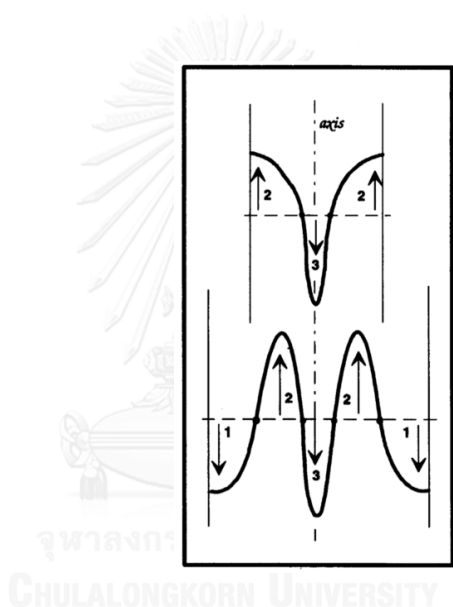
รูปที่ 2- 19 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ Seureau (1994)

การแยกของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้จะแตกต่างจากไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ (Bednaski และ Listewnik, 1988) โดยในไฮโดรไซโคลนชนิดนี้น้ำจะถูกขับออกด้านบนสุดของไฮโดรไซโคลน ในขณะที่อนุภาคของแข็งและน้ำมันจะถูกขับออกด้านล่างสุดของของไฮโดร รูปที่ 2-20 แสดงลักษณะการไหลของอนุภาคทั้ง 3 ดังกล่าว



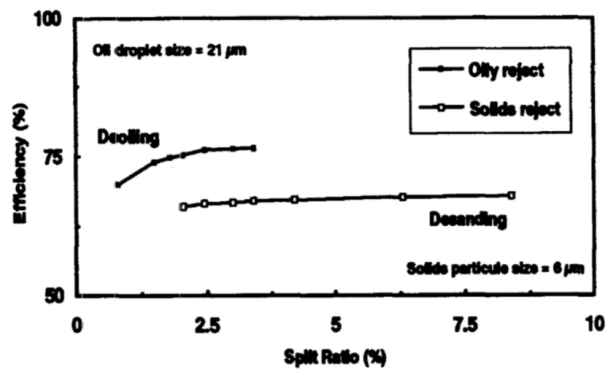
รูปที่ 2- 20 ลักษณะการไหลของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ Seureau (1994)

เพื่อให้เกิดความต่อเนื่องระหว่างกระแสน้ำวนด้านนอก (Outer vortex) ที่ใช้สำหรับแยกน้ำมันและกระแสน้ำวนด้านใน (inner vortex) ที่ใช้สำหรับแยกอนุภาคของแข็งปนเปื้อน ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ของกระแสน้ำวนทั้ง 2 จำเป็นที่จะต้องอยู่ในตำแหน่งเดียวกันดังรูปที่ 2-20 ซึ่งการที่จะทำให้เป็นเช่นนั้นได้นั้นจำเป็นต้องกำหนดสัดส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางของทางเข้า (Inlet) ของไฮโดรไซโคลอนส่วนที่ใช้แยกของแข็งปนเปื้อนให้เท่ากับ $\frac{D_o}{D} = 0.34$ สำหรับสัดส่วนดังกล่าวถูกนำเสนอโดย Rietema (1969) และสำหรับสัดส่วนที่สำคัญอื่นๆเช่น D_i มุมระหว่างไฮโดรไซโคลอนทั้ง 2 ฯลฯ ก็ถูกอ้างอิงมาจากหลักการของ Rietema เช่นกัน

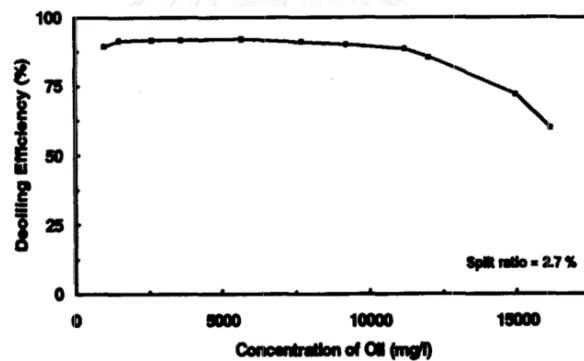


รูปที่ 2- 21 รูปแบบการไหลตามแนวแกน

จากผลการประเมินประสิทธิภาพในห้องทดลองระบุว่า ความสามารถในการแยกน้ำมันของไฮโดรไซโคลอนนั้นขึ้นอยู่กับสัดส่วนปริมาณสารที่ระบายทิ้งต่อปริมาณสารที่ฉีดเข้า (Split ratio) โดยสัดส่วนดังกล่าวมีความเหมาะสมที่สุดที่ 2.7% ภายใต้เงื่อนไขที่ว่าความเข้มข้นของน้ำมันในน้ำจะต้องไม่เกิน 10,000 ppm สังเกตได้จากรูปที่ 2-22 และ 2-23 ในทางกลับกันสัดส่วนปริมาณสารที่ระบายทิ้งต่อปริมาณสารที่ฉีดเข้ากลับมีผลไม่มากนักต่อความสามารถในการแยกอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอนสังเกตได้จากรูปที่ 2-21

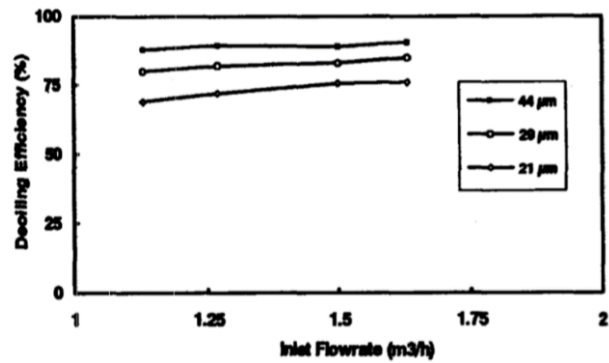


รูปที่ 2- 22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ฉีดเข้าไฮโดรไซโคลนและประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และอนุภาคของแข็ง

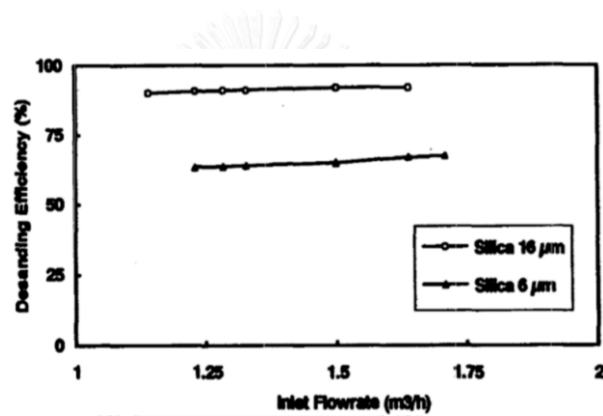


รูปที่ 2- 23 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของน้ำมันและประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน

ในส่วนของผลกระทบจากขนาดของหยดน้ำมัน และผลกระทบจากขนาดของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลนชนิดนี้นั้นแสดงผลที่ใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ทั่วไปโดยขนาดหยดน้ำมันที่มีความเหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 44 μm ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-24 ในขณะที่ขนาดของอนุภาคของแข็งที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ประมาณ 16 μm ดังที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2-25

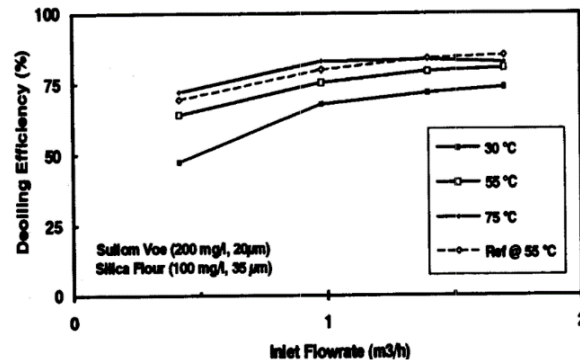


รูปที่ 2- 24 ผลกระทบของขนาดหยดน้ำมันที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยก

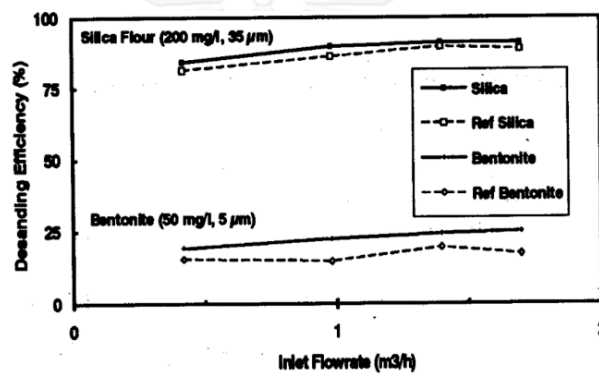


รูปที่ 2- 25 ผลกระทบของขนาดอนุภาคของแข็งที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยก

เนื่องจากข้อจำกัดด้านวัสดุที่ใช้ในการสร้างไฮโดรไซโคลน ทำให้ในการประเมินประสิทธิภาพครั้งแรกความดันของน้ำภายในไฮโดรไซโคลนถูกจำกัดไว้เพียง 9 บาร์ ดังนั้นในการทดลองครั้งที่ 2 ผู้วิจัยได้ใช้ไฮโดรไซโคลนที่สร้างจากวัสดุประเภทเหล็กกล้าคาร์บอน (Carbon steel) และได้กำหนดอัตราการไหลไว้ที่ 1.4 ลบ.ม./ชั่วโมง



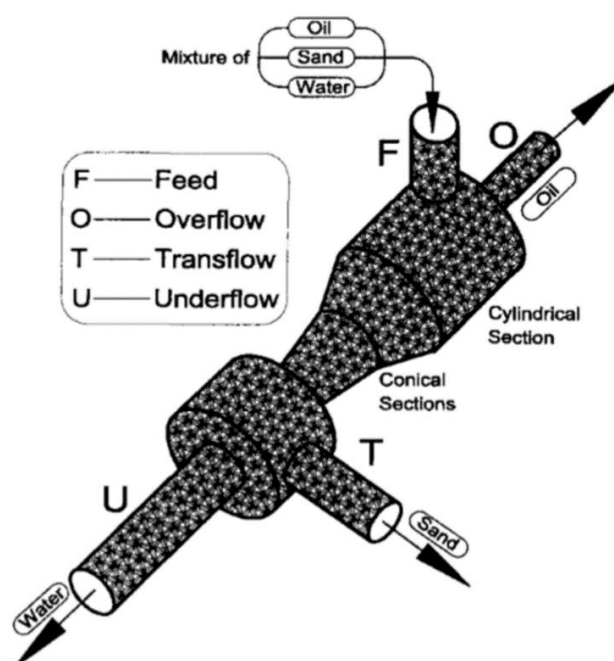
รูปที่ 2- 26 ผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน



รูปที่ 2- 27 ผลกระทบของชนิดของแข็งที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง

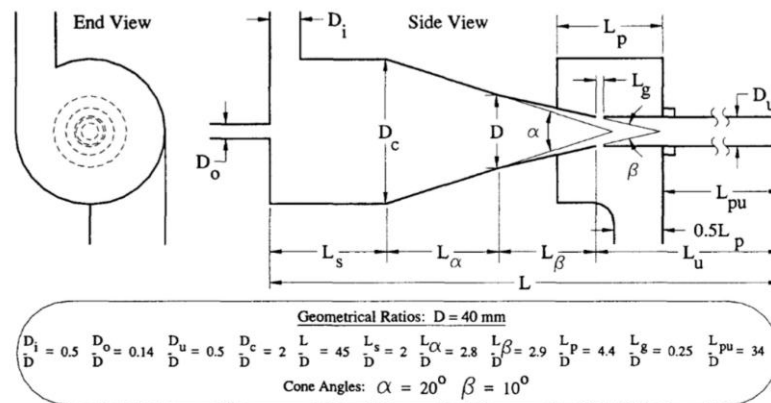
จากรูปที่ 2-26 แสดงให้เห็นว่ากระบวนการแยกน้ำมันมีประสิทธิภาพดีที่สุดในขณะที่อุณหภูมิอยู่ประมาณ 55 ถึง 75 องศาเซลเซียส และจากรูปที่ 2-27 ก็แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการแยกของแข็งในไฮโดรไซโคลอนชนิดนี้จะสูงกว่าเมื่อใช้แยกอนุภาคของแข็งชนิดซิลิกา (Silica) ผู้วิจัยยังระบุอีกว่าเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็ง และน้ำมันระหว่างไฮโดรไซโคลอนชนิดนี้กับเครื่องแยกอนุภาคที่ทันสมัยชนิดอื่นๆ (Others state of art equipment) พบว่าไฮโดรไซโคลอนชนิดนี้อยู่ในเกณฑ์ดีเทียบเท่ากับเครื่องแยกอนุภาคอื่นๆ

Changirwa ได้ศึกษาไฮโดรไซโคลน 3 เฟส ชนิด 2 โคลนที่เป็นการรวมกันระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับแยกน้ำมัน และไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับแยกอนุภาคของแข็ง ไฮโดรไซโคลนชนิดนี้มีลักษณะเฉพาะที่ตัวไฮโดรไซโคลนจะมีทางออกของแข็งอยู่ในแนวขวาง (Transverse aperture) ซึ่งแตกต่างจากไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่ถูกนำเสนอมาในอดีต รูปที่ 2-28 แสดงถึงลักษณะโดยรวมของไฮโดรไซโคลนชนิดนี้ (Changirwa และคณะ, 1999)



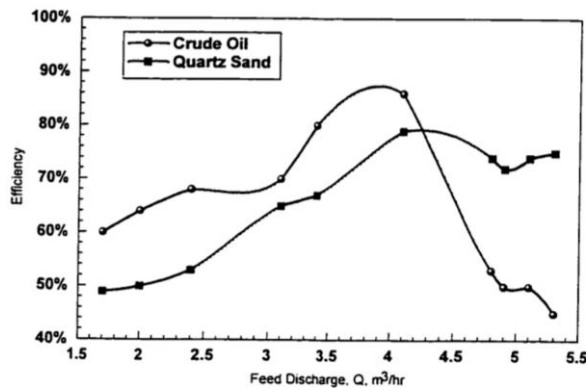
รูปที่ 2- 28 ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ของ (Changirwa และคณะ, 1999)

เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพ และข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลนผู้วิจัยได้ใช้การจำลอง (Simulation) การทำงานของไฮโดรไซโคลนด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ร่วมด้วยกับการทดลองกับไฮโดรไซโคลนตัวจริง โดยได้กำหนดตัวแปรต่างๆดังนี้ ความหนาแน่นของน้ำ (P_w) = 1000 กก./ลบ.ม. ความหนาแน่นของน้ำมัน (P_o) = 830 กก./ลบ.ม. ความหนาแน่นของทราย (P_s) = 2650 กก./ลบ.ม. ความหนืด (μ) = 10^{-3} Nsm^{-2} ความเร็วส่วนที่รับเข้า (v_i) = 8 เมตร/วินาที ขนาดของหยดน้ำ/อนุภาค (d_s) = 10-150 μm ในส่วนของตัวแปรด้านรูปทรงของไฮโดรไซโคลนแสดงอยู่ในรูปที่ 2-29



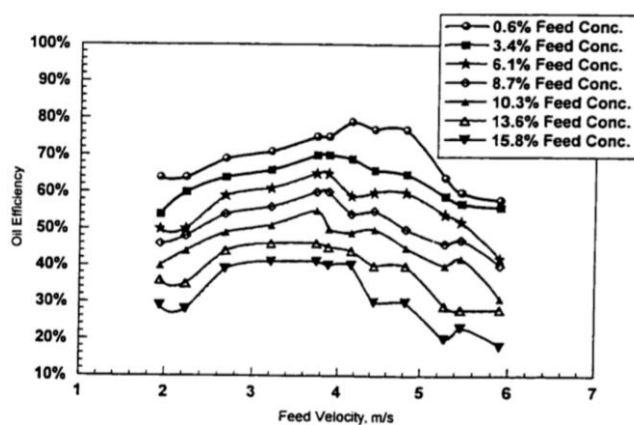
รูปที่ 2- 29 แบบแปลนและตัวแปรต่างๆ ของไฮโดรไซโคลน

จากผลการทดลองพบว่าอัตราการไหลเข้า (Feed discharge) มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแยกของทั้งน้ำมัน และอนุภาคของแข็งซึ่งในที่นี้คือทรายที่เกิดจากแร่ควอตซ์ (Quartz sand) ในสถานะที่สัดส่วนปริมาณสารที่ระบายทิ้งต่อปริมาณสารที่ฉีดเข้า (Split ratio) และเปอร์เซ็นต์ความเจือจางอยู่ที่ 0.2 และ 0.1% ตามลำดับ โดยประสิทธิภาพของการแยกน้ำมัน และทรายจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการไหลเข้าจนกระทั่งถึงจุดที่อัตราการไหลเข้าเท่ากับ $4 \text{ m}^3/\text{hr}$ หลังจากนั้นประสิทธิภาพการแยกของทั้งคู่จะลดลงซึ่งประสิทธิภาพการแยกของน้ำมันจะลดลงอย่างรวดเร็ว แต่ประสิทธิภาพการแยกของทรายจะลดลงอย่างช้าๆ ดังแสดงในรูปที่ 2-30 ผู้วิจัยกล่าวว่าสาเหตุเกิดจากการที่หยदन้ำมันจะแตกออกจากกันในสถานะที่อัตราการไหลสูงขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกน้ำมันต่ำลงอย่างรวดเร็ว

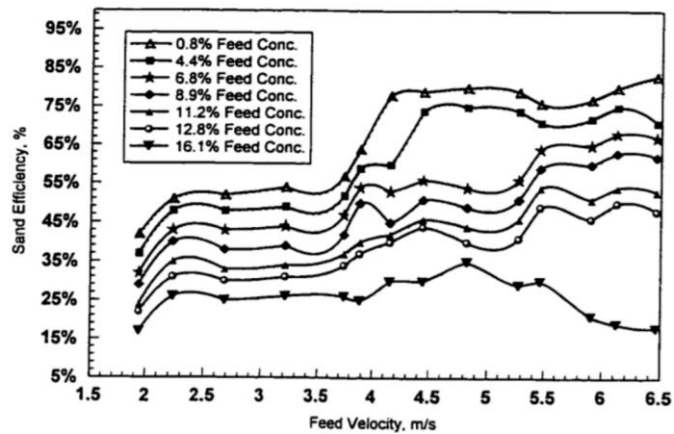


รูปที่ 2- 30 ผลกระทบระหว่างอัตราการไหลเข้าและประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และทราย

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าความเร็วขณะฉีดเข้า (Velocity) รวมถึงความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง และน้ำมันก็มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการแยกเช่นกัน โดยประสิทธิภาพการแยกน้ำมันมีแนวโน้มที่จะลดลงหากความเร็วขณะฉีดเข้าสูงขึ้น ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพการแยกอนุภาคทรายมีแนวโน้มที่จะสูงขึ้นหากความเร็วขณะฉีดเข้าสูงขึ้น ในส่วนของความเข้มข้นของน้ำมัน และทรายที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 0.6% และ 0.8% ตามลำดับ และเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพการแยกของอนุภาคทั้ง 2 มีแนวโน้มที่จะต่ำลง ซึ่งผู้วิจัยให้เหตุผลว่าอาจเกิดจากการที่อนุภาคมีปริมาณหนาแน่นเกินไปก่อให้เกิดการชนกันและระเบิดเป็นอนุภาคย่อยๆ ทั้งหมดนี้สามารถสังเกตได้จากรูปที่ 2-31 และ 2-32



รูปที่ 2- 31 ผลกระทบระหว่างความเร็วขณะเข้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในสภาวะความเข้มข้นที่แตกต่างกัน



รูปที่ 2- 32 ผลกระทบระหว่างความเร็วขณะเข้าที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาคทรายในสภาวะ
ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาวิจัยในอดีตทั้ง 3 ทำให้ทราบถึงสาระสำคัญที่แตกต่างกันออกไปเช่น
สาเหตุที่ในปัจจุบันนิยมใช้ไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 กรวย (Two cone) มากกว่าชนิดกรวยเดี่ยว (Single
cone) รวมถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน และอนุภาคของแข็ง
โดยในตารางที่ 2-8 จะเป็นการสรุปสาระสำคัญต่างๆ ที่ผู้วิจัยได้รับจากงานวิจัยทั้ง 3

ตารางที่ 2- 8 สรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ผู้วิจัย	สาระสำคัญที่ได้รับจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	สาระสำคัญที่นำไปใช้ในงานวิจัย
Bednaski และ Listewnik (1988)	สาเหตุที่นำไปสู่การคิดค้นไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส และจุดบกพร่องของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่มีลักษณะกรวยเดี่ยว (Single clone) (Single clone)	ทราบถึงข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส แบบลักษณะกรวยเดี่ยว (Single clone) ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้แยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เนื่องจากมีประสิทธิภาพต่ำ
Seureau (1994)	ผลกระทบของ สัดส่วนปริมาณสารที่ระบายทิ้งต่อปริมาณสารที่ฉีดเข้า (Split ratio) ความเข้มข้นของน้ำมัน ขนาดของอนุภาค อุณหภูมิ และ ชนิดของอนุภาค ของแข็ง ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน	มีความเป็นไปได้ที่จะนำไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส แบบสองกรวยมาใช้ในการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน
Changirwa (1999)	ผลกระทบของ อัตราการไหลเข้า (Feed discharge) ความเร็วขณะฉีดเข้า (Velocity) และความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง ที่มีต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน	สามารถนำขั้นตอนการทดลองในงานวิจัยนี้ มาศึกษาเพื่อนำไปใช้ในงานวิจัยต่อได้

บทที่ 3

ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 วัสดุอุปกรณ์

1. ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ขนาด 50 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3-2
2. ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ขนาด 45 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 3-3
3. ตะแกรงคัดขนาด (Molecular sieve)
4. กระดาษกรอง GF/C 0.45 ไมครอน
5. ถังเตรียมและเก็บน้ำดิบสังเคราะห์ขนาด 200 ลิตร
6. เครื่องสูบน้ำ ชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์
7. ถังสำหรับกวนผสม ขนาด 500 ลิตร
8. เครื่องชั่งละเอียด ยี่ห้อ OHAUS
9. ปีกเกอร์ ขนาด 200 , 500 มิลลิลิตร
10. ตู้อบที่ปรับอุณหภูมิได้ ยี่ห้อ WTB Binder
11. มาตรวัดความดัน
12. หลอดทดลอง (Test Tube) ขนาด 25 x150 มิลลิเมตร
13. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 100 , 1000 มิลลิลิตร
14. กระบอกตวง (Cylinder) ขนาด 200 , 500 และ 1000 มิลลิลิตร
15. ปิเปต (Pipette) ขนาด 1, 5, 10 มิลลิลิตร
16. สายยาง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ยาว 20 เซนติเมตร
17. กริตพอท (Grit pot) เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ขนาด 860 มิลลิลิตร
แสดงดังรูปที่ 3-4

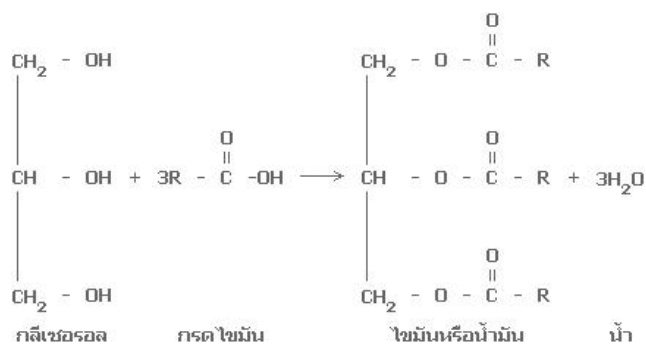
3.1.2 เครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์ผลการทดลอง

1. ชุดอุปกรณ์การกรองเพื่อวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย
2. ปุ่มดูดสูญญากาศ
3. ชุดกรวยกรองบุคเนอร์
4. เครื่องวัดขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) รุ่น Mastersizer 2000 ยี่ห้อ Malvern

3.1.3 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ยี่ห้อ Ajax Finechen
2. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($FAS, NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$) ยี่ห้อ Ajax Finechen
3. กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid, H_2SO_4) ยี่ห้อ Ajax Finechen
4. ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) ยี่ห้อ Ajax Finechen
5. สารละลายเฟอโรอิน (Ferrion Indicator) ยี่ห้อ Ajax Finechen
6. น้ำกลั่น
7. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ มรกต

น้ำมันที่เลือกนำมาใช้ในการสร้างน้ำเสียสังเคราะห์เพื่อเป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน คือน้ำมันปาล์ม (Plam Oil) จากบริษัท มรกต อินดิस्टรีส์ ซึ่งมีความหนาแน่น 0.89 กรัมต่อมิลลิลิตร ค่าความหนืดที่ 20 องศาเซลเซียส 130 MPa และเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว



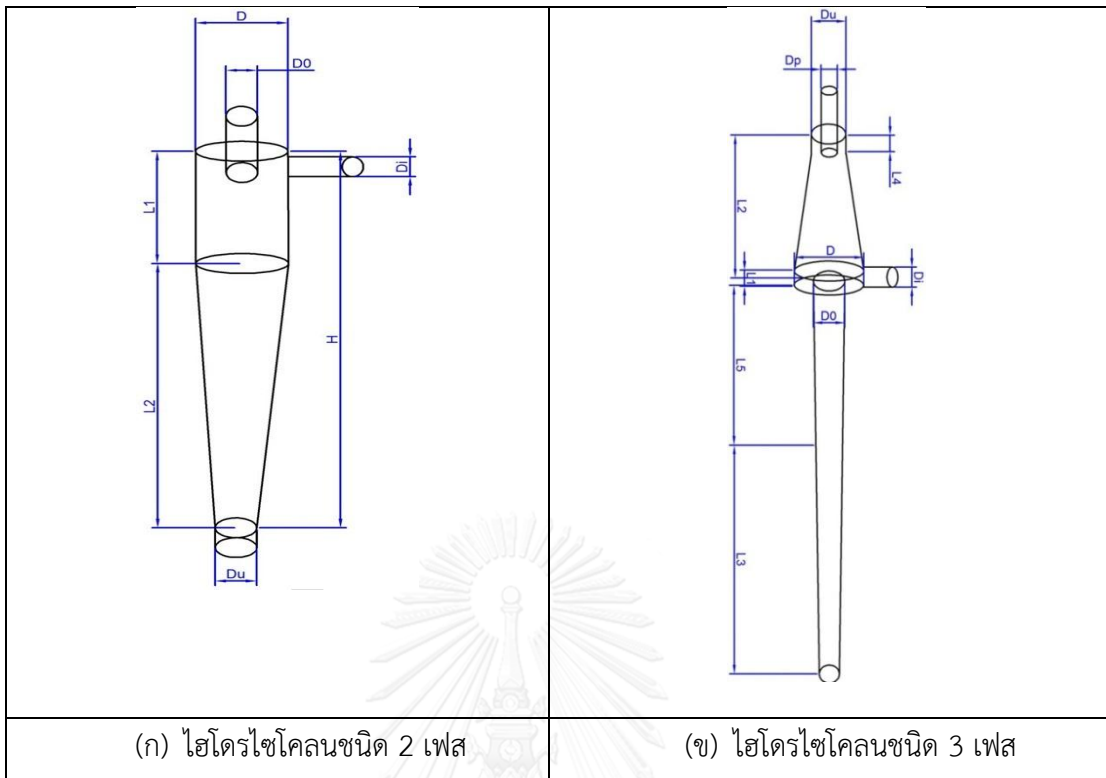
รูปที่ 3- 1 โครงสร้างน้ำมัน (กระทรวงศึกษาธิการ, 2553)

3.1.4 ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย

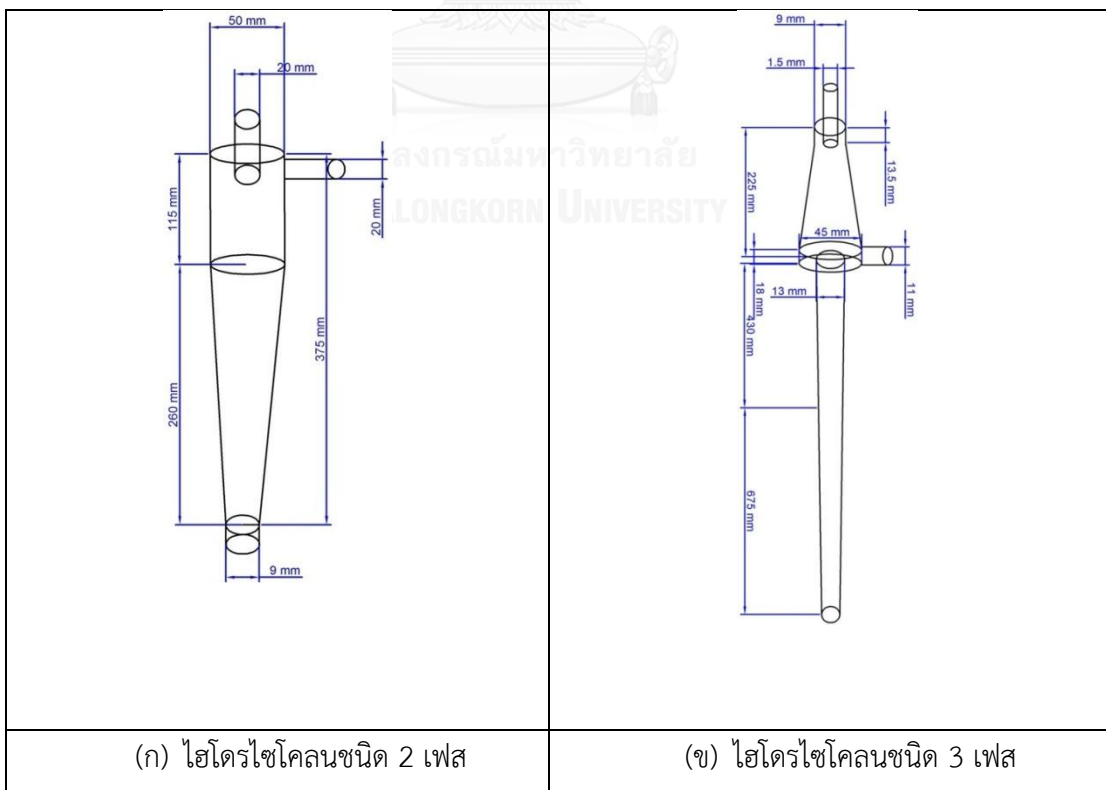
ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัยเป็นไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังตารางที่ 3-1 โดยรูปที่ 3-1 แสดงสัดส่วนของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ชนิด และรูปที่ 3-2 แสดงขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ได้มาจากการออกแบบ

ตารางที่ 3- 1 รายละเอียดจำเพาะของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

