

การประยุกต์ใช้ไฮโดรโซโคลนและไฮโดรโซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท เพื่อใช้ในการกำจัดกรวดทราย  
ในโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง



นางสาวสนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF HYDROCYCLONE AND HYDROCYCLONE EQUIPPED WITH  
GRIT POT FOR GRIT REMOVAL IN DINDAENG MUNICIPAL WASTEWATER  
TREATMENT PLANT



Miss Sonthiluk Sukasukonth

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 2009

Copyright of Chulalongkorn University



สนธิลักษณ์ สุชะสุนทร์ : การประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอต  
เพื่อใช้ในการกำจัดกรวดทรายในโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง. (APPLICATION OF  
HYDROCYCLONE AND HYDROCYCLONE EQUIPPED WITH GRIT POT FOR GRIT  
REMOVAL IN DINDAENG MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT)

อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ, 185 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากการประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง  
กริตพอตแทนที่ถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศในการแยกกรวดทรายออกจากรน้ำเสียชุมชน  
ดินแดง โดยศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ  
ไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบ ได้แก่ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอต อีกทั้ง  
เปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลน ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอต และถังดักกรวด  
ทรายแบบเดิมอากาศที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง

ผลการวิจัยพบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายในรูปของของแข็งคงตัวของ  
ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอต มีค่าสูงสุดเท่ากับ 86 และ 68  
เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอตมีความเข้มข้นของกรวดทรายที่สะสม  
ในกริตพอตโดยเฉลี่ย 6,272 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ  
200 เท่า ส่วนความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศ มีค่า  
เท่ากับ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลนมากที่สุด คือ ความดัน  
จ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออก  
ด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอต ตามลำดับ

ดังนั้นไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้แทนที่ถังดัก  
กรวดทรายแบบเดิมอากาศ เนื่องจากมีขนาดเล็ก จึงประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง เหมาะสำหรับการ  
บำบัดน้ำเสียในตัวเมืองที่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ อีกทั้งยังให้ประสิทธิภาพสูงและให้ความเข้มข้นของ  
กรวดทรายที่แยกได้สูง นอกจากนี้ยังประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และสามารถแก้ปัญหา  
น้ำเสียมีปริมาณออกซิเจนละลายสูงก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกทิวเต็ดสลัดจ์แบบ A/O ได้อีกด้วย

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต สุชะสุนทร์

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2552



## 4870709721: MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS: HYDROCYCLONE / GRIT POT / GRIT CHAMBER / MUNICIPAL WASTEWATER / MUNICIPAL TREATMENT PLANT

SONTHILUK SUKASUKONTH : APPLICATION OF HYDROCYCLONE AND HYDROCYCLONE EQUIPPED WITH GRIT POT FOR GRIT REMOVAL IN DINDAENG MUNICIPAL WASTEWATER TREATMENT PLANT. THESIS ADVISOR: CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 185 pp.

This research studied on the replacement of the aerated grit chamber by using hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot to remove grit from Dindaeng municipal wastewater. Operating parameters such as inlet pressure, diameter of hydrocyclone, underflow diameter and grit pot operating times were studied. In addition, this research also studied on the efficiency between classical hydrocyclone, hydrocyclone equipped with grit pot and aerated grit chamber, which currently uses in Dindaeng municipal wastewater treatment plant.

The results indicated that the grit removal efficiency of hydrocyclone and hydrocyclone equipped with grit pot were as high as 86 and 68 % respectively. However, the average value of accumulated grit concentration of hydrocyclone equipped with grit pot was 6,272 mg/L, which was 200 times higher than classical hydrocyclone while the grit concentration from aerated grit chamber was only 1,800 mg/L. In term of operating parameter, the most important parameters for hydrocyclone efficiency were inlet pressure, diameter of hydrocyclone, underflow diameter and grit pot operating times.

Therefore, hydrocyclone equipped with grit pot is an interesting choice to replace the aerated grit chamber in municipal wastewater treatment, because of its compactness, high separation efficiency, high concentration and energy saving. Moreover, hydrocyclone equipped with grit pot also resolves the problem of wastewater with high dissolve oxygen before turn into A/O activated sludge process.

Department : Environmental Engineering Student's Signature Sonthiluk Sukasukonth  
Field of Study : Environmental Engineering Advisor's Signature [Signature]  
Academic Year : 2009

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.ชัยพร ภู่วะเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษา ภา  
วิทยานิพนธ์ ที่ให้แนวทางในการดำเนินการวิจัยและให้คำแนะนำอย่างดี รวมทั้ง ให้ความกรุณา  
วิเคราะห์ผลการทดลอง และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ ประธานกรรมการสอบ  
วิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.พิสุทธิ เพ็ชรมนกุล และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล  
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาในการ สอบวิทยานิพนธ์ และให้คำปรึกษาที่เป็น  
แนวทางในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ล้อมที่  
ได้ให้ความรู้และให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้  
สถานที่และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำ  
ดินแดง ที่ให้ความช่วยเหลือ แก้ไขปัญหา และให้ข้อมูล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณพี่ๆและเพื่อนนิสิตปริญญาโททุกท่าน ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการ  
วิเคราะห์ผลการทดลอง และขอขอบคุณ คุณสุขสันต์ จันทน์วิมล ที่คอยช่วยเหลือและแก้ไขปัญหา  
ต่างๆที่เกิดขึ้นให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีตลอดการวิจัย

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่ให้ การ  
สนับสนุนทุนทรัพย์ และเป็นกำลังใจที่สำคัญ โดยเฉพาะมารดา ถึงแม้ว่าท่านจะจากไปก่อนที่จะได้  
เห็นความสำเร็จครั้งนี้ แต่ท่านก็เป็นพลังที่ยิ่งใหญ่ที่ช่วยให้ ผู้วิจัยสามารถฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆได้  
ตลอดมา

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ณ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน.....	4
2.1.1 ปริมาณและลักษณะสมบัติของกรวดทรายในน้ำเสียชุมชน.....	5
2.2 โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง.....	6
2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย.....	7
2.3 ถังดักกรวดทราย.....	10
2.3.1 ประเภทของถังดักกรวดทราย.....	10
2.3.2 ข้อดีและข้อเสียของถังดักกรวดทรายแบบต่างๆ.....	13
2.4 ไฮโดรไซโคลน.....	15
2.4.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน.....	15
2.4.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน.....	19
2.4.3 ความเร็วของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน.....	21
2.4.3.1 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง.....	21
2.4.3.2 ความเร็วตามแนวแกน.....	25

2.4.3.3	ความเร็วตามแนวรัศมี.....	25
2.4.4	กฎของสโตค (Stoke's law).....	26
2.4.5	พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน....	28
2.4.6	สรุปผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลน.....	37
2.5	ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	38
2.6	ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน.....	40
2.6.1	ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency).....	40
2.6.2	ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency).....	42
2.6.2.1	ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	43
2.6.2.2	ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	44
2.6.3	ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency).....	45
2.6.4	ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency).....	46
2.6.5	ขนาดตัด (Cut size).....	47
2.6.6	ความคมชัด (Sharpness).....	49
2.7	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	50
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....		59
3.1	เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	59
3.1.1	อุปกรณ์ที่ติดตั้งใน Pilot plant ที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
3.1.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในงานวิจัย.....	60
3.1.3	หลักการทำงานของ Pilot plant.....	61
3.2	ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	62
3.2.1	การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท.....	63
3.2.2	การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	65
3.3	แผนการทดลอง.....	66
3.3.1	วิธีทำการทดลอง.....	71
3.3.1.1	การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท.....	71



3.3.1.2	การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท.....	72
3.3.1.3	การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	73
3.3.1.4	การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	74
3.3.2	การแสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	75
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	76
4.1	ความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน.....	77
4.1.1	ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	77
4.1.2	ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	83
4.1.3	เปรียบเทียบความเข้มข้นของกรวดทรายที่ถูกแยกออกทางด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	88
4.2	มวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน.....	90
4.2.1	ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	90
4.2.2	ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	93
4.2.3	เปรียบเทียบมวลของกรวดทรายที่ถูกแยกออกทางด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	96
4.3	ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน.....	97
4.3.1	ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	98
4.3.2	ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	110
4.3.3	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	103
4.4	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน.....	105
4.5	ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน.....	108
4.5.1	ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	109
4.5.2	ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	111
4.5.3	เปรียบเทียบขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	114

4.5.4	ประสิทธิภาพในการแยกกรดทราายของไฮโดรไซโคลนกับขนาดอนุภาค..	114
4.5.5	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคกรดทราายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	115
4.5.6	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคกรดทราายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	116
4.6	เปรียบเทียบการประสิทธิภาพแยกกรดทราายระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรดทราายแบบเต็มอากาศ.....	117
4.6.1	เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการแยกกรดทราายออกจากน้ำเสียชุมชนระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรดทราาย.....	118
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	120
5.1	สรุปผลการวิจัย.....	120
5.1.1	ประสิทธิภาพในการแยกกรดทราายของไฮโดรไซโคลน.....	120
5.1.2	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน.....	121
5.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	122
	รายการอ้างอิง.....	123
	ภาคผนวก.....	126
	ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	127
	ภาคผนวก ข การคำนวณมวลของกรดทราายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน.....	151
	ภาคผนวก ค การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรดทราายของไฮโดรไซโคลน....	171
	ภาคผนวก ง การคำนวณมวลของกรดทราายเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทและถังดักกรดทราายแบบเต็มอากาศและการคำนวณค่าไฟฟ้าของไฮโดรไซโคลนและถังดักกรดทราายแบบเต็มอากาศ.....	180
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	185

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย.....	4
ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดงประจำปี พ.ศ.2551	6
ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของถังดักกรวดทรายแบบต่างๆ.....	13
ตารางที่ 3.1 รูปร่างและลักษณะของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย.....	60
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท.....	63
ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	65
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบมวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ที่ความดัน 2 บาร์.....	96
ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และ % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร .....	109
ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และ % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร .....	110
ตารางที่ 4.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท.....	111
ตารางที่ 4.5 % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท.....	111
ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท.....	112
ตารางที่ 4.7 % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท.....	113
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทกับถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศ.....	117
ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าไฟฟ้าระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรวดทรายแบบเดิมอากาศ	118

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง .....	7
รูปที่ 2.2 ตะแกรงละเอียด.....	8
รูปที่ 2.3 ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated grit chamber).....	8
รูปที่ 2.4 ถังเลี้ยงตะกอน (Activated Sludge Tank).....	9
รูปที่ 2.5 ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated grit chamber).....	11
รูปที่ 2.6 ถังดักกรวดทรายแบบน้ำวน (Vortex grit chamber) .....	11
รูปที่ 2.7 ถังดักกรวดทรายแบบเดโทรทาส.....	12
รูปที่ 2.8 ถังดักกรวดทรายแบบน้ำไหลแนวนอน (Horizontal flow grit chamber).....	13
รูปที่ 2.9 เส้นทางการไหลภายในไฮโดรไซโคลน.....	16
รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลน.....	19
รูปที่ 2.11 เส้นทางการไหลของของไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน...	20
รูปที่ 2.12 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน.....	21
รูปที่ 2.13 ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท.....	23
รูปที่ 2.14 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ).....	24
รูปที่ 2.15 การกระจายความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ ).....	25
รูปที่ 2.16 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ).....	26
รูปที่ 2.17 ผลของความยาวของ Vortex finder ต่อประสิทธิภาพระดับชั้นและขนาดตัด .....	33
รูปที่ 2.18 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท .....	39
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคกับขนาดอนุภาค เมื่อเปรียบเทียบ ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท .....	40
รูปที่ 2.20 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา.....	43
รูปที่ 2.21 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	44
รูปที่ 2.22 กราฟแสดงเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง	45
รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบความคมชัดในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน.....	49
รูปที่ 3.1 เครื่องทดลองแบบนำร่อง (Pilot plant)ที่ใช้ในงานวิจัย.....	59
รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของเครื่องทดลองแบบนำร่อง (Pilt plant).....	61



รูปที่ 3.3	ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	62
รูปที่ 3.4	ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	63
รูปที่ 3.5	แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร .....	67
รูปที่ 3.6	แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร .....	68
รูปที่ 3.7	แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท .....	69
รูปที่ 3.8	แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท .....	70
รูปที่ 4.1	ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านบน .....	78
รูปที่ 4.2	ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง .....	78
รูปที่ 4.3	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 6 มิลลิเมตร ความดัน 3 บาร์.....	79
รูปที่ 4.4	เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร.....	79
รูปที่ 4.5	ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านบน.....	80
รูปที่ 4.6	ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง .....	81
รูปที่ 4.7	เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร.....	82
รูปที่ 4.8	เปรียบเทียบความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้ที่ทางออกด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร.....	83
รูปที่ 4.9	ลักษณะของของแข็งที่ตกตะกอนและสะสมอยู่ภายในกริตพอท.....	84
รูปที่ 4.10	ลักษณะน้ำทั้ง 3 ช่องการไหลที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท ที่ความดันจ่ายเข้า 2 บาร์ เวลาในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที หลังจากตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง .....	84

รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของของแข็งคั่งตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน.....	85
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของของแข็งคั่งตัวที่สะสมในกริตพอทของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท .....	86
รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งคั่งตัวของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	86
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของของแข็งทั้ง 3 เส้นทางการไหลของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร.....	87
รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน 50 มิลลิเมตร .....	88
รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน 75 มิลลิเมตร .....	89
รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....	89
รูปที่ 4.18 มวลของแข็งคั่งตัวที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร.....	91
รูปที่ 4.19 มวลของแข็งคั่งตัวที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร.....	92
รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ทั้ง 3 ช่องการไหล.....	93
รูปที่ 4.21 มวลของแข็งคั่งตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	94
รูปที่ 4.22 มวลของแข็งคั่งตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท.....	95
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร.....	98
รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร.....	99

รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ระหว่างไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร  
ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร..... 99

รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50  
มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท..... 101

รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75  
มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท..... 102

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท..... 102

รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนระหว่างไฮโดร  
ไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท.....104

รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะการประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนโดยการต่อแบบขนานและติดตั้งกริตพอท  
เพื่อกำจัดกรวดทรายในโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง .....119

รูปที่ 5.1 ประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทโดยการต่อแบบอนุกรม ..... 122

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

$A_i$	พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลน (ตารางเมตร)
$C_f$	ความเข้มข้นของผลสมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)
$C_{GP}$	ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งในกิริตพอท (มวลต่อปริมาตร)
$C_o$	ความเข้มข้นของผลสมที่ออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)
$C_u$	ความเข้มข้นของผลสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)
$d_p$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) (เมตร)
$D_a$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ (Air core diameter) (เมตร)
$D_c$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone diameter) (เมตร)
$D_i$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (Feed in diameter) (เมตร)
$D_o$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (Overflow diameter) (เมตร)
$D_u$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (Underflow diameter) (เมตร)
$D_{50}$	ขนาดอนุภาคที่อยู่ในส่วนการไหลใดๆ ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก
$D^*$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้ามีค่าเท่ากับ $D - D_i$ (เมตร)
$E_T$	ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน (Total efficiency) (%)
$E'_T$	ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลน (Reduced total efficiency) (%)
$F$	เปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัด ( $x_{50}$ ) (% oversize)
$F_f(x)$	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (%)
$F_o(x)$	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบน (%)
$F_u(x)$	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่าง (%)
$g$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที <sup>2</sup>
$G(x)$	เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve)
$G'(x)$	เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency curve)
%GE	Granulometric separation efficiency
$h$	ระยะทางระหว่างส่วนปลายของ vortex finder กับส่วนบนของช่องทางออกด้านล่าง (เซนติเมตร)
$H\left(\frac{25}{75}\right)$	ดรรชนีความคมชัดของไฮโดรไซโคลนที่เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น 25 และ 75 %



$M$	มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (มวลต่อเวลา)
$M_u$	มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านล่าง (มวลต่อเวลา)
$n$	ค่าคงที่ของรูปร่างไฮโดรไซโคลน มีค่าระหว่าง 0.5-0.9
$Q$	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)
$Q_o$	อัตราการไหลที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)
$Q_u$	อัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)
$R$	รัศมีของไฮโดรไซโคลน (บริเวณที่เป็นทรงกระบอก) (เมตร)
$R_f$	อัตราส่วนอัตราการแบ่งการไหล (Flow split)
$S$	การแยกน้ำ (Water split)
$T$	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)
$t$	ความหนาของผนัง vortex finder (เมตร)
$V_{GP}$	ปริมาตรของกริตพอท (ลิตร)
$V_i$	ความเร็วของของผสมที่จ่ายเข้าที่ช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลน (Inlet velocity) (เมตรต่อวินาที)
$V_p$	ความเร็วในการตกตะกอน (Terminal velocity) (เมตรต่อวินาที)
$V_x$	ความเร็วตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน (Radial velocity) (เมตรต่อวินาที)
$V_y$	ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน (Tangential velocity) (เมตรต่อวินาที)
$V_z$	ความเร็วตามแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลน (Axial velocity) (เมตรต่อวินาที)
$x_{25}$	ขนาดอนุภาคที่เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น 25 เปอร์เซ็นต์ (ไมโครเมตร)
$x_{50}$	ขนาดตัด (Cut size) (ไมโครเมตร)
$x_{75}$	ขนาดอนุภาคที่เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น 75 เปอร์เซ็นต์ (ไมโครเมตร)
$\Delta p$	ความดันลด (Pressure drop)
$\Delta\rho$	ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว (กิโลกรัมต่อเมตร <sup>3</sup> )
$\alpha$	อัตราส่วนระหว่างความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน ( $V_y$ ) กับความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า ( $V_i$ ) (Bradley, 1965)
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตร <sup>3</sup> )
$\rho_w$	ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตร <sup>3</sup> )
$\zeta$	ความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone) (เมตรต่อวินาที <sup>2</sup> )
$\mu$	ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) (นิวตันวินาทีต่อเมตร <sup>2</sup> )