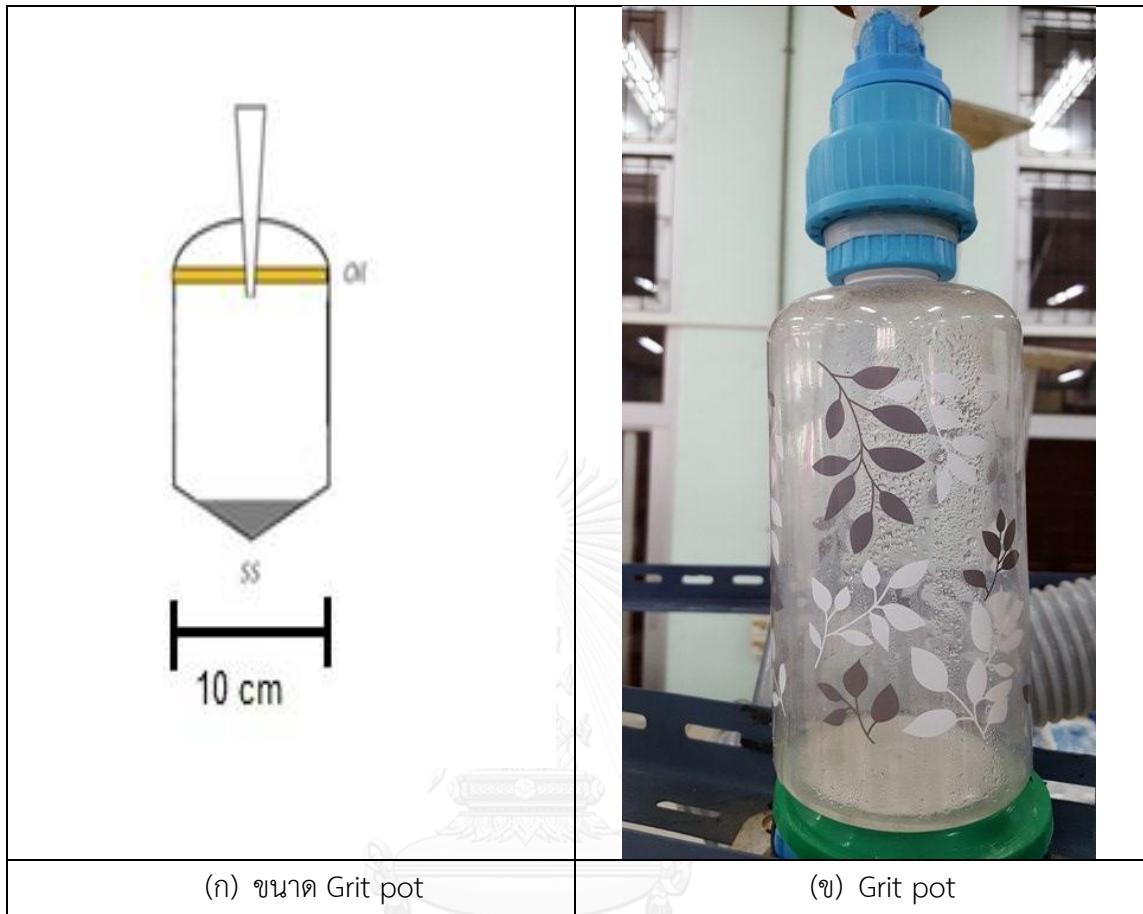
รายละเอียด	ไฮโดรไซโคลน ชนิด 2 เฟส	ไฮโดรไซโคลน ชนิด 3 เฟส
เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน (D)	50 มิลลิเมตร	45 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า (D _i)	20 มิลลิเมตร	11 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านบน (D _o)	20 มิลลิเมตร	13 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (D _u)	9 มิลลิเมตร	9 มิลลิเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางออกด้านล่าง (D _p)	-	1.5 มิลลิเมตร
ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน (H)	375 มิลลิเมตร	1330 มิลลิเมตร
ความยาวของส่วนทรงกระบอก (L ₁)	115 มิลลิเมตร	18 มิลลิเมตร
ความยาวของส่วนทรงกรวย (L ₂)	260 มิลลิเมตร	225 มิลลิเมตร
ความยาวของส่วนปลาย (L ₃)	-	675 มิลลิเมตร
ความยาวของส่วนปลาย (L ₄)	-	13.5 มิลลิเมตร
ความยาวของส่วนปลาย (L ₅)	-	430 มิลลิเมตร



รูปที่ 3- 2 รายละเอียดสัดส่วนของไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 3- 3 ขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ได้มาจากการออกแบบ

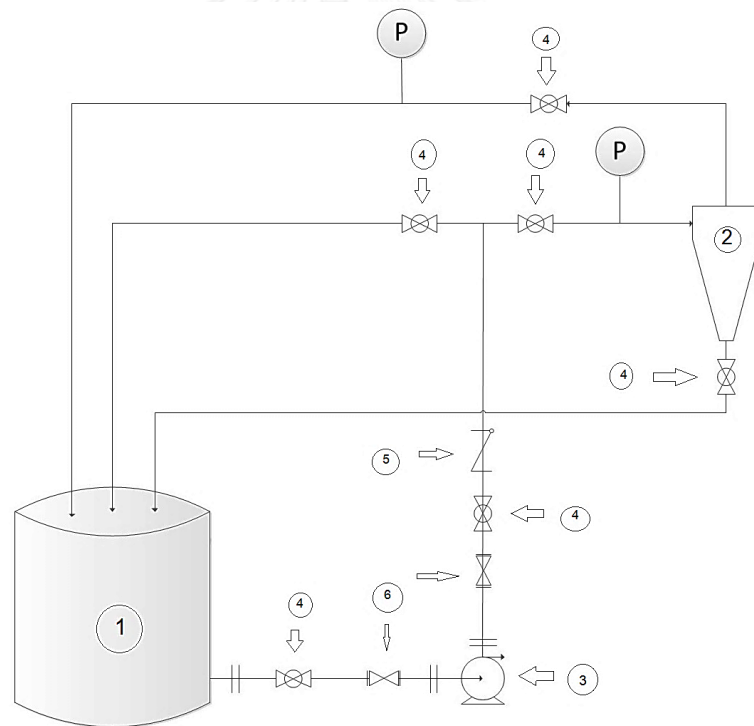


จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY
รูปที่ 3- 4 อุปกรณ์ Grit pot

3.1.5 แผนผังการติดตั้งกระบวนการไฮโดรไฮโคลน

การเดินระบบในการทดลองนี้เป็นแบบไหลวน (Recirculation) ซึ่งน้ำที่ได้จากการแยกทั้งหมดจะถูกนำกลับมารวมกันใหม่ในถังเก็บน้ำที่มีการกวนผสม โดยรูปที่ 3-5 แสดงแผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลน ซึ่งประกอบไปด้วย

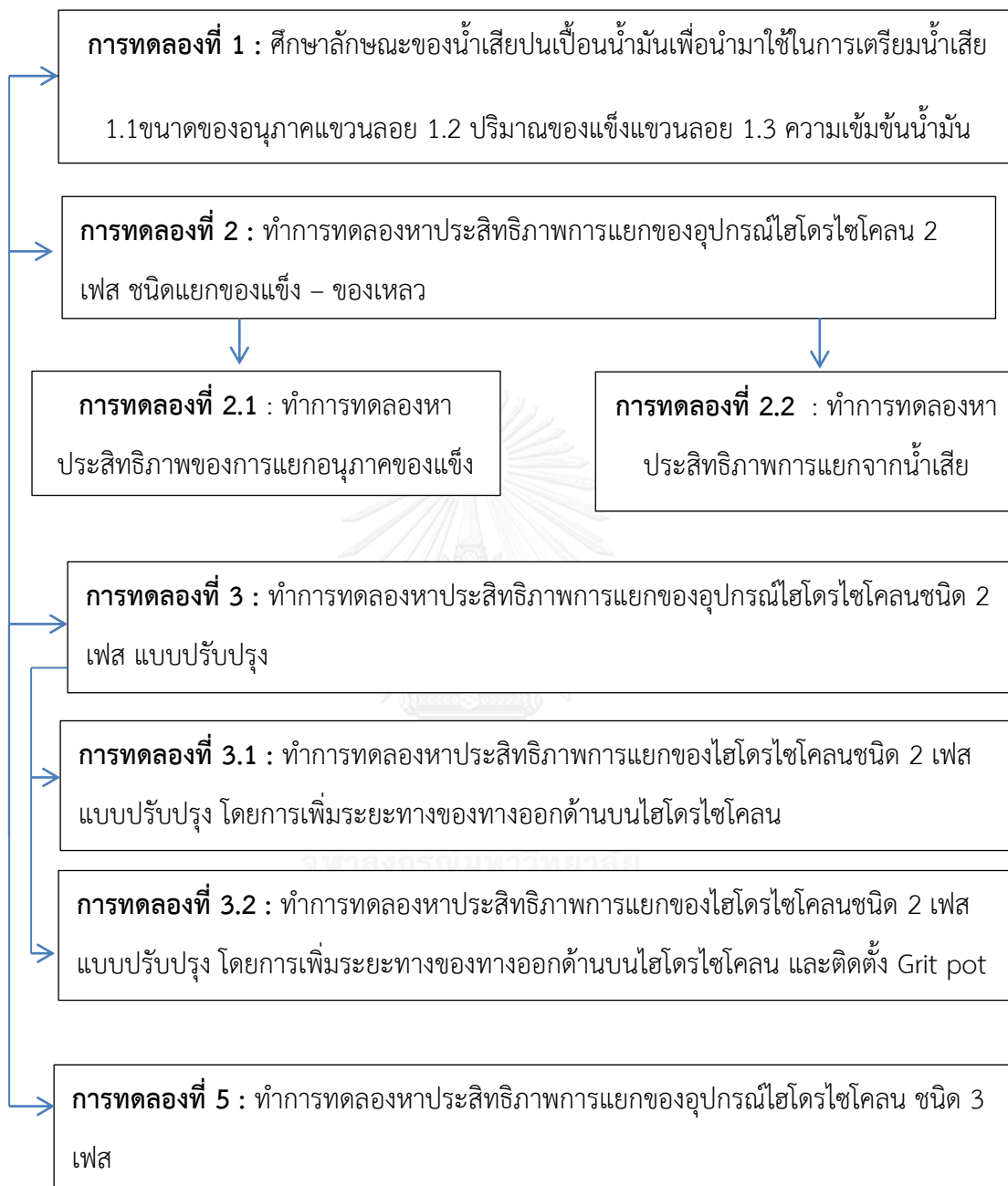
- (1) ถังเตรียมและเก็บน้ำตัวอย่าง
- (2) อุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลน
- (3) เครื่องสูบน้ำ
- (4) วาล์วสำหรับปรับการไหล
- (5) วาล์วสำหรับปรับอัตราการไหลเข้าของน้ำตัวอย่าง
- (6) อุปกรณ์วัดอัตราการไหล



รูปที่ 3- 5 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบกระบวนการไฮโดรไฮโคลน

3.2 แผนการทดลอง

ในการวิจัยนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 4 การทดลอง โดยการทดลองที่ 1 เป็นการศึกษา ลักษณะน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากน้ำเสียจริง เพื่อนำมาใช้ในการสังเคราะห์น้ำเสียให้มี ปริมาณ ของแข็งแขวนลอย ขนาดของแข็งแขวนลอย และปริมาณน้ำมันตามที่ต้องการ โดยจะนำน้ำเสีย สังเคราะห์ที่ได้มาใช้ในการทดลองที่ 2 3 และ 4 ต่อไป โดยการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษา ประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลน 2 เฟส ชนิด แยกของแข็ง - ของเหลว เพื่อศึกษา ประสิทธิภาพการแยก ระหว่างอนุภาคของแข็งกับน้ำ และการแยกอนุภาคของแข็ง น้ำมัน และน้ำ การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง และน้ำมันของไฮโดรไซโคลน โดยการนำไฮโดรไซโคลน 2 เฟส มาปรับปรุง โดยในการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การ ทดลองคือ 1.ปรับปรุงไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส โดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) ด้วยการต่อท่อเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยก ของแข็งแขวนลอย และน้ำมันออกจากน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมัน 2.ปรับปรุงไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส โดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot ที่ทางออกด้านล่าง เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอย และน้ำมันออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน การทดลองที่ 4 เป็นการนำไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มาทำ การทดลองหาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง และน้ำมันออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน โดย การทำการทดลองเป็นไปตามแผนภาพการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 3-6 จากนั้นนำผลที่ได้จากการทำ การทดลองมาวิเคราะห์ เพื่อหาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง และน้ำมันออกจากน้ำเสีย ปนเปื้อนน้ำมันของไฮโดรไซโคลนว่าไฮโดรไซโคลน แบบใดเหมาะสมสำหรับการนำมาแยกอนุภาค ของแข็ง และน้ำมันออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน



รูปที่ 3- 6 แผนผังการทดลอง

3.3 การดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเพื่อนำมาใช้เป็นค่าเริ่มต้นในการเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

1. นำน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันมาศึกษาขนาดของอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่มีอยู่ในตัวอย่างน้ำ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (Particle size analyzer) และทำการหาปริมาณของแข็งแขวนลอยโดยวิธีการ กรองเพื่อแยกของแข็งแขวนลอยด้วยกระดาษกรอง ขนาด 0.45 ไมครอน แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณของแข็งแขวนลอย อ้างอิงจาก EPA 160.2

2. นำน้ำเสียตัวอย่างมาวิเคราะห์หา ปริมาณน้ำมันและไขมัน (Fat, oil, and grease; FOG) และค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand; COD) โดยวิธีการ Soxhlet extraction method อ้างอิงจาก SM 5520 D และ Closed reflux, Titrimetric method อ้างอิงจาก EPA 410.1ตามลำดับ

3. สังเคราะห์น้ำเสียให้มี ขนาดของอนุภาคของแข็งแขวนลอย ปริมาณของแข็งแขวนลอย ปริมาณน้ำมัน และความเข้มข้นน้ำมันตามที่ต้องการ

3.3.2 การทดลองที่ 2 การทดลองหาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 2 เฟส

ชนิดแยกของแข็ง – ของเหลว

การทดลองที่ 2.1 ศึกษาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 2 เฟส ชนิดแยกของแข็ง – ของเหลว โดยการแยกของแข็งแขวนลอยและน้ำเปล่าออกจากกัน

ตารางที่ 3- 2 ตัวแปรที่ทำการควบคุมในการทดลองที่ 2.1

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิดของแข็ง- ของเหลว	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร
2. ขนาดของของแข็งแขวนลอย	จากการทดลองที่ 1
3. ปริมาณของของแข็งแขวนลอย	จากการทดลองที่ 1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	0.5 1.0 และ 2 บาร์
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
2. ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย	กรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ⁰ C (Total Suspended Solids, 0.2um dried @105C, EPA 160.2)

วิธีการดำเนินการทดลอง มีดังนี้

1. เติมของแข็งแขวนลอย ตามความเข้มข้นที่ได้จากการทดลองที่ 1 ลงในถังพลาสติกขนาด 500 ลิตร ที่บรรจุน้ำปริมาณ 150 ลิตร
2. ทำการเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำที่ผสมกับ ของแข็งแขวนลอย จากถังเก็บน้ำเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด แยกของแข็ง-ของเหลว

3. ปรับค่าความดันจ่ายเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนโดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นทางการไหลอ้อม (By pass) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 บาร์
4. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน โดยการทำการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาณน้ำ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับเวลา
5. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ทั้ง 3 ค่าความดันเพื่อนำไปวิเคราะห์ผล ดังตารางที่ 3-2
6. คำนวณประสิทธิภาพการแยกโดยใช้ไฮโดรไซโคลนจาก

$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

E'_T = ประสิทธิภาพผล

E_T = ประสิทธิภาพรวม

R_f = อัตราส่วนการแบ่งการไหล (Flow spilt)

การทดลองที่ 2.2 ศึกษาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 2 เฟส ชนิดแยกของแข็ง - ของเหลว โดยการแยกน้ำเสียสังเคราะห์จากการทดลองที่1

ตารางที่ 3- 3 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 2.2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิดของแข็ง- ของเหลว	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร
2. ขนาดของของแข็งแขวนลอย	จากการทดลองที่1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	0.5 1.0 และ 2 บาร์
2. ปริมาณของของแข็งแขวนลอย*	จากการทดลองที่ 1
3. ปริมาณน้ำมัน	จากการทดลองที่ 1
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
2. ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย	กรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ⁰ C (EPA 160.2)
3. ปริมาณความเข้มข้นน้ำมัน	Closed reflux , Titrimetric method (อ้างอิงจาก EPA 410.1)

วิธีการดำเนินการทดลอง มีดังนี้

1. ผสมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งแขวนลอย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 150 ลิตร
2. ทำการเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกับ ของแข็งแขวนลอย และน้ำมัน จากถังเก็บน้ำเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด แยกของแข็ง-ของเหลว

3. ปรับค่าความดันที่จ่ายเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนโดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นทางการไหลอ้อม (By pass) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 บาร์
4. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลน โดยการทำการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาณน้ำ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
5. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลน ทั้ง 3 ค่าความดัน เพื่อไปวิเคราะห์ผล ดังตารางที่ 3-3
6. คำนวณประสิทธิภาพการแยกโดยใช้ไฮโดรไฮโคลนจาก สมการที่ (3.1)
7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณน้ำมันเป็น 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณของแข็งแขวนลอย เป็น 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.3.3 การทดลองที่ 3 การทดลองหาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลน 2 เฟส

ชนิดแยกของแข็ง – ของเหลว แบบปรับปรุง

การทดลองที่ 3.1 การทดลองหาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลน 2 เฟส ชนิดแยกของแข็ง – ของเหลว แบบปรับปรุง โดยการเพิ่มระยะทางของทางออกด้านบนไฮโดรไฮโคลน (Vortex finder) เพื่อเป็นการเลียนแบบการเกิดการหมุนวนภายใน (Inner Vortex) แบบไฮโดรไฮโคลนชนิด 3 เฟส

ตารางที่ 3- 4 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิดของแข็ง- ของเหลว	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร
2. ขนาดของของแข็งแขวนลอย	จากการทดลองที่1
3. ความยาวท่อที่ต่อเพิ่มของทางออกด้านบน*	ความยาว 20 เซนติเมตร
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 บาร์
2. ปริมาณของของแข็งแขวนลอย**	50 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปริมาณน้ำมัน**	1 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
2. ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย	กรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ⁰ C (Total Suspended Solids, 0.2um dried @105C, EPA 160.2)
3. ปริมาณความเข้มข้นน้ำมัน	ปรับปรุงจากวิธีการหาปริมาณน้ำมันและไขมัน (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก.3)

*หมายเหตุ: ความยาวของท่อที่ต่อเพิ่มของทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน กำหนดมาจากขนาดความยาวท่อนแรกของทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส โดยรายละเอียดการออกแบบอยู่ในหัวข้อที่ 2.6.4

**หมายเหตุ: ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณน้ำมัน เลือกค่ามาจากการนำน้ำเสียจริงไปวิเคราะห์

วิธีการดำเนินการทดลอง มีดังนี้

1. ทำการปรับปรุงไฮโดรไซโคลนโดยการนำท่อสายยางขนาด 2 นิ้ว ความยาว 20 เซนติเมตร มาต่อที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน โดยเป็นการเพิ่มระยะทางของทางออกด้านบน (Vortex finder)
2. ผสมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งแขวนลอย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 200 ลิตร
3. ทำการเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกับ ของแข็งแขวนลอย และน้ำมัน จากถังเก็บน้ำเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด แยกของแข็ง-ของเหลว
4. ปรับค่าความดันที่จ่ายเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนโดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นทางการไหล อ้อม (By pass) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 บาร์
5. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน โดยทำการ ทำการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาณน้ำ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร กับเวลา
6. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออก ด้านล่าง (Underflow) ของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ทั้ง 5 ค่าความดันเพื่อไปวิเคราะห์ผล ดัง ตารางที่ 3-4
7. คำนวณประสิทธิภาพการแยกโดยใช้ไฮโดรไซโคลนจากสมการที่ (3.1)
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณน้ำมันเป็น 2.5 และ 5 กรัมต่อ ลิตร ตามลำดับ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณของแข็งแขวนลอย เป็น 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

การทดลองที่ 3.2 การทดลองหาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 2 เฟส ชนิดแยกของแข็ง – ของเหลว แบบปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางของทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ตารางที่ 3- 5 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.2

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิดแยกของแข็ง- ของเหลว	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 มิลลิเมตร
2. ขนาดของของแข็งแขวนลอย	จากการทดลองที่1
3.ความยาวท่อที่ต่อเพิ่มของทางออกด้านบน*	ความยาว 20 เซนติเมตร
4.Grit pot**	เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร , ปริมาตร 860 มิลลิลิตร
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 บาร์
2. ปริมาณของของแข็งแขวนลอย***	50 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปริมาณน้ำมัน***	1 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา (Flow meter)

ตารางที่ 3- 6 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 3.2

ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย	กรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ⁰ C (Total Suspended Solids, 0.2um dried @105C, EPA 160.2)
2. ปริมาณความเข้มข้นน้ำมัน	ปรับปรุงจากวิธีการหาปริมาณน้ำมันและไขมัน (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก.3)

*หมายเหตุ: ความยาวของท่อที่ต่อเพิ่มของทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลอน กำหนดมาจากขนาดความยาวท่อนแรกของทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟสโดยรายละเอียดการออกแบบอยู่ในหัวข้อที่ 2.6.4

**หมายเหตุ: ขนาดของGrit pot คำนวณมาจากอัตราการไหลของทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนและความเร็วของน้ำมันในการลอยตัวขึ้นไปบนผิวน้ำ

***หมายเหตุ: ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณน้ำมัน เลือกค่ามาจากการนำน้ำเสียจริงไปวิเคราะห์

วิธีการดำเนินการทดลอง มีดังนี้

1. ทำการติดตั้ง Grit pot ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10เซนติเมตร ปริมาตร 860 มิลลิลิตร ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนที่ได้รับการปรับปรุงโดยการต่อท่อสายยาง ความยาว 20 เซนติเมตรที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอน
2. ผสมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งแขวนลอย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 150 ลิตร
3. ทำการเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกับ ของแข็งแขวนลอย และน้ำมัน จากถังเก็บน้ำเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนชนิด แยกของแข็ง-ของเหลว

4. ปรับค่าความดันที่จ่ายเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนโดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นทางการไหลอ้อม (By pass) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 บาร์
5. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน โดยการทำการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาณน้ำ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
6. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ที่แต่ละค่าความดัน เพื่อไปวิเคราะห์ผล ดังตารางที่ 3-6 โดยเก็บตัวอย่างที่ออกจาก Grit pot ที่เวลา 5 10 และ 15 นาที
7. คำนวณประสิทธิภาพการแยกโดยใช้ไฮโดรไซโคลนจาก สมการที่ (3.2)

$$E_T = \frac{Q_f C_f T_f - Q_o C_o T}{Q_f C_f T_f} \times 100 \quad (3.2)$$

E_T = ประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot

Q_f = อัตราการไหลเข้า (l/s)

C_f = ความเข้มข้นของผสมที่เข้าไฮโดรไซโคลน (mg/l)

Q_o = อัตราการไหลที่ทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน (l/s)

C_o = ความเข้มข้นของผสมที่ออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลน (mg/l)

T = เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (min)

8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณน้ำมันเป็น 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
9. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณของแข็งแขวนลอย เป็น 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

3.4.4 การทดลองที่ 4 การทดลองหาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 3 เฟส

ตารางที่ 3- 7 ตัวแปรที่ทำการศึกษาในการทดลองที่ 4

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส	เส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 45 มิลลิเมตร
2. ขนาดของของแข็งแขวนลอย	จากการทดลองที่ 1
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน	0.5 1.0 1.5 2.0 และ 2.5 บาร์
2. ปริมาณของของแข็งแขวนลอย*	50 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร
3. ปริมาณน้ำมัน*	1 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
2. ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย	กรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลืออยู่บนกระดาษกรองโดยนำไปอบที่อุณหภูมิ 105 ⁰ C (Total Suspended Solids, 0.2um dried @105C, EPA 160.2)
3. ปริมาณความเข้มข้นน้ำมัน	ปรับปรุงจากวิธีการหาปริมาณน้ำมันและไขมัน (รายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ก.3)

*หมายเหตุ: ปริมาณของแข็งแขวนลอย และปริมาณน้ำมัน เลือกค่ามาจากการนำน้ำเสียจริงไปวิเคราะห์

1. ผสมน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร และปริมาณของแข็งแขวนลอย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 150 ลิตร
2. ทำการเดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผสมกับ ของแข็งแขวนลอย และน้ำมัน จากถังเก็บน้ำเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส
3. ปรับค่าความดันที่จ่ายเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนโดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นทางการไหล อ้อม (By pass) จำนวน 3 ค่า ได้แก่ 0.5 1.0 และ 2.0 บาร์
4. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านบนและด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน โดยการทำการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาณน้ำ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตร กับเวลา
5. ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ทั้ง 2 ทางออก ของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ทั้ง 5 ค่าความดัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ผล ดังตารางที่ 3-7
6. คำนวณประสิทธิภาพการแยกโดยใช้ไฮโดรไซโคลนจากสมการ (3.3)

$$E_T = \frac{M_u}{M} \times 100 \quad (3.3)$$

E_T = ประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

M_u = มวลของอนุภาคที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านบนที่สนใจ (มวลต่อเวลา)

M = มวลของแข็งที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน (มวลต่อเวลา)

7. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณน้ำมันเป็น 2.5 และ 5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ
8. ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 1-8 โดยทำการเปลี่ยนปริมาณของแข็งแขวนลอย เป็น 150 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการศึกษาลักษณะและสมบัติของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.1.1 ลักษณะของน้ำเสียจริง

ตัวอย่างน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ได้นำมาเพื่อใช้เป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสำหรับศึกษาการแยกด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการล้างของบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน)

4.1.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

ตัวอย่างน้ำเสียนี้มีลักษณะเป็นของเหลวใส และมีตะกอนของแข็งปะปนอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4-1 จากการทดสอบเบื้องต้นคาดว่าน้ำเสียตัวอย่างนี้จะมีองค์ประกอบของน้ำ น้ำมัน และสารลดแรงตึงผิว และของแข็ง



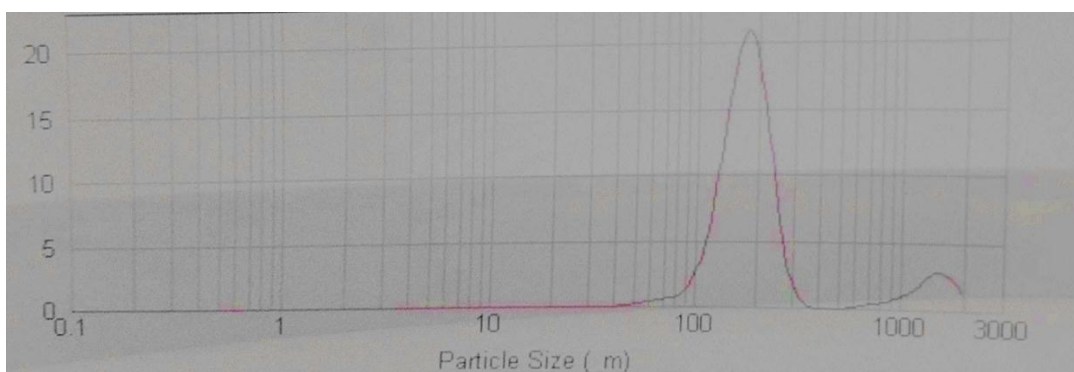
รูปที่ 4- 1 น้ำปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการล้าง

4.1.1.3 ลักษณะทางเคมี

จากการตรวจวัดพบว่าซีไอดี มีค่า เท่ากับ 1,804.8 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณน้ำมันและไขมัน 2,464.4 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด 149.67 มิลลิกรัมต่อลิตร และขนาดของอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 180 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 4-1 และรูปที่ 4-2

ตารางที่ 4- 1 ลักษณะสมบัติเบื้องต้นของตัวอย่างน้ำปนเปื้อนน้ำมันจากกระบวนการล้าง

พารามิเตอร์	ค่า	วิธีการวัด
ค่าซีโอดี (mg O ₂ /l)	1,804.8	Closed reflux, colorimetric method
ปริมาณน้ำมันและไขมัน (mg/l)	264.4	Hexane extraction
ปริมาณของแข็งแขวนลอยทั้งหมด (mg/l)	159.67	กรองและอบที่ 103-105 องศา
ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย d ₅₀ (µm)	180	Particle size analyzer



รูปที่ 4- 2 ผลการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันตัวอย่าง

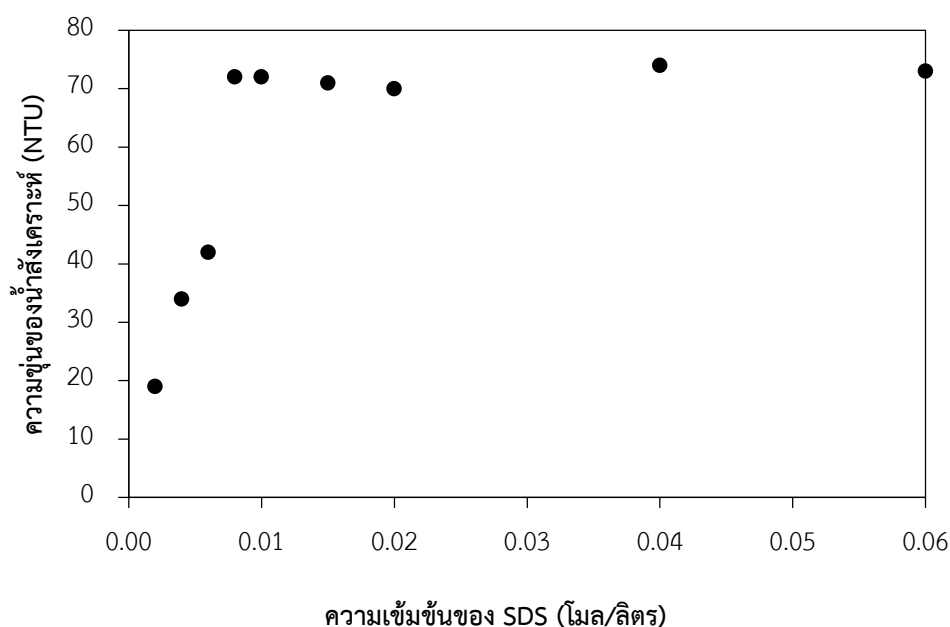
โดยจากข้อมูลการวิเคราะห์ผลน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันเบื้องต้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกจะศึกษาการบำบัดน้ำปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์จากน้ำมันปาล์ม เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีความหนาแน่น เท่ากับ 895 kg/m³ ใกล้เคียงกับน้ำมันที่มาจากน้ำเสียจริงซึ่งมีความหนาแน่น เท่ากับ 900 kg/m³ หาซื้อได้ง่ายกว่า และน้ำมันปาล์มเสมือนเป็นตัวแทนของมลสารในน้ำเสียจากการล้างจากกิจกรรมในครัวเรือน ซึ่งเป็นน้ำเสียส่วนใหญ่ ดังนั้นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันจากน้ำมันปาล์ม จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนจากน้ำเสียอุตสาหกรรมและเป็นตัวแทนจากกิจกรรมในครัวเรือนด้วย และอนุภาคที่เลือกมาใช้ในการสังเคราะห์น้ำเสียนี้ คือทรายซึ่งเป็นตัวแทนของอนุภาคที่มาจากระบบรวบรวมรวมน้ำเสีย

4.1.2 ลักษณะของน้ำเสียสังเคราะห์

ลักษณะสมบัติของน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม

การเตรียมน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์นี้จะใช้น้ำมันปาล์มสำหรับบริโภคที่มีขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาดร่วมกับสารลดแรงตึงผิว เพื่อให้ น้ำสังเคราะห์อยู่ในรูปของอิมัลชันที่มีเสถียรภาพ โดยเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบซึ่งพบได้ทั่วไปในสารซักล้างที่ใช้กันตามบ้านเรือน เช่น น้ำยาล้างจานและผงซักฟอก เพื่อให้ น้ำสังเคราะห์ที่ได้นี้สามารถเป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันจากกิจกรรมในบ้านเรือนและชุมชน น้ำมันปาล์มนี้มีความหนาแน่นเท่ากับ 895 kg/m³

ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่ใช้กำหนดให้เท่ากับค่า Critical micelle concentration (CMC) หรือค่าความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวน้อยที่สุดที่จะเกิดไมเซลล์ในน้ำ โดยมีสมมติฐานว่า สารลดแรงตึงผิวทั้งหมดที่ใส่ลงไป ณ ความเข้มข้นนี้จะอยู่ที่บริเวณพื้นผิวนูนภาคน้ำมัน ไม่จับตัวกันเป็นไมเซลล์ โดยเลือกใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Sodium dodecyl sulfate (SDS) และทำการทดสอบหาค่า CMC ด้วยการวัดค่าความขุ่นของน้ำสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่แตกต่างกัน (Mukerjee และ Mysels, 1971) ผลการศึกษาที่ได้แสดงดังรูปที่ 4-3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าในช่วงค่าความเข้มข้นของ SDS มีค่าน้อยคือ 0.002 – 0.008 โมล/ลิตร จะทำให้ความขุ่นของน้ำเสียเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากเกิดการลดลงของแรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมัน อีกทั้งยังมีพื้นที่ผิวของน้ำมันมากพอที่จะดูดซับโมเลกุลของ SDS แต่เมื่อความเข้มข้นของ SDS มีค่ามากกว่า 0.008 โมล/ลิตร (2.31 กรัม/ลิตร) จะเห็นได้ว่าความขุ่นของน้ำเสียนั้นมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงตึงผิวระหว่างน้ำและน้ำมันเริ่มมีค่าคงที่ และพื้นที่ผิวของหยดน้ำมันที่เกิดการแตกตัวเป็นอนุภาคขนาดเล็กดูดซับโมเลกุลของ SDS จนเต็ม จึงส่งผลให้โมเลกุลของ SDS ที่เหลือเกิดการจับตัวกันเองเกิดเป็นไมเซลล์ ซึ่งส่งผลต่อความขุ่นของน้ำเสียน้อยมากค่าปริมาณ SDS ที่ได้นี้คือ 0.05 cmc จะถูกใช้ในการเตรียมน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4- 3 ผลการหาค่า Critical micelle concentration (CMC) ของสารลดแรงตึงผิว SDS

เมื่อได้ค่าความเข้มข้นของ SDS ที่จะใช้แล้ว จึงทำการสังเคราะห์น้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่ความเข้มข้นต่างๆ ได้แก่ ร้อยละ 1.0 2.5 และ 5.0 โดยปริมาตร โดยใช้วิธีการดังนี้ คือ ปั่นกวนด้วยความเร็ว 125 รอบ/นาที เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติ

ผลการศึกษาลักษณะสมบัติต่างๆ ที่ได้แสดงในตารางที่ 4-2 โดยน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มที่เตรียมได้มีค่าความหนืด และค่าศักย์ซีตาเท่ากับ 19.7 cps และ -31 mV ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มมีเสถียรภาพ

ตารางที่ 4- 2 ลักษณะสมบัติของน้ำปนเปื้อนน้ำมันปาล์มสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นน้ำมัน (ร้อยละโดยปริมาตร)		
	1.0	2.5	5.0
ค่าซีโอติ (mg/l)	3,280	6,910	13,470
ปริมาณน้ำมันและไขมัน (mg/l)	195	347	668
ค่าความขุ่น (NTU)	59.8	65.3	71.1
ค่าพีเอช	7.1	7.2	7.5
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย D_{32} (μm)	2.9	3.2	3.7

จากตารางที่ 4-2 จะเห็นได้ว่าค่าซีโอติของน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำมัน และยังเป็นสัดส่วนสอดคล้องกับค่าปริมาณของน้ำมันและไขมันที่ใช้ในการเตรียมน้ำสังเคราะห์ แต่ค่าความขุ่น ค่าพีเอช และขนาดอนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากที่ความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอนุภาคน้ำมันมีการรวมตัวกันไม่มาก แต่ยังคงมีขนาดเล็กและยังมีเสถียรภาพค่อนข้างสูง เมื่อทดสอบการตกตะกอน พบว่าต้องใช้เวลาประมาณ 3 วันจึงจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลง โดยน้ำปนเปื้อนจะมีส่วนด้านล่างจะมีการลดลงของค่าปริมาณน้ำมันและไขมัน และค่าซีโอติลดลงเล็กน้อย

4.2 ผลการทดลองการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน 2 เฟส ชนิด แยกของแข็ง – ของเหลว

การทดลองนี้จะทำการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

4.2.1 การทดลองการแยกของแข็งแขวนลอยในน้ำประปา

4.2.2 การทดลองการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์

4.2.1 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ทำการทดลองโดยใช้ทรายคัดขนาด 180 ไมโครเมตร ปริมาณ 22.5 กรัม ใส่ลงในถังกวนผสมที่มีน้ำประปา 150 ลิตร ในขั้นตอนนี้เลือกใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ทำการทดลองเดินระบบโดยปรับความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนที่ 0.5 1 และ 2 บาร์ เก็บตัวอย่างที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) และนำตัวอย่างของผสมมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) และคำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคทรายของไฮโดรไซโคลนจากสมการประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สมการที่ (4.1) (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.1)

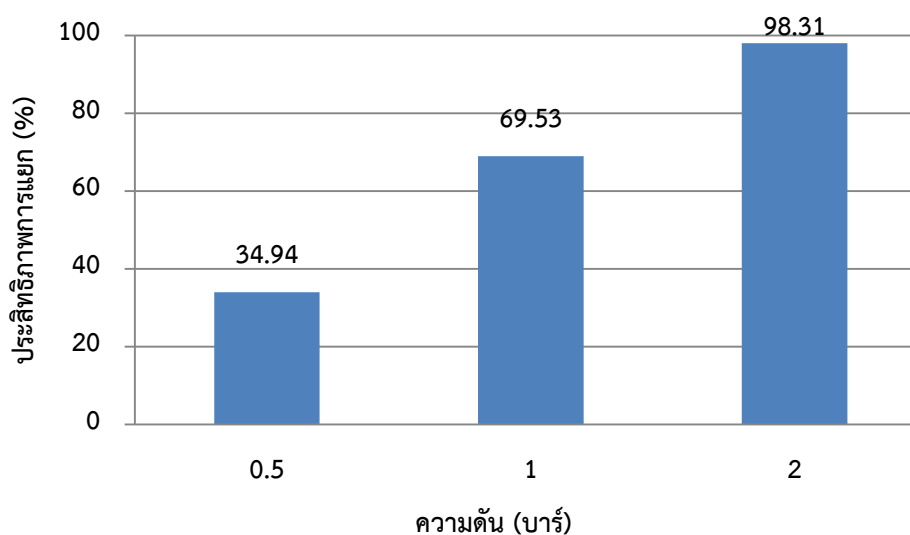
$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

เมื่อ E'_T , E_T และ R_f คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลน ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน และอัตราส่วนการแบ่งการไหล (Flow spilt) ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่แสดงในรูป 4-4 สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลของความดันจ่ายเข้าที่ 0.5 1 และ 2 บาร์ พบว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจ่ายเข้าเปรียบได้กับการเพิ่มอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน โดยความสัมพันธ์เป็นดังตารางที่ 4-3 จากอัตราการไหลที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนสูงขึ้นความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ($V_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$) ก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ความเร่งหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ($a_c = \frac{2V_y^2}{D_c}$) เนื่องจากความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนเป็นตามกฎของสโตค จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร่งหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นความเร็วของอนุภาคในการตกตะกอนก็จะสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น (วรศิริ เสียงสนัน, 2552)

ตารางที่ 4- 3 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าแตกต่างกัน

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)		
	ทางเข้าไฮโดรไซโคลน	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
0.5	0.40	0.30	0.10
1	0.53	0.42	0.11
2	0.89	0.76	0.13



รูปที่ 4- 4 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.2.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ในส่วนนี้จะทำการทดลองการแยกอนุภาคและน้ำมันด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส สำหรับแยกของแข็ง-ของเหลวโดยทำการศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันปาล์ม 2 ชนิด ได้แก่ 1) ไม่ผสมสารลดแรงตึงผิว และ 2) ผสมสารลดแรงตึงผิวซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำเสียในกระบวนการล้างสารลดแรงตึงผิวที่ใช้คือ Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) ความเข้มข้น 0.05 cmc โดยลักษณะของน้ำเสียที่ไม่ผสมสารลดแรงตึงผิวจะมีลักษณะเป็นอิมัลชันแต่ก็มีบางส่วนแยกเป็นชั้นระหว่างน้ำและน้ำมัน เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปใต้น้ำเสียสังเคราะห์น้ำเสียจะมีลักษณะเป็นอิมัลชันมากกว่าน้ำเสียที่ไม่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวมีคุณสมบัติทำให้อนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กลงและมีเสถียรภาพมากขึ้น

การทดลองดำเนินการเช่นเดียวกับการทดลองที่ 4.2.1 แต่น้ำที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 2 ชนิด โดยมีความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน

2.5 g/l ซึ่งค่าความเข้มข้นดังกล่าวได้มาจากผลการวิเคราะห์น้ำเสียจริงจากการทดลองที่ 4.1 ในขั้นตอนนี้เลือกใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ทำการทดลองเดินระบบโดยปรับความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนที่ 0.5 1 และ 2 บาร์ เก็บตัวอย่างที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) ลักษณะอนุภาคที่เข้าและออกจากไฮโดรไซโคลนทั้งด้านบน และด้านล่าง แสดงดังรูปที่ 4-5 และนำตัวอย่างของผสมมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ปริมาณน้ำมัน (COD) ค่าวนหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลนและค่าวนหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนจากสมการประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สมการที่ (4.1) (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.2)



น้ำเสียเข้า น้ำทางออกด้านล่าง น้ำทางออกด้านบน

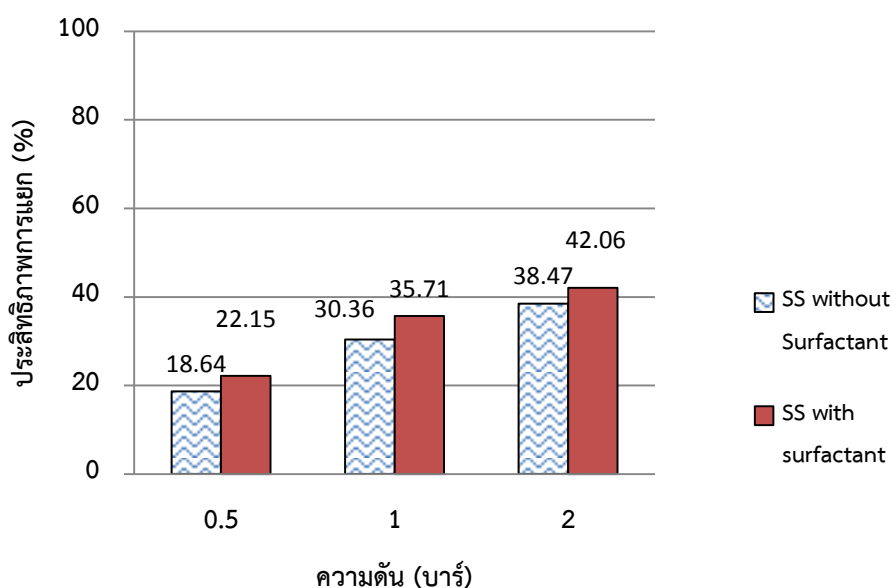
รูปที่ 4- 5 ลักษณะของอนุภาคก่อนเข้าและที่ออกจากไฮโดรไซโคลน

ผลของประสิทธิภาพ แสดงได้ดังนี้

4.2.2.1 ผลการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4-6 พบว่า การแยกอนุภาคของแข็งในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ทั้ง 2 ชนิดด้วยไฮโดรไซโคลน มีประสิทธิภาพการแยกประมาณ 20 - 40% ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันมีค่าต่ำกว่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำประปา เนื่องจากในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน มีความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาค และของเหลวที่แตกต่างกันน้อยกว่าในน้ำประปา กล่าวคือ น้ำมันจะไปจับตัวกับอนุภาค ทำให้ความถ่วงจำเพาะของอนุภาคลดลง ส่งผลกระทบให้ความแตกต่างของความหนาแน่นต่ำลงด้วย

เมื่อพิจารณาจากกฎของสโตค ความแตกต่างของความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลวลดลง ความเร็วในการตกตะกอนจะช้าลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคลดลงด้วย ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในกรณีที่มีสารลดแรงตึงผิวมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวทำปฏิกิริยากับน้ำมันทำให้น้ำมันไม่จับตัวกับอนุภาคส่งผลให้อนุภาคสามารถแยกตัวออกจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีกว่าอนุภาคที่อยู่ในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนยังมีค่าไม่สูงนักเนื่องจาก ก้อนของอนุภาค และน้ำมันที่จับตัวกันคอยทำหน้าที่ขัดขวางการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน กล่าวคือ เมื่ออนุภาครวมตัวกับน้ำมันจะกลายเป็นก้อนอนุภาคก้อนใหม่ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำทำให้ยากต่อการแยก ซึ่งสอดคล้องกับกฎของสโตค ในเรื่องของความแตกต่างของความหนาแน่น โดยสาเหตุที่น้ำมันและอนุภาคไม่สามารถแยกตัวออกจากกันได้ อาจเนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการแยกที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นหากมีการเพิ่มระยะเวลาในการแยกขึ้น อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) เป็นวิธีหนึ่งที่มีแนวโน้มจะช่วยให้ระยะเวลาในการแยกสูงขึ้นได้ ซึ่งการทดลองนี้จะนำเสนอในหัวข้อถัดไป

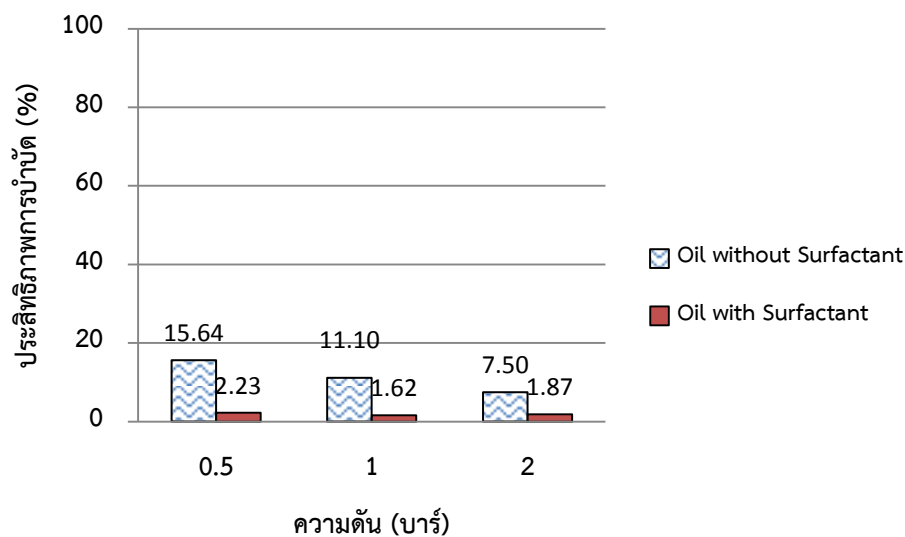


รูปที่ 4- 6 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค

4.2.2.2 ผลการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ไม่ผสมสารลดแรงตึงผิวจากผลการทดลองในรูปที่ 4-6 สามารถอธิบายผลที่ได้ คือที่ความดัน 0.5 1 และ 2 บาร์ ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันเท่ากับ 15.85% 10.36% และ 7.49% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความดันที่ใช้ในการทดลอง กล่าวคือ ยิ่งความดันสูงขึ้นประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันก็มีแนวโน้มที่จะลดลง สาเหตุของปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดจากการที่ความดันที่สูงก่อให้เกิดการแตกตัวของหยดน้ำมันกลายเป็นหยดน้ำมันที่มีขนาดเล็กลง ซึ่งปกติแล้วไฮโดรไซโคลนจะไม่สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีนักตามกฎของสโตค โดยเมื่ออนุภาคเล็กลงส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนช้าลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดลงเมื่ออนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็ก (Changirwa และคณะ, 1999) นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ผสมสารลดแรงตึงผิว จากรูปที่ 4-7 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนอยู่ที่ประมาณ 1 - 2% โดยไม่มีผลกระทบจากความดันเดินระบบ ค่าประสิทธิภาพการบำบัดที่ต่ำเนื่องจากน้ำมันดังกล่าวอยู่ในรูปของอิมัลชัน ส่งผลให้อนุภาคของน้ำมันมีความเสถียรสูง กล่าวคืออนุภาคน้ำมันมีขนาดเล็กมากจึงทำให้การแยกอนุภาคน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนในกรณีนี้เป็นไปได้ยาก

แม้ว่าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส จะมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันต่ำ แต่ความเข้มข้นของน้ำมันที่ทางออกด้านบนมีค่าสูงขึ้นดังตารางที่ 4-4 โดยคำนวณมาจากการหาค่าปริมาณน้ำมันด้วยวิธีการซีโอดี ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการนำกลับน้ำมันและใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนส่งต่อไปให้กระบวนการอื่นต่อไป ดังนั้น หากสามารถปรับปรุงให้อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนให้มีประสิทธิภาพการแยกน้ำมันและของแข็งสูงขึ้น จะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำกลับน้ำมันและลดปริมาณของแข็งในน้ำเสียลงก่อนการบำบัดในขั้นต่อไปได้



รูปที่ 4- 7 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน

ตารางที่ 4- 4 ค่าซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร) ของน้ำปนเปื้อนน้ำมันที่ผ่านการแยกด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

ความดัน (บาร์)	น้ำปนเปื้อนน้ำมันที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิว		น้ำปนเปื้อนน้ำมันที่มีสารลดแรงตึงผิว	
	บน	ล่าง	บน	ล่าง
เริ่มต้น	2340		5640	
0.5	2462	1440	5682	5330
1	2408	880	5664	5590
2	2370	960	5658	5642

4.3 ผลการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคของแข็งและน้ำมัน

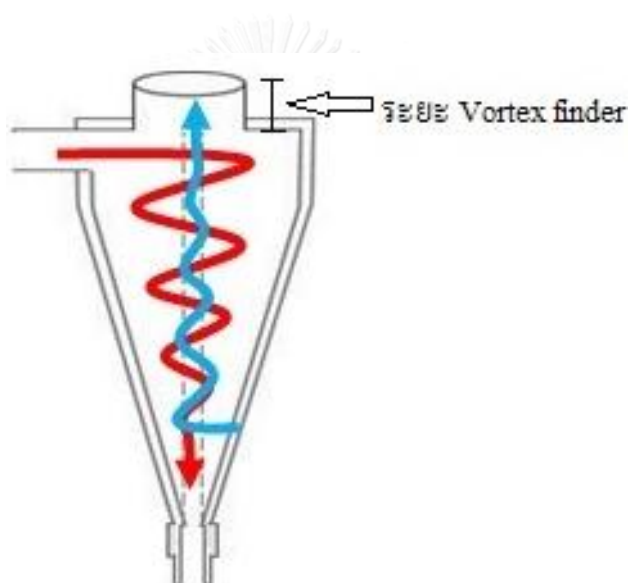
การทดลองในส่วนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ดังนี้

4.3.1 การปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

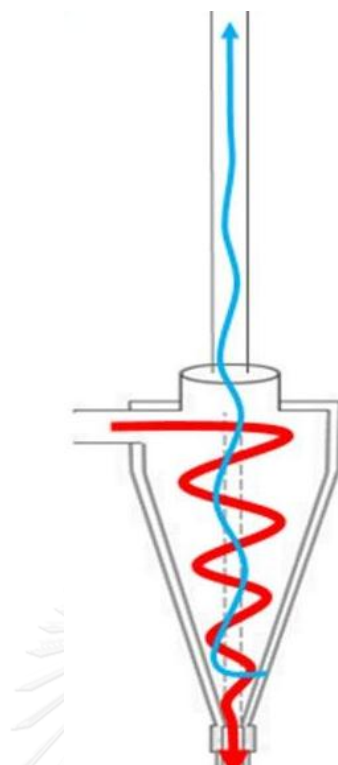
4.3.2 การปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

4.3.1 ผลการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคของแข็งและน้ำมันโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

การทดลองในส่วนนี้จะทำการปรับปรุงไฮโดรไซโคลนให้มีระยะทางของทางออกด้านบน (Vortex finder) เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 4-9 โดยการเพิ่มระยะของ Vortex finder เพิ่มขึ้น 20 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่กำหนดขึ้นมาจากความยาวท่อนแรกของทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ส่งผลให้อนุภาคมีเวลาอยู่ในไฮโดรไซโคลนนานขึ้น เป็นผลให้อนุภาคมีเวลาในการแยกตัวออกจากน้ำมันมากขึ้นตามไปด้วยและน่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสูงขึ้นได้



รูปที่ 4- 8 ลักษณะการไหลของไฮโดรไซโคลนก่อนการเพิ่มระยะ Vortex finder



รูปที่ 4- 9 ลักษณะการไหลของไฮโดรไซโคลนหลังการเพิ่มระยะ Vortex finder

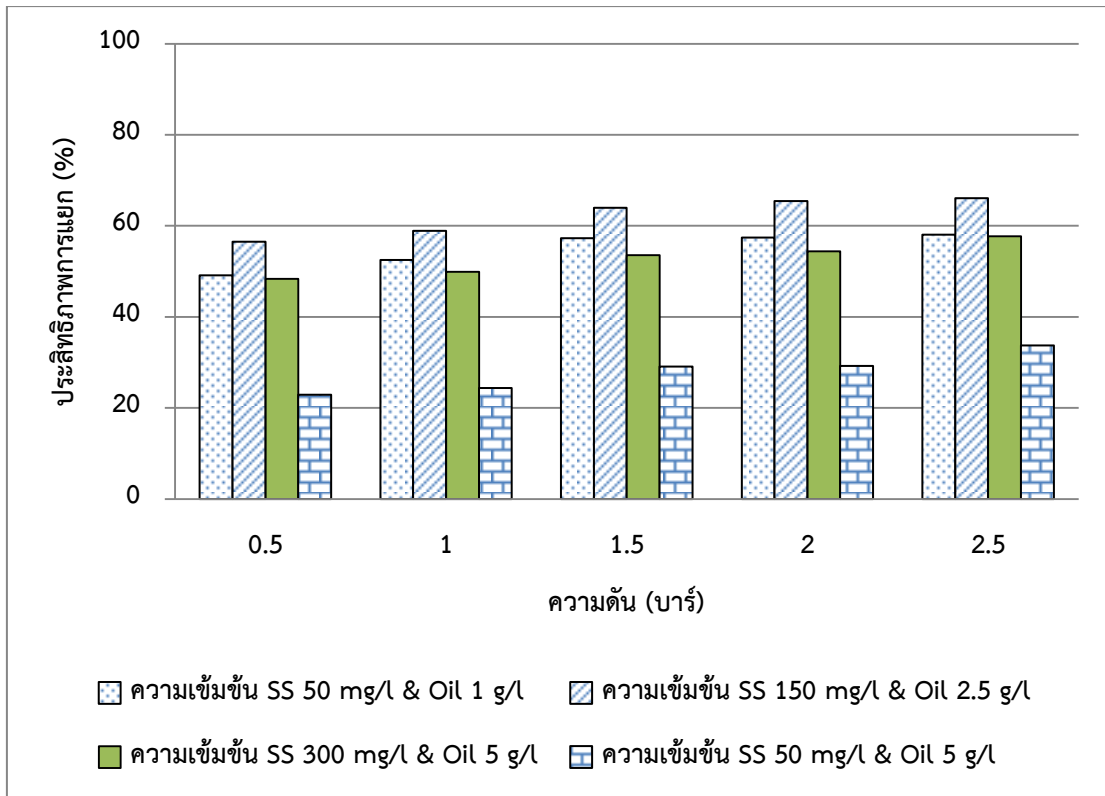
ในการทำการทดลองส่วนนี้ศึกษาน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่มีความเข้มข้นของอนุภาค และน้ำมัน ปริมาณแตกต่างกัน 4 ค่า ซึ่งเป็นตัวแทนของน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่เกิดขึ้นจริง เพื่อที่จะได้ทราบถึงข้อจำกัดในการนำไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส มาใช้ในการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันที่มีอนุภาคของแข็ง ได้แก่

- 1) ความเข้มข้นอนุภาค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำมัน 1 กรัมต่อลิตร
- 2) ความเข้มข้นอนุภาค 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำมัน 2.5 กรัมต่อลิตร
- 3) ความเข้มข้นอนุภาค 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำมัน 5 กรัมต่อลิตร
- 4) ความเข้มข้นอนุภาค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำมัน 5 กรัมต่อลิตร

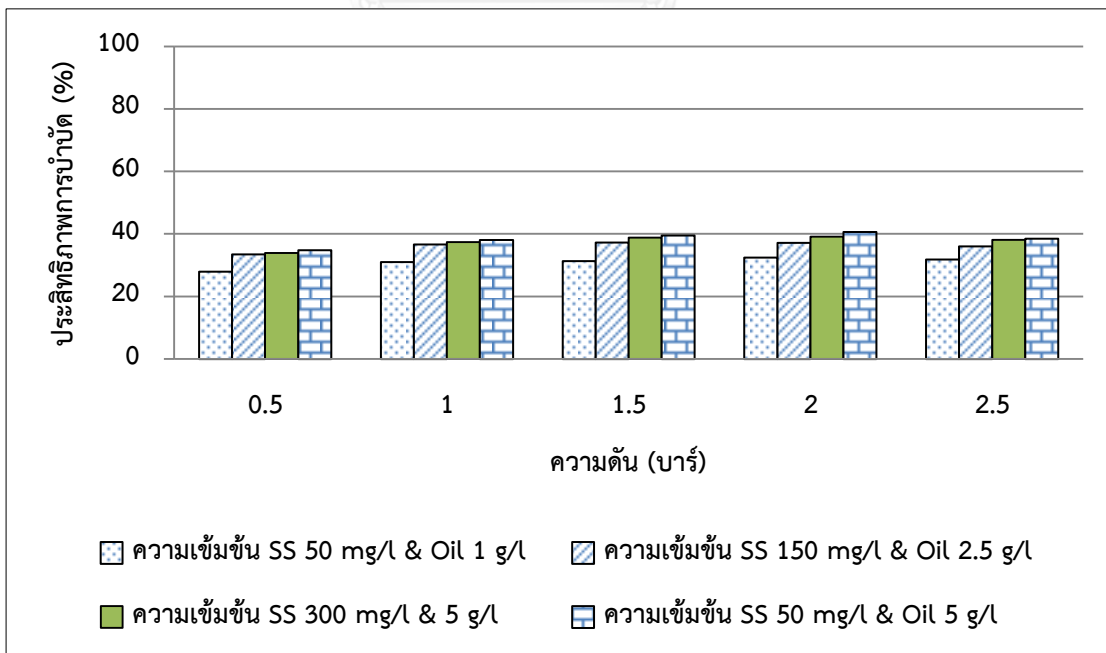
ในขั้นตอนนี้เลือกใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางที่ทางออกส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน 9 มิลลิเมตร ทำการทดลองเดินระบบโดยปรับความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนที่ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 บาร์ เก็บตัวอย่างที่ทางเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) และนำตัวอย่างของผสมมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ปริมาณน้ำมัน คำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคทรายของไฮโดรไซโคลน และคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลน จากสมการ

ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สมการที่ (4.1) (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.3)

จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4-10 และรูปที่ 4-11 พบว่าการแยกอนุภาคของแข็งในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 4 ชนิดด้วยไฮโดรไซโคลนที่เพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) มีค่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 30 - 65% และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันอยู่ที่ประมาณ 30 - 40% โดยมีผลจากความดันเดินระบบซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลของความดันจ่ายเข้าที่ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 บาร์ พบว่าผลการทดลองเป็นไปตามทฤษฎีที่ว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคจะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความดันจ่ายเข้าเปรียบได้กับการเพิ่มอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน โดยความสัมพันธ์เป็นดังตารางที่ 4-5 จากอัตราการไหลที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ($V_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$) ก็จะสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่งผลให้ความเร่งหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ($a_c = \frac{2V_y^2}{D_c}$) เนื่องจากความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนเป็นตามกฎของสโตค ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อความเร่งหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นความเร็วของอนุภาคในการตกตะกอนก็จะสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น (สุภนิช เลิศลาภวสิน, 2558) แต่จะเห็นได้ว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่มีความเข้มข้นอนุภาค 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นน้ำมัน 5 กรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคที่ต่ำกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่น เนื่องมาจากในน้ำเสียสังเคราะห์ชนิดนี้มีปริมาณน้ำมันมากแต่มีปริมาณอนุภาคน้อย ทำให้น้ำมันที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ไปจับตัวเป็นก้อนกับอนุภาคทั้งหมด ส่งผลให้ยากต่อการที่อนุภาคจะแยกตัวออกจากน้ำมัน กล่าวคือเมื่ออนุภาครวมตัวกับน้ำมัน กลายเป็นอนุภาคก้อนใหม่ที่มีความถ่วงจำเพาะต่ำ ส่งผลให้ยากต่อการแยก ซึ่งสอดคล้องกับกฎของสโตค ในเรื่องของความแตกต่างของความหนาแน่น โดยในกรณีนี้ความดันที่ใช้ในการทดลองและความยาวของระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) อาจไม่เพียงพอต่อการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันชนิดนี้



รูปที่ 4- 10 ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นต่างๆ

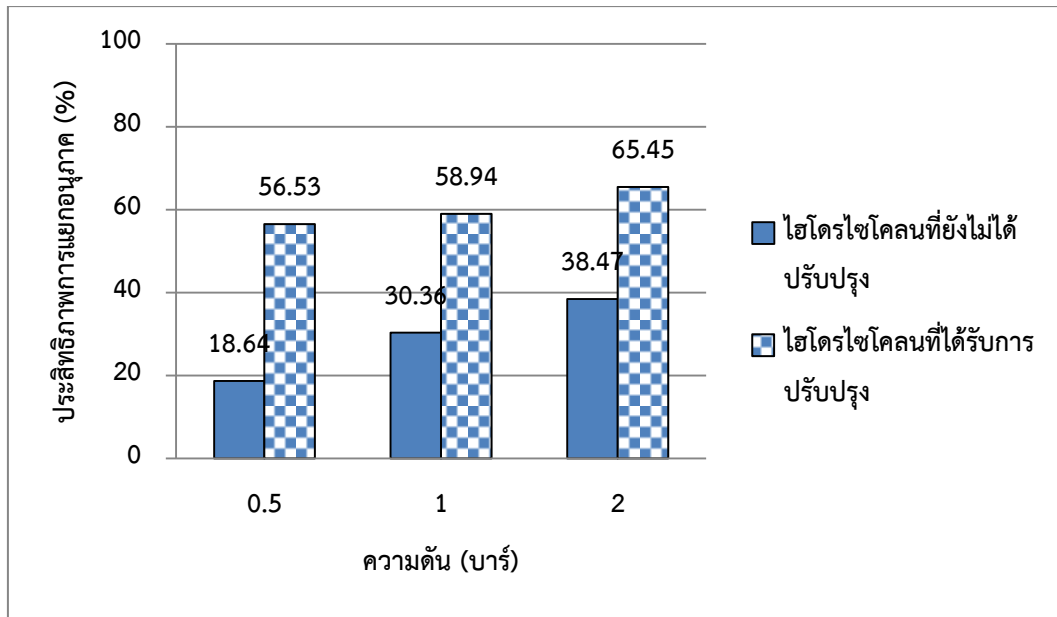


รูปที่ 4- 11 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

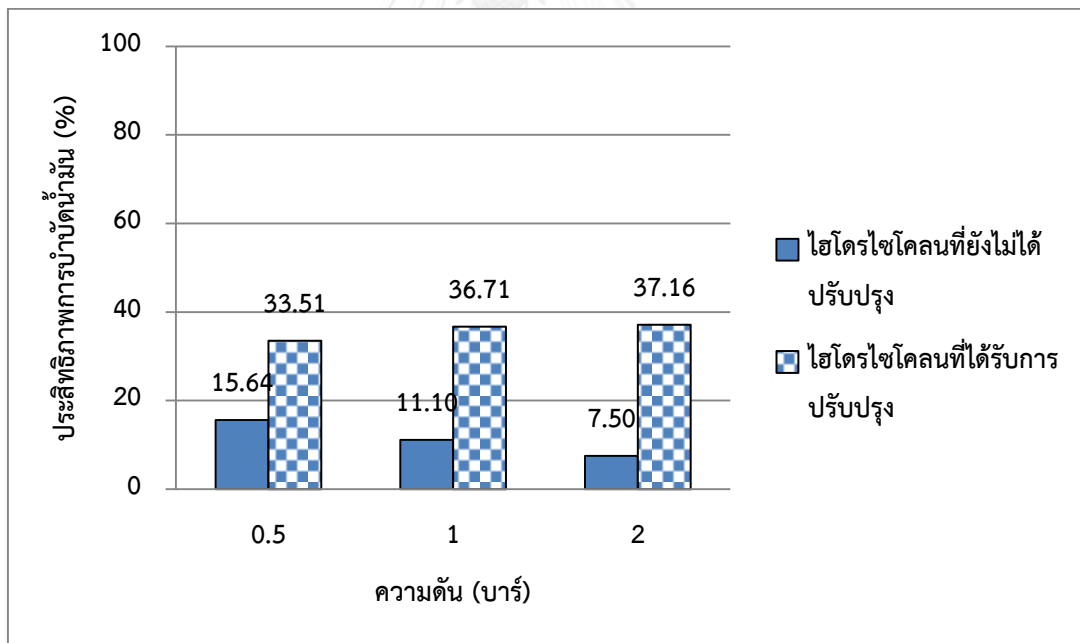
ตารางที่ 4- 5 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของไฮโดรไซโคลนที่ความดันจ่ายเข้าแตกต่างกัน