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ในกระบวนการรวบรวมและบำบัดน้ำเสียชุมชนของประเทศไทย น้ำเสียจากท่อรวบรวมน้ำเสียในพื้นที่จะไหลมายังโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนรวม เพื่อบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งรับน้ำ ซึ่งระบบรวบรวมน้ำเสียแบบรวม (Combined system) ที่ใช้ในประเทศไทยกันอยู่จะทำหน้าที่รวบรวมน้ำเสียและน้ำฝนจากแหล่งชุมชนในลักษณะการไหลที่รวมกันภายในท่อเดียวกัน ลักษณะการไหลภายในท่อรวบรวมน้ำเสียแบบรวมจะอยู่ภายใต้ แรงโน้มถ่วงเป็นหลัก ทำให้ลักษณะของน้ำเสียมีปริมาณของแข็งขนาดเล็ก เช่น ทราย หิน กรวด หรือตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะสูง ๆ ปะปนอยู่ด้วยเป็นจำนวนมาก ของแข็งเหล่านี้เมื่อเข้าสู่ระบบบำบัดจะทำให้เครื่องสูบน้ำ หรือ อุปกรณ์อื่นๆ เช่นเครื่องกวาดตะกอนในถังตกตะกอนเกิด การสึกกร่อน โดยเฉพาะถ้า น้ำเสียมีส่วนประกอบของน้ำมันอาจทำให้เกิดการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่อุดตันตามท่อ ข้องอ หรือตามมุมถึงปฏิกริยา เป็นต้น ดังนั้นในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนจึงมักออกแบบให้มีระบบกำจัดกรวดทรายออกจากน้ำเสียก่อนนำไปบำบัด

ในปัจจุบันการแยกสารแขวนลอยประเภท กรวด ทราย หรือวัสดุอื่นๆ ออกจากน้ำเสียด้วยการทำให้ตกจมที่นิยมใช้ในประเทศไทย มี 2 แบบ ได้แก่ ถังตกกรวดทรายแบบแนวราบ (conventional grit chamber) ซึ่งมักมีขนาดใหญ่มาก และถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศ (aerated grit chamber) ซึ่งต้องการพลังงานมากในการเติมอากาศด้านล่างและบริเวณด้านข้างของถัง เพื่อให้ น้ำเกิดการไหลแบบหมุนเป็นเกลียว (spiral roll) ตั้งฉากกับการไหลของน้ำ และต้องการแรงงานและความชำนาญในการบำรุงรักษาและควบคุมระบบเติมอากาศ นอกจากนี้ในกรณีของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง น้ำเสียที่ผ่านถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศจะมีปริมาณออกซิเจนละลายอยู่สูง เมื่อเข้าสู่กระบวนการแยกที่เวเต็ดสไลด์จ์แบบ A/O (Anoxic-Oxic Activated Sludge Process) ที่ใช้ขบวนการทำให้เกิดสภาวะแอน็อกซิก (anoxic) ได้ยาก

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะประยุกต์ใช้ ไฮโดรไซโคลนและ ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทแทนที่ถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชน ไฮโดรไซโคลนมีหลักการทำงานโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแยกของผสมออกจากกัน เช่น แยกของแข็งออกจากของแข็ง ของแข็งออกจากของเหลว และของเหลวออกจากของเหลว โดยที่ของผสมทั้งสองนั้นต้องมีความหนาแน่นแตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการแยกของแข็ง เช่น กรวดทราย ออกจากน้ำเสียชุมชนซึ่งมีปริมาณกรวดทรายอยู่จำนวนมากโดยใช้ไฮโดรไซโคลนที่

ติดตั้งกริตพอท ซึ่งกริตพอทนั้นจะทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก โดยจะติดตั้งอยู่ที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอน

สาเหตุที่เลือกใช้ไฮโดรไซโคลอนและไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทในงานวิจัยนี้เนื่องจากไฮโดรไซโคลอนเป็นอุปกรณ์ที่ดำเนินการและติดตั้งได้ง่าย ราคาถูก มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง อีกทั้งมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกชนิดอื่น ๆ จึงประหยัดพื้นที่ในการติดตั้งและใช้เวลากักน้ำน้อย นอกจากนี้ไฮโดรไซโคลอนไม่มีการเติมอากาศ จึงสามารถแก้ปัญหาหน้าเสียนีปริมาณออกซิเจนละลายสูงก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกที่เวเต็ดสลัดจ์แบบ A/O (Anoxic-Oxic Activated Sludge Process) อีกด้วย อย่างไรก็ตามไฮโดรไซโคลอนก็มีข้อเสียอยู่บ้าง คือ ต้องการพลังงานสูงในการสร้างความเร็วในการไหลเข้า โดยนิยมควบคุมความดันจ่ายเข้าเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลอน

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไฮโดรไซโคลอนและไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทมาใช้ใน การแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชน แทนที่ถังตกกรวดทรายประเภทอื่นๆ
- 1.2.2 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน และไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชน
- 1.2.3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลอนและไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทและถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศที่ใช้อยู่ ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการวิจัยในระดับทดลอง (Pilot plant) ดำเนินการ ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง โดยใช้น้ำเสียดิบจริงจากสถานีสู บ่งน้ำมาใช้ในการทดลอง และได้นำ Pilot plant ดังกล่าวไปติดตั้ง ณ บริเวณสถานีส่งสูบน้ำเสีย หลังจากนั้นได้ทำการทดลองและเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อนและหลังจากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลอนและไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ห้องปฏิบัติการ การ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ช่วงเวลาที่ทำการทดลองคือระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2551 ถึง พฤศจิกายน พ.ศ. 2551

การศึกษาวิจัยในครั้งนี้กำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

- 1.3.1 ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะรูปร่างคงที่ โดย ใช้ไฮโดรไซโคลน 2 ขนาด ยี่ห้อ NEYRTEC ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทำจาก โพลียูเรเทน (Polyurethane) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ทำจาก เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel)
- 1.3.2 กริตพอทที่นำมาใช้ในการทดลองทำจากพลาสติกทรงกระบอกโปร่งใสซึ่งมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และมีปริมาตรเท่ากับ 1.2 ลิตร
- 1.3.3 การศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดา ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง กริตพอทและถังดักกรวดทราย ทำในสองแนวทาง โดยแนวทางแรกจะทำในแง่ การแยกมวลกรวดทราย(Grit) ซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพการแยกลด (Reduced total efficient) สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา และประสิทธิภาพรวม (Total efficient) สำหรับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท แนวทางที่สองนั้นจะทำในแง่ ขนาดอนุภาคของกรวดทรายที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลน

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ทราบความเป็นไปได้ในการนำไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท มาใช้ในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนแทนที่ถังดักกรวดทรายประเภท อื่นๆ
- 1.4.2 ทราบถึงประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลน ที่ติดตั้ง กริตพอท เพื่อเป็นทางเลือกใหม่ในการแยกกรวดทรายออก จากน้ำเสีย ชุมชน
- 1.4.3 ทราบพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลนและ ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนจริง



## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง กวิตพอทในการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น (Preliminary Treatment) เพื่อแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชน โดยดำเนินการทดลอง ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง แทนที่ถังดักกรวดทรายที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งรายละเอียดที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

#### 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียชุมชน

น้ำเสียชุมชน (Domestic Wastewater) หมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมการดำรงชีวิตประจำวันของประชากร ได้แก่ น้ำเสียที่เกิดจากการประกอบอาหารและชำระล้างสิ่งสกปรกทั้งหลายภายในครัวเรือน และอาคารประเภทต่าง ๆ เป็นต้น ลักษณะน้ำเสียชุมชนจะมีค่าพีเอชเป็นกลาง มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่เป็นของแข็งแขวนลอย และของแข็งละลายน้ำ โดยมีสารอินทรีย์เป็นส่วนประกอบหลัก ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย แสดงได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย (ธงชัย พรรณสวัสดิ์ และคณะ, 2530 อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์, 2544)

ชุมชน	บีโอดี (BOD)	ซีโอดี (COD)	เอสเอส (SS)	ทีเคเอ็น (TKN)	ฟอสฟอรัส (TP)
อาคารชุดพักอาศัย					
• น้ำล้าง	110	220	-	40.8	1.3
• น้ำเสียอื่น	151	285	-	21	2.1
โรงแรมชั้นหนึ่ง	190	311	84	23	1.8
หอพัก					
• น้ำล้าง	123	1,290	666	32.9	6.8
• น้ำเสีย	75	135	29	19.2	3.9

หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ 2.1 ค่าเฉลี่ยของลักษณะน้ำเสียชุมชนในประเทศไทย (ต่อ)

ชุมชน	บีโอดี (BOD)	ซีโอดี (COD)	เอสเอส (SS)	ทีเคเอ็น (TKN)	ฟอสฟอรัส (TP)
โรงพยาบาล	170	282	69	27.6	2.9
ภัตตาคาร	919	1,785	401	55.1	3.2
ตลาด	1,123	2,242	551	53.9	4.0
ศูนย์การค้า	81	224	61	66.8	10.1

หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ในกระบวนการรวบรวมและบำบัดน้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากที่รวบรวมน้ำเสียในพื้นที่จะไหลมายังโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน (Municipal treatment plant) เพื่อบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งรับน้ำ ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้ระบบรวบรวมน้ำเสียแบบรวม (Combined system) ซึ่งจะรวบรวมน้ำเสียและน้ำฝนภายในท่อเดียวกัน ทำให้ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียมีปริมาณของแข็ง เช่น กรวด หิน ททราย เข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในปริมาณมาก

### 2.1.1 ปริมาณและลักษณะสมบัติของกรวดทรายในน้ำเสียชุมชน

ปริมาณและลักษณะของกรวดทรายในน้ำเสียชุมชนจะแตกต่างกันได้มาก โดยขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ประเภทของระบบรวบรวมน้ำเสีย ความเร็วการไหลของน้ำในท่อรวบรวมน้ำเสีย ลักษณะของพื้นที่รับน้ำฝน สภาพท่อน้ำเสีย และประสิทธิภาพของระบบกำจัดกรวดทราย ปริมาณกรวดทรายสำหรับประเทศไทยยังไม่พบว่ามีกรวดทราย แต่ค่าโดยทั่วไปจาก Qasim, S.R. (1985) ซึ่งได้ข้อมูลในต่างประเทศพบว่ากรวดทรายมีปริมาณประมาณ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อหนึ่งล้านลูกบาศก์เมตร อย่างไรก็ตามคาดว่าปริมาณกรวดทรายของประเทศไทยน่าจะมีมากกว่าของประเทศที่เจริญแล้ว เนื่องจากลักษณะการวางท่อและการประสานต่อของประเทศไทยยังไม่มีดีเท่าที่ควร และความหนาแน่นของกรวดที่ผ่านการรื้อน้ำแล้วอยู่ในช่วง 1,400-1,800 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

## 2.2 โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียชุมชนจริง ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง ซึ่งเป็นโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ของกรุงเทพมหานคร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันและแก้ไขปัญหาเน่าเสียของแม่น้ำเจ้าพระยาและคลองต่างๆ ในพื้นที่ให้บริการบำบัดน้ำเสีย คือ คลองโอง่าง คลองบางลำพู คลองมหานาค คลองแสนแสบ คลองเปรมประชากร และคลองสามเสน และบำบัดน้ำเสียที่เก็บรวบรวมจากแหล่งชุมชน ให้ได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งชุมชนก่อนปล่อยลงสู่คลองสามเสน และบึงมักกะสัน โดยสามารถบำบัดน้ำเสียได้ประมาณ 350,000 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน มีพื้นที่รับน้ำเสีย 37 ตารางกิโลเมตร ครอบคลุมพื้นที่ 8 เขตการปกครอง คือเขตดินแดง ปทุมวัน และบางส่วนของพื้นที่เขตดุสิต พญาไท ราชเทวี พระนคร ป้อมปราบศัตรูพ่าย และสัมพันธวงศ์ ประชากรประมาณ 1,080,000 คน ใช้ระบบการบำบัดน้ำเสียเป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งใช้ระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ร่วมกับการกำจัด ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส รวมทั้งกำจัดกลิ่นด้วย (แหล่งที่มา : <http://www.gusco.co.th>) ข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดงในช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2551 แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดงประจำปี พ.ศ.2551

เดือน	อัตราการไหล (ลบ.ม./วัน)	BOD เข้า (มก./ลิตร)	BOD ออก (มก./ลิตร)	BOD Removal (%)	SS เข้า (มก./ลิตร)	SS ออก (มก./ลิตร)	SS Removal (%)
มกราคม	205,161	27.02	4.67	82.72	20.10	8.58	57.31
กุมภาพันธ์	221,556	29.36	10.38	64.65	40.13	9.33	76.75
มีนาคม	222,053	31.04	10.91	64.85	24.64	13.07	46.96
เมษายน	203,623	29.49	5.27	82.13	23.90	11.83	50.50
พฤษภาคม	184,296	25.12	2.82	88.77	28.24	14.48	48.73
มิถุนายน	169,122	24.64	2.11	91.44	27.78	10.01	63.97
กรกฎาคม	178,224	23.45	2.32	90.11	31.29	7.37	76.45

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดงประจำปี พ.ศ.2551(ต่อ)

เดือน	อัตราการไหล (ลบ.ม./วัน)	BOD เข้า (มก./ลิตร)	BOD ออก (มก./ลิตร)	BOD Removal (%)	SS เข้า (มก./ลิตร)	SS ออก (มก./ลิตร)	SS Removal (%)
สิงหาคม	173,689	29.36	3.25	88.93	51.64	6.32	87.76
กันยายน	199,548	27.07	3.24	88.03	45.76	8.10	82.30
ตุลาคม	203,786	21.49	2.76	87.16	36.56	9.53	73.93
พฤศจิกายน	242,848	24.61	4.60	81.31	29.13	10.75	63.10
<b>เฉลี่ย</b>	<b>200,355</b>	<b>26.60</b>	<b>4.76</b>	<b>82.12</b>	<b>32.65</b>	<b>9.94</b>	<b>69.55</b>

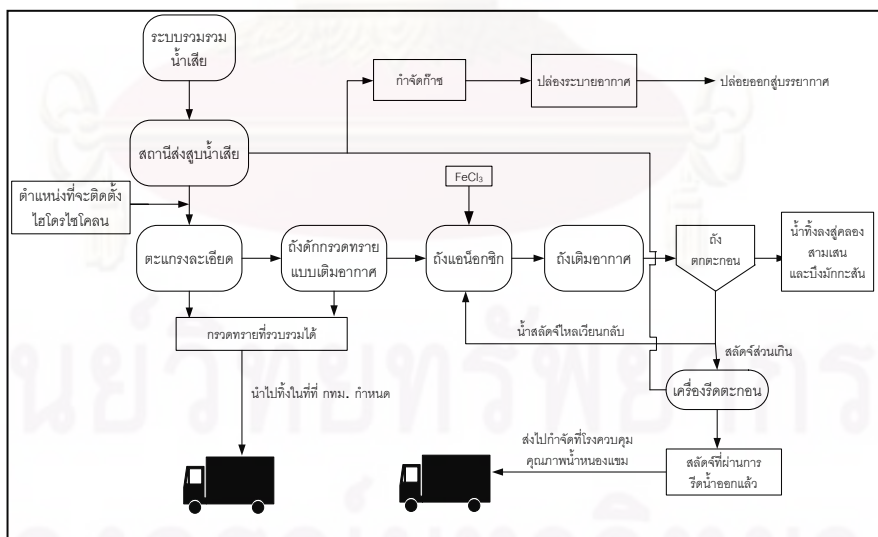
ที่มา : สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ สำนักการระบายน้ำ กรุงเทพฯ (www.dds.bma.go.th)

หมายเหตุ : BOD คือ Biochemical Oxygen Demand

SS คือ Suspended Solids เป็นปริมาณของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำเสีย

### 2.2.1 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

น้ำเสียจากท่อรวบรวมน้ำเสียในพื้นที่ที่จะไหลมายังโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง ซึ่งจะทำหน้าที่บำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่คลอง โดยโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดงมีหน่วยบำบัดต่างๆ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนผังกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง



กระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นต้น

น้ำเสียจากท่อรวบรวมน้ำเสียจะไหลมารวมกันที่สถานีส่งสูบน้ำเสีย (Inlet Pumping Station) ซึ่งประกอบไปด้วยเครื่องสูบน้ำเสียจำนวน 16 เครื่อง เพื่อทำหน้าที่สูบน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยรักษาระดับน้ำในสถานีสูบน้ำไว้ที่ 12 เมตร น้ำเสียจะถูกบำบัดทางกายภาพโดยผ่านตะแกรงละเอียด (Fine Screen) ที่มีทั้งหมด 8 ตัว ช่องว่างของตะแกรงขนาดกว้าง 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.2 จากนั้นเข้าสู่ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated Grit Chamber) ขนาด  $3.2 \times 9.45 \times 5.2$  เมตร ดังรูปที่ 2.3 เพื่อแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียก่อนเข้าถังเลี้ยงตะกอน (Activated Sludge Tanks)



รูปที่ 2.2 ตะแกรงละเอียด (Fine Screen)



รูปที่ 2.3 ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated Grit Chamber)

## 2. ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นที่สอง

น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นไปแล้วจะถูกส่งไปยังถังเลี้ยงตะกอน ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแอกทีเวตเต็ดสลัดจ์แบบ A/O (Anoxic-Oxic Activated Sludge Process) โดยมีการกำจัดไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์เฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic microorganisms) ผ่านกระบวนการดีไนทริฟิเคชัน (Denitrification) และมีการเติมออกซิเจนในถังเติมอากาศเพื่อออกซิไดซ์แอมโมเนียไปเป็นไนเตรทโดยจุลินทรีย์ออโตโทรฟิก (Autotrophic microorganisms) ผ่านกระบวนการไนทริฟิเคชัน (Nitrification) และเวียนกลับไนเตรทมายังถังแอน็อกซิกเพื่อกำจัดไนเตรทต่อไป หลังจากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งไปยังถังตกตะกอน เพื่อแยกตะกอนจุลินทรีย์จากถังเลี้ยงตะกอน โดยตะกอนจุลินทรีย์จะตกลงสู่ก้นถัง น้ำใสส่วนบนจะไหลล้นฝายออกไป และระบายลงสู่คลองสามเสนและบึงมักกะสัน ส่วนตะกอนจุลินทรีย์ที่ก้นถังส่วนหนึ่งจะไหลเวียนกลับเข้าสู่ถังเลี้ยงตะกอน และอีกส่วนหนึ่งจะไหลไปเข้าเครื่องรีดตะกอน ทั้งนี้มีการใช้ระบบเติม  $FeCl_3$  ในน้ำก่อนเข้าถังตกตะกอนไว้ เพื่อการกำจัดฟอสฟอรัส



รูปที่ 2.4 ถังเลี้ยงตะกอน (Activated Sludge Tank)

## 3. การจัดการสลัดจ์

ตะกอนส่วนเกินและตะกอนฟอสฟอรัสที่ตกลงสู่ก้นถังตกตะกอน จะถูกนำมาเพิ่มความเข้มข้น ก่อนที่จะนำไปรีดน้ำออกด้วยเครื่องรีดตะกอน (Belt Filter Press) โดยตะกอนที่ผ่านการรีดน้ำแล้วจะต้องมีค่าของแข็งคิดเป็นน้ำหนักแห้ง 20 เปอร์เซ็นต์ (มีน้ำ 80 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งจะมี

สภาพคล้ายดินแห้ง นำมาผสมกับปูนขาวเพื่อป้องกันการเกิดกลิ่น ตะกอนที่ได้สามารถนำไปผสมดินใช้ทำปุ๋ยหรือถมที่ก็ได้ โดยตะกอนทั้งหมดนี้จะถูกส่งไปที่ โรงบำบัดตะกอนหนองแขมเพื่อดำเนินการต่อไป

## 2.3 ถังดักกรวดทราย (Grit chamber)

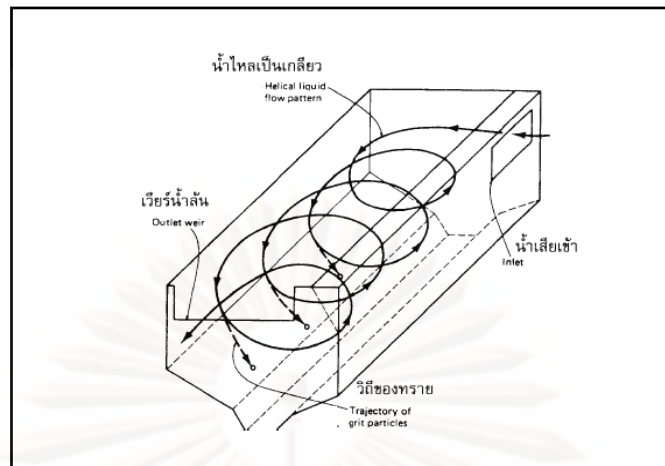
ถังดักกรวดทราย มีหน้าที่ดักกรวดทรายและก้ำกั๊ตของแข็งแขวนลอยที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าสารอินทรีย์ เช่น กรวด ทราย เมล็ดพืช เป็นต้น ในกระบวนการรวบรวมและบำบัดน้ำเสียชุมชน น้ำเสียจากท่อ รวบรวมน้ำเสียในพื้นที่จะไหลมายังโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน (Municipal treatment plant) เพื่อบำบัดน้ำเสียให้ได้มาตรฐานน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งรับน้ำ ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะใช้ระบบรวบรวมน้ำเสียแบบรวม (Combined system) ซึ่งจะรวบรวมน้ำเสียและน้ำฝนภายในท่อเดียวกัน ทำให้ลักษณะทางกายภาพของน้ำเสียมีปริมาณของแข็ง เช่น กรวด หิน ทราย เข้าสู่กระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำในปริมาณมาก จึงจำเป็นต้องมีถังดักกรวดทราย (Grit chamber) ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นต้น โดยจุดประสงค์ของการดักกรวดทรายก็เพื่อป้องกันการสึกกร่อนของอุปกรณ์หรือเครื่องจักร เช่น เครื่องสูบน้ำ เครื่องกวาดตะกอนในถังตกตะกอน ป้องกันท่ออุดตันโดยเฉพาะถ้าน้ำเสียมีส่วนประกอบของน้ำมัน อาจทำให้กรวดทรายเกิดการจับตัวรวมกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่อุดตันตามท่อ ซังอ หรือตามมุมถึงปฏิภรียา นอกจากนี้ยังป้องกันกรวดทรายสะสมอยู่ในถังบำบัด เช่น ถังกรวดทรายสะสมอยู่ในถังเติมอากาศ (ของระบบเอเอส) ย่อมทำให้ปริมาตรลดลง จึงอาจทำให้ประสิทธิภาพการบำบัดลดลงด้วย

### 2.3.1 ประเภทของถังดักกรวดทราย

ถังดักกรวดทรายสามารถแบ่งได้หลายประเภท การเลือกใช้แบบใดนั้นย่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความต้องการพื้นที่ ลักษณะของของแข็งที่จะก้ำกั๊ต การสูญเสียเสด ความยืดหยุ่นของระบบ และการป้องกันสารอินทรีย์ตกตะกอน เป็นต้น โดยถังดักกรวดทรายที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทย สามารถแบ่งได้ 4 แบบ ดังต่อไปนี้

#### 1. ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated grit chamber)

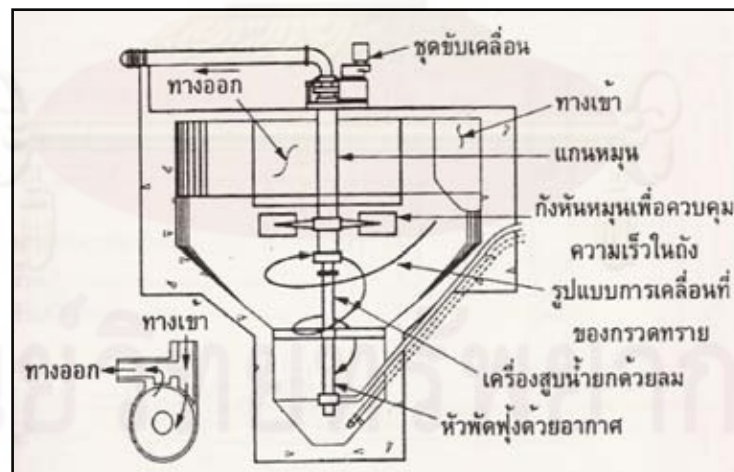
ถังดักกรวดทรายแบบนี้มีการเติมอากาศด้านล่างและบริเวณด้านข้างของถัง เพื่อให้ น้ำเกิดการไหลแบบหมุนเป็นเกลียว (spiral roll) ตั้งฉากกับการไหลของน้ำ (น้ำไหลตามความยาวของถัง) ทำให้ของแข็งหรือกรวดทรายตกลงสู่ก้นถังและรวมกันในรางหรือฮอปเปอร์ (Hopper) กรวดทรายที่อยู่ในฮอปเปอร์ มักจะถูกแยกออกจากกันถังโดยเครื่องสูบบแบบสกรูลำเลียง หรือเครื่องสูบน้ำแบบยกด้วยลม (Air lift pump) หรือถังดักกรวดทราย (bucket)



รูปที่ 2.5 ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated grit chamber)

## 2. ถังดักกรวดทรายแบบน้ำวน (Vortex grit chamber)

ถังดักกรวดทรายแบบน้ำวน มีหลักการทำงานคือ น้ำเสียไหลเข้าถังดักกรวดทรายในทิศทางสัมผัสกับขอบถังและใช้ใบพัดทำให้เกิดกระแสน้ำวน ความสามารถในการกำจัดกรวดทรายขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของใบพัด กรวดทรายจะจมตัวลงสู่สอปเปอร์ซึ่งอยู่ตรงกลางของถัง และสามารถแยกกรวดทรายออกจากกันถังโดยการใช้อุปกรณ์สูบน้ำกรวดทราย เช่น เครื่องสูบน้ำแบบยกด้วยลม (Air lift pump) เป็นต้น



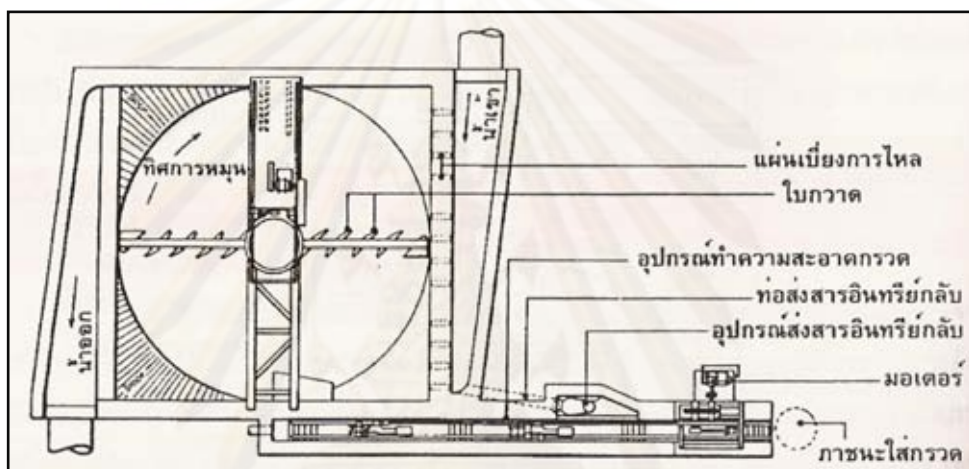
รูปที่ 2.6 ถังดักกรวดทรายแบบน้ำวน (Vortex grit chamber)

(สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)



### 3. ถังดักกรวดทรายแบบเดโทริทัส (Detritus grit chamber)

ถังดักกรวดทรายแบบเดโทริทัสมีลักษณะเป็นถังสี่เหลี่ยมจัตุรัส ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายเนื่องจากมีลักษณะการทำงานคล้ายกับถังตกตะกอน แต่มีเวลากักน้ำสั้นกว่า ดังนั้นอาจทำให้อุณหภูมิของสารอินทรีย์สามารถตกตะกอนพร้อมกับกรวดทรายด้วย จึงจำเป็นต้องมีระบบทำความสะอาดกรวดทรายแยกอีกต่างหากเพื่อแยกสารอินทรีย์ ออกจากนี้ถังดักกรวดทรายแบบนี้มีการติดตั้งเครื่องกวนหมุนติดใบกวาดด้วย เพื่อกวาดตะกอนกรวดทรายที่กั้นก้นให้เข้าสู่ฮอปเปอร์ซึ่งอยู่บริเวณขอบถังด้านใดด้านหนึ่ง ซึ่งตะกอนกรวดทรายในฮอปเปอร์จะถูกแยกออกจากถังด้วยเครื่องสูบบแบบสกรูลำเลียงต่อไป



รูปที่ 2.7 ถังดักกรวดทรายแบบเดโทริทัส (Detritus grit chamber)

(สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546)

### 4. ถังดักกรวดทรายแบบน้ำไหลแนวนอน (Horizontal flow grit chamber)

ถังดักกรวดทรายแบบน้ำไหลแนวนอน มีหลักการการทำงานคล้ายกับถังตกตะกอนแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้า แต่มีความลึก และเวลากักน้ำน้อยกว่า หรือในบางกรณีมักเรียกว่า รางดักกรวดทราย

ถังดักกรวดทรายชนิดนี้ใช้อุปกรณ์ เช่น weir และ parshall flume เพื่อควบคุมอัตราเร็วของน้ำให้คงที่ โดยทั่วไปมักควบคุมการไหลของน้ำให้เท่ากับ 0.3 เมตรต่อวินาที ซึ่งที่ความเร็วดังกล่าวจะทำให้กรวดทรายตกตะกอนได้ แต่ในขณะเดียวกันสารอินทรีย์ซึ่งเบากว่ายังแขวนลอยอยู่ (ไม่ตกตะกอน) ส่วนใหญ่มักใช้โซ่ และใบกวาด (Chain and flight) รวบรวมกรวดทรายเข้าสู่ฮอปเปอร์ที่กั้นก้น และถูกแยกออกจากถังต่อไปด้วยอุปกรณ์และเครื่องจักรต่างๆ



รูปที่ 2.8 ถังดักกรวดทรายแบบน้ำไหลแนวนอน (Horizontal flow grit chamber)

### 2.3.2 ข้อดีและข้อเสียของถังดักกรวดทรายแบบต่างๆ

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของถังดักกรวดทรายแบบต่างๆ

ข้อดี	ข้อเสีย
<b>ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. การสูญเสียเฮดค่อนข้างน้อย</li> <li>2. ระบบมีความยืดหยุ่นสามารถรองรับอัตราการไหลที่แปรผันในช่วงกว้างได้</li> <li>3. การเติมอากาศจะช่วยลดสภาวะ Septic และเป็น การเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการบำบัดต่อไป</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ต้องการพลังงานมาก</li> <li>2. ต้องการแรงงานและความชำนาญในการบำรุงรักษาและการควบคุมระบบเติมอากาศ</li> <li>3. ค่ากำหนดการออกแบบที่ทำให้เกิดการหมุนเกลียวที่ดียังไม่มี ความชัดเจนมากนัก</li> </ol>

ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของถังดักกรวดทรายแบบต่างๆ (ต่อ)

ข้อดี	ข้อเสีย
<p><b>ถังดักกรวดทรายแบบน้ำวน</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ระบบมีความยืดหยุ่น รองรับอัตราการไหลได้กว้าง</li> <li>2. อุปกรณ์ที่ต้องบำรุงรักษาอยู่เหนือน้ำทั้งหมด</li> <li>3. ต้องการพื้นที่น้อย จึงประหยัดค่าก่อสร้าง</li> <li>4. การสูญเสียเสดค่อนข้างน้อย ปกติอยู่ในช่วง 6 มิลลิเมตร</li> <li>5. สามารถกำจัดกรวดทรายละเอียดขนาด 140 เมชได้ถึงร้อยละ 73</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. อาจเกิดการอุดตันของกรวดในฮอปเปอร์ อาจต้องใช้การกววอย่างแรงด้วยน้ำหรืออากาศ</li> <li>2. ตะกอนอาจสะสมตามใบพัดได้</li> <li>3. เครื่องสูบน้ำยกด้วยลมมักไม่ค่อยมีประสิทธิภาพในการสูบกวดออกจาก ฮอปเปอร์</li> <li>4. มีสิทธิบัตร์สำหรับการออกแบบ</li> </ol>
<p><b>ถังดักกรวดทรายแบบเดโทรทัส</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. แบร็งและอุปกรณ์ที่เคลื่อนไหวติดตั้งอยู่เหนือน้ำ</li> <li>2. ลักษณะกรวดทรายที่ถูกกำจัดขึ้นอยู่กัอัตราการไหล</li> <li>3. การสูญเสียเสดค่อนข้างน้อย</li> <li>4. ประหยัดพลังงานและมีงบประมาณการเดินระบบต่ำ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. ระบบไม่ยืดหยุ่นมากนัก ยากต่อการควบคุมความเร็วในการไหล เนื่องจากการแปรผันของอัตราไหล</li> <li>2. เมื่ออัตราการไหลต่ำจะทำให้สารอินทรีย์ถูกดักออกมาด้วย</li> <li>3. ถ้าถึงต้น กรวดทรายสามารถหลุดออกมาได้จากการกวาดตะกอน</li> </ol>
<p><b>ถังดักกรวดทรายแบบน้ำไหลแนวอน</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. ประสิทธิภาพการกำจัดกรวดทรายขึ้นอยู่กับการปรับอุปกรณ์ควบคุมการไหลที่ทางน้ำออก</li> <li>2. ไม่มีส่วนโครงสร้างที่เป็นพิเศษ</li> <li>3. ประหยัดพลังงานและงบประมาณการเดินระบบต่ำ</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. มีอุปกรณ์จมน้ำ เช่น ไซ้ แบร็ง</li> <li>2. เมื่ออัตราการไหลต่ำจะทำให้สารอินทรีย์ถูกดักออกมาด้วย</li> <li>3. เสดสูญเสียค่อนข้างมาก</li> </ol>

ที่มา : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย (2546)

โดยในงานวิจัยนี้ สนใจที่จะประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริดพอท ในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนแทนที่ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ (Aerated Grit Chamber) ที่ใช้อยู่ ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง

ไฮโดรไซโคลนที่นิยมใช้อยู่ในปัจจุบัน มี 2 แบบ คือ ไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบโดย Bradley และ ไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบโดย Rietema

Castilho และ Medronho, 2000 ได้ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพไฮโดรไซโคลนของ Bradley และ Rietema พบว่าไฮโดรไซโคลนของ Bradley มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงกว่าในแง่ของขนาดอนุภาคของแข็ง ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนของ Rietema มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูงกว่าในแง่ของมวลของแข็งที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลน

ในงานวิจัยนี้ได้นำไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบโดย Rietema มาใช้ในงานวิจัยเพื่อแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชน เนื่องจากจะให้ประสิทธิภาพในแง่ของมวลของแข็งที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนมากกว่าไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบโดย Bradley