ความดันจ่าย เข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)		
	ทางเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
0.5	0.600	0.537	0.063
1	0.763	0.690	0.073
1.5	0.861	0.781	0.080
2	1.255	1.167	0.088
2.5	1.481	1.375	0.106

จากผลการทดลองข้างต้นเมื่อนำไฮโดรไซโคลนที่ยังไม่ได้เพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) กับไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) มาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน ที่ความเข้มข้นน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นเดียวกัน คือ ความเข้มข้นอนุภาค 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นน้ำมัน 2.5 กรัมต่อลิตร และที่ความดันเดียวกัน คือ 0.5 1 และ 2 บาร์ ดังรูปที่ 4-12



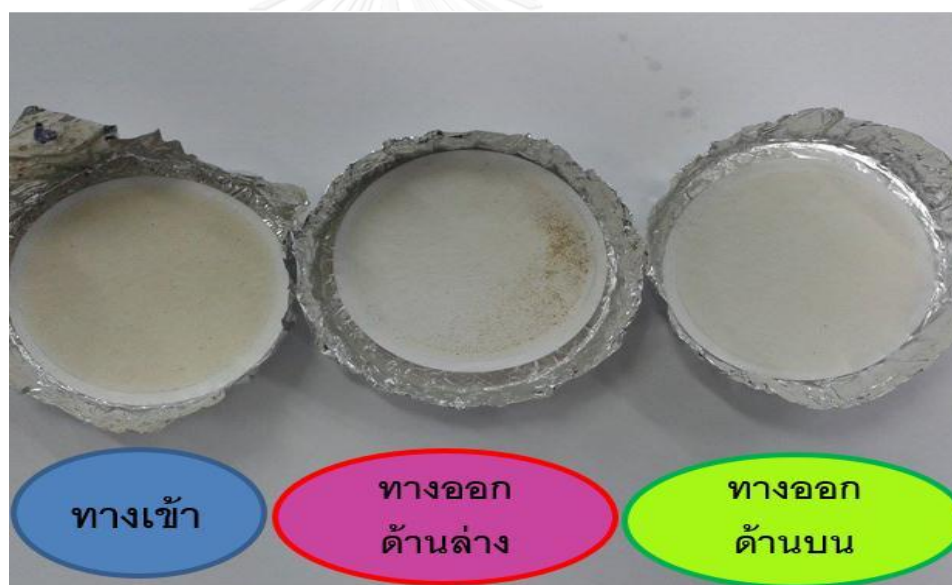
(ก)



(ข)

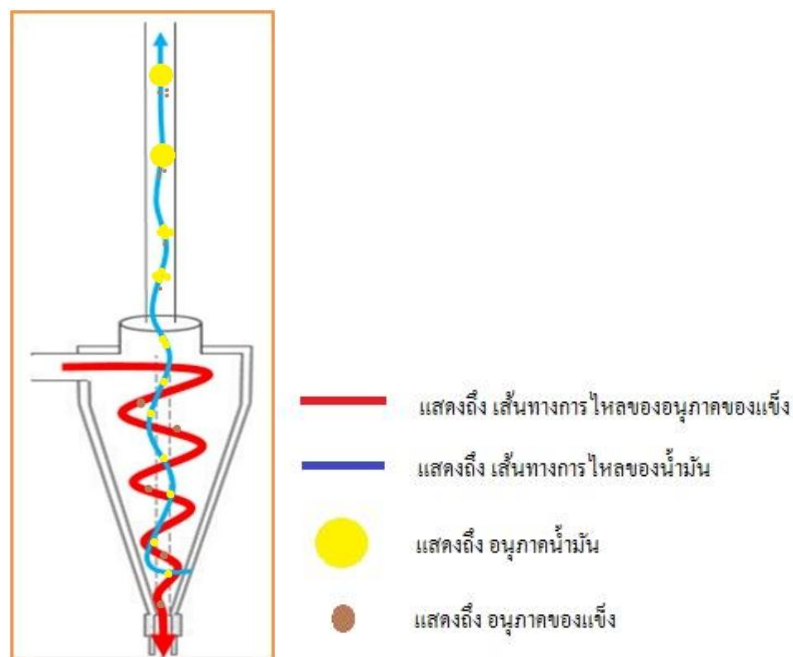
รูปที่ 4- 12 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน ก่อนและหลังเพิ่มระยะ Vortex finder ของน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 150mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l

จากรูปที่ 4-12 (ก) และรูปที่ 4-12 (ข) จะเห็นได้ว่า ไฮโดรไฮโคลนที่ผ่านการปรับปรุงมีประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะของ Vortex finder ที่เพิ่มขึ้นทำให้ระยะที่เกิดการหมุนเหวี่ยงบริเวณท่อที่ต่อออกไปเพิ่มขึ้นส่งผลให้อนุภาคที่ติดอยู่กับน้ำมันมีเวลาพอที่จะตกกลับลงมา และแรงเฉือนทำให้อนุภาคที่จับตัวกับน้ำมันแตกออกจากกัน และหลุดออกจากไฮโดรไฮโคลนผ่านทางออกด้านล่าง โดยสามารถเห็นได้ชัดเจนจากอนุภาคที่ออกจากอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนหลังกรองผ่านกระดาษกรองดังรูปที่ 4-13 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ผิวกระดาษกรองส่วนทางออกด้านบนมีทรายติดอยู่น้อยลงกว่าเดิมมากเมื่อเทียบกับผิวกระดาษกรองส่วนทางออกด้านบนของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนที่ยังไม่ได้ทำการปรับปรุง ดังรูปที่ 4-5 ในขณะที่น้ำมันที่ไม่มีการปนเปื้อนของอนุภาคจะหลุดออกทางด้านบน นอกจากนั้นการเพิ่มขึ้นของระยะทางออกด้านบนส่งผลให้น้ำมันมีเวลาในการรวมตัวกันนานขึ้นจนมีขนาดใหญ่ และหลุดออกจากไฮโดรไฮโคลนได้ง่ายยิ่งขึ้น กลไกการทำงานของไฮโดรไฮโคลนที่ได้รับการปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 4-14



รูปที่ 4- 13 อนุภาคที่ออกมาจากไฮโดรไฮโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

จากผลการทดลองข้างต้นสามารถสรุปได้ว่า การเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) ทำให้ไฮโดรไฮโคลนชนิด 2 เฟส มีความสามารถในการแยกน้ำมันใกล้เคียงกับไฮโดรไฮโคลนชนิด 3 เฟส มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมันดีขึ้น



รูปที่ 4- 14 กลไกการไหลภายในไฮโดรไซโคลนหลังการเพิ่มระยะ Vortex finder

4.3.2 ผลการศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคของแข็งและน้ำมันโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้งกริทพอต (Grit pot)

การทดลองในส่วนนี้จะนำ Grit pot มาติดตั้งไว้ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) ซึ่ง Grit pot ที่นำมาติดตั้งมีปริมาตร 860 มิลลิลิตร และเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก ดังรูปที่ 4-15 กลไกการทำงานของ Grit pot อยู่ในหัวข้อ 2.6.5. เพื่อให้ไขมันที่ปนเปื้อนมากับอนุภาคของแข็งแยกออกจากกัน และลอยขึ้นมาติดบนผิวน้ำโดยคาดว่าวิธีการนี้จะส่งผลให้การแยกอนุภาคของแข็งทำได้ง่ายขึ้นเนื่องจากไม่มีไขมันมาปนเปื้อน นอกจากนั้น อาจจะมีไขมันบางส่วนที่ลอยขึ้นมาติดบนผิวน้ำไหลหมุนวนย้อนกลับขึ้นไปออกทางออกด้านบนของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนอีกด้วย ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับไฮโดรไซโคลนอีกทางหนึ่ง



รูปที่ 4- 15 อุปกรณ์ Grit pot

โดยในการทำการทดลองส่วนนี้จะทำการศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน 4 ชนิด และสภาวะการทดลองเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.3 เก็บตัวอย่างที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกด้านบน (Overflow) ส่วนน้ำตัวอย่างที่สะสมใน Grit pot นั้นสามารถเก็บได้โดยตรงจากการถอด Grit pot จากทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ซึ่งจะเก็บตามเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot ที่กำหนดไว้ คือ 5 10 และ 15 นาที และนำตัวอย่างของผสมมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) และปริมาณน้ำมัน คำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคทรายของไฮโดรไซโคลนและคำนวณหาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของไฮโดรไซโคลนจากสมดุลมวล (Mass balance) ซึ่งมวลที่จ่ายเข้าและมวลที่แยกออกทางด้านบน สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลกับความเข้มข้น เช่นเดียวกับการคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนธรรมดา แต่การคำนวณมวลที่สะสมใน Grit pot สามารถคำนวณได้จากมวลที่จ่ายเข้าลบกับมวลที่แยกออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot ผลการคำนวณที่ได้จะอยู่ในรูปของหน่วยน้ำหนักต่อเวลา (สนธิลักษณ์ สุขะสุนันท์, 2552) ดังสมการที่ (4.4) (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.4)

$$E_T = \frac{Q_f C_f T_f - Q_o C_o T}{Q_f C_f T_f} \times 100 \quad (4.4)$$

เมื่อ E_T = ประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง Grit pot

Q_f = อัตราการไหลเข้า (L/s)

C_f = ความเข้มข้นของผสมที่เข้าไฮโดรไซโคลน (mg/l)

Q_o = อัตราการไหลที่ทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน (L/s)

C_o = ความเข้มข้นของผสมที่ออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลน (mg/l)

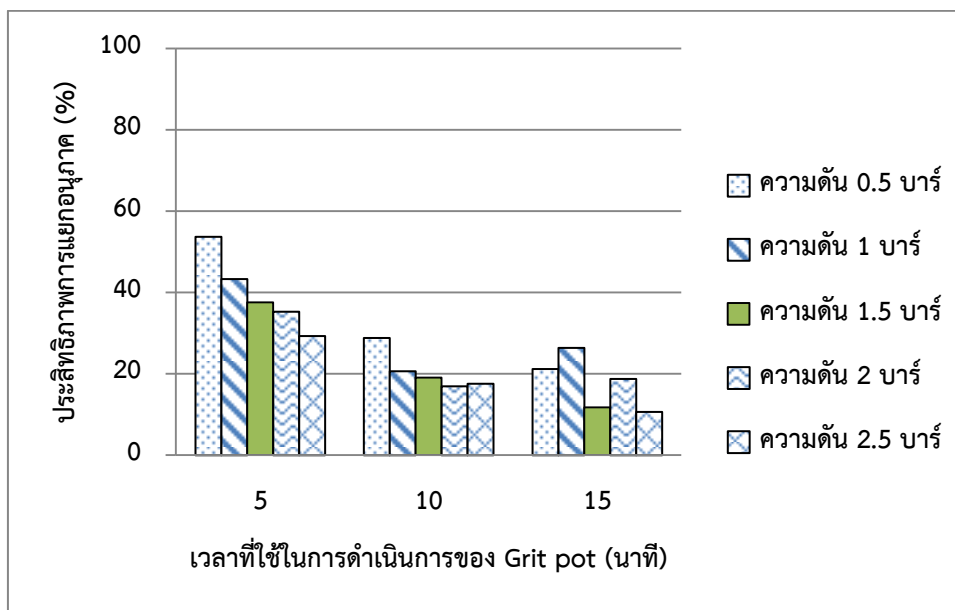
T = เวลาที่ใช้ในการเดินระบบ (min)

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-16 – รูปที่ 4-19 พบว่าการแยกอนุภาคของแข็ง และน้ำมันใน น้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 4 ชนิด ด้วยไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุง และติดตั้ง Grit pot มีค่าประสิทธิภาพการแยกอนุภาคอยู่ที่ประมาณ 80% และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันอยู่ที่ ประมาณ 90% โดยมีผลจากความดันเดินระบบ และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot ซึ่ง สามารถอธิบายได้ ดังนี้

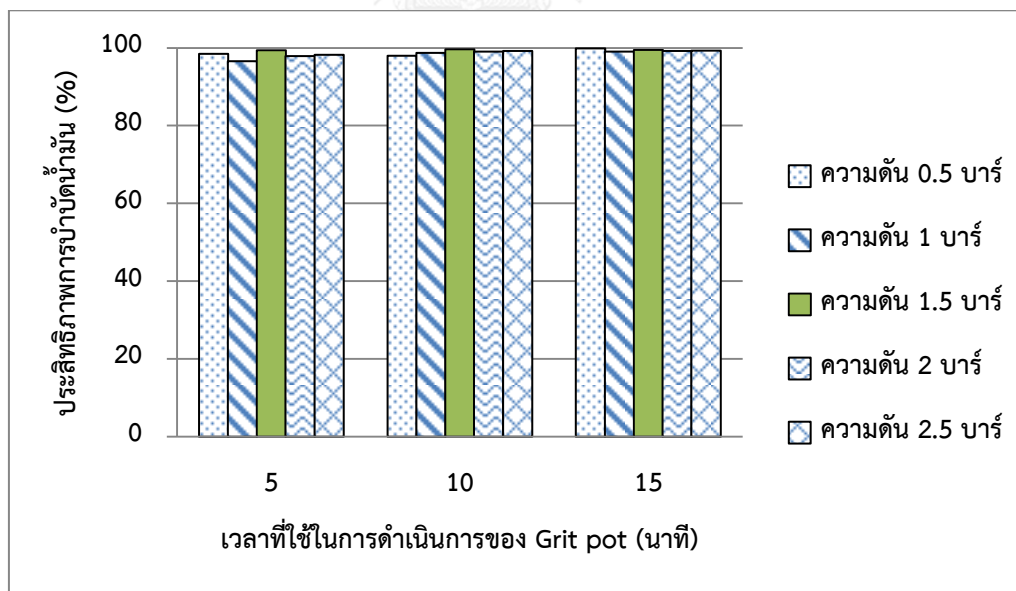
เมื่อเปรียบเทียบผลของความดันจ่ายเข้า พบว่าที่ความดันจ่ายเข้าต่ำมีประสิทธิภาพการแยก อนุภาคที่ดีกว่าความดันจ่ายเข้าสูง และ พบว่า ที่เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของไฮโดรไซโคลนที่ ปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน และติดตั้ง Grit pot หากมีค่าน้อยให้ประสิทธิภาพ การแยกอนุภาคที่ดีกว่าเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot ที่สูงขึ้น เนื่องจากในการแยกอนุภาค เมื่ออนุภาคตกลงใน Grit pot ความดันที่น้อยจะส่งผลให้อนุภาคที่อยู่ใน Grit pot ไม่เกิดการกระจาย ตัวและไหลย้อนกลับขึ้นไปออกทางออกด้านบน กล่าวคือ เมื่อความดันเดินระบบต่ำทำให้อัตราการ ไหลที่ทางออกด้านล่างน้อยลง ส่งผลให้ความปั่นป่วนใน Grit pot และการไหลกลับของอนุภาคจาก Grit pot ขึ้นไปที่ทางออกด้านบนน้อยลงตามไปด้วย ในทางกลับกันถ้าความดันในการเดินระบบต่ำ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคน่าจะมีค่าต่ำกว่าที่ใช้ความดันเดินระบบสูง อย่างไรก็ตามพบว่า ที่ ความดันเดินระบบ 0.5 บาร์ ก็เพียงพอต่อการแยกอนุภาคออกแล้ว ในขณะที่ประสิทธิภาพการบำบัด น้ำมันก็สูงเป็นที่น่าพึงพอใจ นอกจากนี้การใช้ความดันในการเดินระบบต่ำก็สามารถประหยัดพลังงาน ได้ด้วย และเมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot เพิ่มมากขึ้นปริมาณอนุภาคที่สะสมใน Grit pot ก็จะมีมากขึ้นด้วย ทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้าสู่ Grit pot ดังนั้น อนุภาค ของแข็งจึงไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคมีค่าลดลง ซึ่ง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Puprasert (Puprasert และคณะ, 2004)

ส่วนประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมัน เมื่อเปรียบเทียบผลของความดันจ่ายเข้าที่ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 พบว่า ที่ความดันจ่ายเข้าสูงมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่ดีกว่าความดันจ่ายเข้าต่ำโดย เฉพาะที่ความดัน 0.5 บาร์ แต่ที่ความดัน 1 1.5 และ 2 บาร์มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน และเวลาที่ใช้ ในการดำเนินการของ Grit pot ที่ 5 10 และ 15 นาที พบว่าที่เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot ที่มากขึ้น มีประสิทธิภาพการแยกน้ำมันที่ดีกว่าเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot ที่ต่ำกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับการแยกอนุภาค เนื่องจากในการแยกน้ำมันต้องใช้ความดัน และเวลาที่มากกว่า เพื่อช่วยในการให้น้ำมันที่เกาะอยู่กับอนุภาคใน Grit pot แยกตัวออกจากกันและไหลย้อนกลับขึ้นไป ออกด้านบน

และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นอนุภาคและความเข้มข้นน้ำมันขาเข้าที่ปริมาณต่างๆ พบว่า ความเข้มข้นของอนุภาค และน้ำมัน ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมัน มากนัก

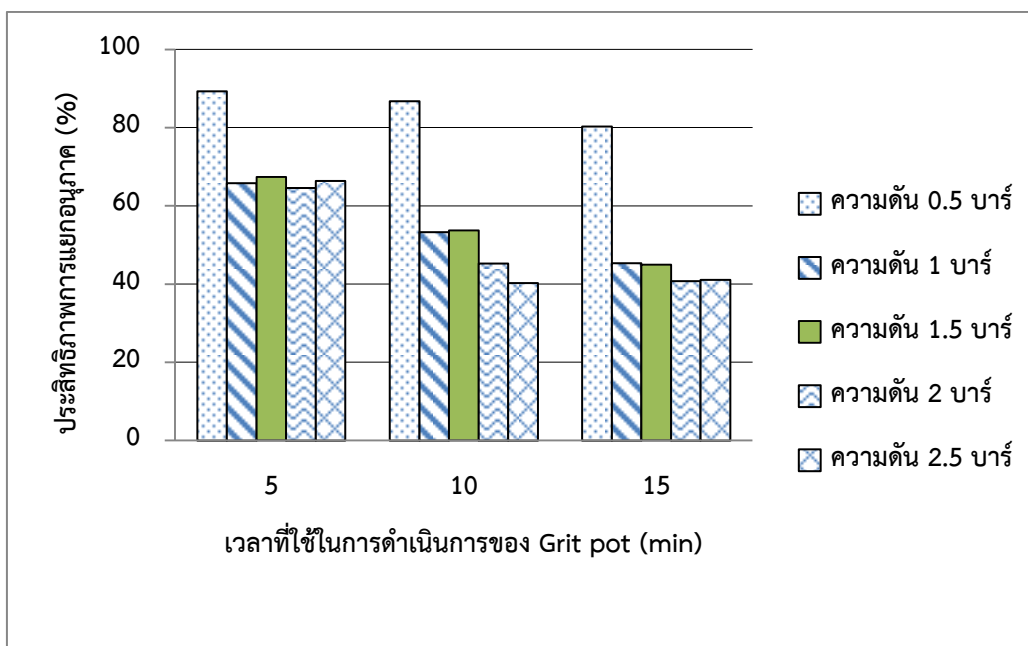


(ก)

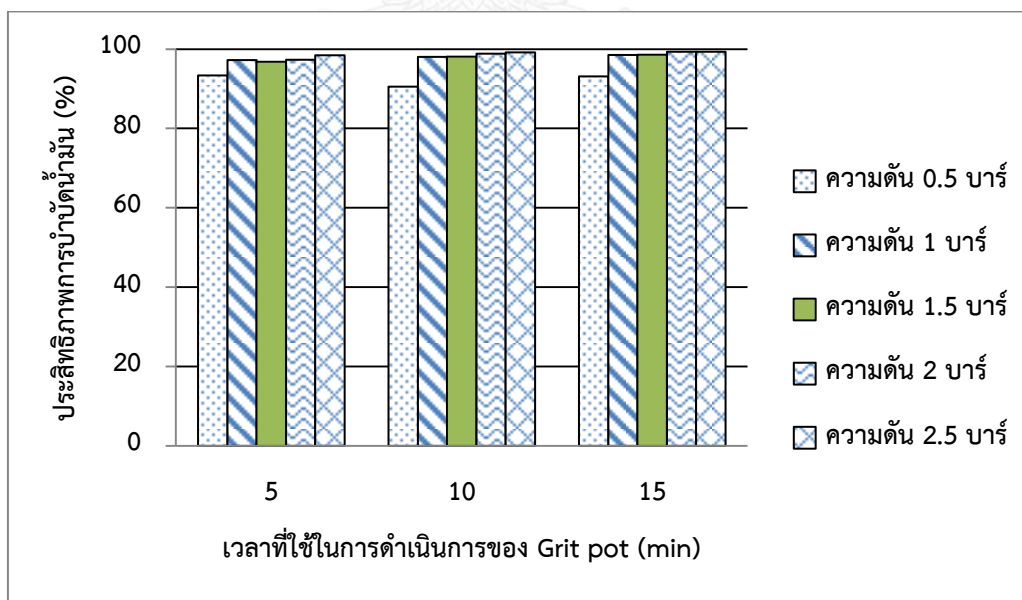


(ข)

รูปที่ 4- 16 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/l

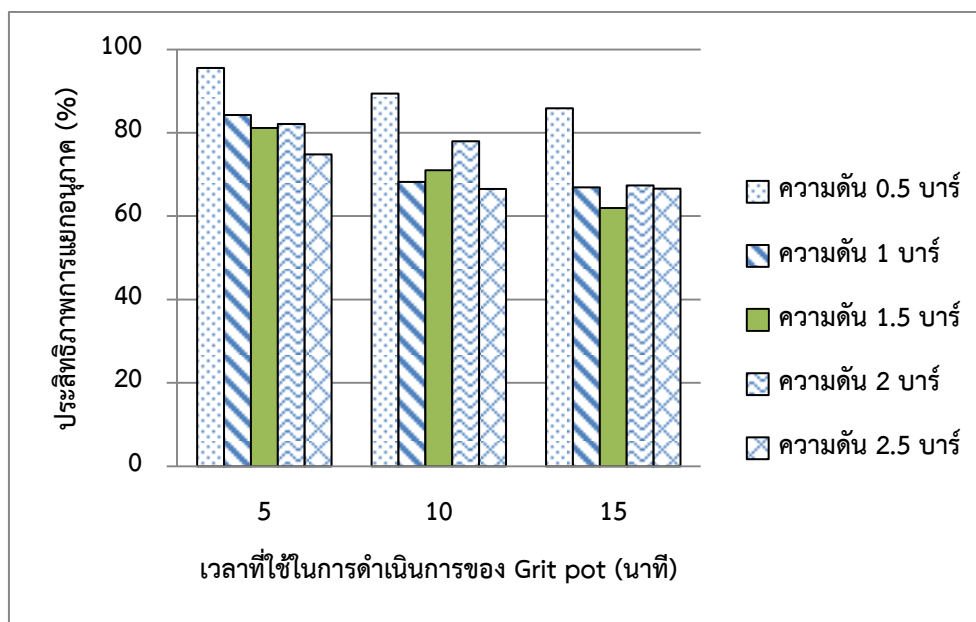


(ก)

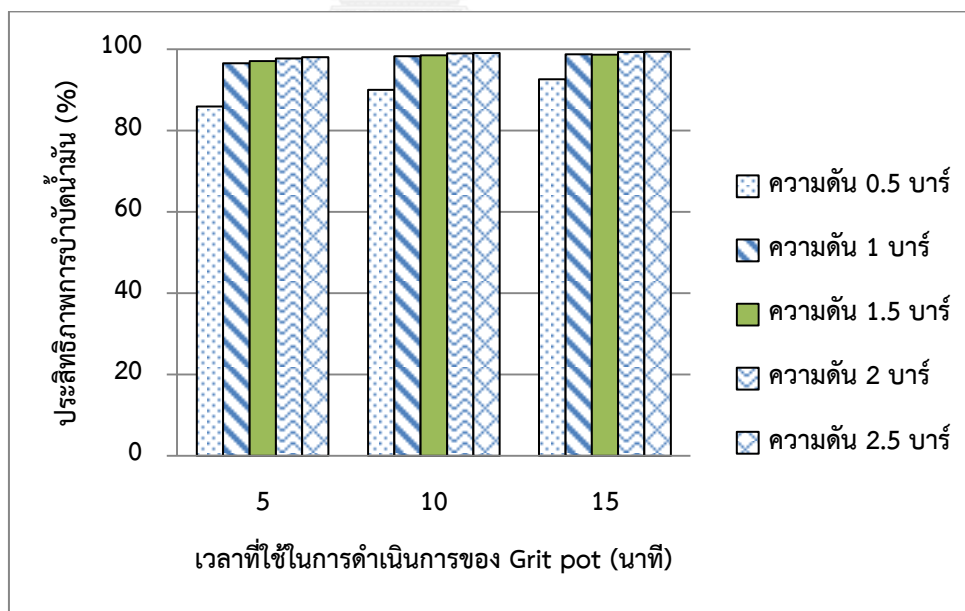


(ข)

รูปที่ 4- 17 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 150mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l

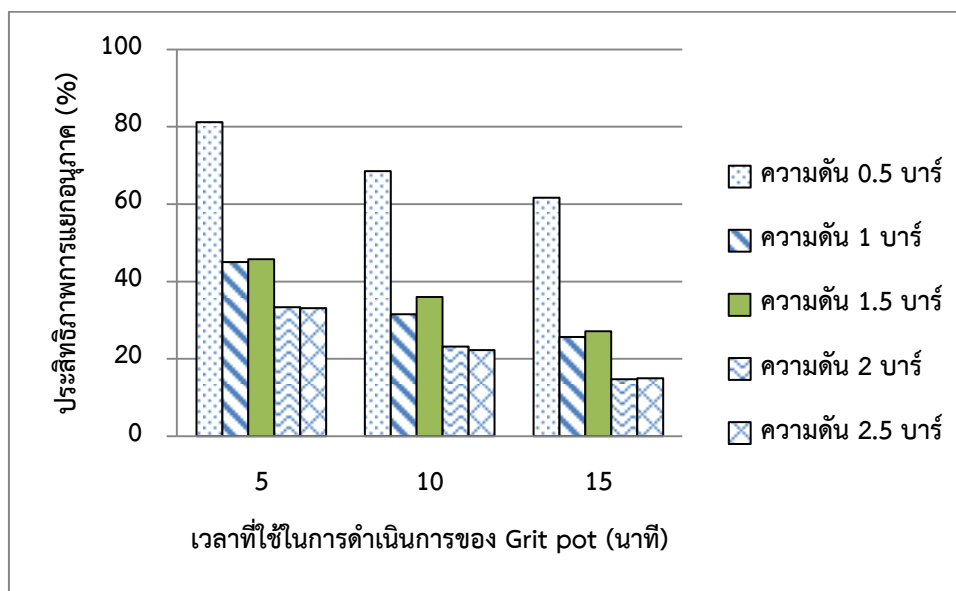


(ก)

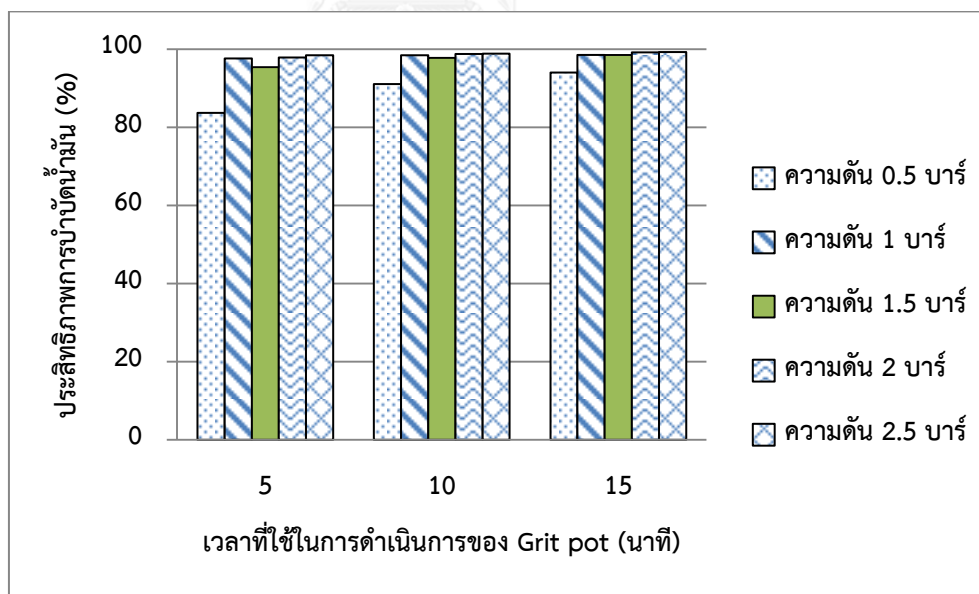


(ข)

รูปที่ 4- 18 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 300mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l



(ก)



(ข)

รูปที่ 4- 19 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและ (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของอนุภาค ระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุงโดยเพิ่มระยะทางออกด้านบน และไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุงโดยเพิ่มระยะทางออกด้านบน และติดตั้ง Grit pot เวลาในการดำเนินการของ Grit pot 5 นาที ที่สภาวะความดัน ความเข้มข้นอนุภาค และความเข้มข้นน้ำมัน เดียวกัน พบว่าไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุงโดยเพิ่มระยะทางออกด้านบนและติดตั้ง Grit pot จะมีความเข้มข้นของอนุภาคที่สะสมตัวใน Grit pot มากกว่าความเข้มข้นอนุภาคที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุงโดยเพิ่มระยะทางออกด้านบน ประมาณ 30 เท่า จึงง่ายต่อการขนส่ง และสะดวกต่อการนำไปกำจัดต่อไป ดังแสดงในตารางที่ 4-6 ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Puprasert (Puprasert และคณะ, 2004) ที่กล่าวว่า Grit pot ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก อนุภาคที่ไหลออกจากทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนเข้าสู่ Grit pot เกิดการสะสมตัวอยู่ภายใน Grit pot จึงทำให้มีความเข้มข้นของอนุภาคสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปที่ 4-20 สังเกตเห็นได้ว่ามีอนุภาคที่ติดค้างอยู่บนกระดาดทรงกรวยเป็นจำนวนมากอย่างชัดเจน

ตารางที่ 4- 6 เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน และไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบนที่ติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของอนุภาคที่แยกได้จากทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (mg/l)	
	ไฮโดรไซโคลนที่ปรับปรุงโดยการ เพิ่มระยะทางออกด้านบน	ไฮโดรไซโคลนที่ปรับปรุงโดยการเพิ่ม ระยะทางออกด้านบนและติดตั้ง Grit pot
0.5	368.93	4075.47
1	352.14	4920.47
2	287.22	7897.79



รูปที่ 4- 20 ปริมาณของอนุภาคที่แยกได้จากทางออกด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลอนที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และไฮโดรไซโคลอนที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน และติดตั้ง Grit pot