## 2.4 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

### 2.4.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน

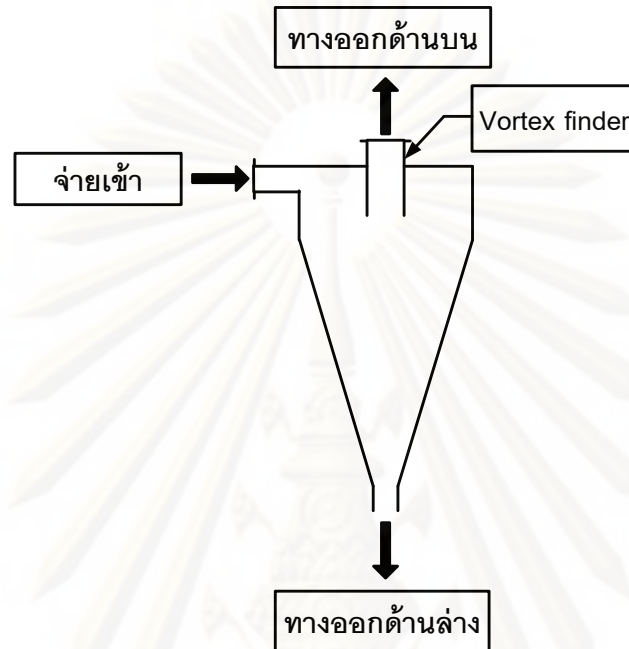
ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมออกจากกัน โดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เช่น แยกของแข็งออกจากของแข็ง ของแข็งออกจากของเหลว และของเหลวออกจากของเหลว ในการทำงานจะไม่มีชิ้นส่วนใดๆ ของไฮโดรไซโคลนเคลื่อนที่ ซึ่งต่างจากเครื่องแยกแบบหมุนเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) ที่ต้องหมุนเพื่อให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง อย่างไรก็ตามเครื่องแยกทั้งสองชนิดนี้ใช้หลักการแยกอนุภาคแบบเดียวกัน โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างของผสมสองชนิดที่ผสมกันอยู่และ/หรือขนาดและรูปร่างของอนุภาค ซึ่งการแยกด้วยไฮโดรไซโคลนที่ใช้โดยทั่วไปจะมีเส้นการไหลทั้งหมด 3 ส่วน ดังนี้

1. ทางเข้าของของผสม (Feed in) จะอยู่ทางด้านข้างของไฮโดรไซโคลนเพื่อให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวงทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาค ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกตัวออกมาใกล้ผนังของไฮโดรไซโคลน และหลุดออกไปที่ทางออกด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กไหลแยกออกไปยังทางด้านบน
2. ทางออกด้านบน(Overflow)เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นต่ำ



3. ทางออกด้านล่าง(Underflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือความหนาแน่นสูง

เส้นทางการไหลทั้ง 3 ส่วน ภายในไฮโดรไซโคลน สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 เส้นทางการไหลภายในไฮโดรไซโคลน

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน เริ่มจากการจ่ายของผสมที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลนด้วยแรงดันของน้ำ โดยที่ช่องท่อจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลนส่วนใหญ่จะมีหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้นเมื่อมีการจ่ายของผสมหรือน้ำ ที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลนทางด้านข้าง จะทำให้เกิดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) เพื่อให้เกิดการหมุนเหวี่ยงแล้วแยกการไหลของของผสมที่มีอนุภาคและความหนาแน่นต่างกันออกจากกันเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการไหลของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่หรือของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงจะไหลลงสู่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) พร้อมกับมีน้ำด้วยบางส่วน ส่วนที่สองคือการไหลของน้ำใสและอนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือของแข็งที่มีความหนาแน่นต่ำจะไหลขึ้นออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) ผ่านท่อที่อยู่ภายใน ท่อดังกล่าวเรียกว่า Vortex finder

การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนจะมีลักษณะการไหลแบบหมุนวน โดยสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ การไหลแบบหมุนวนภายนอก (Outer vortex) จะหมุนอยู่ด้านนอกติดกับผนังของไฮโดรไซโคลนทิศทางลง ซึ่งทำหน้าที่นำพาอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรืออนุภาคที่มีความหนาแน่นสูงออกทางส่วนล่างของไฮโดรไซโคลน และการไหลแบบหมุนวน

ภายใน (Inner vortex) จะหมุนวนขึ้นด้านบนในทิศทางการหมุนเดียวกันที่บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลนซึ่งทำหน้าที่นำพาน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีความหนาแน่นต่ำไหลออกทางช่องทางออกด้านบน และที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนจะเกิดแกนอากาศ (Air core) ขึ้น

ด้านบนของไฮโดรไซโคลนจะพบการไหลอีกแบบหนึ่ง ซึ่งของผสมจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนปิดบน Vortex finder และรอบๆผนังของไฮโดรไซโคลนโดยที่ของผสมนั้นจะไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณในส่วนบนของไฮโดรไซโคลนและไหลออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) โดยไม่ผ่านการหมุนวนใน Outer และ Inner vortex ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นการไหลนี้ ของผสมที่ไหลออกทางช่องทางออกด้านบนจะไหลไปรวมกับของผสมที่ไม่ได้ไหลลงมาที่ตัวไฮโดรไซโคลน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ซึ่งทำให้ความเร็วของการหมุนวนในไฮโดรไซโคลนลดลง เนื่องจากการไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณภายในช่วงบนของไฮโดรไซโคลนแล้วไหลลัดออกทางช่องทางออกด้านบน

ไฮโดรไซโคลนสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งอุปกรณ์สำหรับทำใส (Clarifier) และอุปกรณ์สำหรับทำข้น (Thickeners) นั่นคือ ส่วนการไหลที่แยกออกทางด้านบน (Overflow) เป็นการเจือจางของของแข็งหรืออนุภาคขนาดละเอียด แสดงว่ามีปริมาณอนุภาคของแข็งน้อยลง ส่วนการไหลที่แยกออกทางด้านล่าง (Underflow) จะมีปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่และมีความเข้มข้นของของแข็งมากกว่า

การใช้ไฮโดรไซโคลนในอุตสาหกรรม ในกรณีที่ค่าความดันลดของไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงมากหรืออัตราการไหลของของผสมมีค่ามาก อาจจำเป็นต้องใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อกันแบบขนานหรือแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคออกจากกัน

การต่อแบบขนาน นิยมใช้เพื่อรับอัตราการไหลของผสมได้สูงขึ้นตามต้องการ ในการต่อไฮโดรไซโคลนแบบขนานนี้อาจใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีรูปร่างและขนาดเดียวกันหลายๆตัว มาต่อแบบขนานโดยต้องออกแบบให้ของไหลผ่านเข้ามาในไฮโดรไซโคลนเท่าๆกัน

การต่อแบบอนุกรม หมายถึงการใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อกันแบบอนุกรม อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือความหนาแน่นต่ำในส่วน ที่ออกทางช่องทางออกด้านบน จะไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวที่สองและต่อไป ค่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนตัวที่สองจะน้อยกว่าของไฮโดรไซโคลนตัวแรก ดังนั้นอาจออกแบบให้ขนาดของไฮโดรไซโคลนตัวถัดมาเล็กลงตามลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค ที่มีขนาดเล็กที่หลุดรอดออกมาจากไฮโดรไซโคลนตัวต้นๆ อนุภาคที่ออกมาจากไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวมีการกระจายตัวของขนาดแตกต่างกัน ในการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบนี้อาจใช้สำหรับแยกอนุภาคของผสมออกเป็น 2-3 ขนาดได้ นอกจากนี้ยังใช้ได้กับในกรณีของผสมมีการกระจายขนาดกว้าง ดังนั้นควรใช้ไฮโดรไซโคลนตัว

แตกแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เพื่อป้องกันการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนตัวต่อไปซึ่งมีขนาดเล็กกว่า

ขนาดของไฮโดรไซโคลน โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10 มิลลิเมตร - 2.5 เมตร ขนาดของอนุภาคที่แยกได้อยู่ในช่วง 2-250 ไมโครเมตร (Bradley, 1965) และอัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนจะอยู่ในช่วง 0.1-7200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าความดันลด (Pressure drop) ระหว่างช่องทางที่จ่ายน้ำเข้ากับช่องทางที่น้ำไหลออก ซึ่งค่าที่ใช้ในการทำงานอยู่ในช่วง 0.34-6 บาร์ (Svarovsky, 1984)

ข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลน สามารถสรุปได้ดังนี้

### ข้อดีของไฮโดรไซโคลน

1. สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลายกรณี เช่น ใช้ในการแยกของเหลวออกจากสิ่งเจือปนที่เข้มข้น แยกของเหลวสองชนิดที่ไม่ผสมกัน แยกอนุภาคออกจากอากาศ อีกทั้งยังสามารถแยกก๊าซออกจากของเหลวได้
2. มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับก ะบวนการแยกชนิดอื่นๆ จึงทำให้ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง และใช้เวลาเก็บกักน้ำน้อย
3. แรงเฉือน (Shear force) ที่มีมากในไฮโดรไซโคลนทำให้อนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อนแตกออกจากกันได้ ซึ่งเป็นผลดีสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากกรวดทรายที่ถูกแยกออกมาจะมีความสะอาด โดยไม่มีสารอินทรีย์อื่นๆ ปะปนอยู่
4. เนื่องจากไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนใดเคลื่อนที่ ดังนั้น การดำเนินการและการติดตั้งจึงง่าย มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง และไม่ต้องการเครื่องมืออื่นๆ ในการประกอบการทำงานมาก

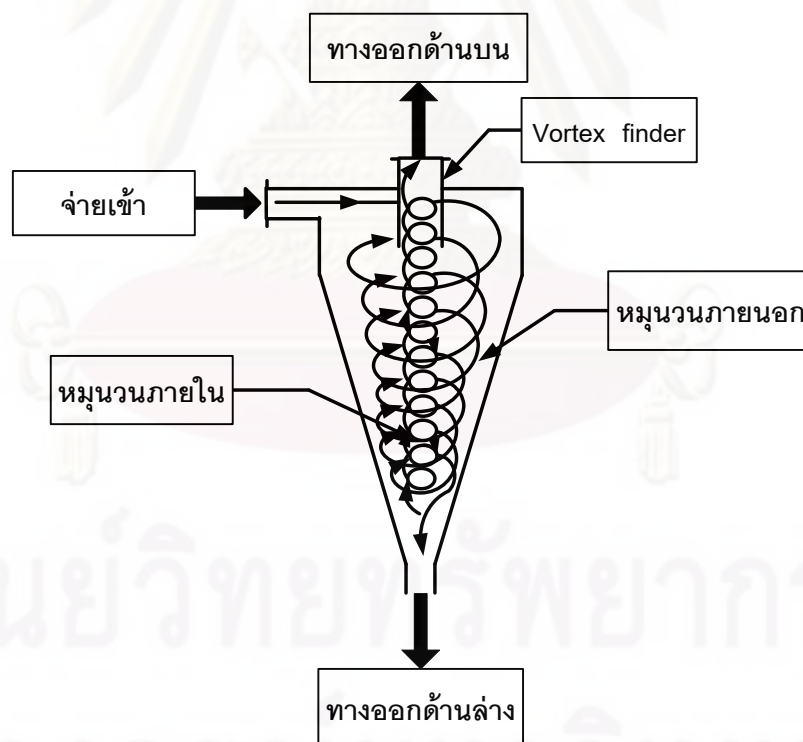
### ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

1. ไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกขนา ดของอนุภาคออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ชัดเจนได้ เนื่องจากมีการปะปนของอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดเล็กเอียด หรือมีการปะปนของอนุภาคขนาดเล็กในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดหยาบอยู่เสมอ
2. ตัวเรือนของไฮโดรไซโคลนอาจเกิดการกัดกร่อนและสึกหรอได้ เนื่องจากการกระทบกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังภายในไฮโดรไซโคลน อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันได้จากการเคลือบผิวภายในไฮโดรไซโคลนหรือเลือกวัสดุของตัวเรือนไฮโดรไซโคลนที่มีคุณสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งาน

- ใช้พลังงานสูงในการสร้างความเร็วในการไหลเข้า โดยนิยมควบคุมความดันจ่ายเข้าเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน

#### 2.4.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน

การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน อาศัยหลักการของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน แรงดังกล่าวเกิดจากการหมุนวนซึ่งเกิดจากการจ่ายของผสมเข้าไปในลักษณะสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน ดังรูปที่ 2.10 แสดงให้เห็นรูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่ใช้กันอยู่ แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนที่เป็นทรงกระบอกจะถูกปิดที่ส่วนบนด้วยตัวครอบและมีท่อทะลุสำหรับให้ของไหลออกทางด้านบน เรียกว่า Vortex finder มีระยะยื่นออกมาจากตัวไฮโดรไซโคลน และส่วนล่างที่เป็นกรวยจะมีลักษณะเป็นช่องเปิดปลายกรวยเพื่อให้อนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลนไหลออกมาที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ของผสมจะถูกจ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลนตามแนวสัมผัสผิวเส้นรอบวง ในทางปฏิบัติช่องทางเข้าของของผสมจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลที่จะเข้ามาในไฮโดรไซโคลน

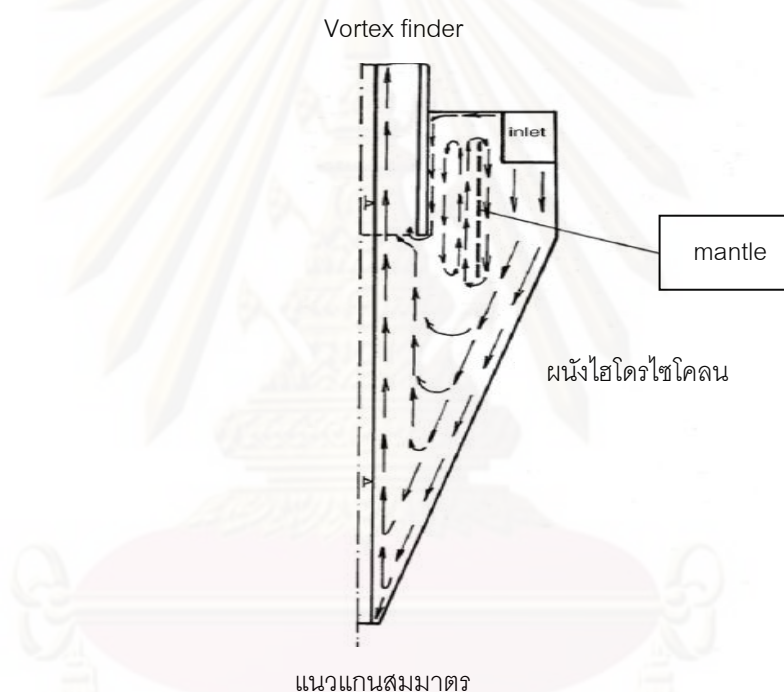


รูปที่ 2.10 ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลน



บริเวณด้านในและบริเวณรอบๆของท่อทางเข้า การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนเป็นลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ของไหลที่ไหลเข้ามาส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ในลักษณะการไหลแบบเกลียววงนอก (Outer vortex) ไปสู่ด้านล่างของกรวยและทำให้ของไหลและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ไหลออกทางช่องเปิดด้านล่าง (Underflow) ที่ปลายแหลมของกรวย จากนั้นน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กบางส่วนไหลกลับขึ้นมา ในแกนกลางของไฮโดรไซโคลน (Inner vortex) เคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นมาและไหลออกทาง Vortex finder

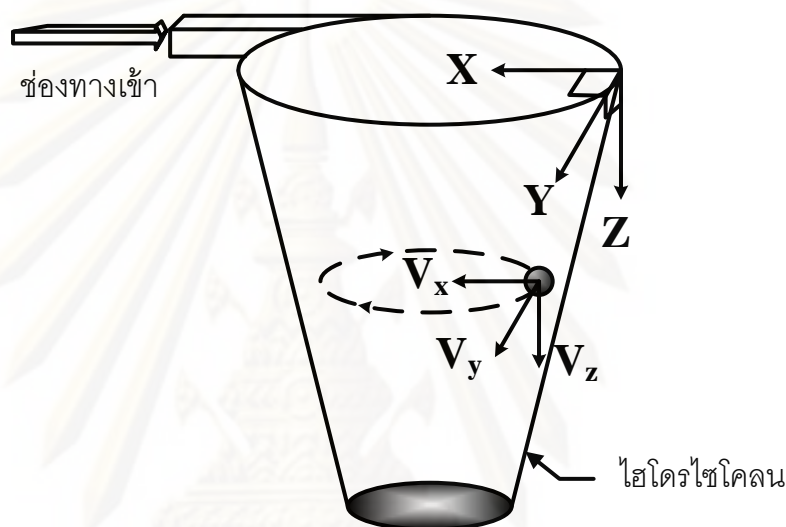
นอกจากนี้ยังมีการไหลวนที่เรียกว่า mantle ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางการไหลที่แบ่งออกจากกันระหว่างการไหลลงที่บริเวณผนังของกรวยและการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณด้านในใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 2.11 เส้นทางการไหลของของไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

### 2.4.3 ความเร็วของของไหลภายในไฮโดรไซโคลอน

ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลอนเกิด จากการจ่ายของผสมระหว่างของไหลกับของแข็งเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ส่งผลให้ของผสมในไฮโดรไซโคลอนมีความเร็วของของไหล ซึ่งสามารถแบ่งออกตามทิศทางของความเร็วต่างๆ ได้ 3 ชนิด คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน (Tangential velocity) ( $V_y$ ) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ( $V_z$ ) และความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity) ( $V_x$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลอน (Puprasert, 2004)

#### 2.4.3.1 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) ( $V_y$ )

ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของผสมที่จ่ายไปที่บริเวณทางเข้าโดยมีทิศทางสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน และมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของผสมที่จ่ายเข้าที่บริเวณทางเข้ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลอน ดังสมการที่ 2.1

$$V_i = \frac{Q}{A_i} \quad (2.1)$$

- เมื่อ  $V_i$  คือ ความเร็วของของผสมที่จ่ายเข้าที่ช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลอน  
 $Q$  คือ อัตราการไหลเข้าของของผสมที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอน  
 $A_i$  คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลอน

โดยที่ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) ในไฮโดรไซโคลน สามารถแสดงได้  
ดังนี้

$$\text{จาก} \quad \alpha = \frac{V_y}{V_i} \quad (2.2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V_y = \alpha \cdot V_i \quad (2.3)$$

$$\text{หรือ} \quad V_y = \alpha \frac{Q}{A_i} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วภายในไฮโดรไซโคลน ( $V_y$ ) กับความเร็วที่  
ช่องจ่ายเข้า ( $V_i$ ) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4-0.8 (Bradley, 1965)