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าในการนำไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส แบบปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) และไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส แบบปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) ที่ติดตั้ง Grit pot มาใช้แยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันสามารถทำได้จริง อย่างไรก็ตาม ไฮโดรไซโคลอนทั้งสามชนิดดังกล่าวยังไม่สามารถแยกส่วนน้ำ และน้ำมันออกจากกันอย่างสมบูรณ์ ดังนั้น การทดลองในส่วนถัดไปจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ในการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันและอนุภาคของแข็ง

4.4 ผลการศึกษาการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส

การทดลองในส่วนนี้จะนำไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ออกแบบตามทฤษฎีของ Aurelle และ Ma (Aurelle Y. และ Ma F., 1994) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร มาใช้ในการศึกษาการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่มีของแข็ง โดยในการทำการทดลองส่วนนี้จะทำการศึกษากับน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน 4 ชนิด เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 4.3.1 และ 4.3.2 ทำการทดลองเดินระบบโดยปรับความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนที่ 0.5 1 1.5 2 และ 2.5 บาร์ เก็บตัวอย่างที่ทางเข้า (Inlet) ทางออกน้ำมัน ทางออกอนุภาค และทางออกน้ำ ทั้งหมด 4 จุด ดังรูปที่ 2-11 และนำตัวอย่างของผสมมาวิเคราะห์หาค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solid) ปริมาณน้ำมัน คำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลอนและคำนวณหาประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของไฮโดรไซโคลอน จากสมดุลมวล (Mass balance) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลกับความเข้มข้น เช่นเดียวกับการคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนธรรมดา จากสมการประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) สมการที่ (4.5) (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค.5)

$$E_T = \frac{M_u}{M} \times 100 \quad (4.5)$$

เมื่อ E_T M_u และ M คือ ประสิทธิภาพรวม มวลของอนุภาคที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านที่สนใจ (มวลต่อเวลา) และมวลของแข็งที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอน (มวลต่อเวลา) ตามลำดับ

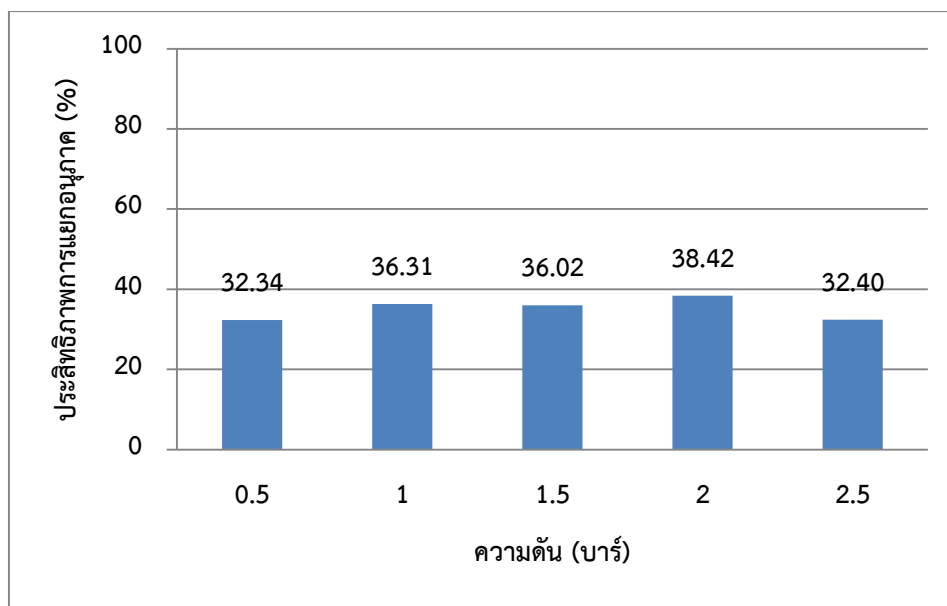
จากผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4-21 – 4-24 พบว่าการแยกอนุภาคของแข็ง และน้ำมันในน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันทั้ง 4 ชนิดด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคประมาณ 35 -50% และมีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันประมาณ 25-30% โดยมีผลกระทบจากความดันเดินระบบเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถอธิบายได้ 2 กรณี คือ

- (1) เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 และ 1.5 บาร์ ผลการทดลองจะเป็นไปตามทฤษฎีของไฮโดรไซโคลอนที่ว่า เมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และน้ำมันจะเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากการเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนเปรียบได้กับการเพิ่มอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลอน โดยสามารถสังเกตความสัมพันธ์ดังกล่าวได้จากตารางที่ 4-7 และเมื่ออัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลอนสูงขึ้นความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงก็จะสูงขึ้นเช่นกัน ($V_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$) ซึ่งส่งผลให้ความเร่งหนีศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ($a_c = \frac{2V_y^2}{D_c}$) เนื่องจากความเร็วของการตกตะกอนของอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนเป็นตามกฎของสโตค จะเห็นได้ว่าเมื่อความเร่งหนีศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้น

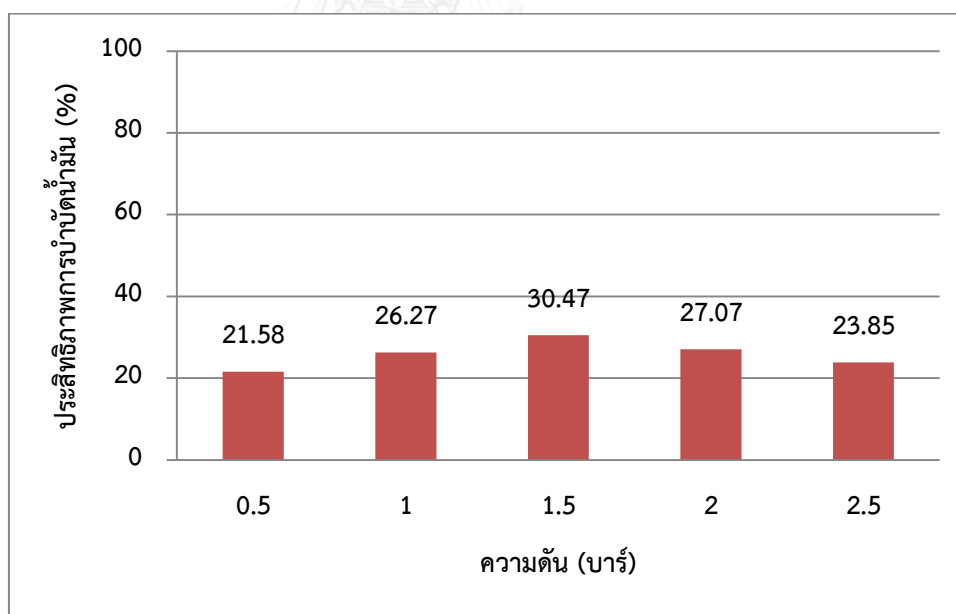
ความเร็วของอนุภาคในการตกตะกอนก็จะสูงขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น (ศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ, 2556)

- (2) แต่เมื่อเปรียบเทียบที่ความดันจ่ายเข้า 2 และ 2.5 บาร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และน้ำมันกลับลดลง ผลการทดลองที่ไม่สอดคล้องกับทฤษฎีนี้อาจเนื่องมาจากการที่เพิ่มความดันจ่ายเข้ามากเกินไปจะส่งผลให้อนุภาคเกิดการชนกันจนแตก และสึกกร่อนเนื่องมาจากการเกิดแรงเฉือน (Shear force) และความปั่นป่วน (Turbulence) ที่มากเกินไปภายในไฮโดรไซโคลอน ดังนั้นตามกฎของสโตค (Stokes's law) คือ $U_T = \frac{a_c(\Delta\rho)D_p^2}{18\mu}$ จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของอนุภาคและน้ำมันสึกกร่อนความเร็วในการตกตะกอนก็จะน้อยลง ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของไฮโดรไซโคลอนลดลงไปด้วย (Dwari, Biswas และ Meikap, 2004) (Husveg และคณะ, 2007)

เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นอนุภาคและความเข้มข้นน้ำมันขาเข้าที่ปริมาณต่างๆ พบว่าความเข้มข้นของอนุภาค และน้ำมัน ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมันนัก

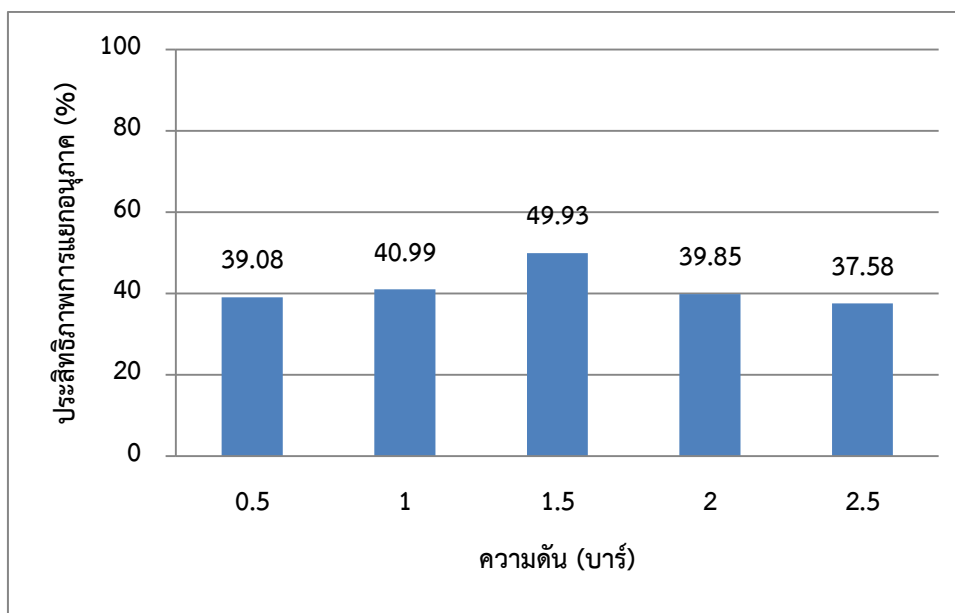


(ก)

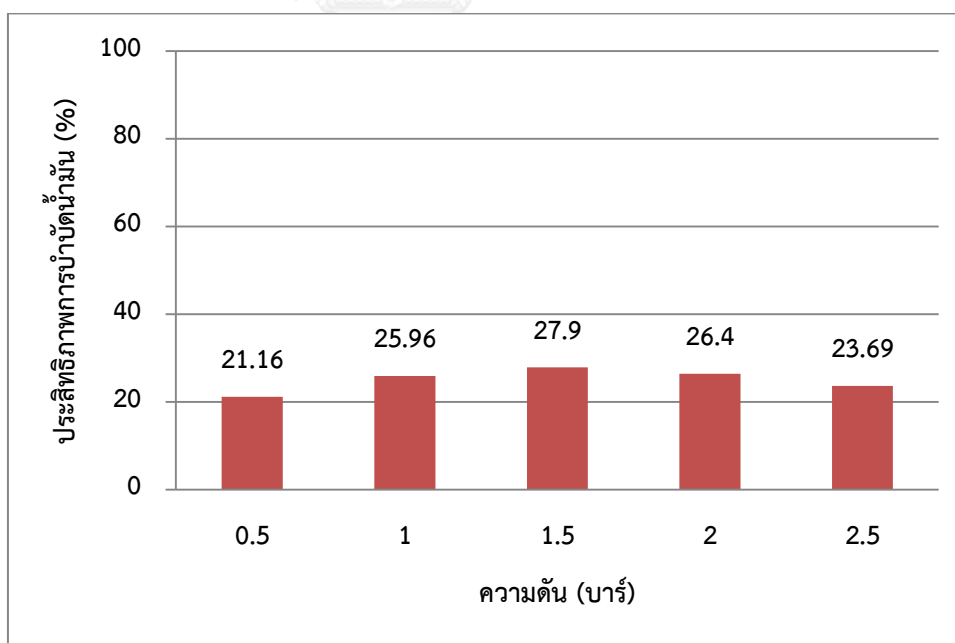


(ข)

รูปที่ 4- 21 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/l

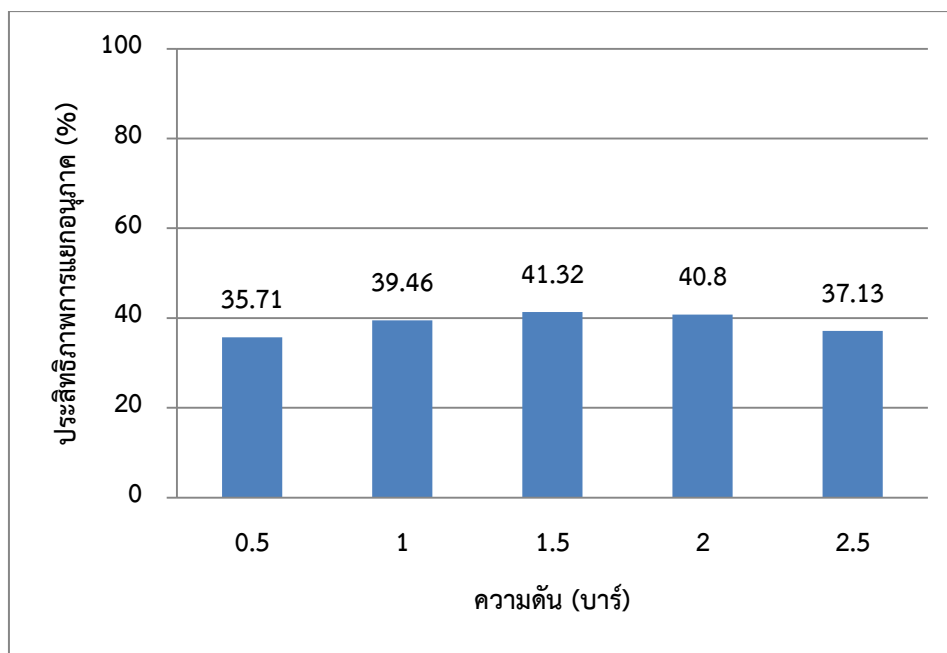


(ก)

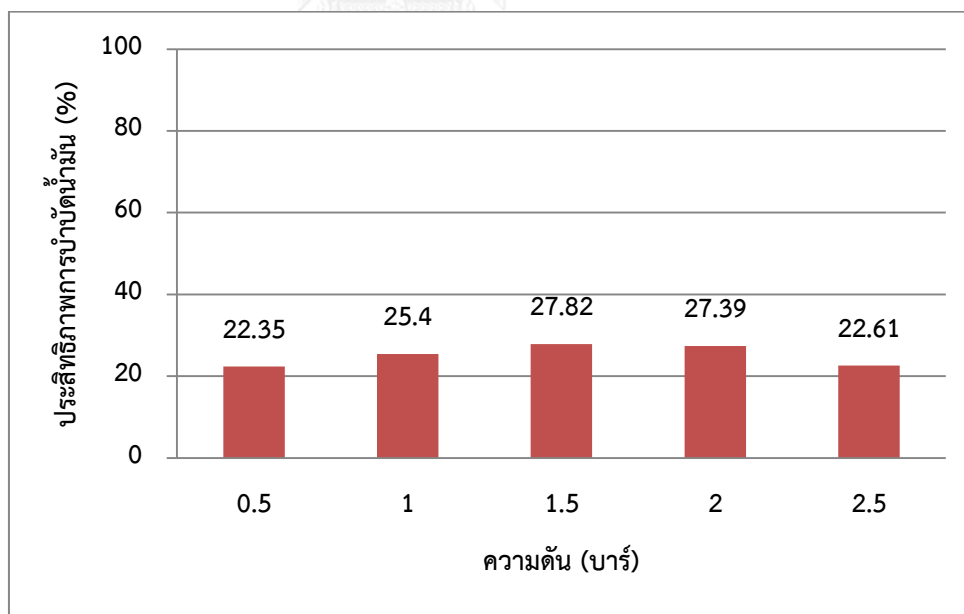


(ข)

รูปที่ 4- 22 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 150mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l

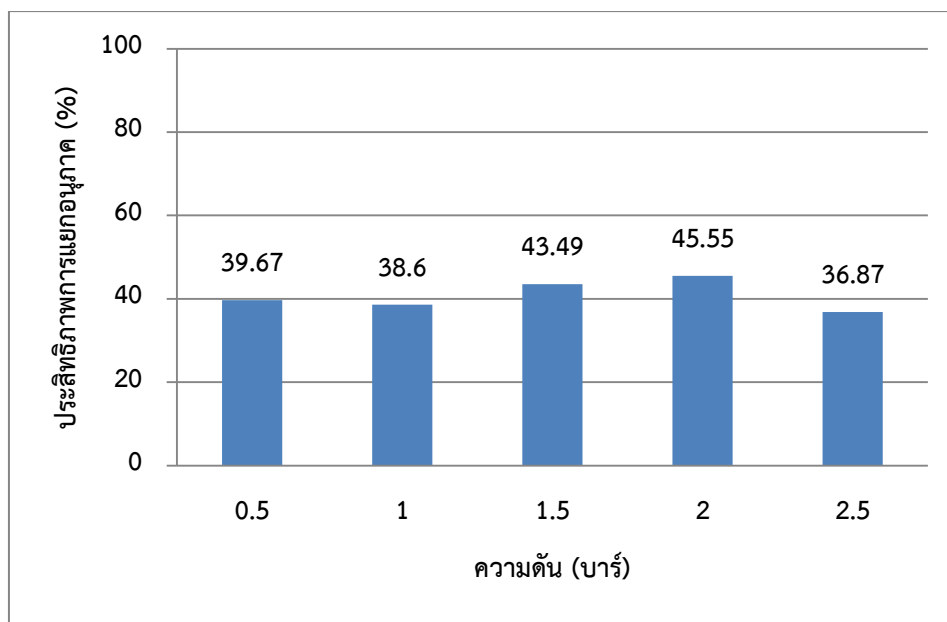


(ก)

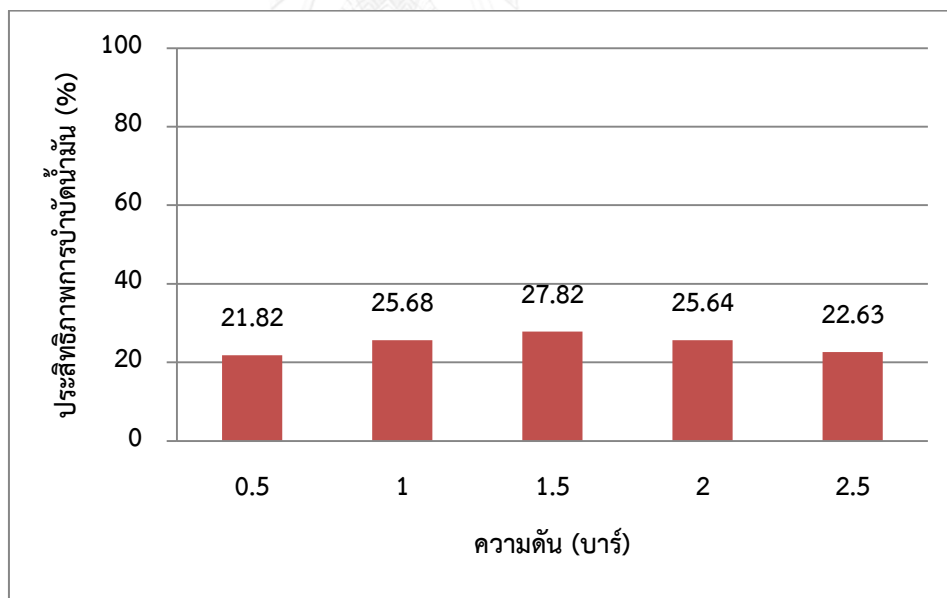


(ข)

รูปที่ 4- 23 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 300mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l



(ก)



(ข)

รูปที่ 4- 24 (ก) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค (ข) ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันของน้ำเสีย
สังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ความเข้มข้นอนุภาค 50mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l

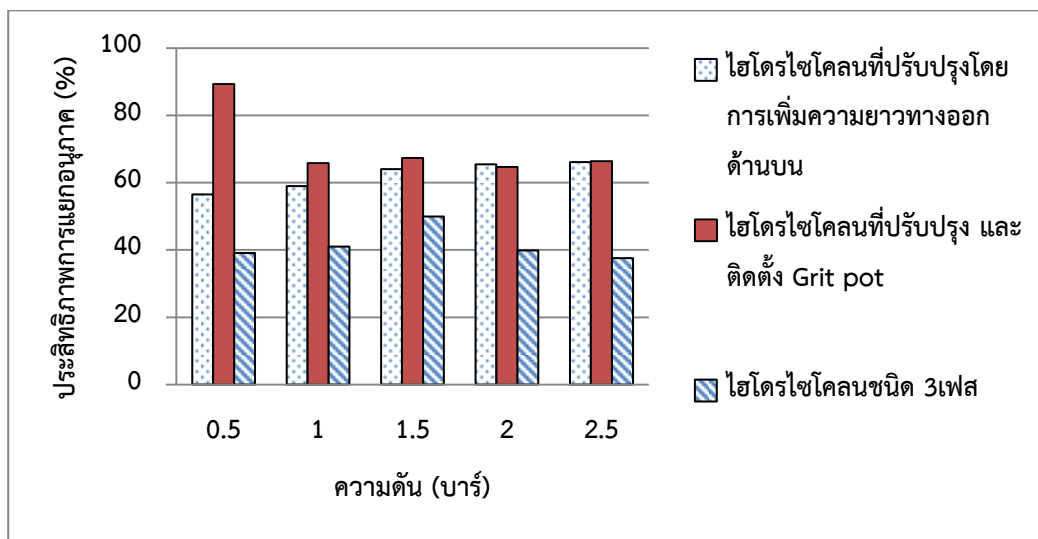
ตารางที่ 4- 7 อัตราการไหลเฉลี่ยของน้ำที่ทางเข้าและทางออกของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่ความดันจ่ายเข้าที่แตกต่างกัน

ความดันจ่าย เข้า (บาร์)	อัตราการไหล(ลิตร/วินาที)			
	ทางเข้า	ทางออกด้าน อนุภาค	ทางออกด้านน้ำ	ทางออกด้าน น้ำมัน
0.5	0.3784	0.0960	0.2760	0.0064
1	0.5010	0.1500	0.3500	0.0100
1.5	0.6772	0.2220	0.4420	0.0132
2	0.7974	0.2440	0.5380	0.0154
2.5	0.9098	0.2540	0.6380	0.0178

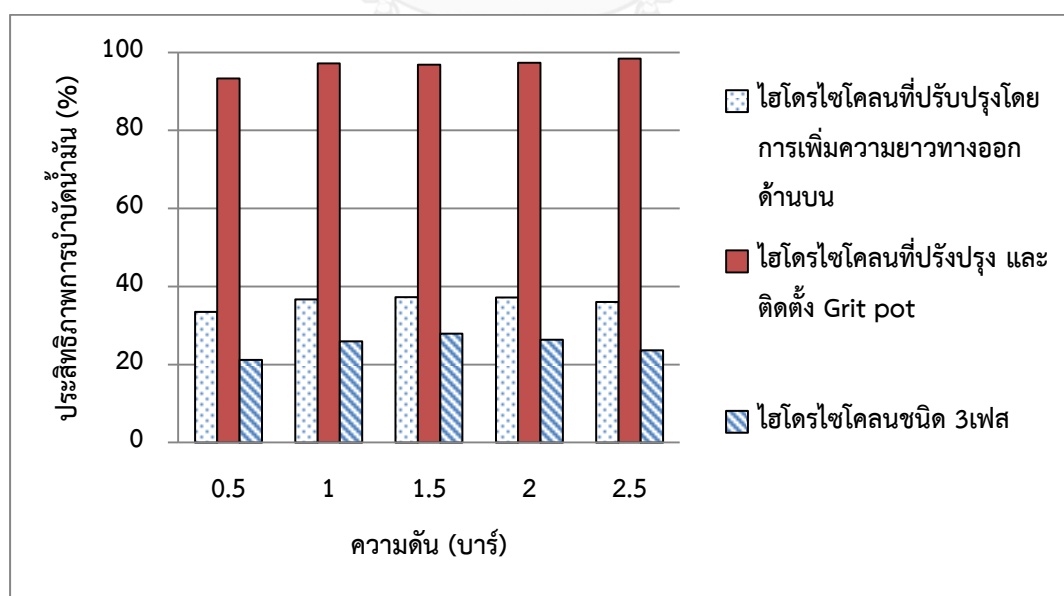
4.5 การเปรียบเทียบไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 ชนิด

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและประสิทธิภาพการแยกน้ำมันระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) ไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) ที่ติดตั้ง Grit pot ที่เวลาเดินระบบ 5 นาที และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5 g/l และที่สภาวะความดันเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4-25 และ 4-26 พบว่าไฮโดรไซโคลนที่ได้รับการปรับปรุง และติดตั้ง Grit pot มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคและประสิทธิภาพการแยกน้ำมันสูงที่สุด เนื่องจาก Grit pot ที่นำมาติดตั้งไว้ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีส่วนช่วยในการเก็บอนุภาค และน้ำมันให้มีเวลาการแยกตัวออกจากกันอีกขั้นหนึ่งก่อนที่จะปล่อยอนุภาคให้ไหลออกมาจากทางออกด้านล่าง แต่ในการใช้ Grit pot มีข้อเสียอย่างหนึ่งคือ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot ถ้ามากเกินไปอาจทำให้อนุภาคใน Grit pot หนาแน่น และขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้าสู่ Grit pot ดังนั้นอนุภาคของแข็งจึงไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคมีค่าลดลงได้ ส่วนประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการแยกน้ำมันของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส กลับมีค่าประสิทธิภาพการแยกต่ำสุด เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ เนื่องจากไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เล็กกว่าไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่นำมาปรับปรุง เมื่อน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส และถูกปั่นเหวี่ยงด้วยความดันที่มากเกินไป ทำให้อนุภาคของแข็งและอนุภาคน้ำมันเกิดการแตกและมีขนาดเล็กลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกลดลง ซึ่งจะเห็นได้ว่าน้ำเสียสังเคราะห์ที่ผ่านการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มีสีที่ขุ่น และขนาดอนุภาคน้ำมันเล็กลง เนื่องจากน้ำมันและน้ำผสมกันจนเป็นเนื้อเดียวดังรูปที่

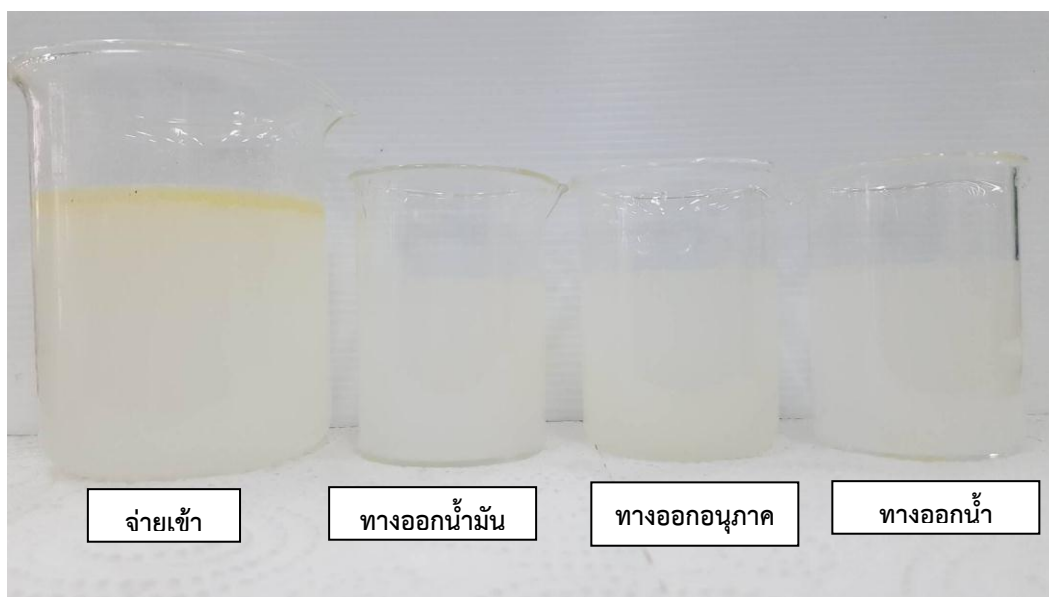
4-27 และ 4-28 ซึ่งอาจจะต้องใช้ความดันที่มากกว่านี้ในการแยกน้ำและน้ำมันในลักษณะนี้ออกจากกันโดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ Seureau ที่ต้องใช้ความดันถึง 9 บาร์ ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำ (Seureau และคณะ, 1994)



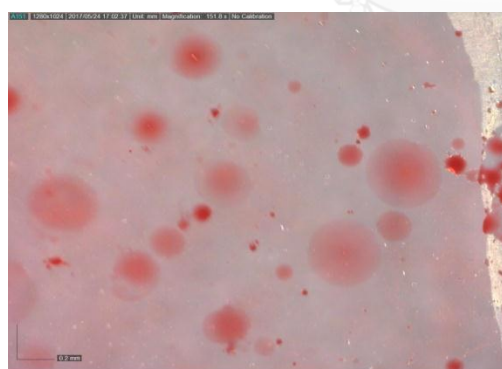
รูปที่ 4- 25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาคระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุง ไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุงที่ติดตั้ง Grit pot และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส



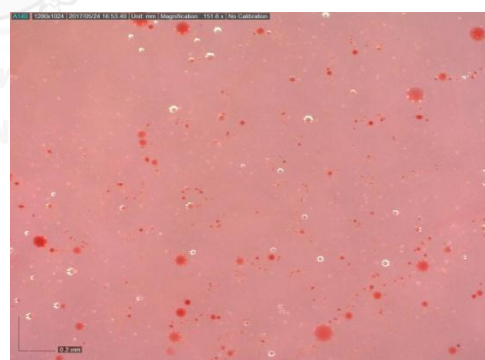
รูปที่ 4- 26 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุง ไฮโดรไซโคลนแบบปรับปรุงที่ติดตั้ง Grit pot และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส



รูปที่ 4- 27 แสดงลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ทั้ง 4 ช่องทางการไหล



(ก) ขนาดอนุภาคน้ำมันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน



(ข) ขนาดอนุภาคน้ำมันหลังเข้าไฮโดรไซโคลนจากทางออกด้านน้ำมัน

รูปที่ 4- 28 ขนาดอนุภาคน้ำมัน

จากการทำการทดลองข้างต้นสามารถสรุปเงื่อนไข และสภาวะเดินระบบที่ดีที่สุดในการแยกเสียน้ำมันสังเคราะห์โดยใช้ไฮโดรไซโคลนชนิดต่างๆได้ดังตารางที่ 4-8

ตารางที่ 4-8 เรือโนไฮ และสภาวะเดินระบบที่ดีที่สุดในการแยกน้ำเสียปนไขมันส่งเคราะห์

ชนิดของไฮโดรไซโคลน	อนุภาค		น้ำมัน			
	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของอนุภาคและความเข้มข้นน้ำมันที่สภาวะการเดินระบบที่ดีที่สุด	ประสิทธิภาพการแยก (%)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของอนุภาคและความเข้มข้นน้ำมันที่สภาวะการเดินระบบที่ดีที่สุด	ประสิทธิภาพบำบัด (%)
ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส	2	150mg/l 2.5g/l	38.47	0.5	150mg/l 2.5g/l	15.64
ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟสที่ ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)	2.5	150mg/l 2.5g/l	66.06	2	300mg/l 5g/l	39.14
ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟสที่ ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot	0.5	300mg/l 5g/l	95.57	0.5	50mg/l 1g/l	99.92
ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส	1.5	150mg/l 2.5g/l	49.93	1.5	50mg/l 1g/l	30.47

4.6 การนำน้ำมันกลับมาใช้ใหม่

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกน้ำมันของไฮโดรไซโคลอนที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot มีประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันสูงที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4-26 ซึ่งประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันที่สูงแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นของน้ำมันที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอนที่มากขึ้น ซึ่งจะมีประโยชน์อย่างมากในการนำกลับน้ำมันและใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นต้นก่อนส่งต่อไปให้กระบวนการอื่นต่อไป