จากสมการที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นเมื่อ  
พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลนลดลง

การจ่ายของผสมตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน จะทำให้เกิดลักษณะการ  
หมุนวน 2 ประเภท คือ Free Vortex หรือ Outer Vortex ซึ่งจะหมุนวนอยู่ภายนอกในทิศทางลง  
ตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง และ Force Vortex หรือ Inner Vortex ซึ่งจะหมุนขึ้นในทิศทางเดียวกัน  
บริเวณใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

จาก Helmholtz's law แสดงถึงการหมุนวนของของไหลแบบอุดมคติ โดยอาศัยหลักการ  
อนุรักษ์โมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) โดยไม่พิจารณาแรงต้านทาน จะได้ว่า

$$V_y \times R = \text{ค่าคงที่} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $V_y$  คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงซึ่งเปรียบเสมือนความเร็วลัพท์ที่  
เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน

$R$  คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลน

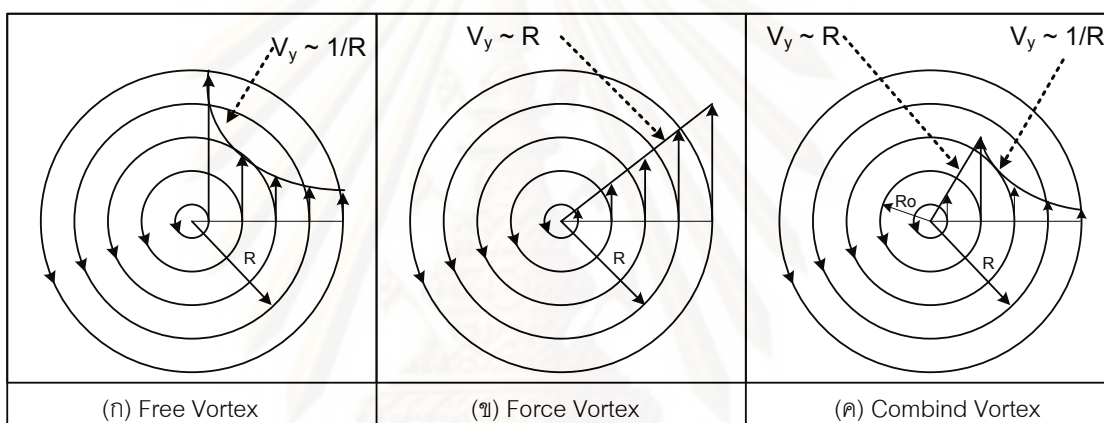
แต่ในทางปฏิบัติจริงจะมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) จะทำให้ได้  
ค่าน้อยกว่าสมการข้างต้น ดังนั้น

$$V_y \times R^n = \text{ค่าคงที่} \quad (2.6)$$

โดยที่  $n$  มีค่าระหว่าง 0.5 - 0.9 และเมื่อคิดว่าการไหลไม่มีแรงเสียดทาน ค่า  $n$  จะมีค่าเท่ากับ 1 (Kelsall, 1952 อ้างถึงใน Svarovsky, 1984)

สมการที่ 2.5 และ 2.6 ใช้ได้กับการหมุนวนภายนอก (Outer Vortex) นั่นคือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลง ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันการหมุนวนภายใน (Inner Vortex) ในทิศทางขึ้นใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงก็จะเพิ่มขึ้น ดังสมการ

$$V_y/R = \text{ค่าคงที่} \quad (2.7)$$



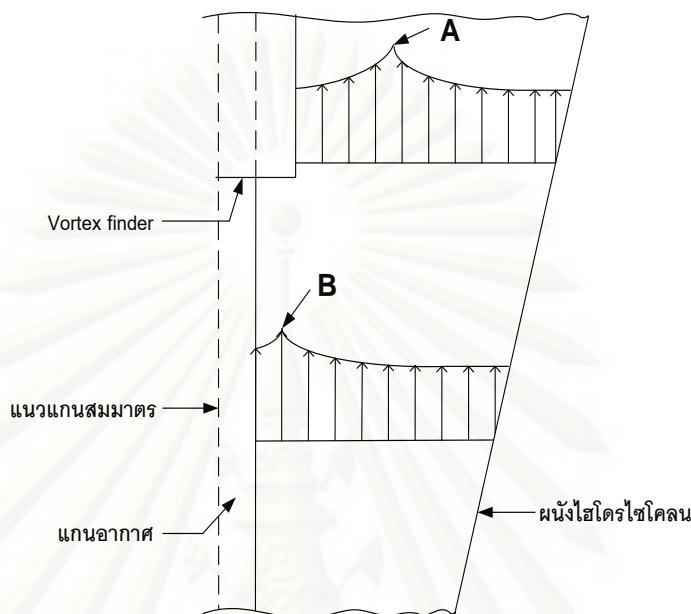
รูปที่ 2.13 ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท  
(Puprasert, 2004)

จากรูปที่ 2.13 แสดงให้เห็นว่า การหมุนวนแบบ (ค) Combined Vortex คือ สภาพจริงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะดีที่สุด เมื่ออนุภาคอยู่ในบริเวณใกล้กับตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมากที่สุด ดังนั้นจึงควรออกแบบไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยแหลมและยาว เพื่อเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเข้าสู่ตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมากขึ้น

Kelsall, 1952 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ทดลองพบว่าความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีการหมุนวนลดลงเข้าใกล้แกนอากาศ ซึ่ง Kelsall ทำการทดลองวัดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential Velocity,  $V_y$ ) โดยทดลองกับน้ำสะอาดที่มีการผสมอนุภาคอลูมิเนียม (Aluminium) แล้วใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) วัดตำแหน่งที่มีการโปร่งใสในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่



2.14 ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นค่าความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนเฉพาะในส่วนที่เป็นทรงกรวย ไม่รวมในส่วนที่เป็นทรงกระบอก



รูปที่ 2.14 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) (Svarovsky, 1984)

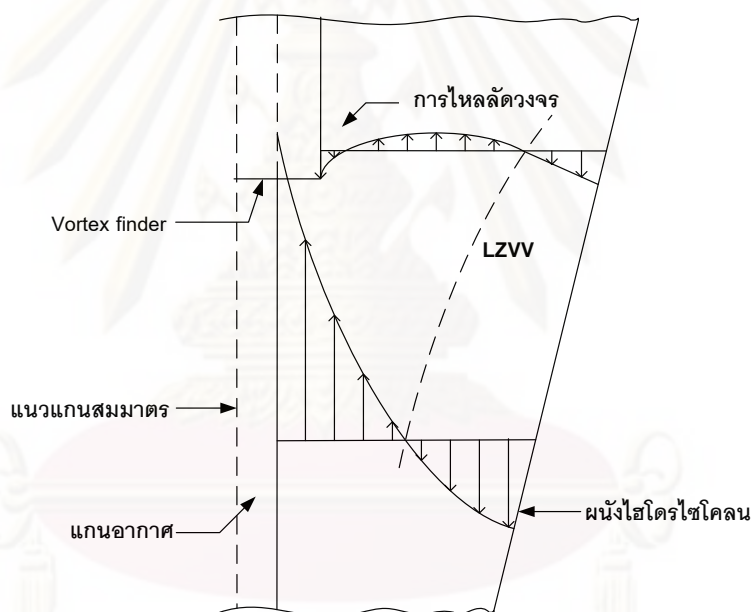
จากรูปที่ 2.14 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน (Tangential velocity,  $V_y$ ) จะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของไฮโดรไซโคลนลดลง ตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 แต่บริเวณรอบๆ Vortex finder ไม่สามารถใช้สมการนี้อธิบายได้เนื่องจากที่บริเวณเหนือขอบ Vortex finder ขนาดรัศมีที่ให้ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดใหญ่กว่าขนาดรัศมีของ Vortex finder ที่ตำแหน่ง A และตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสูดน้อยกว่ารัศมีของ Vortex finder ที่ตำแหน่ง B

ตำแหน่ง A และ B ต่างเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนสูงสุด ซึ่งรัศมีจากขอบผนังไฮโดรไซโคลนไปถึงขอบ Vortex finder จะมีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง A และในทำนองเดียวกัน รัศมีจากขอบผนังของไฮโดรไซโคลนไปถึงขอบของแกนอากาศ (Air core) จะมีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง B จากปรากฏการณ์นี้ แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนไม่ขึ้นกับตำแหน่งใดๆ ตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลน

อย่างไรก็ตาม ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ( $V_y$ ) ก็ยังเป็นความเร็วของของไหลที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน เนื่องจากมีค่ามากที่สุดจากความเร็วของของไหลทั้งหมด

### 2.4.3.2 ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity) ( $V_z$ )

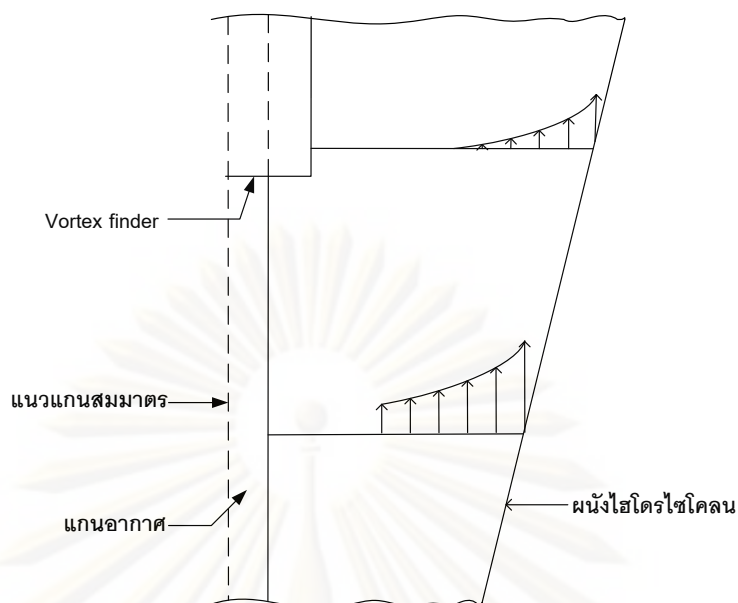
ความเร็วตามแนวแกน คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง นั่นคือ การหมุนวนภายนอก (Outer vortex) ที่มีทิศทางลงสู่ทางออกด้านล่าง ในขณะที่การหมุนวนภายใน (Inner vortex) มีทิศทางขึ้นไปสู่ทางออกด้านบน จากทิศทางไหลในส่วนการ หมุนวนภายนอกและการหมุนวนภายในที่มีทิศทางการไหลสวนทางกัน ทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity หรือ LZVV) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่ระหว่างการหมุนวนภายนอก (Outer vortex) และการหมุนวนภายใน (Inner vortex) และเป็นตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.15 และบริเวณด้านบนของไฮโดรไซโคลนตรงขอบด้านบนของ Vortex finder จะเกิดการไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 2.15 การกระจายความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ ) (Svarovsky, 1984)

### 2.4.3.3 ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity) ( $V_x$ )

ความเร็วตามแนวรัศมี คือ ความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลน และเป็นความเร็วที่มีค่าน้อยที่สุดจากความเร็วของของไหลทั้ง 3 ชนิด ภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งความเร็วตามแนวรัศมีจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณเหนือขอบของ Vortex finder ใกล้กับผนังของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การกระจายความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ) (Svarovsky, 1984)

#### 2.4.4 กฎของสโตค (Stoke's law)

กฎของสโตคเป็นกฎพื้นฐานที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วในการแยกอนุภาคด้วยกระบวนการและอุปกรณ์ในการแยกต่างๆ เช่น ถังตกตะกอน โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคนั้นมีรูปร่างเป็นทรงกลม และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา เช่น ถังตกตะกอน อนุภาคจะตกตะกอนลงเนื่องจากความเร่งโน้มถ่วงของโลก ซึ่งการเคลื่อนที่ลงของอนุภาคจะมีแรงต้านที่เรียกว่า แรงลาก (Drag force) และความหนืดของของเหลว (Viscosity) ที่มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค

ในการหาความเร็วในการแยกอนุภาคออกนั้น ก็เพื่อที่จะบ่งบอกถึงความสามารถในการแยกอนุภาคของแข็ง ออกจากน้ำ ซึ่งแสดงได้จากสมการกฎของสโตค (Stoke's law equation) (Metcalf และ Eddy, 2003)

$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 \cdot g}{18\mu} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $V_p$  คือ ความเร็วในการตกตะกอน (Terminal velocity) หน่วย เมตรต่อวินาที  
 $\Delta\rho$  คือ ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว หน่วย กิโลกรัมต่อเมตร<sup>3</sup>

- $d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) หน่วย เมตร
- $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>
- $\mu$  คือ ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) หน่วยนิวตันวินาทีต่อเมตร<sup>2</sup>

จากสมการกฎของสโตคจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อความเร็วในการแยกอนุภาคมีต่างๆดังนี้

### 1. ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

โดยทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำ นิยมใช้การแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เช่น ถังตกทราย ถังตกตะกอน เป็นต้น สำหรับเครื่องมือการแยกอื่นๆสามารถทำการเพิ่มความเร่งนี้เพื่อให้ความเร็วในการตกตะกอน ( $V_p$ ) เพิ่มขึ้นได้ และในกรณีของไฮโดรไซโคลอน ความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอนจะมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาก ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอนกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง สามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert, 2004)

$$\zeta = \frac{V_y^2}{R \cdot g} \quad (2.9)$$

- เมื่อ  $\zeta$  คือ ความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลอน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone) หน่วย เมตรต่อวินาที
- $V_y$  คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอน หน่วย เมตรต่อวินาที
- $R$  คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลอน (บริเวณส่วนที่เป็นทรงกระบอก) หน่วย เมตร
- $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup>

### 2. ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส, $\Delta\rho$

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแยกอนุภาคของของแข็งออกจากของเหลว เมื่อของผสมนั้นต้องมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส ( $\Delta\rho$ ) นั้นหมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง ( $\rho_p$ ) และความหนาแน่นของน้ำ ( $\rho_w$ ), ( $\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$ ) นั่นเอง ในการแยกของแข็งออกจากน้ำด้วย



ไฮโดรไซโคลอนจะไม่เกิดขึ้น หากความหนาแน่นของทั้งสองเฟสไม่มีความแตกต่างกัน ( $\Delta\rho = 0$ ) ซึ่งจะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาค ( $V_p$ ) ดังสมการที่ 2.8 มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย เป็นผลทำให้ไฮโดรไซโคลอนไม่สามารถแยกอนุภาคทั้งสองเฟสออกจากกันได้

### 3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง, $d_p$

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง ก็คือ ขนาดอนุภาคของของแข็ง ซึ่งจากสมการกฎของสโตค (Stoke's law equation) จะเห็นได้ว่า  $d_p$  อยู่ในรูปของกำลังสอง ( $d_p^2$ ) นั้นหมายถึง ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ ความเร็วในการแยกอนุภาค ( $V_p$ ) ก็จะมีเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น หากสามารถทำการเพิ่มขนาดของอนุภาคของแข็งได้ จะทำให้การแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลอนเกิดขึ้นได้ดี

### 4. ความหนืดของของไหล, $\mu$

ความหนืดของของไหลส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค ( $V_p$ ) เมื่อค่าความหนืดของของไหลสูงจะส่งผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความหนืดของของไหลมีค่าต่ำจะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง และความหนืดยังสัมพันธ์กับคุณสมบัติของของไหลอีกด้วย โดยถ้าหากคุณสมบัติสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของของไหลต่ำ ดังนั้น เพื่อให้ค่าความเร็วในการแยกอนุภาคสูงและส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น ควรให้ของไหลมีความหนืดต่ำหรือควรมีคุณสมบัติสูงนั่นเอง

#### 2.4.5 พารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน

##### 1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน วัดที่ฐานของส่วนที่เบ้ นกรวยหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (Cut size) ( $x_{50}$ ) โดยที่อัตราการไหล ( $Q$ ) คงที่ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด ( $x_{50}$ ) และความดันลด (Pressure drop) ( $\Delta p$ ) ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ( $D_C$ ) แสดงได้ดังนี้

$$x_{50} \propto D_C^x \quad (2.10)$$

$$\Delta p \propto D_C^y \quad (2.11)$$

โดยที่  $x$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.36 ถึง 1.52 และ  $y$  มีค่าอยู่ระหว่าง -3.6 ถึง -4.1 (Bradley, 1965) ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนเล็กๆ จะทำให้ได้ขนาดอนุภาคที่แยกออกมาได้เล็กลงตามไปด้วย และเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนใหญ่ขึ้น ค่าความดันตกก็จะลดลงเช่นกัน

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.10 และ 2.11 เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลคงที่ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ( $Q$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ( $D_C$ ) ที่ความดันตก ( $\Delta p$ ) คงที่ เป็นดังนี้

$$Q \propto D_C^z \quad (2.12)$$

โดยที่  $z$  มีค่าอยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 2.0 (Bradley, 1965)

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด ( $x_{50}$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ( $D_C$ ) ที่ความดันตก ( $\Delta p$ ) คงที่ เป็นดังนี้

$$x_{50} \propto D_C^x \quad (2.13)$$

โดยที่  $x$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0.41 ถึง 0.5 (Bradley, 1965)

แสดงให้เห็นว่า เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็กลง จะทำให้ขนาดตัด ( $x_{50}$ ) ลดลงด้วยเช่นกัน นั่นหมายถึง ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงไปได้อีก

## 2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหล (Aperture diameter)

ในการออกแบบและควบคุมการทำงานของไฮโดรไซโคลนนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลมีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลในไฮโดรไซโคลนจะประกอบไปด้วย เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (Feed in) เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Overflow) และเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) ซึ่งผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลทั้ง 3 ทาง แสดงดังรายละเอียดต่อไปนี้

### 2.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (Feed in diameter, $D_i$ )

ขนาดของช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) ควรจะให้ค่าโมเมนต์ม (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงสุด เพื่อให้ความเร็วเฉลี่ยที่ทางเข้าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่รัศมีเฉลี่ยทางเข้า (mean radius of entry) การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) จะ

ทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง ดังนั้นในการออกแบบขนาดของช่องจ่ายเข้า จึงควรเลือกช่วงที่มีค่าโมเมนต์สูงสุด (Bradley, 1965)

Chaston, 1958 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ศึกษาถึงขนาดที่เหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า ( $D_i$ ) โดยค่าที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับและใช้กันอยู่ทั่วไป คือ  $D_c / 6$  ถึง  $D_c / 7$  เมื่อ  $D_c$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน

การออกแบบขนาดของช่องจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลอนมีความสำคัญ เนื่องจากจะส่งผลต่อปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ (Capacity) ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค (Separation efficiency) และความดันลด (Pressure drop) ของไฮโดรไซโคลอน การออกแบบทางเข้าที่ ามแนวสัมผัสเส้นรอบวงต้องคำนึงถึงผลกระทบต่อ Vortex finder เนื่องจากอาจเกิดการปั่นป่วนของของไหลและทำให้เกิดการสึกกร่อน

## 2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน(Overflow diameter, $D_o$ )

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนใน 2 ลักษณะ คือ

1. การไหลลัดวงจร (Short circuit flow) คือ การไหลผ่านช่วงบนของไฮโดรไซโคลอน และไหลลงที่ผนังด้านนอกของช่องทางออกด้านบน หรือ Vortex finder โดยที่ไม่ผ่านเข้าสู่การหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอน

การไหลลัดวงจรเป็นลักษณะการไหลที่นำอนุภาคหายับไหลออกทางออกด้านบน (Overflow) ซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องทางออกด้านบนมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด อนุภาคที่อยู่ในเส้นทางการไหลลัดวงจร จะไหลกลับเข้ามาในบริเวณของการเพิ่มความเร็วมตามแนวสัมผัสภายในไฮโดรไซโคลอน และเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ไปตามขอบด้านล่างของ Vortex finder และมีโอกาสที่จะไหลเข้ามาสู่กระบวนการแยกอนุภาคอีกครั้ง ในทางตรงกันข้าม ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องทางออกด้านบนมีขนาดเล็กกว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด โอกาสที่อนุภาคจะไหลย้อนกลับไปยังการหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอนก็จะน้อยลงไปด้วย ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนลดลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนก็มีค่าลดลงด้วย

2. ในกรณีถ้าขนาดของช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZV (Locus of zero vertical velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วตามแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลอนเท่ากับศูนย์ โดย LZV จะมีขนาดประมาณ 0.43 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ของไฮโดรไซโคลน ( $0.43 D_C$ ) เป็นเหตุให้ลักษณะการไหลตามแนวรัศมีลดลง ทำให้อนุภาคไหลแยกออกไปทางด้านบนโดยไม่เข้าสู่กระบวนการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลนเกิดการไหลลัดวงจรขึ้น

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) พบว่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบจะลดลง เมื่อ  $D_o = D_C / 12$  หรือเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก Vortex finder มีค่าเท่ากับ  $D_C / 6$

Bradley, 1965 แนะนำว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการไหล โดยค่า มากที่สุดเท่ากับ  $D_C / 2.3$  ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ  $D_C / 8$  ค่าที่ทำให้มีปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ออกที่ช่องทางออกด้านบนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ  $D_C / 7$  และขนาดช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) ควรจะใหญ่กว่าช่องทางจ่ายเข้า ( $D_i$ ) โดยอาจมีค่า  $D_o = D_i$  ไปจนถึง  $D_o = 1.6D_i$  เพื่อป้องกันการกัดเซาะผนังของไฮโดรไซโคลนจากการจ่ายของผสมเข้าไป นอกจากนี้ ค่า  $2D_i + D_o$  ควรมีค่าน้อยกว่า  $D_C$  ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.14

$$2D_i + D_o = 0.4 - 0.6D_C \quad (2.14)$$

และความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก คือ

$$2D_i + D_o = 0.35 - 0.7D_C \quad (2.15)$$

Rietema, 1961 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) เสนอให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) ควรมีค่าประมาณ  $0.16D_C$  ถึง  $0.5D_C$  และค่าที่เหมาะสมที่ Rietema เสนอเท่ากับ  $0.34D_C$

### 2.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (Underflow diameter, $D_u$ )

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง ( $D_u$ ) โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นขนาดที่แปรผันได้หรือเป็นลักษณะที่ปรับเปลี่ยนได้ เพื่อควบคุมอัตราการไหลออกทางด้านล่าง ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างจึงขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานมากกว่าที่จะกำหนดเป็นค่าคงที่

ปริมาณอัตราการไหลออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ( $Q_u$ ) ที่น้อยที่สุดจะเท่ากับปริมาณของอนุภาคของแข็งที่แยกออกมารวมกับปริมาณของไหลที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างระหว่าง



อนุภาคของแข็ง นั่นคือ นอกจากจะขึ้นกับการใช้งานแล้ว ยังขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดอนุภาค (Size distribution) ในเส้นการไหลลงสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน ( $D_u$ ) โดยทั่วไปแล้ว จะอยู่ในช่วง  $D_c/10$  ถึง  $D_c/5$  และควรมีค่า  $D_u = D_o/3$  เมื่อ  $D_o = D_c/5$  ภายใต้สภาวะความดันคงที่ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเข้า (Feed flowrate) กับอัตราการไหลออกที่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow flowrate) หรือ  $Q_f/Q_u$  มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง ( $D_u$ ) อาจถือได้ว่าไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนหรืออาจมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) พบว่าประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนจะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง ( $D_u$ ) ลดลง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความดันลด สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลต่างๆใหญ่ตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกันไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็ก ก็จะได้รับผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง ( $D_u$ ) ให้มีค่าประมาณ  $D_c/7$

ดังนั้น สามารถสรุปผลของช่องทางออกทั้งสามทาง ในรูปเชิงคณิตศาสตร์ที่มีต่อไฮโดรไซโคลอน

$$D_c > 2D_i + D_o + 2t \quad (2.16)$$

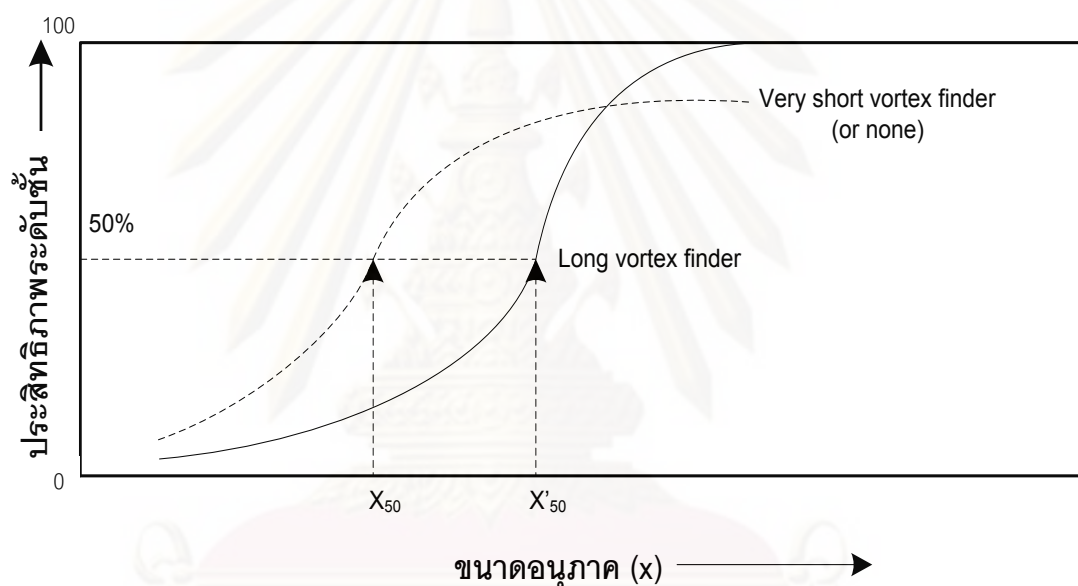
เมื่อ $D_c$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน
$D_i$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า
$D_o$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน
$t$	คือ	ความหนาของผนัง Vortex finder

### 3. ความยาว ขนาด และรูปร่างของ Vortex finder (Vortex finder dimensions)

Vortex finder คือ ช่องทางที่น้ำใส่ออกทางด้านบน (Overflow) และมีไว้เพื่อป้องกันการไหลล้นดวงจรด้วย โดยอนุภาคที่จ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนจะเคลื่อนที่ลงตามผนังด้านนอกของ Vortex finder เข้าสู่ตัวเรือนของไฮโดรไซโคลอน ความยาวของ Vortex finder จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด ( $x_{50}$ ) โดยที่การเพิ่มความยาวของ Vortex finder จะทำให้อนุภาคมีโอกาส (เวลา) ในการแยกออกจากน้ำภายในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบ ใน

ขณะเดียวกันก็จะเป็นการลดประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กเฉียด ซึ่งควรที่จะไหลออกไปที่ทางออกด้านบน (Overflow) พร้อมกับน้ำใส แต่ย้อนกลับมาไหลออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน ดังนั้น ความยาวของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของกลุ่มอนุภาคที่จ่ายเข้าไปและจุดตัด (Cut point) ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายของขนาดนั้นๆ

เนื่องจากความยาวของ Vortex finder ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด ( $x_{50}$ ) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวของ Vortex finder ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.17 และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อไม่มี Vortex finder ในกรณีนี้จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดใหญ่ลดลง กล่าวคือ อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวจะไหลออกสู่ทางออกด้านบน (Overflow) โดยเส้นทางการไหลลัดวงจร



รูปที่ 2.17 ผลของความยาวของ Vortex finder ต่อประสิทธิภาพระดับขั้นและขนาดตัด (Svarovsky, 1984)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้มีการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ที่ใช้ในโรงงาน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว ทำการแยกของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ค้ำวมตันต่ำ จากผลการทดลองพบว่า ความยาวของ Vortex finder ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน อาจอธิบายได้ว่า เกิดจากการที่อนุภาคตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นเหตุให้อนุภาคไหลออกจากเส้นการไหลลัดวงจรเข้าสู่การไหลแบบปกติภายในไฮโดรไซโคลอนได้

Bradley, 1965 ได้ศึกษาถึงรูปร่างที่ต่างกันของ Vortex finder พบว่า ค่าที่เหมาะสมของความยาวของ Vortex finder โดยทั่วไปแล้วจะให้มีระยะตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลอนให้

เพียงพอระหว่างระดับท้องของช่องจ่ายเข้า (Feed in) กับส่วนปลายของ Vortex finder โดยที่ส่วนปลายของ Vortex finder ไม่ควรอยู่ในระดับเดียวกันกับท้องท่อจ่ายเข้าและไม่ควรอยู่ใกล้กับบริเวณหน้าตัดที่เป็นรอยต่อระหว่างส่วนทรงกระบอกและทรงกรวย เนื่องจากบริเวณนี้มีการกระจายอนุภาคแบบปั่นป่วน อาจทำให้มีอนุภาคขนาดใหญ่ปนออกไปพร้อมกับน้ำใสที่ออกทางด้านบน (Overflow) ได้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผนังด้านนอกของ Vortex finder ก็มีความสำคัญอีกเช่นกัน จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนลดลง เนื่องจากการไหลลัดวงจรกับ ตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนสูงสุด ในขณะเดียวกันก็พบข้อดีของการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน ( $D_o$ ) เมื่อควบคุมให้ผนังด้านนอกของ Vortex finder มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุด โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอกของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงไม่ควรมีค่าเกิน  $D_c - 2D_i$  และความยาวของ Vortex finder ควรีค่าเท่ากับ  $D_c / 3$

#### 4. ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไซโคลน (Body dimensions)

ไฮโดรไซโคลนจะประกอบไปด้วยส่วนหลักๆ คือ ส่วนที่เป็นทรงกระบอกและส่วนที่เป็นทรงกรวย การเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของไฮโดรไซโคลนนั้นมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย ดังนั้น จึงเกิดการทำให้ไฮโดรไซโคลนแบบไม่มีส่วนทรงกระบอก หรือการทำไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กโดยไม่มีส่วนกรวยเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดต่อไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยเล็กน้อยมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังคงมีการทำส่วนกรวยเอาไว้เพื่อช่วยในแง่เชิงการผลิตไฮโดรไซโคลนค่าที่เหมาะสมในการออกแบบความยาวของไฮโดรไซโคลน คือ  $2.7D_c$  ถึง  $7.7D_c$  (Bradley, 1965)

Rietema, 1961 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่าสัดส่วนระหว่างส่วนทรงกรวยกับส่วนทรงกระบอกไม่ควรีมากเกินไป โดยแนะนำว่า ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลนควรีค่าประมาณ  $5D_c$  และควรีมุมกรวยเล็กกว่า 30 องศา

Dahlstrom, 1949 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า การเพิ่มความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลน คือ การเพิ่มความยาวของส่วนกรวยหรือการลดมุมกรวยของไฮโดรไซโคลนอย่างใดอย่างหนึ่งนั้น ทำให้ปริมาณน้ำที่บำบัดได้และประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ได้มีการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวย 9 องศา และ

20 องศา ความยาวไฮโดรไซโคลน  $9\frac{9}{16}$  นิ้ว กับ  $19\frac{3}{8}$  นิ้ว และ  $9\frac{5}{16}$  นิ้ว พบว่าที่ความจุเดียวกัน

ไฮโดรไซโคลนที่ยาวกว่าจะลดค่าความดันลด (Pressure drop) ลงครึ่งหนึ่ง ในขณะที่เมื่อเพิ่มมุมกรวยจาก 9 องศา เป็น 20 องศา โดยมีความยาวทั้งหมดเท่าเดิม พบว่ามุมไม่ได้ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าความดันลด (Pressure drop) ต่อความจุ (Capacity) แต่อย่างใด นั่นคือ ณ ความดันลดใดๆ เมื่อความยาวของไฮโดรไซโคลนมากขึ้น ความจุก็จะสูงขึ้น จึงสามารถเพิ่มอัตราบำบัดน้ำของไฮโดรไซโคลนได้

Dahlstrom, 1949 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคโดยการเพิ่มความยาวที่อัตราการไหลเดียวกัน พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะเพิ่มขึ้น เมื่อลดมุมกรวยจาก 45 องศา เป็น 15 องศา

Bradley, 1960 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ทำการเปรียบเทียบขนาดมุมของไฮโดรไซโคลนระหว่างไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา และ 20 องศา พบว่าไฮโดรไซโคลนมุม 20 องศาให้ขนาดตัด ( $x_{50}$ ) เล็กกว่าที่อัตราการไหลเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันลด และอัตราการไหลและจากการสังเกตค่าของขนาดตัดที่เปลี่ยนไป พบว่า ที่ความดันลดที่กำหนดไว้ นั้นไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา จะให้ปริมาณอัตราการจ่ายเข้าสูงกว่าโดยมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเท่ากัน สามารถอธิบายได้ว่า การเปลี่ยนมุมในช่วง 9 องศา ถึง 20 องศา ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่ความดันลดเดียวกัน

Svarovsky, 1984 กล่าวว่าในการออกแบบไฮโดรไซโคลน ขนาดมุมกรวยมีความสำคัญเช่นกัน คือ เมื่อลดมุมกรวยลงจะส่งผลทำให้ขนาดตัดลดลงด้วย ซึ่งแสดงถึงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนก็มากขึ้น อย่างไรก็ตาม ข้อดีของมุมกรวยที่กว้าง คือ จะทำให้เกิดการอุดตันที่ปลายกรวยน้อยลง นอกจากนี้ ถ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง ( $D_u$ ) เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ (Air core) เพิ่มขึ้นด้วย โดยทั่วไปมุมของไฮโดรไซโคลนควรมีค่าประมาณ 6 องศา ถึง 25 องศา

ขนาดมุมกรวยและความยาวของไฮโดรไซโคลนเป็นตัวแปรที่ค้ำึงถึงน้อยที่สุดในการออกแบบไฮโดรไซโคลน เนื่องจากไม่มีผลสรุปแน่นอนของผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจากการเปลี่ยนความยาวและมุมกรวยของไฮโดรไซโคลน ผลจากงานวิจัยได้สนับสนุนว่า มุมกรวยที่แหลมจะให้ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ (Capacity) สูงและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนอีกด้วย

กรณีที่ใช้มุมกรวยที่กว้าง ก็คือ ไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับการทำใส (Clarifier) หรือการทำ ความสะอาด (Washer) มีสองสาเหตุที่ต้องใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยกว้าง ประการแรก คือ ไฮโดรไซโคลนมุมกรวยกว้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันที่ปลายกรวยน้อยกว่า ประการที่สอง คือ ความดันลดที่ใช้กับไฮโดรไซโคลนมุมกรวยกว้างที่อัตราการไหลเดียวกัน จะให้ขนาดตัด ( $x_{50}$ ) เล็กกว่าไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยแหลม และมีการทดลองในแง่การใช้ไฮโดรไซโคลนเล็กๆ โดยมี



ช่องทางจ่ายเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential inlet) ปรากฏว่าใช้ในการคัดแยก (Classification) ตามขนาดที่ต้องการได้ดี

## 5. ขนาดและลักษณะของช่องท่อจ่ายของผสมเข้าไปในไฮโดรไซโคลอน

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า ช่องท่อจ่ายเข้าสามารถมีรูปร่างได้หลายแบบและหลายตำแหน่ง ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนไม่มากนัก โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไฮโดรไซโคลอนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อมีพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากันและความยาวต่อความกว้างควรเป็น 2:1

มีการทดลองที่ทำให้สังเกตได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดของช่องท่อจ่ายเข้าโดยยังคงพื้นที่เอาไว้ ช่องทางเข้าที่ยาวกว่าและเป็นเหลี่ยมยุ่งยากในด้านการผลิต ดังนั้นโดยส่วนใหญ่ ไฮโดรไซโคลอนจึงยังคงรูปร่างของช่องท่อจ่ายเข้าเป็นวงกลมเอาไว้