ยกตัวอย่างเช่น ในกรณีที่ต้องการนำกลับน้ำมันในปริมาณที่เท่ากัน ถ้าของผสมที่ออกจากไฮโดรไซโคลอนที่มีความเข้มข้นน้ำมันสูงกว่า แสดงว่าของผสมนั้นจะมีปริมาณน้ำที่ต้องทำการแยกออกจากของผสมด้วยกระบวนการต่อไปน้อยกว่า ส่งผลให้น้ำเสียที่เข้าสู่ระบบต่อไป (เช่น โคอะเลสเซอร์) มีน้อยกว่า ขนาดของระบบโคอะเลสเซอร์จึงเล็กกว่าหรือมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบลดลง



จากผลการทดลองการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยไฮโดรไซโคลนทั้ง 4 แบบ สามารถสรุปได้ดังนี้

- ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส สามารถแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันได้แค่บางส่วน เนื่องจากระยะทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส มีความยาวไม่เพียงพอที่จะแยกของแข็งแขวนลอยที่ติดขึ้นไปกับน้ำมันให้ตกลงออกที่ทางออกด้านล่างได้
- ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน สามารถแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันได้ดีกว่าไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบดั้งเดิม เนื่องจากความยาวของระยะทางออกด้านบนที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้ของแข็งแขวนลอยไม่หลุดติดออกไปกับน้ำมัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนดีขึ้น
- ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน และติดตั้ง Grit pot มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการแยกน้ำมันดีที่สุดใน เนื่องจาก Grit pot ที่นำมาติดตั้งไว้ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีส่วนช่วยในการเก็บอนุภาค และน้ำมันให้มีเวลาการแยกตัวออกจากกัน
- ไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส สามารถแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันได้ แม้ประสิทธิภาพการแยกจะต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงแบบต่างๆ อาจเนื่องมาจากความดันที่ใช้ในการเดินระบบไม่เพียงพอ

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบแยกของแข็ง-ของเหลว และไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มาใช้ในการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมัน รวมถึงพัฒนาไฮโดรไซโคลนให้มีประสิทธิภาพการแยกที่ดีขึ้น ในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบแยกของแข็ง – ของเหลวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร 2) ทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และ 3) ทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 มิลลิเมตร

5.1.1 ประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบแยกของแข็ง – ของเหลว

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบแยกของแข็ง –ของเหลว มีค่าสูงสุดเท่ากับ 38.47 เปอร์เซ็นต์ และ 15.64 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมันไม่สูงนัก อาจเนื่องมาจากระยะเวลาที่ใช้ในการแยกที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นหากมีการเพิ่มระยะเวลาในการแยกขึ้น อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) เป็นวิธีหนึ่งที่มีแนวโน้มจะช่วยให้ระยะเวลาในการแยกสูงขึ้นได้

5.1.2 ประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงประสิทธิภาพ

การทดลองส่วนนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ 1.การปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และ 2.การปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

5.1.2.1 ประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder)

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) มีค่าสูงสุดเท่ากับ 66.06 เปอร์เซ็นต์ และ 39.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยจากผลการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบดั้งเดิม และไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) พบว่าไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมันที่ดีกว่าไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส แบบดั้งเดิม เนื่องจากความยาวของระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) ที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้ของแข็งแขวนลอยไม่หลุดติดออกไปกับน้ำมัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนดีขึ้น

5.1.2.2 ประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot มีค่าสูงสุดเท่ากับ 95.57 เปอร์เซ็นต์ และ 99.92 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมันดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ เนื่องจาก Grit pot ที่นำมาติดตั้งไว้ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีส่วนช่วยในการเก็บอนุภาค และน้ำมันให้มีเวลาการแยกตัวออกจากกันมากขึ้น

5.1.3 ประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และประสิทธิภาพการบำบัดน้ำมันด้วยไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มีค่าสูงสุดเท่ากับ 49.93 เปอร์เซ็นต์ และ 30.47 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมัน พบว่า ประสิทธิภาพการแยกอนุภาค และน้ำมันของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส มีค่าน้อยกว่า ไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะ

ทางออกด้านบน (Vortex finder) และไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มความยาวทางออกด้านบน (Vortex finder) ที่ติดตั้ง Grit pot

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการศึกษาการนำอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส มาใช้ในการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน พบว่าน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส นั้นยังไม่สามารถแยกอนุภาค น้ำมัน และน้ำออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ ดังที่คาดหวังไว้ ดังนั้นจึงควรปรับปรุงระบบให้มีประสิทธิภาพการแยกน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสูงขึ้นโดย

- เพิ่มความดันในการเดินระบบให้สูงขึ้น เนื่องจากในการแยกอนุภาค น้ำ และน้ำมันให้ออกจากกันในขั้นตอนเดียวต้องใช้ความดันที่สูงกว่าความดันที่ใช้ในการทดนี้ เนื่องจากข้อจำกัดด้านอุปกรณ์อย่างที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ส่งผลให้ในการทดลองไม่สามารถผลิตความดันที่เพียงพอต่อความต้องการในการแยกน้ำเสียสังเคราะห์ปนเปื้อนน้ำมันให้มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นได้
- ควรต่ออุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ให้ครบตามการออกแบบ ซึ่งผลที่ได้คาดว่าจะมีประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอย และน้ำมันที่ดีกว่าผลการทดลองที่นำเสนอในงานวิจัยนี้
- สามารถนำอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนหลังจากการปรับปรุงประสิทธิภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันขั้นต้น (Pre-treatment) ร่วมกับกระบวนการบำบัดอื่นๆ เพื่อการนำกลับน้ำมัน และแยกของแข็งที่ปนเปื้อนได้

รายการอ้างอิง

- Aurette Y. (1985). *Treatment of oil-containing wastewater*. Bangkok: Chulalongkorn.
- Aurette Y., & Ma F. (1994). United States Patent US Patent No.
- Bednareki S., & Lietewnik J. (1987). *Hydrocyclone for Simultaneous Removal of Oil and Solid Particles from Ship's Oily Waters*. Paper presented at the the 3rd International Conference on Hydrocyclone, Oxford. UK.
- Castilho, L. R., & Medronho R.A. . (2000). A simple produce for design and performance prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclone. *Minerial Engeneering*, 13, 183-191.
- Changirwa, R., Rockwell, M., Frimpong, S., & Szymanski, J. (1999). Hybrid simulation for oil-solids-water separation in oil sands production. *Minerals Engineering*, 12(12), 1459-1468.
- Coca-Prados J., Gutiérrez-Cervello G., & Benito, J. (2011). *Treatment of oily wastewater. Water Purification and Management*.
- Dwari, R., Biswas, M., & Meikap, B. (2004). Performance characteristics for particles of sand FCC and fly ash in a novel hydrocyclone. *Chemical Engineering Science*, 59(3), 671-684.
- Husveg, T., Rambeau, O., Drengstig, T., & Bilstad, T. (2007). Performance of a deoiling hydrocyclone during variable flow rates. *Minerals Engineering*, 20(4), 368-379.
- Mukerjee, P., & Mysels, K. J. (1971). Critical micelle concentrations of aqueous surfactant systems: DTIC Document.
- Puprasert, C., Hebrard, G., Lopez, L., & Aurelle, Y. (2004). Potential of using hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot as a pre-treatment in run-off water treatment. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 43(1), 67-83.
- Rietema K. (1960). Performance and design of hydrocyclones-I General considerations. *ChemicalEngineering science*, 15, 298-302.

- Seureau J.J., Aurelle Y., & Hoyack M.E. . (1994). *A Three-Phase Separator for the Removal of Oil and Solids from Produced Water*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Svarovsky L. (2000). *Solid-Liquid Separation*. Butterworth-Heinemann Oxford.
- Thew M.T., Colman D.A., & Comey, D. R. (1980). *Hydrocyclones for Oil/Water Separation*. Paper presented at the the International Conference on Hydrocyclones, Churchill College. Cambridge UK.
- กระทรวงคมนาคม (Producer). (2545, 14 มกราคม 2559). น้ำมันรั่วไหล (Oil Spill). Retrieved from <http://www.mkh.in.th/index.php/2010-03-22-18-05-34/2011-08-24-04-53-01>
- กระทรวงศึกษาธิการ (Producer). (2553, 17 มกราคม 2559). เคมี ม.5 เล่ม 4 ว.033. Retrieved from www.myfirstbrain.com/student_view.aspx?id=74118
- ธัญธรณ์ สวัสดิ์วงศ์. (2553). การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริดพอดแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา. (วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พิสุทธิ์ เพ็ชรมนกุล. (2556). ตำราวิชา 100 ปี 2456-2556 การบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันและอนุภาคขนาดเล็กในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- วรศิริ เสียงสนั่น. (2552). กระบวนการไฮบริดด้วยไฮโดรไซโคลนโคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชัน และการลอยตะกอนในกระบวนการผลิตน้ำประปา. (มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ศุภบุศย์ ดำรงค์กิจการ. (2556). การประยุกต์ใช้ระบบไฮโดรไซโคลนและถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดน้ำเสียปนเปื้อนสีข้อม. (มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์. (2552). การประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริดพอด เพื่อใช้ในการกำจัดกรวดทรายในโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง. (ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สำนักโรคจากการประกอบอาชีพและสิ่งแวดล้อม กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข (Producer). (2556, 14 มกราคม 2559). สรุปสถานการณ์ปัญหาน้ำมันดิบ จังหวัดระยอง และกรณีน้ำมันดิบรั่วในทะเลใกล้ชายฝั่งท่าเรือมาตาพุด. Retrieved from www.riskcomthai.org/advice-about-disease-detail.php?id=19338
- สุนิษา เลิศลาภวสิน. (2558). การพัฒนากระบวนการไฮบริดไฮโดรไซโคลนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดเพื่อใช้ในการบำบัดสีที่เกิดจากลิกนินในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ. (มหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุรารักษ์ อวนฉนวน. (2552). การบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์ที่ปนเปื้อนน้ำมันตัดด้วยกระบวนการทำให้ลอยด้วยอากาศร่วมกับกระบวนการโคแอกกูเลชัน และการประยุกต์ใช้ฟองอากาศเคลือบน้ำมัน. (ปริญญามหาบัณฑิต), จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

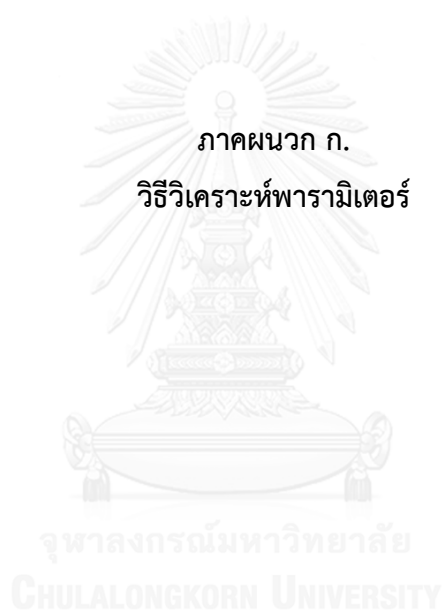




ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก.
วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์



ภาคผนวก ก.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งแขวนลอย (EPA 160.2)

การเตรียมกระดาษกรองใยแก้ว

1. นำกระดาษกรองใยแก้ว (GF/C รูปพรุน 0.45ไมครอน) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.7 ซม.
2. ออบในตู้อบ 103 – 105⁰ ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. นำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนัก (B กรัม)

การวิเคราะห์

1. นำกระดาษกรองที่เตรียมไว้ วางบนกรวยบุคเนอร์ และตวงตัวอย่างตามที่ต้องการ
2. เปิดปั๊มสุญญากาศ (ดูดน้ำตัวอย่างจนแห้ง)
3. ออบในตู้อบ 103 – 105⁰ ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4. นำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น
5. ชั่งน้ำหนัก A

การคำนวณ

$$\text{ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(A-B) \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$

ภาคผนวก ก.2 การหาปริมาณซีโอดี Chemical Oxygen Demand (COD)

(Close – reflux titrimetric method based on Standard methods, EPA 410.1)

ค่าซีโอดีเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนที่นำไปใช้ในการสลายสารอินทรีย์ที่มีในตัวอย่างน้ำได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ ดังนั้นการวิเคราะห์หาค่าซีโอดีก็เพื่อวัดปริมาณความสกปรกของน้ำเสียจากบ้านเรือน และโรงงานอุตสาหกรรม การวิเคราะห์ซีโอดีใช้เวลาสั้นประมาณ 3 ชั่วโมง จึงเหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมดูแลระบบบำบัดน้ำเสีย เนื่องจากสามารถแก้ไขได้ทันทีที่มีความผิดพลาดเกิดขึ้น และสามารถนำค่าไปประมาณค่าบีโอดีของตัวอย่างได้เมื่อหาอัตราส่วนบีโอดีต่อซีโอดีของน้ำเสียชนิดนั้นได้

วิธีหาความเข้มข้นที่แน่นอนของ FAS

เติมน้ำกลั่นให้มีปริมาตร 5 มิลลิลิตร ลงในหลอดย่อยสลายและเติม $K_2 Cr_7 O_7$ 0.1 N 3 มิลลิลิตร H_2SO_4 7 มิลลิลิตร แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1 – 2 หยด และไทเทรตด้วยสารละลาย FAS

วิธีวิเคราะห์ปริมาณซีโอดี

เตรียมน้ำตัวอย่างใส่หลอดย่อยสลาย และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ครบ 5 มิลลิลิตร เติม $K_2 Cr_7 O_7$ 0.1 N 3 มิลลิลิตร H_2SO_4 7 มิลลิลิตร แล้วเติมเฟอร์โรอินดิเคเตอร์ 1 – 2 หยด และไทเทรตด้วยสารละลาย 0.1 N FAS จนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง ทำแบลนด์ทุกครั้งโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง และทำการวิเคราะห์เหมือนน้ำตัวอย่าง

การคำนวณ

$$\text{การหาความเข้มข้นของสารละลาย FAS} = \frac{\text{ปริมาตรของ } 0.1 \text{ N } K_2 Cr_7 O_7 \text{ มล.} \times 0.1}{\text{ปริมาตร FAS ที่ใช้ไทเทรต (มิลลิลิตร)}}$$

การหาปริมาณซีโอดี

$$\text{ซีโอดี (มิลลิกรัม/ลิตร)} = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{\text{ปริมาตร ตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$

เมื่อ

A = มิลลิลิตร ของ FAS ที่ใช้ไทเทรตแบลงค์

B = มิลลิลิตร ของ FAS ที่ใช้ไทเทรตน้ำตัวอย่าง N = นอร์มัลลิตี ของ FAS



ภาคผนวก ก.3 การหาวิเคราะห์หา ปริมาณน้ำมัน-ไขมัน โดยปรับปรุงจากวิธีการหาปริมาณ
น้ำมัน และไขมัน

วิธีการวิเคราะห์

1. นำถ้วยระเหยชั่งน้ำหนัก (A กรัม)
2. เก็บน้ำตัวอย่างตามปริมาตรที่ต้องการใส่ถ้วยระเหย วัดปริมาตร
3. นำถ้วยระเหยที่มีตัวอย่างเข้าตู้อบ 105°C เป็นเวลาประมาณ 3-4 ชั่วโมง เพื่อให้ตัวอย่างแห้ง เหลือแต่อนุภาค และน้ำมัน
4. นำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก (B กรัม)
5. นำถ้วยระเหยจากข้อที่ 4 เข้าเตาเผา 550°C เป็นเวลา 20 นาที เพื่อระเหยน้ำมัน
6. นำออกมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และชั่งน้ำหนัก (C กรัม)

วิธีการคำนวณ

$$\text{ปริมาณอนุภาค และน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$

$$\text{ปริมาณน้ำมัน (มิลลิลิตรต่อลิตร)} = \frac{(C - B) \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (มิลลิลิตร)}}$$



ตารางที่ ข.1 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยในน้ำประปาของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.40	0.30	0.10	39.72	25.84	81.36	34.94
1	0.53	0.42	0.11	49.98	15.23	182.68	69.53
2	0.89	0.76	0.13	87.67	1.48	591.55	98.31

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.40	0.30	0.10	39.75	32.34	61.97	18.64
1	0.53	0.42	0.11	67.23	46.82	145.17	30.36
2	0.89	0.76	0.13	91.79	56.48	298.20	38.47

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่มีสารลดแรงตึงผิวของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.40	0.30	0.10	37.61	29.28	62.61	22.15
1	0.53	0.42	0.11	64.26	41.31	151.88	35.71
2	0.89	0.76	0.13	93.07	53.93	321.91	42.06

ตารางที่ ข.4 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ไม่มีสารลดแรงตึงผิวของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.40	0.30	0.10	2340	2462	1440	15.64
1	0.53	0.42	0.11	2340	2408	880	11.10
2	0.89	0.76	0.13	2340	2370	960	7.50

ตารางที่ ข.5 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่มีสารลดแรงตึงผิวของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.40	0.30	0.10	5640	5682	5330	2.23
1	0.53	0.42	0.11	5640	5664	5590	1.62
2	0.89	0.76	0.13	5640	5658	5642	1.87

ตารางที่ ข.6 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/L ของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	41.04	20.87	213.01	49.15
1	0.763	0.690	0.073	39.33	18.68	234.57	52.51
1.5	0.861	0.781	0.080	29.06	12.42	191.55	57.27
2	1.255	1.167	0.088	23.93	10.19	206.17	57.42
2.5	1.481	1.375	0.106	24.12	10.11	205.82	58.08

ตารางที่ ข.7 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/L ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	747.90	772.41	538.94	27.94
1	0.763	0.690	0.073	736.85	761.06	507.98	31.06
1.5	0.861	0.781	0.080	751.23	775.33	516.00	31.31
2	1.255	1.167	0.088	742.63	760.84	501.17	32.51
2.5	1.481	1.375	0.106	731.11	749.05	498.41	31.83

ตารางที่ ข.8 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/L ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	63.40	27.56	368.93	56.53
1	0.763	0.690	0.073	53.59	22.00	352.14	58.94
1.5	0.861	0.781	0.080	42.59	15.33	308.70	64.00
2	1.255	1.167	0.088	29.67	10.25	287.22	65.45
2.5	1.481	1.375	0.106	29.85	10.13	285.59	66.06

ตารางที่ ข.9 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	1607.93	1671.15	1069.09	33.51
1	0.763	0.690	0.073	1580.11	1641.48	1000.00	36.71
1.5	0.861	0.781	0.080	1582.34	1642.80	992.07	37.30
2	1.255	1.167	0.088	1572.62	1616.68	988.29	37.16
2.5	1.481	1.375	0.106	1562.02	1605.45	998.59	36.07

ตารางที่ ข.10 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 300 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	69.43	35.86	355.56	48.35
1	0.763	0.690	0.073	59.02	29.55	337.55	49.93
1.5	0.861	0.781	0.080	50.07	23.25	311.94	53.57
2	1.255	1.167	0.088	37.72	17.19	310.00	54.43
2.5	1.481	1.375	0.106	33.74	14.28	286.17	57.68

ตารางที่ ข.11 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 300 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	3065.03	3186.81	2026.98	33.87
1	0.763	0.690	0.073	3024.22	3143.72	1894.75	37.35
1.5	0.861	0.781	0.080	3003.96	3123.43	1837.65	38.83
2	1.255	1.167	0.088	2986.91	3075.07	1817.85	39.14
2.5	1.481	1.375	0.106	2990.37	3078.17	1851.51	38.08

ตารางที่ ข.12 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	54.19	41.76	160.14	22.94
1	0.763	0.690	0.073	51.30	38.78	169.65	24.41
1.5	0.861	0.781	0.080	43.11	30.57	165.55	29.09
2	1.255	1.167	0.088	37.07	26.22	180.92	29.26
2.5	1.481	1.375	0.106	33.94	22.48	182.61	33.77

ตารางที่ ข.13 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder)

ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)			ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ ในการแยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	0.600	0.537	0.063	3592.27	3739.19	2339.93	34.86
1	0.763	0.690	0.073	3582.81	3727.30	2217.05	38.12
1.5	0.861	0.781	0.080	3628.04	3774.99	2193.47	39.54
2	1.255	1.167	0.088	3724.11	3838.40	2208.42	40.70
2.5	1.481	1.375	0.106	3770.67	3882.74	2316.95	38.55

ตารางที่ ข.14 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ การแยก (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	5	250	132	1719	53.72
	10	227	164	1488	28.79
	15	238	180	1630	21.20
1	5	228	169	1860	43.29
	10	259	203	1526	20.68
	15	247	185	2870	26.40
1.5	5	319	191	1878	37.57
	10	383	213	1639	19.06
	15	312	268	1753	11.77
2	5	203	145	1929	35.27
	10	210	159	1581	16.92
	15	221	150	2532	18.72
2.5	5	261	165	1971	29.33
	10	255	178	2190	17.61
	15	249	209	2149	10.64

ตารางที่ ข.15 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/L ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการแยกทางออกด้านล่าง (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการแยกทางออกด้านบน (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
0.5	5	929	1551	164	1.51	98.49
	10	1129	1889	405	1.99	98.01
	15	1004	1715	20	0.08	99.92
1	5	1038	1775	552	3.44	96.56
	10	769	1121	409	1.25	98.75
	15	984	1796	428	0.98	99.02
1.5	5	959	1687	95	0.57	99.43
	10	933	1433	117	0.35	99.65
	15	936	1789	257	0.53	99.47
2	5	1004	1599	622	2.08	97.92
	10	1133	1791	572	0.97	99.03
	15	1109	1625	691	0.76	99.24
2.5	5	958	1403	565	1.75	98.25
	10	1029	1518	504	0.78	99.22
	15	832	1996	569	0.67	99.33

ตารางที่ ข.16 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ การแยก (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	5	228	156	4075	69.95
	10	250	142	5838	64.69
	15	233	134	5133	53.23
1	5	202	177	4920	65.85
	10	214	189	6220	53.30
	15	217	188	6763	45.40
1.5	5	220	195	6575	67.36
	10	202	185	7005	53.68
	15	211	168	6731	44.98
2	5	208	177	7898	64.63
	10	198	185	7473	45.27
	15	210	180	9077	40.77
2.5	5	223	174	9886	66.38
	10	203	193	7500	40.30
	15	209	156	9419	41.15

ตารางที่ ข.17 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการแยกทางออกด้านล่าง (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการแยกทางออกด้านบน (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
0.5	5	2356	2708	449	1.95	98.05
	10	2600	2943	1270	2.83	97.17
	15	2389	2954	1358	2.02	97.98
1	5	2368	2473	900	2.79	97.21
	10	2278	2513	1246	2.00	98.00
	15	2206	2993	1304	1.49	98.51
1.5	5	2752	2817	1338	3.15	96.85
	10	2766	2991	1567	1.89	98.11
	15	2494	2935	1652	1.42	98.58
2	5	2154	2516	1676	2.66	97.34
	10	2396	2518	1493	1.20	98.80
	15	2783	2581	1307	0.67	99.33
2.5	5	2216	2600	1203	1.58	98.42
	10	2527	2892	1282	0.85	99.15
	15	2805	3166	1531	0.71	99.29

ตารางที่ ข.18 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 300 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/L ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ การแยก (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	5	208	152	10234	85.71
	10	216	163	8625	70.22
	15	255	173	9896	62.95
1	5	234	170	13178	84.32
	10	243	182	11269	68.23
	15	244	143	12516	66.92
1.5	5	240	176	12388	81.16
	10	227	178	14269	71.04
	15	226	183	14606	61.96
2	5	213	139	15654	82.18
	10	220	106	18386	78.03
	15	201	109	16484	67.36
2.5	5	259	187	15987	74.82
	10	250	177	20307	66.59
	15	244	149	25734	66.67

ตารางที่ ข.19 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 300 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพการแยกทางออกด้านล่าง (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพการแยกทางออกด้านบน (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
0.5	5	4449	4543	1668	4.38	95.62
	10	3542	4001	1671	3.01	96.99
	15	3787	4509	1432	2.18	97.82
1	5	3515	3912	1767	3.47	96.53
	10	3899	4187	1515	1.79	98.21
	15	3198	3744	1800	1.31	98.69
1.5	5	3596	4233	2111	2.96	97.04
	10	4505	4992	2271	1.56	98.44
	15	4229	4625	2680	1.34	98.66
2	5	4559	3875	2273	2.35	97.65
	10	3954	4677	2345	1.02	98.98
	15	3795	5259	3046	0.78	99.22
2.5	5	3649	4217	2500	2.02	97.98
	10	4608	5164	2504	0.97	99.03
	15	4470	5524	3262	0.68	99.32

ตารางที่ ข.20 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ การแยก (ร้อยละ)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
0.5	5	280	138	1856	54.52
	10	271	133	1806	37.70
	15	322	135	2029	30.87
1	5	310	142	1677	45.07
	10	301	157	2085	31.53
	15	303	147	2189	25.61
1.5	5	221	175	2413	45.77
	10	232	134	2463	36.00
	15	269	155	2832	27.16
2	5	361	197	2405	33.33
	10	375	195	2865	23.13
	15	365	190	2394	14.68
2.5	5	313	173	2466	33.12
	10	332	169	2786	22.26
	15	367	175	2664	14.99

ตารางที่ ข.21 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot

ความ ดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของ Grit pot (นาที)	ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพ การแยก ทางออก ด้านล่าง (ร้อยละ)	ประสิทธิภาพ การแยก ทางออก ด้านบน (ร้อยละ)
		จ่าย เข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง		
0.5	5	3657	3811	1709	5.14	94.86
	10	3772	3934	1621	2.67	97.33
	15	4021	4287	1862	1.76	98.24
1	5	3907	4323	1050	2.43	97.57
	10	2391	4749	1110	1.61	98.39
	15	3571	4687	1920	1.51	98.49
1.5	5	6468	6552	4155	4.62	95.38
	10	3989	4087	3024	2.21	97.79
	15	3574	4367	2480	1.48	98.52
2	5	4161	4407	2374	2.16	97.84
	10	3954	4524	2863	1.28	98.72
	15	3358	4186	2469	0.84	99.16
2.5	5	5283	5951	1850	1.60	98.40
	10	5276	5586	3270	1.22	98.78
	15	4185	5383	2983	0.75	99.25

ตารางที่ ข.22 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/L ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	193.75	247.01	58.33	178.37	32.34
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	187.76	231.77	26.54	173.50	36.31
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	191.39	210.27	38.54	186.47	36.02
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	194.86	244.67	49.18	176.44	38.42
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	204.75	237.65	64.22	195.57	32.40

ตารางที่ ข.23 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/L และความเข้มข้นน้ำมัน 1g/L ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	821.19	698.38	1885.94	862.41	21.58
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	872.17	779.13	1973.75	909.14	26.27
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	854.15	793.99	1967.59	880.98	30.47
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	864.65	764.96	1938.92	907.74	27.07
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	942.40	804.94	1985.78	995.92	23.85

ตารางที่ ข.24 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	166.67	256.71	49.82	138.06	39.08
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	178.68	249.00	67.57	151.72	40.99
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	152.51	232.27	58.17	115.26	49.93
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	177.03	230.58	50.89	156.36	39.85
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	176.17	237.16	68.39	154.89	37.58

ตารางที่ ข.25 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 150 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 2.5g/l ของไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	2185.92	989.02	2302.39	1254.02	21.16
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	2237.31	1092	2755.84	1299.05	25.96
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	2383.10	1177.1	2987.02	1489.44	27.90
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	2396.24	1204.64	2760.79	1475.56	26.40
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	2565.93	1328.62	2752.48	1660.79	23.69

ตารางที่ ข.26 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความ
เข้มข้นอนุภาค 300 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	198.51	279.43	76.75	173.19	35.71
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	201.81	270.73	65.31	176.18	39.46
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	192.02	242.06	75.58	170.37	41.32
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	191.65	255.52	65.84	166.29	40.80
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	193.35	257.15	87.20	170.91	37.13

ตารางที่ ข.27 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความ
เข้มข้นอนุภาค 300 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	4385.92	1852.07	4616.26	2191.59	22.35
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	4537.31	1797.15	4805.77	2205.01	25.40
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	4983.10	1910.04	5343.02	2125.05	27.82
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	4396.24	2504.37	4869.85	2328.33	27.39
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	4565.93	2631.55	4970.08	2502.6	22.61

ตารางที่ ข.28 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของอนุภาค (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	135.47	211.83	34.75	111.25	39.67
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	150.42	197.40	31.08	133.69	38.60
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	141.95	188.32	49.14	121.43	43.49
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	152.04	226.31	50.10	121.28	45.55
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	154.98	204.67	56.99	137.93	36.87

ตารางที่ ข.29 ข้อมูลประสิทธิภาพการแยกน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมันสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นอนุภาค 50 mg/l และความเข้มข้นน้ำมัน 5g/l ของไฮโดรไซโคลนชนิด 3 เฟส

ความ ต้น (บาร์)	อัตราการไหล (ลิตร/วินาที)				ความเข้มข้นของน้ำมัน (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิ ภาพการ แยก (ร้อยละ)
	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	จ่ายเข้า	ทางออก อนุภาค	ทางออก น้ำมัน	ทางออก น้ำ	
0.5	0.3784	0.0960	0.0064	0.2760	4743.86	3219.36	4930.01	3583.5	21.82
1	0.5010	0.1500	0.0100	0.3500	4683.36	3216.52	4887.48	3541.89	25.68
1.5	0.6772	0.2220	0.0132	0.4420	4760.08	4040.26	5727.24	4571.82	27.82
2	0.7974	0.2440	0.0154	0.5380	5079.53	4758.99	5302.63	5483.69	25.64
2.5	0.9098	0.2540	0.0178	0.6380	5146.03	5063.75	5430.55	5750.32	22.63



ภาคผนวก ค.1 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค ด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ข.1)

ประสิทธิภาพในการแยก สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100$$

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} = \frac{0.10}{0.40} = 0.2500$$

$$\text{และ } E_T = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} = \frac{0.10 \times 81.36}{0.40 \times 39.72} = 0.5121$$

$$\text{ดังนั้น } E'_T = \left(\frac{0.5121 - 0.2500}{1 - 0.2500} \right) \times 100 = 34.94\%$$

ภาคผนวก ค.2 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อน น้ำมัน ด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ข.2)

ประสิทธิภาพในการแยก สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100$$

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} = \frac{0.10}{0.40} = 0.2500$$

$$\text{และ } E_T = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} = \frac{0.10 \times 61.97}{0.40 \times 39.75} = 0.3898$$

$$\text{ดังนั้น } E'_T = \left(\frac{0.3898 - 0.2500}{1 - 0.2500} \right) \times 100 = 18.64\%$$

ภาคผนวก ค.3 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ข.6)

ประสิทธิภาพในการแยก สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$E'_T = \left(\frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \right) \times 100$$

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} = \frac{0.063}{0.600} = 0.1050$$

$$\text{และ } E_T = \frac{Q_u C_u}{Q_f C_f} = \frac{0.063 \times 213.01}{0.600 \times 41.04} = 0.5450$$

$$\text{ดังนั้น } E'_T = \left(\frac{0.5450 - 0.1050}{1 - 0.1050} \right) \times 100 = 49.15\%$$

ภาคผนวก ค.4 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 2 เฟส ที่ได้รับการปรับปรุงโดยการเพิ่มระยะทางออกด้านบน (Vortex finder) และติดตั้ง Grit pot ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ข.14)

สมมติพิจารณา ที่เวลา 5 นาที จะได้ประสิทธิภาพในการแยก สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$E_T = \frac{Q_f C_f T_f - Q_0 C_0 T}{Q_f C_f T_f} \times 100$$