ชนิดของช่องท่อจ่ายเข้า ส่วนใหญ่จะพิจารณาในไฮโดรไซโคลอนสำหรับแยกก๊าซมากกว่า ไฮโดรไซโคลอนของของไหล ซึ่งมีผลการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลอนขนาด 3 นิ้ว พบว่าลักษณะของช่องท่อจ่ายเข้า ไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคและความดันลด

ตำแหน่งของท่อจ่ายเข้าควรจะได้ระดับกับแผ่นปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลอนซึ่งมีที่จำกัด ในบริเวณที่มีปัญหาหรือเรียกว่า Dead space เป็นบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจร ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติอยู่เสมอ แต่ไม่ควรมีมากเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลทั้งหมด

มุมของช่องท่อจ่ายเข้าไม่มีความสำคัญ กับไฮโดรไซโคลอนที่มีมุมระหว่าง 0 องศา ถึง 10 องศาจากแนวราบ แต่ส่งผลกับอัตราการจ่ายของผสมที่มีอนุภาคขนาดหยาบ ซึ่งส่งผลในเรื่อง บริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจรที่เกิดขึ้นเหนือช่องจ่ายเข้าภายในไฮโดรไซโคลอน ดังนั้นการทำมุมของทางจ่ายเข้าก็เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการจ่ายของ ผสมเข้าไปในเส้นทางไหลลัดวงจร แต่สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องสนใจมุมของทางจ่ายเข้าแต่อย่างใด

## 6. แกนอากาศ (Air core)

ลักษณะการไหลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในไฮโดรไซโคลอน คือ แกนอากาศ (Air core) ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางด้านในของไฮโดรไซโคลอน ซึ่งมีสาเหตุมาจากการไหลแบบหมุนวน เมื่อความเร็วของของไหลสูงจะทำให้บริเวณแกนกลางมีความดันต่ำ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างเป็นปกติเมื่อมีพื้นผิวของไหลที่หมุนวนอย่างอิสระภายในทรงกระบอกและเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของไซโคลอน ถ้าทางออกทั้งสองทางหรือทางใดทางหนึ่งตี ออกสู่อากาศโดยตรง

แกนกลางของไฮโดรไซโคลอนจะดูดอากาศเข้าไป ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแกนอากาศด้านในแกนของไฮโดรไซโคลอน นอกจากนี้แกนอากาศดังกล่าวยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของการไหลแบบหมุนวน (Vortex) ซึ่งควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงและมีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ตลอดความยาวของไฮโดรไซโคลอน

จากผลงานวิจัยของนักวิจัยชาวรัสเซีย (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ ( $D_a$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ( $D_c$ ) แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{D_a}{D_c} = \frac{D^*}{D_c} \sqrt[3]{\frac{\rho v_i^2}{3\Delta\rho}} \quad (2.17)$$

เมื่อ	$D_a$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ
	$D_c$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน
	$D^*$	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสมือนของไฮโดรไซโคลอน เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้ามีค่าเท่ากับ $D - D_i$
	$v_i$	คือ	ความเร็วของการไหลเข้าไปในไฮโดรไซโคลอน

#### 2.4.6 สรุปผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลอน

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอนส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน เนื่องจากถ้าไฮโดรไซโคลอนมีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ขนาดตัด ( $x_{50}$ ) ของอนุภาคจะมีขนาดเล็กตามไปด้วย นั่นหมายถึง ไฮโดรไซโคลอนมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคดียิ่งขึ้นในแง่ของขนาด

2. การลดอัตราการจ่ายเข้าและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (Overflow) จะทำให้ขนาดตัด ( $x_{50}$ ) เล็กลงแต่ความดันลด ( $\Delta p$ ) เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องที่จ่ายเข้าที่เหมาะสมโดยที่ขนาดตัดและความดันลดน้อยที่สุด ควรมีค่า  $D_i = D_c / 3.5$  และ  $D_o = D_c / 3$

3. การเพิ่มความยาวของท่อขึ้นสำหรับช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดเล็กจะลดลง ความยาวที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน แต่ควรมีช่วงระหว่าง  $D_c / 2.5$  ถึง  $D_c / 3$  ความหนาของผนังด้านบนที่ฐานของ Vortex finder ควรหนากว่าส่วนปลายเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

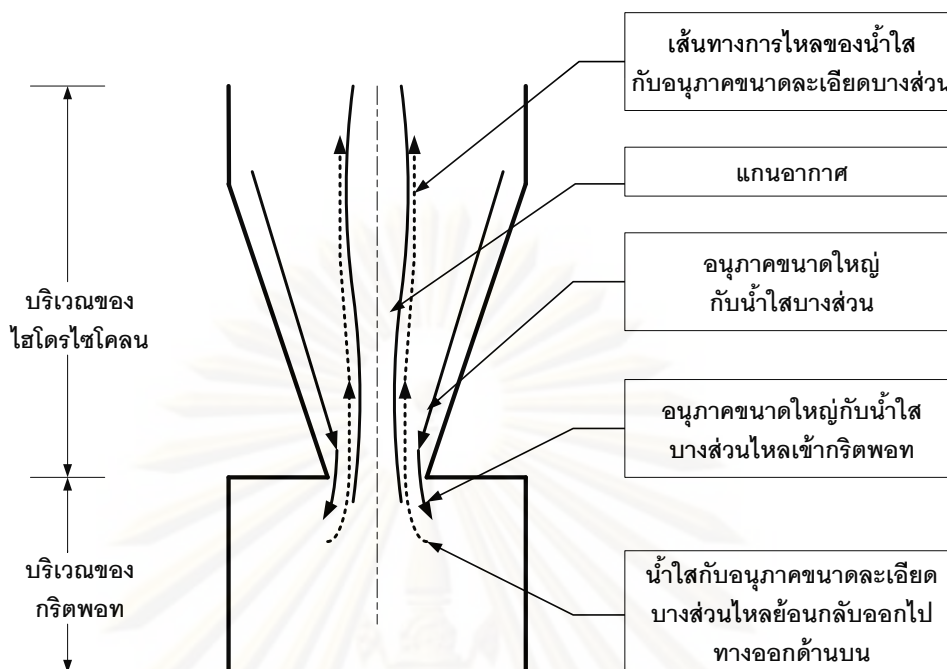
4. ไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดยาว ทำให้มีอัตราการจ่ายเข้าสู่สูง โดยไม่คำนึงถึงสัดส่วนความยาวของส่วนทรงกรวยและทรงกระบอก อีกทั้งยังไม่ส่งผลต่อขนาดตัดเมื่อความดันคงที่ แต่มุมกรวยที่เล็ก อาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายกรวยได้
5. ช่องท่อจ่ายเข้าควรมีผนังเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลน
6. เมื่อมีของแข็งที่จะสามารถกักก่กร่อนได้อยู่ภายในของผสมที่จะจ่ายเข้า ควรมีการป้องกันการกักก่กร่อนที่บริเวณฐานของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และส่วนปลาย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon)

## 2.5 ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ( Hydrocyclone equipped with Grit pot )

กริตพอททำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็กโดยจะติดตั้งอยู่ที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลน ซึ่งอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลนจะไหลออกทางออกด้านล่างและเข้าสู่กริตพอทและจะตกตะกอนอยู่ภายในจนกระทั่งเวลาผ่านไประยะเวลาหนึ่งอนุภาคของแข็งจะสะสมอยู่ภายในจนถึงระดับสูงสุดที่กริตพอทจะรับได้จึงปล่อยออก (Drain off) แล้วนำของผสมเข้มข้น ไปบำบัดต่อไป แต่ในกรณีถ้าอนุภาคของแข็งที่สะสมอยู่ภายในกริตพอทมีเข้มข้นมาก จะทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่ไหลผ่านช่องทางออกด้านล่างมา จึงทำให้อนุภาคของแข็งไหลออกไปยังทางออกด้านบน เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนลดต่ำลง ดังนั้น เวลาที่ใช้กักเก็บตะกอนของกริตพอทจึงขึ้นอยู่กับเวลาที่ปล่อยตะกอนเข้มข้นของอนุภาคของแข็งออกไป ความเข้มข้นที่จ่ายเข้า ลักษณะสมบัติในการตกตะกอนของอนุภาคของแข็งและตัวแปรทางกายภาพอื่นๆ

Puprasert และคณะ, 2004 ได้ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลนที่ทำการติดตั้งกริตพอท บำบัดน้ำฝนไหลนอง (Run off water) เปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา พบว่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจะต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 5-15 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีความเข้มข้นของอนุภาคที่ไหลออกทางด้านล่างสูงขึ้น

การไหลภายในกริตพอทสามารถอธิบายได้โดย Hass และ Bradley, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) บริเวณส่วนบนของกริตพอทนั้น การไหล เข้ากริตพอทจะเท่ากับการไหลย้อนกลับจากกริตพอทเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ทั้งนี้การไหลย้อนกลับจะไหลผ่านช่องแคบรอบแกนอากาศ ทำให้อนุภาคขนาดเล็กไหลย้อนกลับไปในไฮโดรไซโคลน และอนุภาคที่เหลืออยู่ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนอยู่ภายในกริตพอท ดังแสดงในรูปที่ 2.18



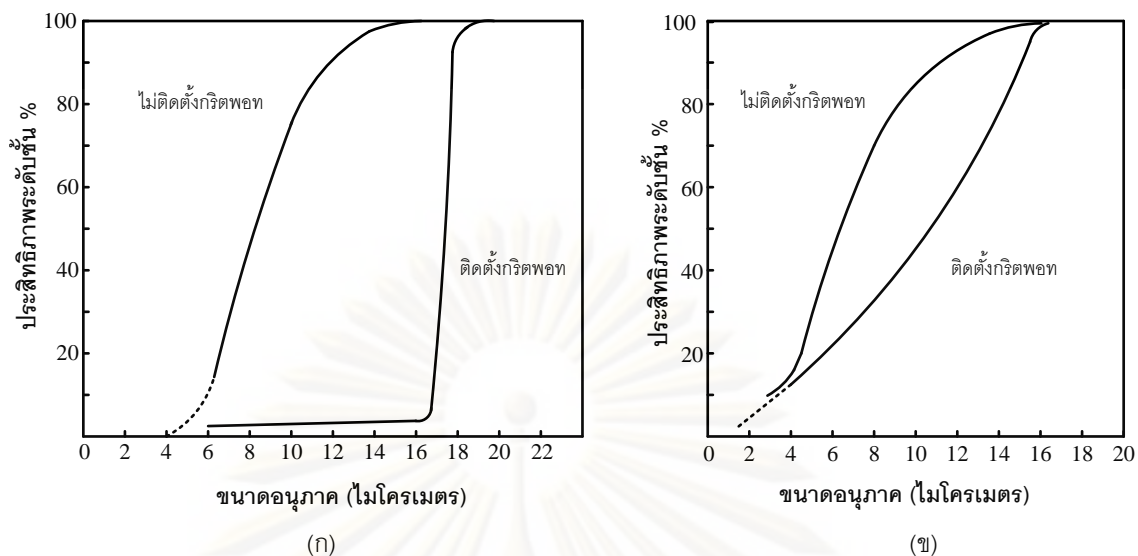
รูปที่ 2.18 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกิริตพอท

Hass และคณะ, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) ยังกล่าวอีกว่า อัตราส่วนความเข้มข้นสามารถตรวจสอบได้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นภายในกิริตพอทและความเข้มข้นของของไหลที่จ่ายเข้า ซึ่งมีค่าสูงถึง 4500 สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 เมตร และมีขนาดของอนุภาคที่สะสมในกิริตพอท เฉลี่ย 1 ไมโครเมตร

Bradley, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) ได้ศึกษาถึงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนเมื่อทำงานร่วมกับกิริตพอทที่ติดตั้งอยู่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอน พบว่าประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกิริตพอทจะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคต่ำกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดาเล็กน้อยและขนาดตัด (Cut size) ที่ได้จากไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกิริตพอทนั้นจะสูงกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา แต่ไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกิริตพอทจะมีความคมชัด (Sharpness) ในการแยกอนุภาคสูงกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 2.19

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคกับขนาดอนุภาค (ก) ที่อัตราการไหลต่ำ และ (ข) ที่อัตราการไหลสูง เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริดพอท (Puprasert, 2004)

## 2.6 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน (Separation Efficiency)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การแยกอนุภาคของของแข็งออกจากของเหลวในไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอาจมีอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำหลุดออกไปกับน้ำใสที่ทางออกด้านบนและมีของเหลวหลุดออกไปพร้อมกับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงที่ทางออกด้านล่างเสมอ การศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน สามารถทำในสองแนวทาง โดยแนวทางแรกจะทำในแง่การแยกมวลของของแข็ง ซึ่งได้แก่ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) ประสิทธิภาพลด (Reduce efficiency) และประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency) แนวทางที่สองจะกล่าวในแง่ของขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลนหรือเรียกว่า ขนาดตัด (Cut size)

### 2.6.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว โดยพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow) กับปริมาณของอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed in) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.18)$$

$$\text{โดยที่} \quad M_u = Q_u \cdot C_u \quad (2.19)$$

$$M = Q_f \cdot C_f \quad (2.20)$$

เมื่อ	$E_T$	คือ	ประสิทธิภาพรวม
	$M_u$	คือ	มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านล่าง (มวลต่อเวลา)
	$M$	คือ	มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (มวลต่อเวลา)
	$Q_u$	คือ	อัตราการไหลที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (ปริมาตรต่อเวลา)
	$Q_f$	คือ	อัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (ปริมาตรต่อเวลา)
	$C_u$	คือ	ความเข้มข้นของผสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)
	$C_f$	คือ	ความเข้มข้นของผสมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (มวลต่อปริมาตร)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของผสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลน (Underflow) เท่ากับความเข้มข้นของผสมที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (Feed in) แสดงว่าไม่เกิดการแยกอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน เพียงแต่เกิดการแบ่งการไหล (Flow split) ออกเป็นสองทางเท่านั้น ดังนั้น ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลนควรมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$C_u = C_f \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.18)

$$E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_u \cdot C_u}{Q_f \cdot C_f} \quad (2.22)$$

แทน  $C_u = C_f$  ในสมการที่ (2.22) จะได้ว่า

$$E_T = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.23)$$

เมื่อทำการแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง ( $Q_u$ ) หารด้วยอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ( $Q_f$ ) พบว่ามีค่ามากกว่าศูนย์ ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน ( $E_T$ ) จึงไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนอย่างแท้จริงได้ ดังนั้นจึงมีการนิยามประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ซึ่งเรียกว่า ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

## 2.6.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

ประสิทธิภาพลด คือ ประสิทธิภาพที่ใช้ในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากจุดประสงค์ของการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนนั้นต้องการให้มีปริมาณของของแข็งทั้งหมดไหลออกไปยังทางออกด้านล่าง (Underflow) และมีเพียงน้ำใสไหลออกไปยังทางออกด้านบน (Overflow) แต่ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ เพราะจะมีส่วนของของเหลวไหลออกมายังทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้นจึงต้องนำสัดส่วนของของเหลวมาคำนวณรวมประสิทธิภาพด้วย ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) น้อยลงและสอดคล้องกับความเป็นจริงยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เป็นประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ในการบ่งบอกประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนมากกว่าประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สามารถแสดงได้จากสมการ

$$E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $E'_T$  คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลอน  
 $E_T$  คือ ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอน  
 $R_f$  คือ อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ระหว่างอัตราการไหลที่ไหลออกทางด้านล่างและอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน

อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล ( $R_f$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.25)$$

ในกรณีที่  $C_u = C_f$  ดังที่กล่าวไปแล้วในสมการที่ (2.21) ซึ่งควรจะทำให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ  $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$   
 แทน  $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$  ในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{E_T - E_T}{1 - E_T} = 0 \quad (2.26)$$

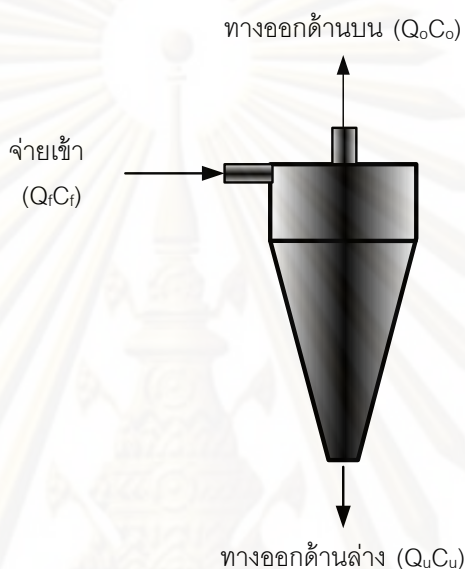
ดังนั้น ในการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน ควรใช้การคำนวณหาประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แทนการใช้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) เพื่อการคำนวณที่ถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า

### 2.6.2.1 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

ในการหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งแบบธรรมดา สามารถคำนวณได้จาก สมดุลมวล (Mass balance)

จากสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 2.20 จะได้ว่า

$$Q_f Q_f = Q_o C_o + Q_u C_u \quad (2.27)$$



รูปที่ 2.20 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

จากสมการที่ (2.24) ประสิทธิภาพ ( $E'_T$ ) =  $\frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$

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

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{Q_u (C_u - C_f)}{C_f (Q_f - Q_u)} \quad (2.28)$$

เมื่อ  $Q_f - Q_u = Q_o$

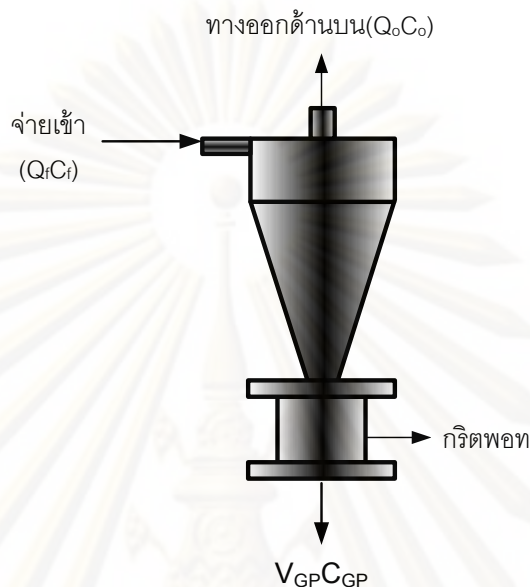
ดังนั้น ประสิทธิภาพในการแยกของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา หรือ ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ( $E'_T$ ) แสดงได้ดังสมการ

$$E'_T = \frac{Q_u (C_u - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (2.29)$$