เมื่อ

$$Q_f C_f T_f = Q_0 C_0 T + V_{GP} C_{GP}$$

$$= (1.93 \times 132 \times 5) + (0.86 \times 1,719)$$

$$= 1,273.80 + 1,478.34 = 2,752.14$$

$$E_T = \frac{2,752.14 - 1,273.80}{2,752.14} \times 100$$

$$= 53.72 \%$$

ภาคผนวก ค.5 ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค และน้ำมันในน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน ด้วยไฮโดรไซโคลอนชนิด 3 เฟส ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 บาร์ (โดยมีข้อมูลผลการทดลองดังตารางที่ ข.22)

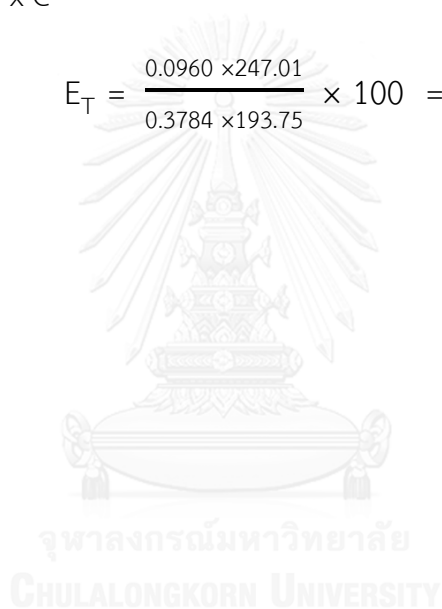
ประสิทธิภาพในการแยกสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$E_T = \frac{M_u}{M} \times 100$$

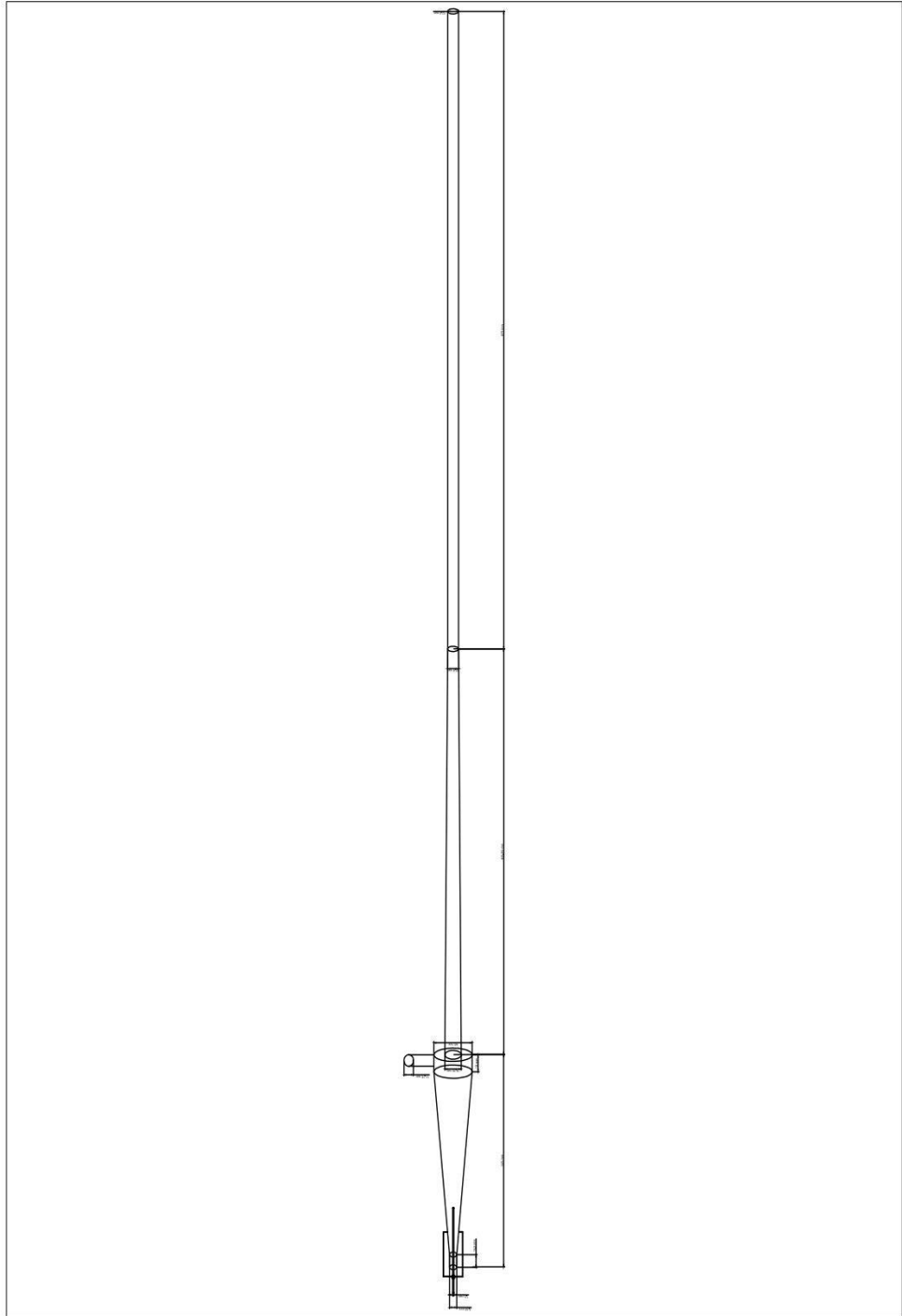
เมื่อ $M_u = Q_u \times C_u$

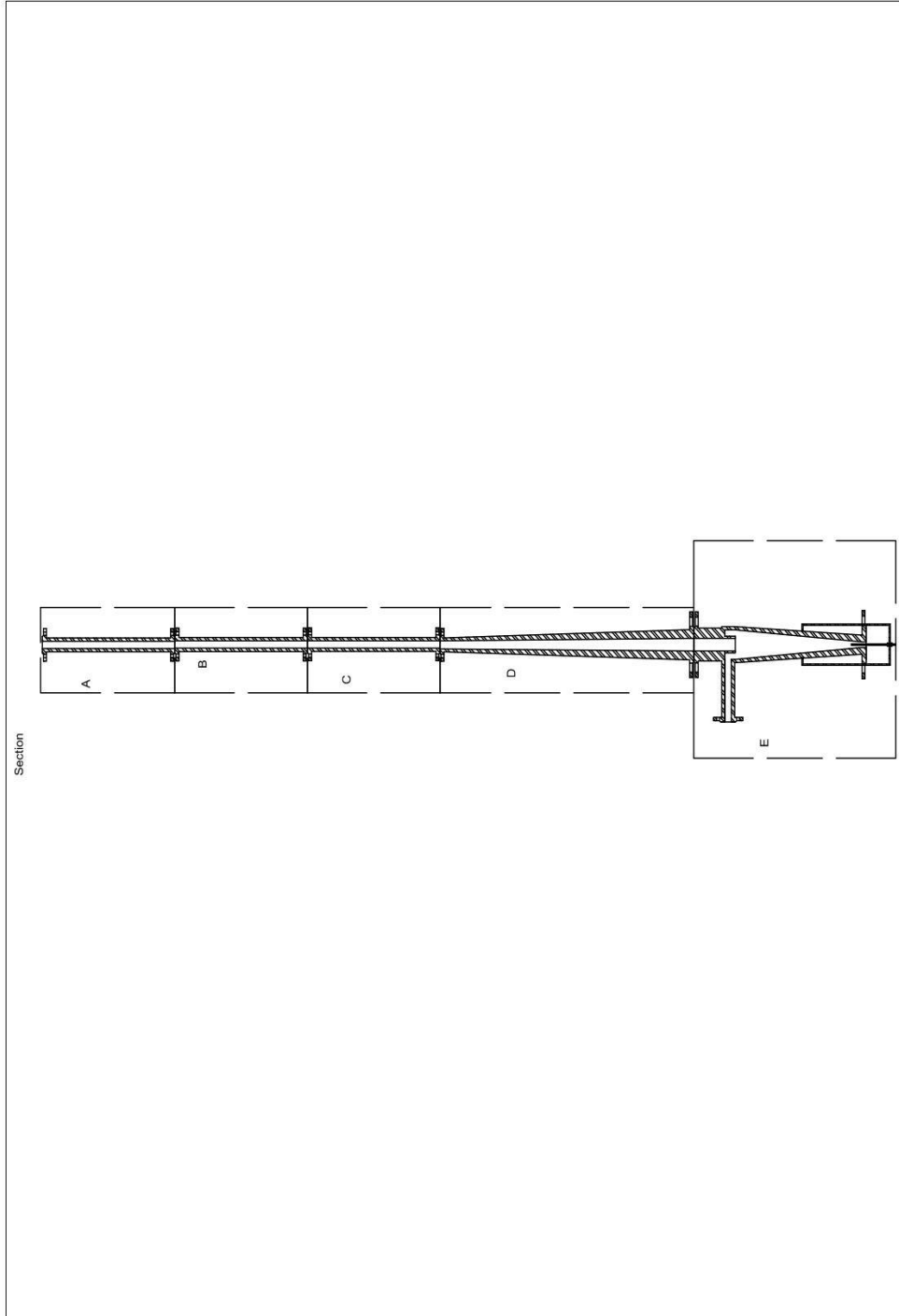
$$M = Q \times C$$

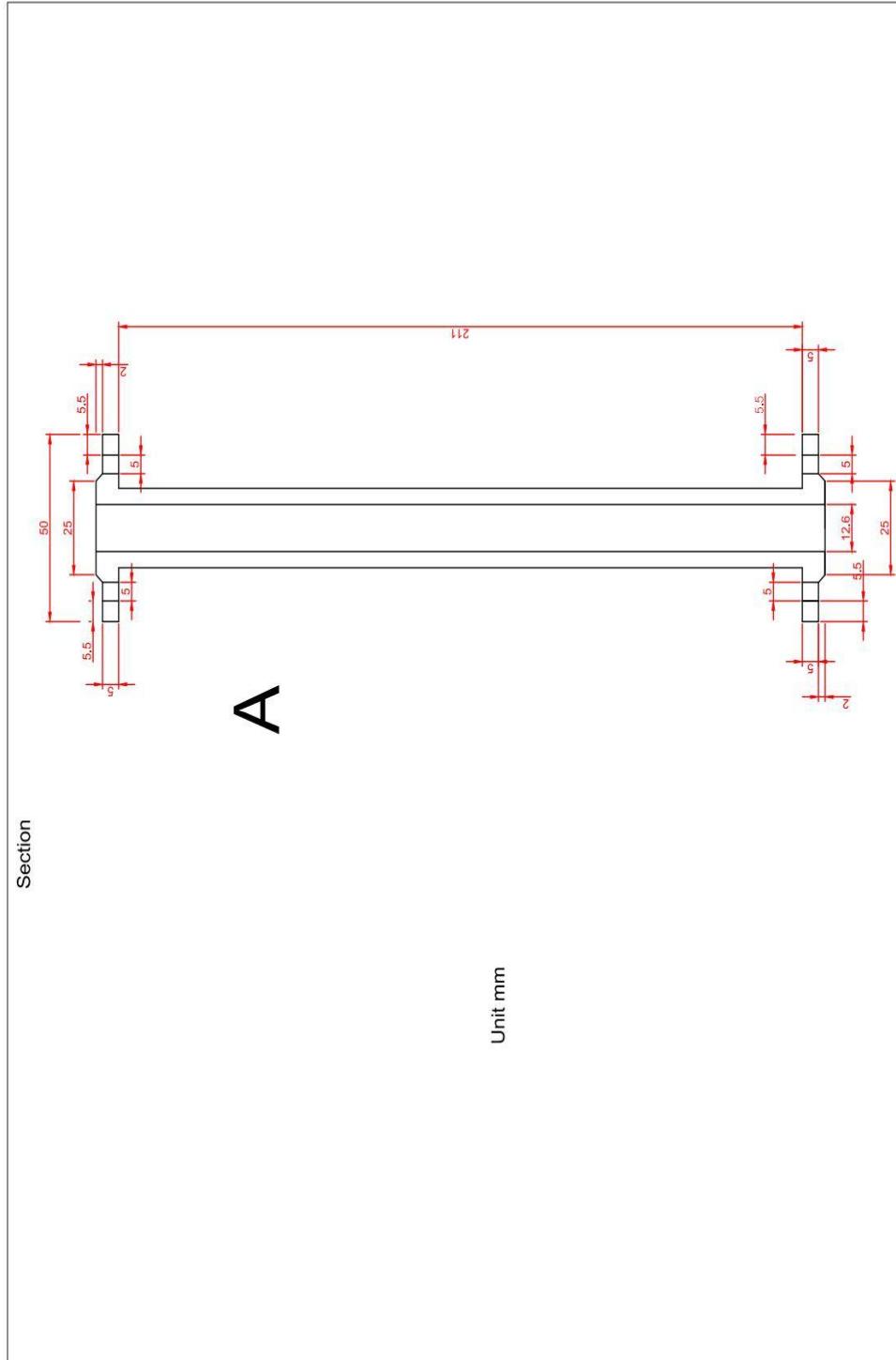
ดังนั้น
$$E_T = \frac{0.0960 \times 247.01}{0.3784 \times 193.75} \times 100 = 32.34 \%$$

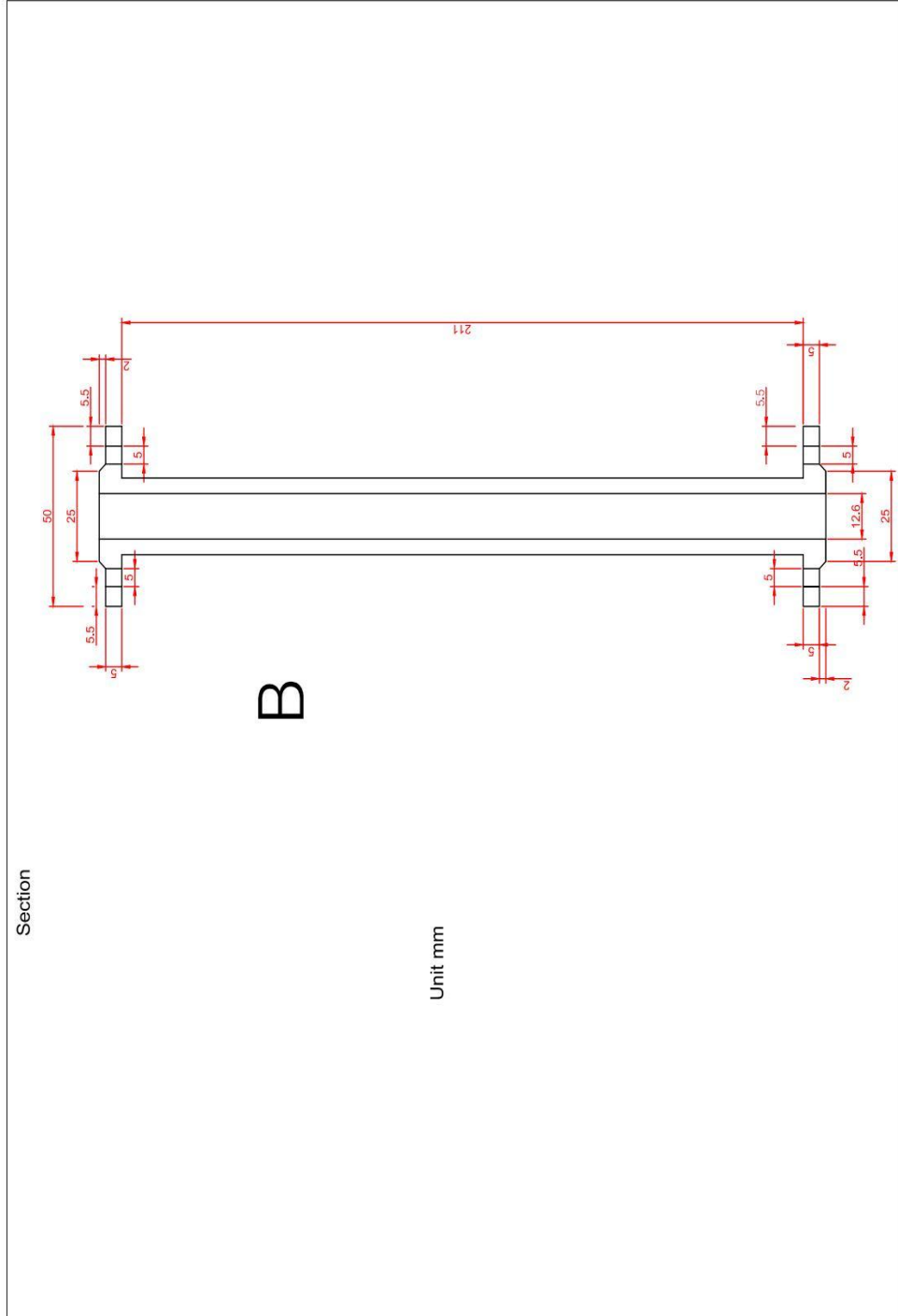


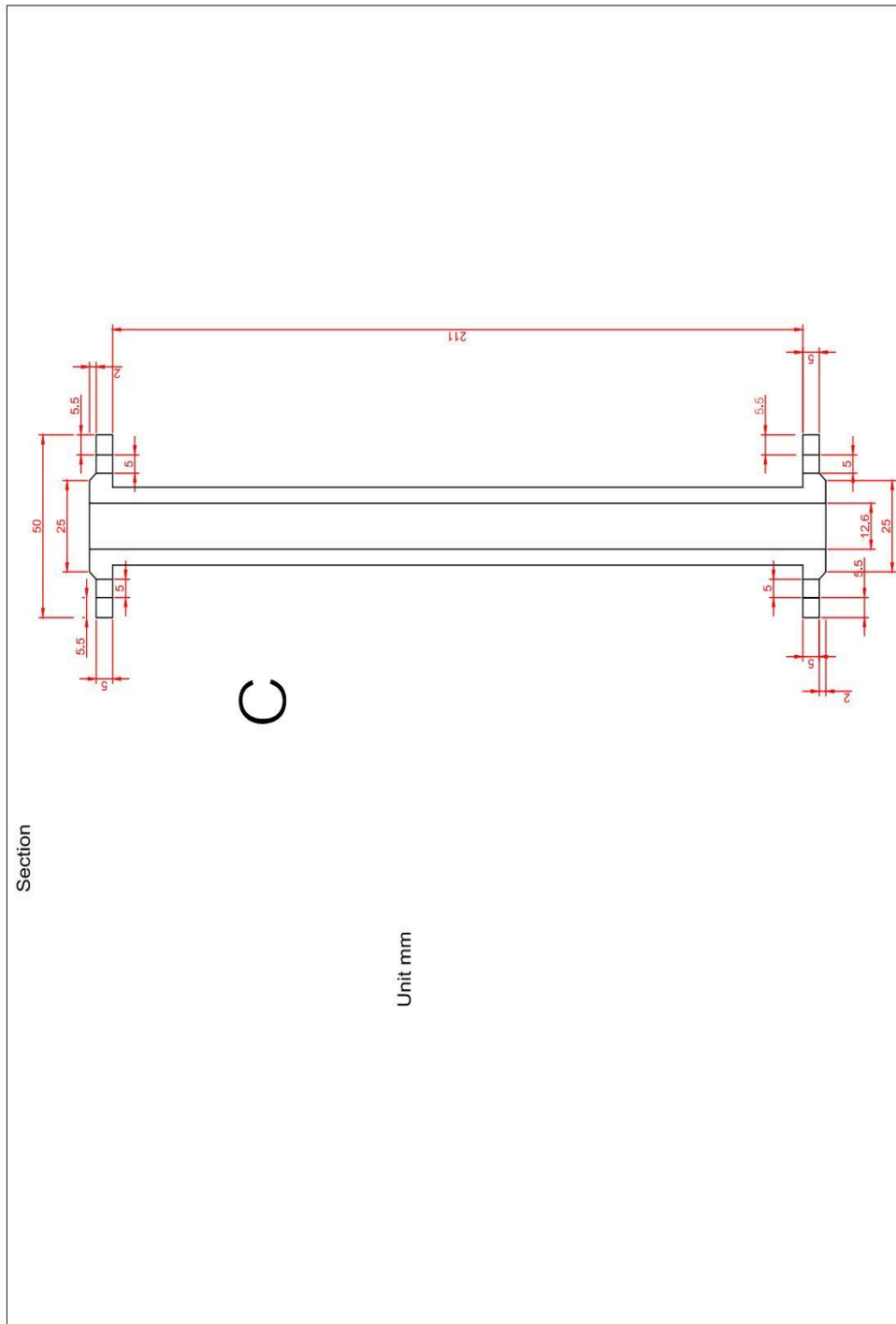


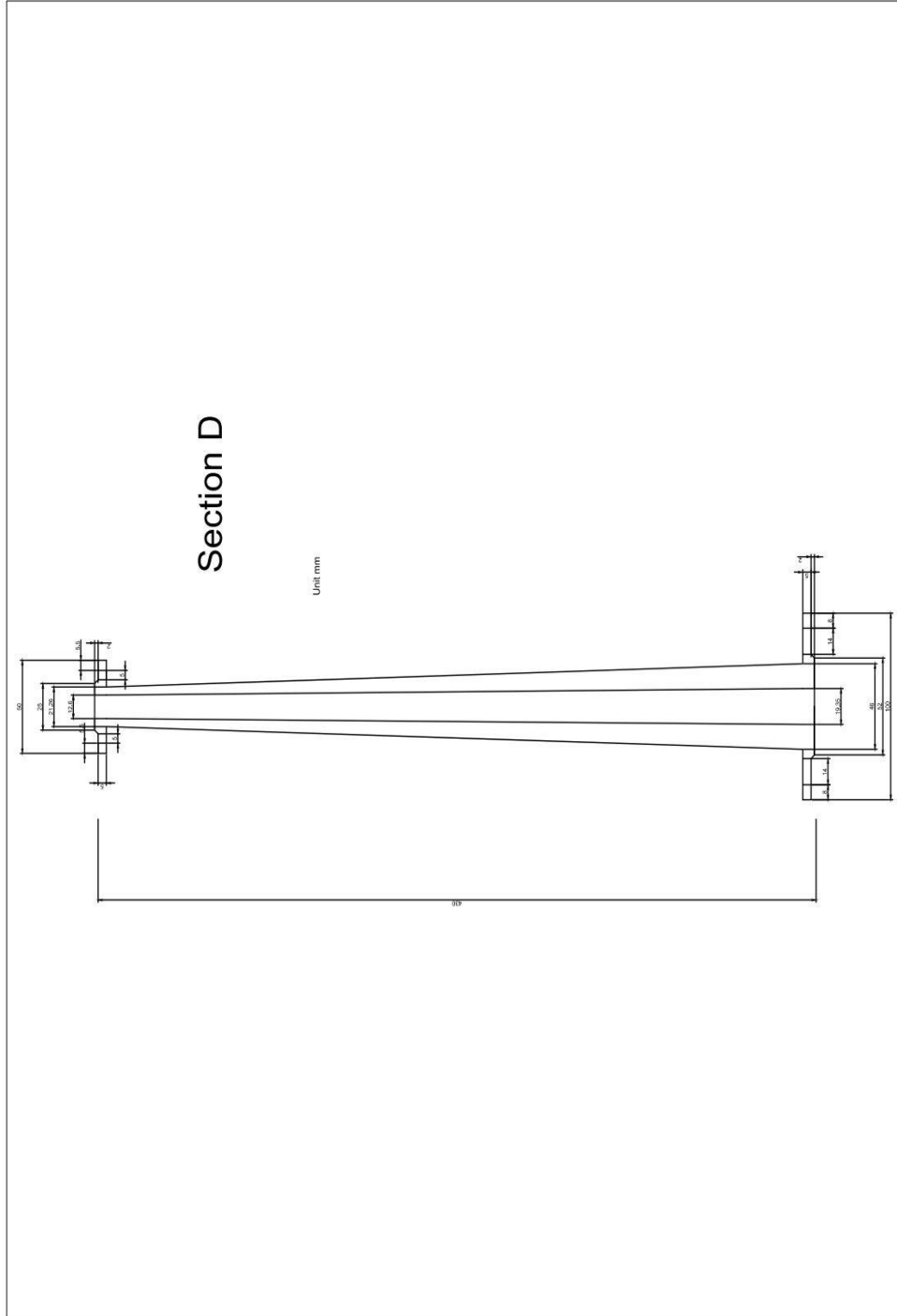


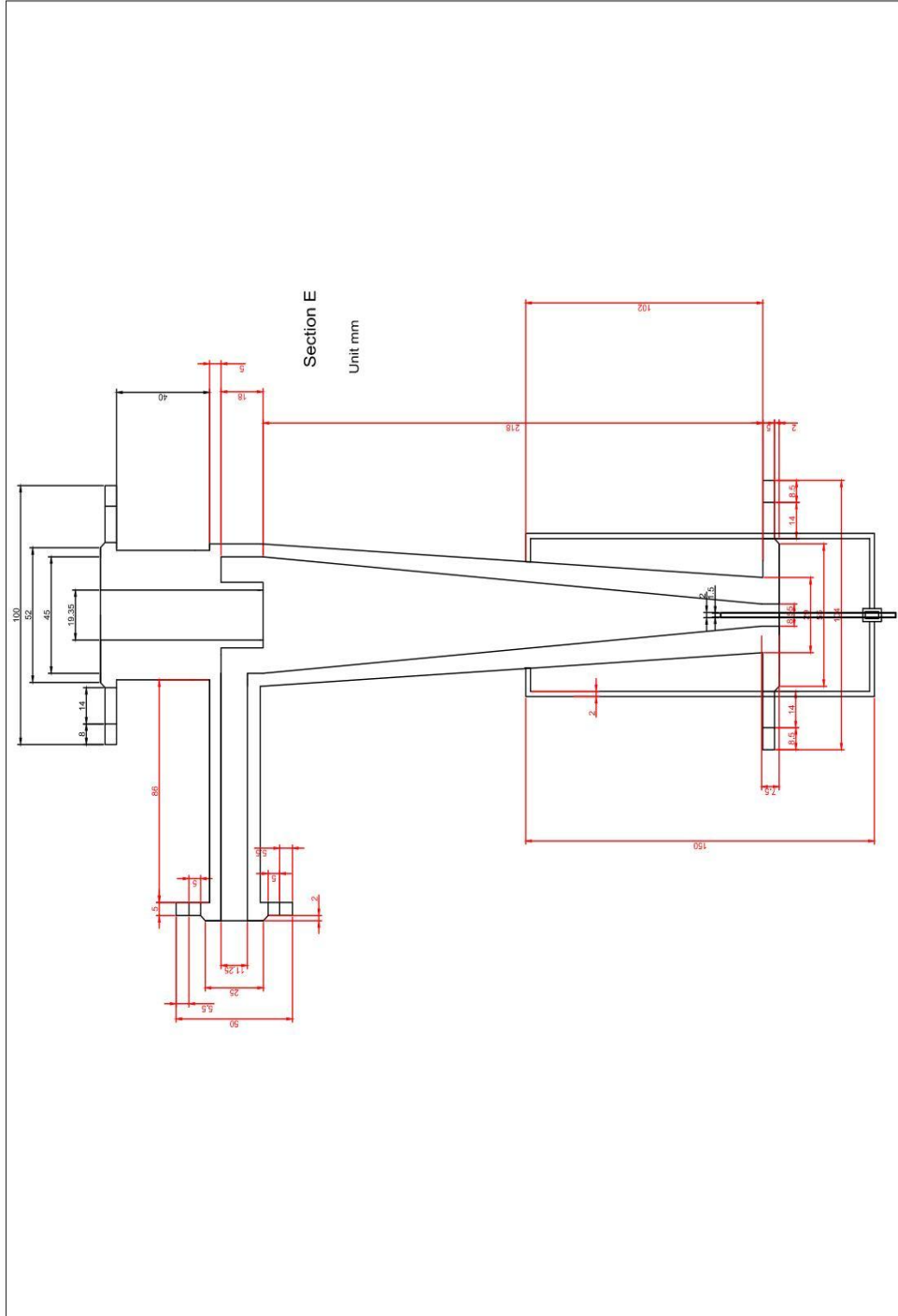


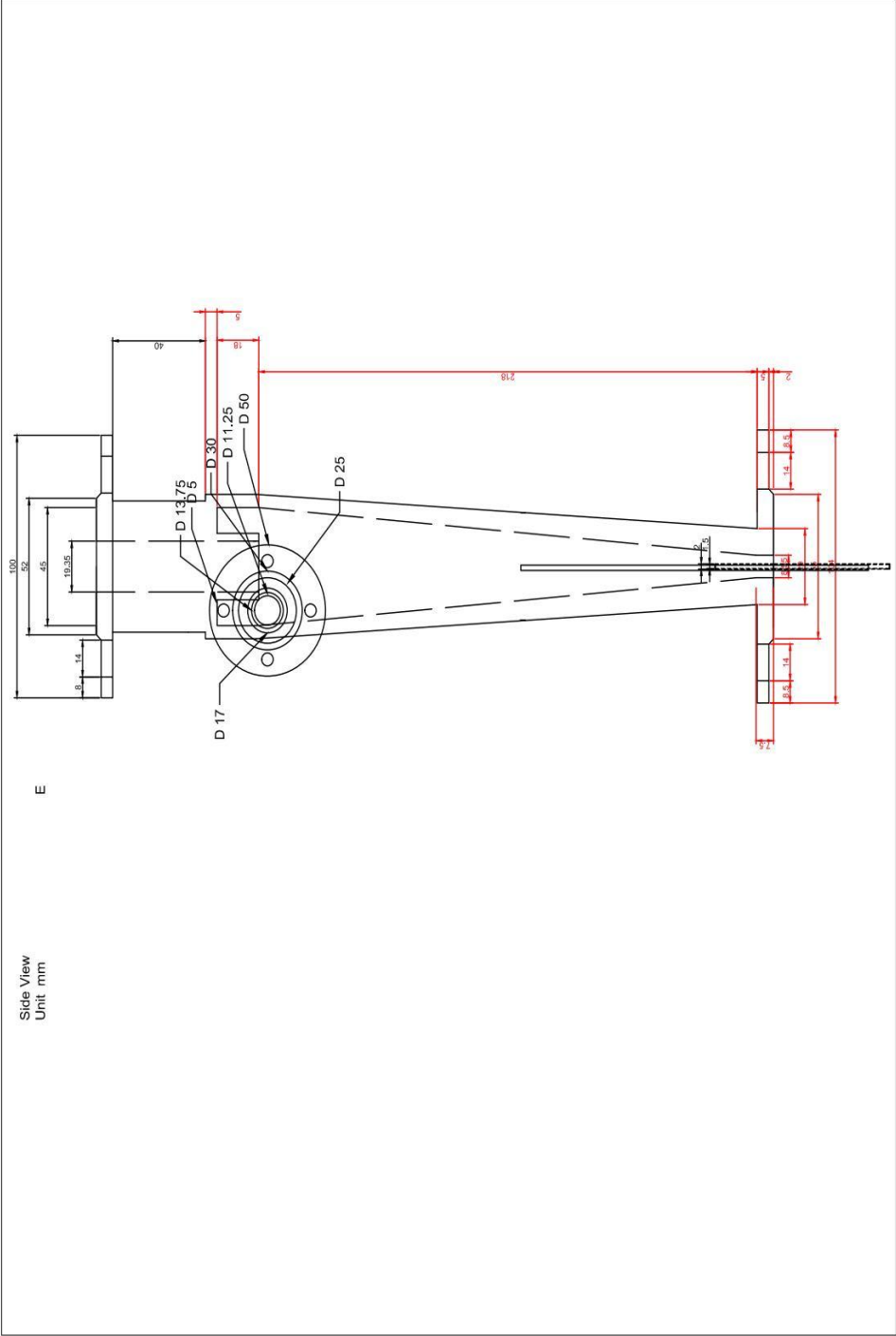


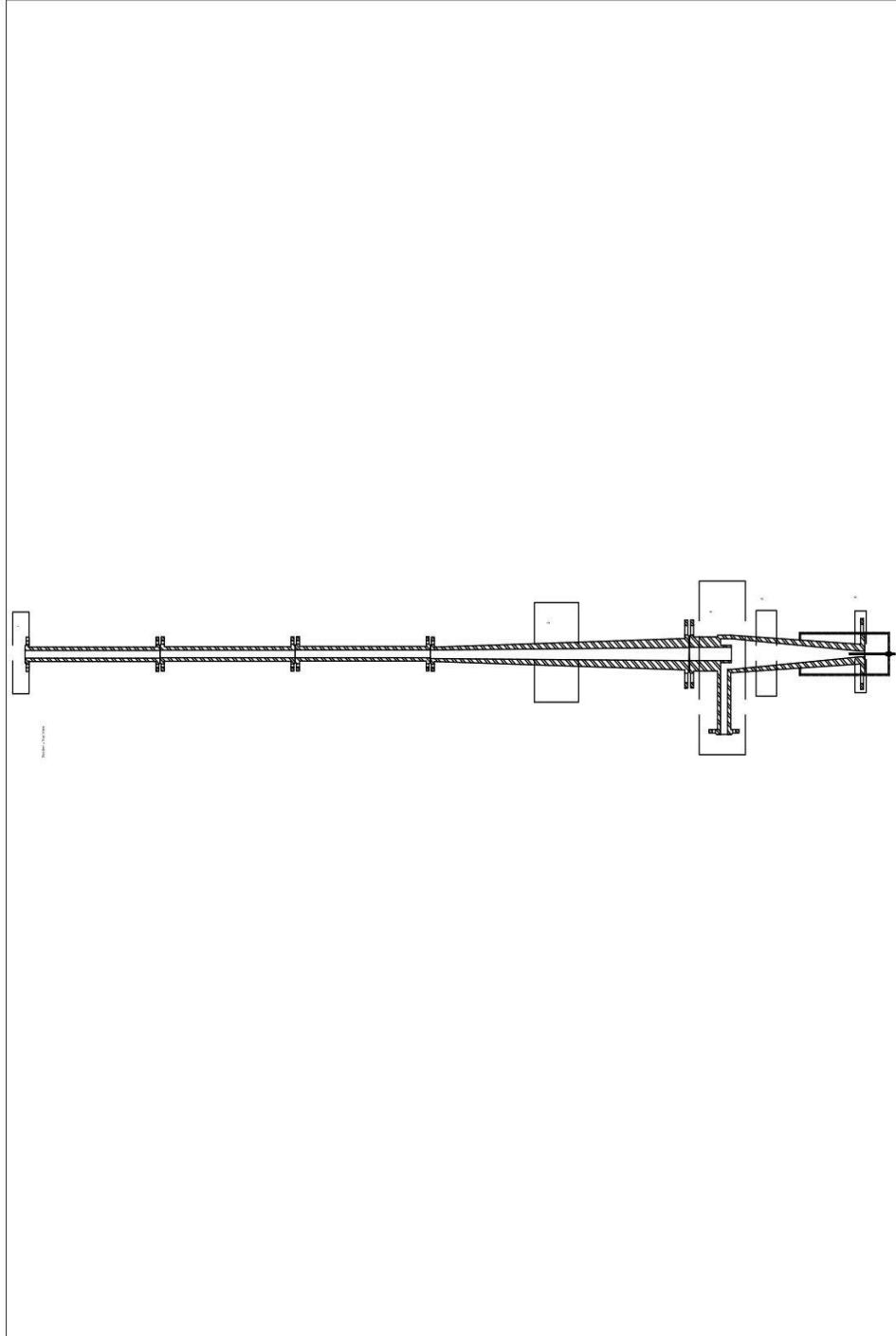




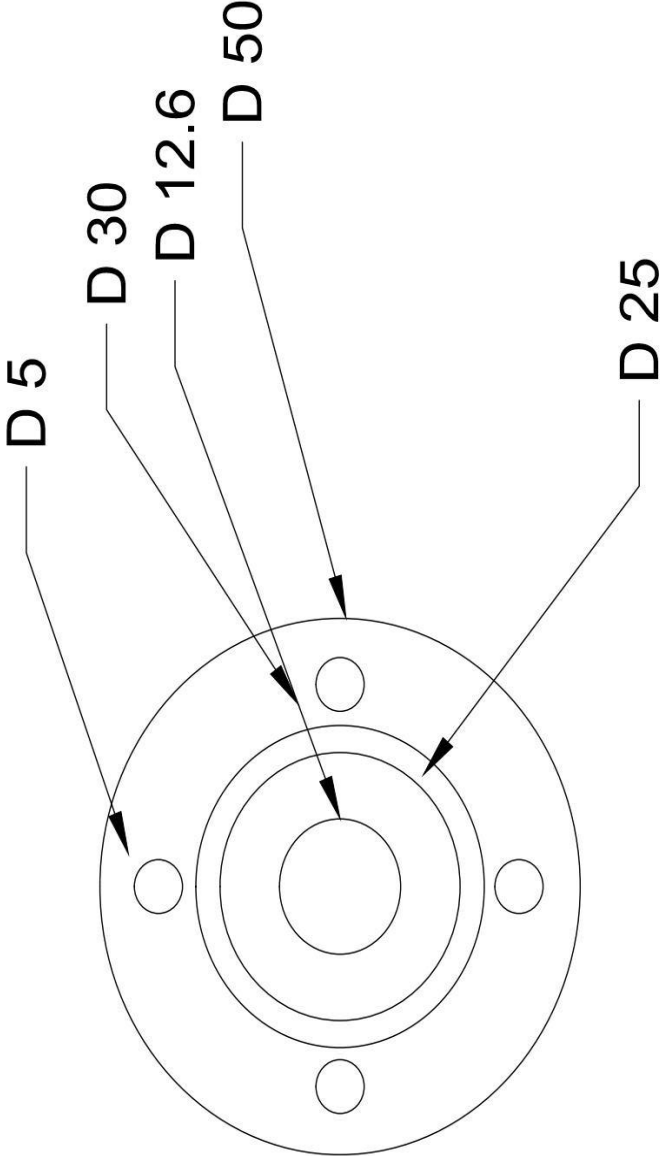








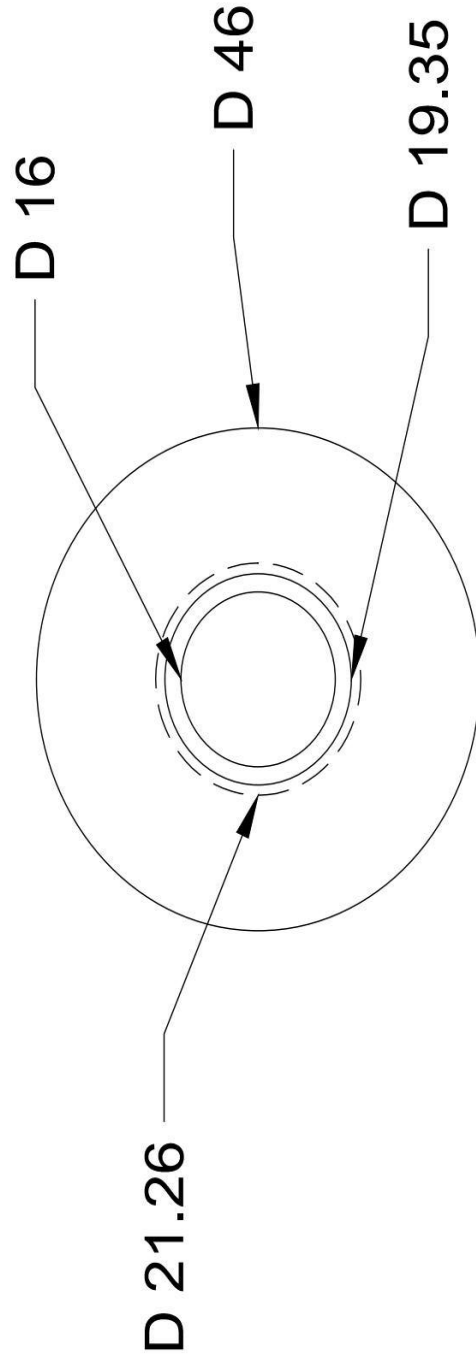
Section - Top View



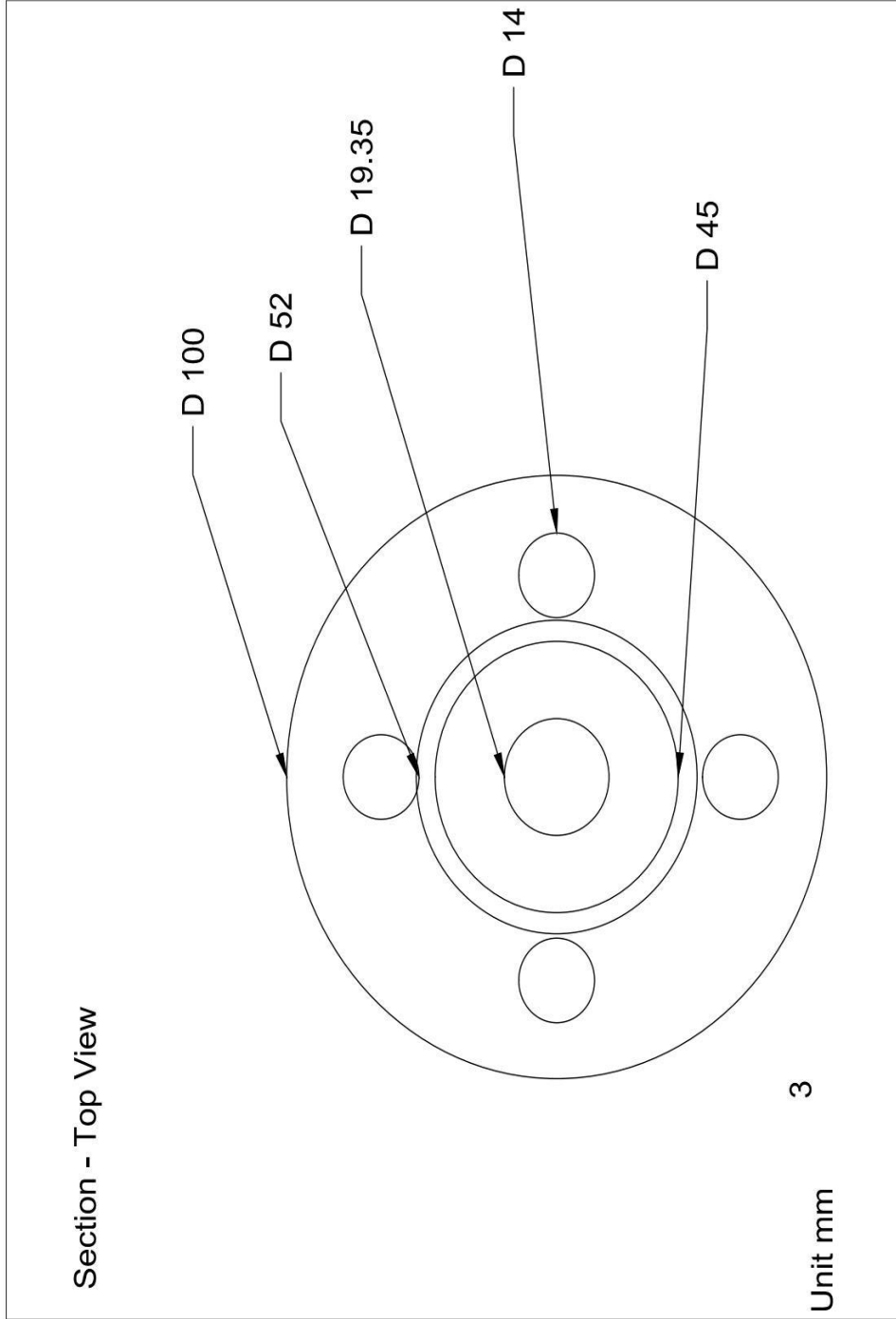
1

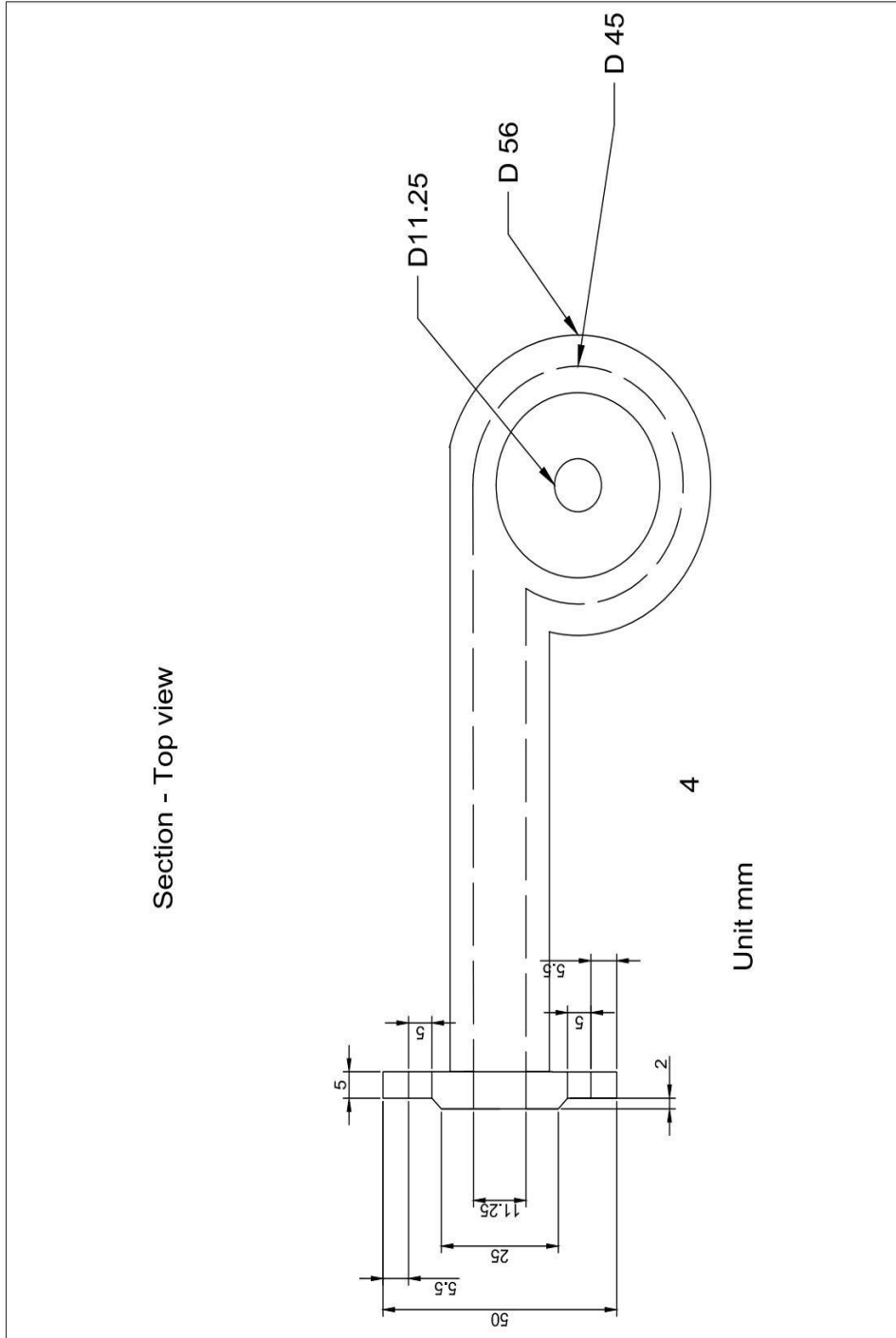
Unit mm

Section - Top View



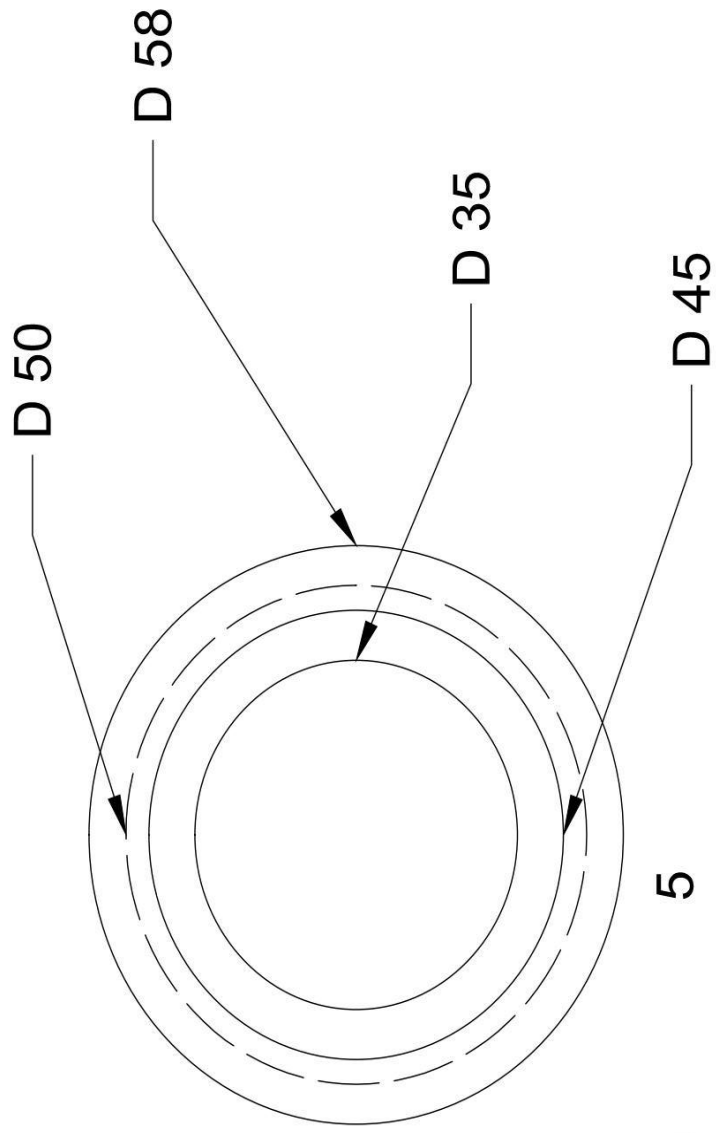
Unit mm 2





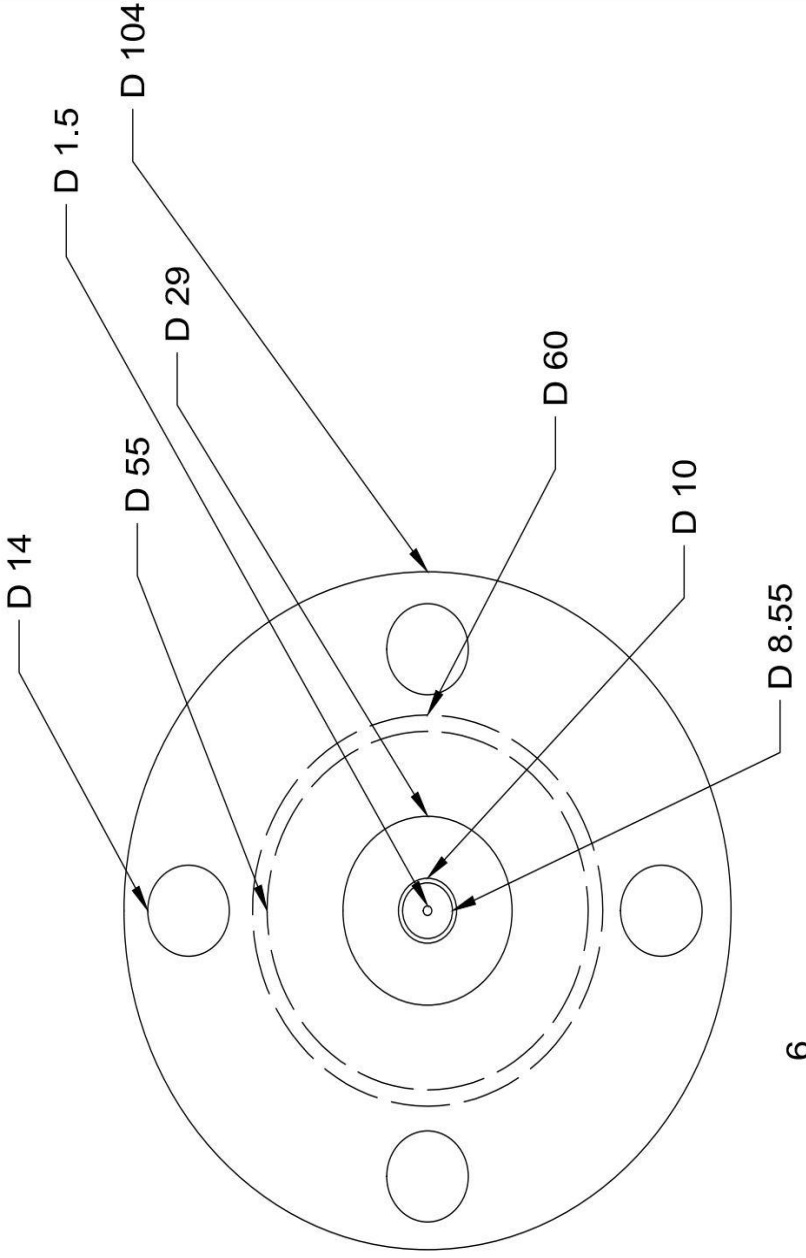
Section - Top view

Section - Top View



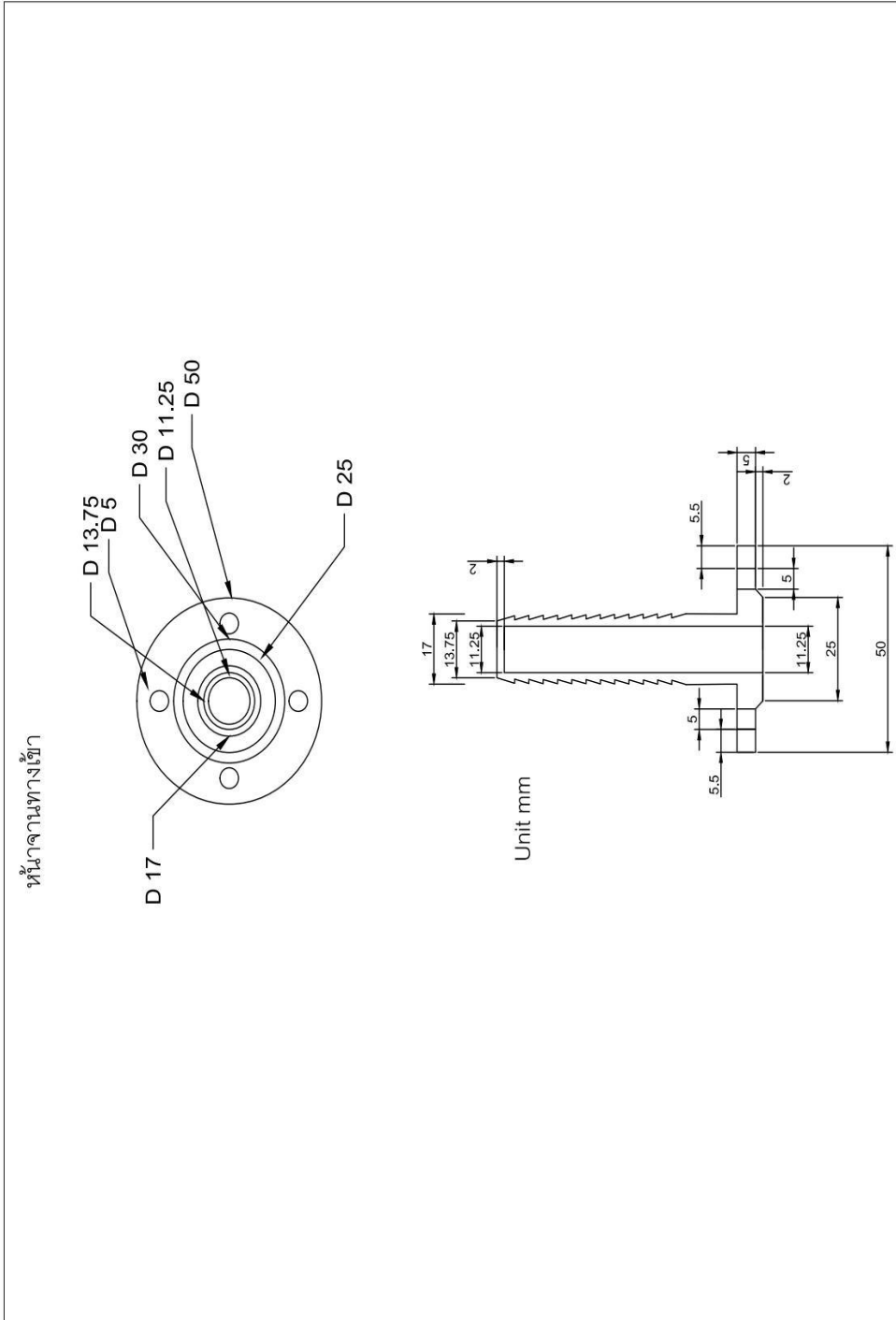
Unit mm

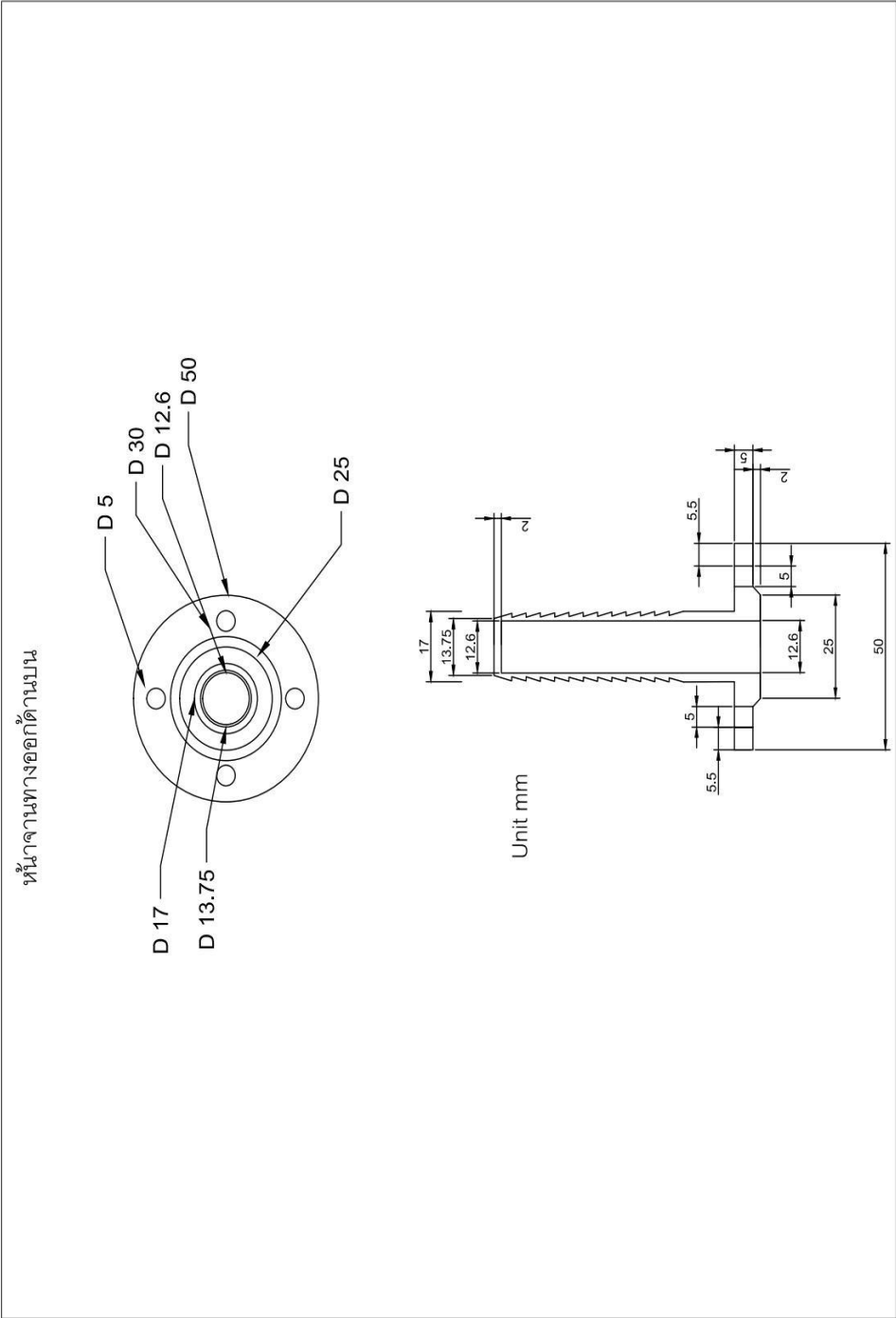
Section - Top View



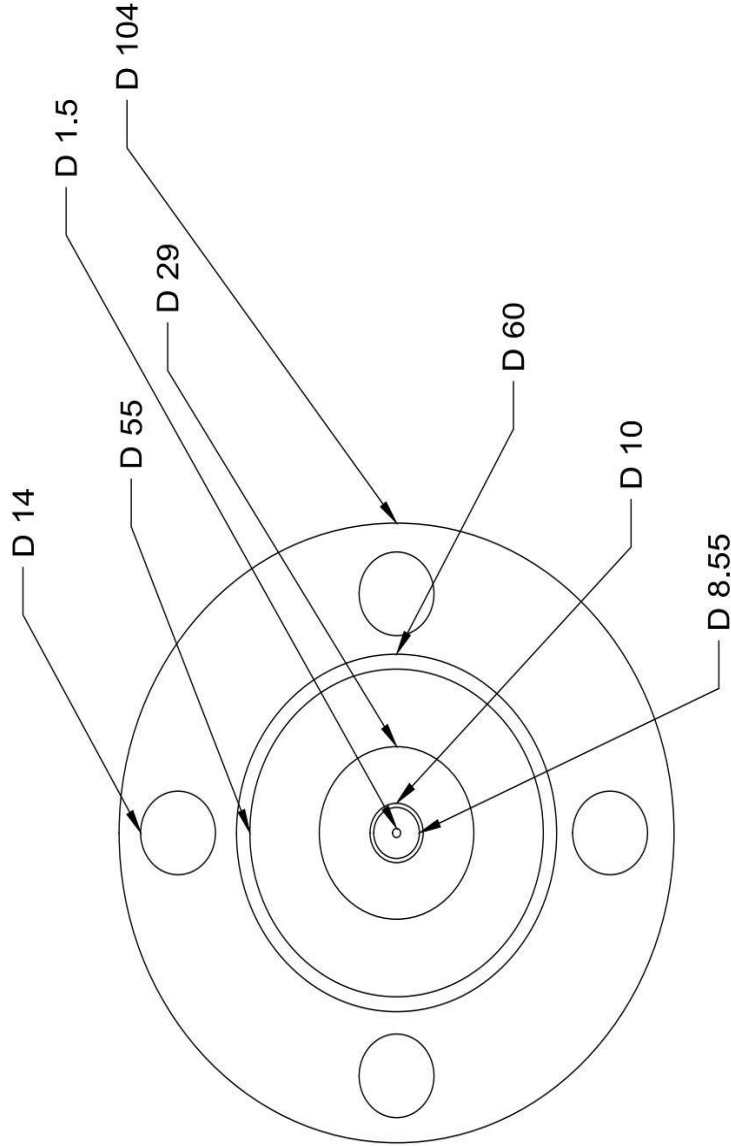
Unit mm

6





หน้าจานทางออกด้านล่าง



Unit mm

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุธินี ปฎิรูปานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 24 เมษายน พ.ศ. 2535 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปีการศึกษา 2556 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2557 ส่วนหนึ่งของงานวิจัยฉบับนี้ได้เผยแพร่ในเอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติดังนี้

1. งานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 15 จัดขึ้นที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในหัวข้อชื่อ การพัฒนาอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน เพื่อนำกลับน้ำมันและการแยกของแข็งแขวนลอยจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เมื่อวันที่ 11 -13 พฤษภาคม 2559
2. งานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 16 จัดขึ้นที่โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ จังหวัดกรุงเทพมหานคร ประเทศไทย ในหัวข้อชื่อ การปรับปรุงอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน เพื่อนำกลับน้ำมัน และการแยกของแข็งแขวนลอยจากน้ำเสียปนเปื้อนน้ำมัน เมื่อวันที่ 17 -18 พฤษภาคม 2560