### 2.6.2.2 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

ในการหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทสามารถหาได้จากสมการสมดุลมวล (Mass balance) เช่นกัน



รูปที่ 2.21 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

จากสมการสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ดังรูปที่ 2.21 จะได้ว่า

$$Q_f C_f T = Q_o C_o T + V_{GP} C_{GP} \quad (2.30)$$

$$V_{GP} C_{GP} = Q_f C_f T - Q_o C_o T \quad (2.31)$$

เมื่อ  $T$  คือ เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่าง หรือระบายน้ำที่ออกจากกริตพอท

$V_{GP}$  คือ ปริมาตรของกริตพอท

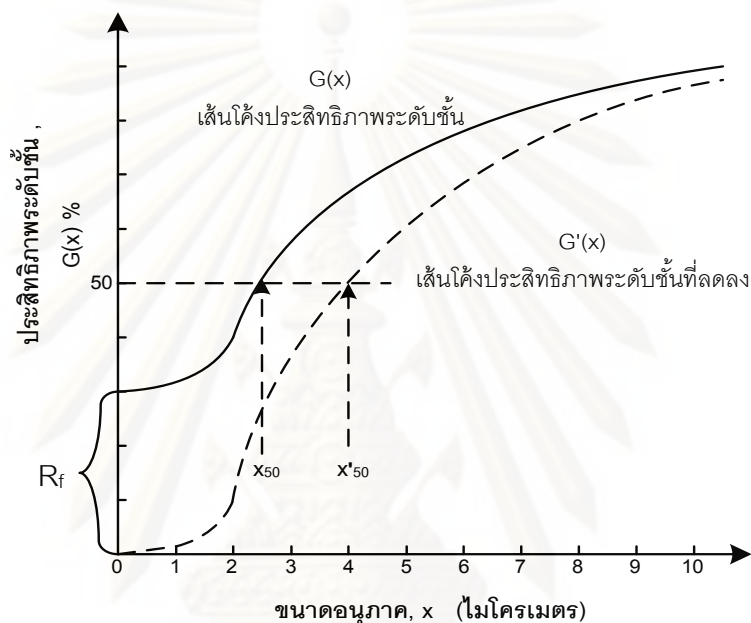
$C_{GP}$  คือ ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งในกริตพอท

ดังนั้นประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทหรือ ประสิทธิภาพรวม ( $E_T$ ) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \quad (2.32)$$

### 2.6.3 ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency)

ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency) มีความหมายคล้ายคลึงกับประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) เพียงแต่ประสิทธิภาพรวมหรือประสิทธิภาพพลจะหมายถึงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคทั้งหมดโดยไม่คำนึงถึงขนาด ส่วนประสิทธิภาพระดับชั้นเป็นการนำค่าประสิทธิภาพของทุกๆขนาดมาทำเป็นกราฟ เรียกว่า เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S) ดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 กราฟแสดงเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Svarovsky, 1984)

การสร้างเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) สามารถสร้างได้จากการทดลอง 2 วิธี ดังนี้ วิธีแรกง่ายของแข็งที่มีชนิดและขนาดอนุภาคขนาดเดียว (Monosized solids) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนหลายๆครั้ง หรือ วิธีที่สองซึ่งประหยัดและเร็วกว่าการทดลองวิธีแรก คือ การจ่ายของแข็งที่มีการกระจายของอนุภาค หลายขนาดตามต้องการ โดยทั้งสองวิธีทดลองต้องมีการวัดเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของอนุภาคแต่ละขนาด ในกรณีที่สองจะต้องมีการนำการกระจายของอนุภาคของการไหลออกสู่ด้านบนและทางออกด้านล่างไปทำการวิเคราะห์ด้วย ดังนั้นการทำสมดุลมวล (Mass balance) ของการไหลทั้ง 3 ทิศทาง สามารถนำไปคำนวณสมการพื้นฐานของประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency,  $G(x)$ ) ได้ดังนี้

$$G(x) = E_T' \cdot \frac{dF_u(x)}{dF_f(x)} \quad (2.33)$$

$$G(x) = 1 - (1 - E_T) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_f(x)} \quad (2.34)$$

$$\frac{1}{G(x)} = 1 + \left( \frac{1}{E_T} - 1 \right) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_u(x)} \quad (2.35)$$

- เมื่อ  $G(x)$  คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve)  
 $E'_T$  คือ ประสิทธิภาพลด (Reduce total efficiency)  
 $F_f(x)$  คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (%)  
 $F_u(x)$  คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่าง (%)  
 $F_o(x)$  คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบน (%)

จากสมการข้างต้นทั้ง 3 สมการ สามารถคำนวณหรือแสดงผลของประสิทธิภาพระดับชั้น (ในแต่ละขนาดอนุภาค) ออกมาได้ในรูปแบบของกราฟ ซึ่งการแสดงผลในรูปแบบของกราฟจะมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณ

ในการทดลองหาค่าประสิทธิภาพระดับ ชั้น ของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนจะต้องเป็นชนิดเดียวกัน หลีกเลี่ยงผลกระทบอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น และควรเลือกใช้วัสดุที่ไม่เกาะตัวกัน เป็นกลุ่มก้อน (Non-flocculating) และมีการกระจายตัวออกจากกันได้ง่าย (Easily dispersed)

#### 2.6.4 ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency)

ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency) จะคำนึงถึงผลที่ได้จากการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) เช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.6.2 นั่นคือ มีการนำอัตราการวนการแบ่งอัตราการไหล ( $R_f = \frac{Q_u}{Q_f}$ ) มาคำนวณด้วย ดังรูปที่ 2.22

ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency) ในแต่ละขนาดอนุภาค หาได้จาก

$$G'(x) = \frac{G(x) - R_f}{1 - R_f} \quad (2.36)$$

- เมื่อ  $G'(x)$  คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง

$G(x)$  คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น

$R_f$  คือ อัตราส่วนการแบ่งอัตรากาไรไหล

สำหรับในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัย พิจารณาถึงปริมาณกรวดทราย ความเข้มข้นของกรวดทราย และมวลของกรวดทรายที่แยกได้ทั้งหมดจากไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง กริดพอท จึงแสดงผลเพียงประสิทธิภาพรวม ( $E_T$ ) และประสิทธิภาพผลด ( $E'_T$ ) เท่านั้น ไม่จำเป็นต้องแสดงถึงประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency)

### 2.6.5 ขนาดตัด (Cut size)

ขนาดตัดของไฮโดรไซโคลน คือ ขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกได้ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ขนาดตัดสามารถหาได้จากขนาดของอนุภาคที่อยู่บนตำแหน่งของเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) บนแกน x เรียกว่า  $x_{50}$  ดังนั้นขนาดตัดจึงเป็นตัววัดประสิทธิภาพในแง่ของขนาดอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกได้ มีบางไฮโดรไซโคลนที่ใช้ขนาดถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นขนาดตัดเมื่อต้องการให้อนุภาคที่แยกได้มีขนาดเล็กๆ แต่โดยทั่วไปที่ยอมรับกันจะอยู่ที่ขนาด 50 เปอร์เซ็นต์ หรือเรียกว่า Equiprobable size นั่นคือ ขนาดของอนุภาคที่มีโอกาส 50 เปอร์เซ็นต์ ที่จะถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลน ซึ่งอนุภาคที่ถูกแยกออกจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และ / หรือหายาก ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กและ / หรือละเอียดที่มีขนาดเล็กกว่า Equiprobable size  $x_{50}$  จะไหลออกไปยังทางออกด้านบน

จากรูปที่ 2.22 ตำแหน่ง  $x_{50}$  (ขนาดอนุภาคที่ให้ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นตำแหน่งที่ได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพ ระดับชั้น (Grade efficiency curve) และตำแหน่ง  $x'_{50}$  (ขนาดอนุภาคที่ให้ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นตำแหน่งที่ได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency)

การหาขนาดตัด ( $x_{50}$ ) สามารถหาได้จากการเขียนกราฟระหว่างอนุภาคขนาดต่างๆ กับประสิทธิภาพรวม ( $E_T$ ) และรวมฟังก์ชันทั้ง 3 การไหลของของไหล ได้ดังสมการ

$$\frac{d}{dx}(F_f - 2E_T - F_u) = 0 \quad (2.37)$$

$$\frac{d}{dx}[F_f - 2(1 - E_T) \cdot F_o] = 0 \quad (2.38)$$

$$\frac{d}{dx}\left[F_u - \left(\frac{1 - E_T}{E_T}\right) \cdot F_o\right] = 0 \quad (2.39)$$



เมื่อ	$F_f$	คือ	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (%)
	$F_u$	คือ	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่าง (%)
	$F_o$	คือ	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบน (%)
	$E_T$	คือ	ประสิทธิภาพรวม

การหาขนาดตัดอีกวิธีหนึ่งสามารถทำได้จากการใช้นิยามของการวิเคราะห์ขนาดตัด หรือเรียกว่า Analytical cut size ( $x_a$ ) ซึ่งหมายถึง ขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกอย่างอุดมคติตามที่ขนาดอนุภาคที่เป็นสัดส่วนกับประสิทธิภาพรวม (Total efficiency,  $E_T$ ) ซึ่งคล้ายกับขนาดของช่องตะแกรงในอุดมคติที่จะสามารถแยกสัดส่วนของ  $E_T$  ของการจ่ายของแข็งเข้าไปให้ได้อนุภาคขนาดใหญ่ (coarse product) เป็นต้น

$$F(x_a) = E_T \quad (2.40)$$

เมื่อ	$F$	คือ	เปอร์เซ็นต์ของขนาดอนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัด ( $x_{50}$ )(%oversize)
-------	-----	-----	--------------------------------------------------------------------

จากการนิยามดังสมการที่ 2.40 จะเห็นได้ว่า  $x_a$  คือ ขนาดของอนุภาคขนาดต่างกันปะปนกันอยู่ในไฮโดรไซโคลน ซึ่งปริมาณของอนุภาคขนาดหยาบในส่วนของอนุภาคขนาดละเอียด และอนุภาคขนาดละเอียดในส่วนของอนุภาคขนาดหยาบนั้นมีปริมาณเท่ากัน อีกทั้งภายใต้ขนาดตัดที่ใช้การวิเคราะห์ (Analytical cut size) แบบเชิงเลข จะเท่ากับ Equiprobable size  $x_{50}$  ในทางปฏิบัติการที่ขนาดตัดสองค่าจะมีค่าเท่ากันนั้น สามารถเกิดขึ้นได้ยาก (ยกเว้นประสิทธิภาพรวมมีค่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์)

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในแง่ของขนาดของอนุภาคของแข็ง ( $D_{50}$ ) ที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนที่ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกได้กับขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้า (Feed in) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วย %GE (Granulometric separation Efficiency) ในส่วนของการไหลออกด้านบน สามารถแสดงได้ดังสมการ (Puprasert, 2004)

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Feed} - D_{50} \text{Overflow}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.41)$$

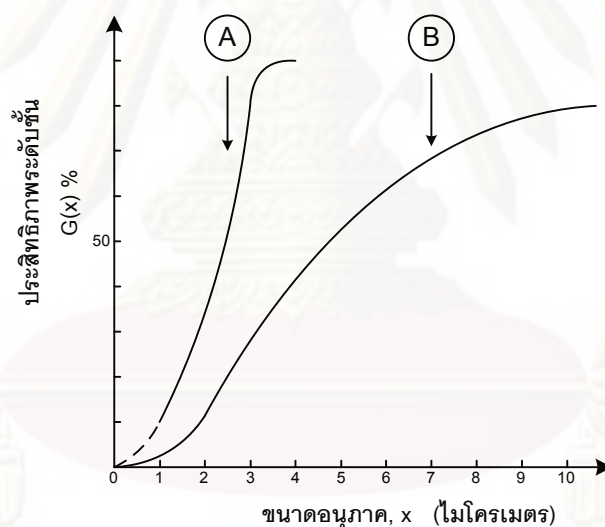
และในส่วนของการไหลออกด้านล่าง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\% \text{ GE} = \frac{D_{50} \text{ Underflow} - D_{50} \text{ Feed}}{D_{50} \text{ Feed}} \times 100 \quad (2.42)$$

เมื่อ  $D_{50}$  คือ ขนาดของอนุภาคที่อยู่ในส่วนการไหลใด ๆ ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

## 2.6.6 ความคมชัด (Sharpness)

ความคมชัดในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนสามารถดูได้จากความชันของเส้นโค้งประสิทธิภาพ (Grade efficiency curve) เมื่อเส้นโค้งประสิทธิภาพที่มีการกระจายขนาดอนุภาคแตกต่างกันหลายค่าจะทำให้เส้นโค้งมีความชันต่ำ นั่นคือ มีความคมชัดในการแยกอนุภาคน้อย ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 เปรียบเทียบความคมชัดในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน (Svarovsky, 1984)

จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่า เส้นโค้ง A มีความชันมากกว่าเส้นโค้ง B นั่นหมายถึง เส้นโค้ง A มีความคมชัดในการแยกอนุภาคของแข็งในแง่ของขนาดมากกว่าเส้นโค้ง B

การหาความคมชัด (Sharpness) ในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนสามารถหาได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve,  $G(x)$ ) อาจกล่าวได้ว่า อัตราส่วนของขนาดอนุภาคสองขนาดจะสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์ที่แตกต่างกันบนเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Eder, 1961 อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ยกตัวอย่างเช่น

$$H\left(\frac{25}{75}\right) = \frac{x_{25}}{x_{75}} \quad (2.43)$$

เมื่อ  $H\left(\frac{25}{75}\right)$  คือ ดรรชนีความคมชัดของไฮโดรไซโคลนที่ Grade efficiency curve 25 และ 75 เปอร์เซ็นต์

$x_{25}$  คือ ขนาดของอนุภาคที่ Grade efficiency curve 25 เปอร์เซ็นต์ ( $\mu\text{m}$ )

$x_{75}$  คือ ขนาดของอนุภาคที่ Grade efficiency curve 75 เปอร์เซ็นต์ ( $\mu\text{m}$ )

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน

1.1 Cilliers. และคณะ (2004) ศึกษาถึงผลกระทบต่อการแยกอนุภาคและการรีดน้ำออก (Dewatering) ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ทำการทดลองโดยใช้ผงซิลิกา (Silica flour) ซึ่งมีขนาดอนุภาค 0.8, 6 และ 11 ไมโครเมตร ผสมกับน้ำที่อุณหภูมิระหว่าง 10 ถึง 60 องศาเซลเซียส จ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ก็เพิ่มขึ้น และปริมาตรโดยน้ำหนักลดลง ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. สัดส่วนความเข้มข้น ( $Q_u / Q_f$ ) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการนำน้ำกลับคืน (Water recovery) ลดลง การนำของแข็งกลับคืนเพิ่มขึ้น (Solid recovery)
2. การที่ของแข็งกลับคืนเพิ่มขึ้นอาจมีผลมาจากการเพิ่มของสัดส่วนการไหลอ้อม (By pass) และการลดลงของขนาดตัด (Cut size)
3. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคขนาดละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อรวบรวมอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร

อีกทั้งในงานวิจัยนี้ได้มีการนำทฤษฎีของความสมดุล (The equilibrium orbit theory) มาใช้ทำนายการเปลี่ยนแปลงของขนาดตัดได้ อย่างน่าพอใจ พร้อมทั้งกับการนำของแข็งกลับคืนสามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ของเวลากักเก็บ (Residence time) ซึ่งกล่าวถึงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงความหนืดของของไหลเนื่องจากอุณหภูมิ

1.2 Kawatra. และคณะ (1996) ศึกษาถึงผลกระทบของความหนืดของของเหลวในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน โดยทดลองใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 102 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งเครื่องมือวัดความหนืด (Viscosimeter) ของผสมเตรียมจากผงซิลิกา (80

เปอร์เซ็นต์ผ่าน 65 ไมโครเมตร) และน้ำ แล้วทำการแปรผันอนุกรมตั้งแต่ 10 ถึง 55 องศาเซลเซียส และของผสมซึ่งมี 19, 26, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์ของแข็งโดยน้ำหนัก ในขณะที่ให้ความดันเข้าคงที่เท่ากับ 10 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. ความหนืดของของเหลวเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจาก การเปลี่ยนแปลงเปอร์เซ็นต์ของแข็ง การกระจายขนาดของอนุภาค อนุกรม และสิ่งแวดล้อมทางเคมี เป็นต้น และแบบจำลองสำหรับขนาดตัดของไฮโดรไซโคลอนที่พัฒนามาจาก Plitt's model สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$d_{50}(c) = \left( \frac{K \cdot D_c^{0.46} \cdot D_i^{0.6} \cdot D_o^{1.21} \cdot \Phi^{0.41} \cdot \eta^{0.35}}{D_u^{0.71} \cdot h^{0.38} \cdot Q^{0.45} \cdot (\rho_s - \rho_l)^{0.5}} \right) \quad (2.44)$$

เมื่อ	$K$	คือ ค่าคงที่
	$D_c$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน (เซนติเมตร)
	$D_i$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า (เซนติเมตร)
	$D_o$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (เซนติเมตร)
	$D_u$	คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (เซนติเมตร)
	$\Phi$	คือ เปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแข็งในน้ำ
	$\eta$	คือ ความหนืดของของเหลว (เซนติพอยต์)
	$h$	คือ ระยะทางระหว่างส่วนปลายของ Vortex finder กับส่วนบนของช่องทางออกด้านล่าง (เซนติเมตร)
	$Q$	คือ อัตราการไหลของของเหลว (ลิตรต่อนาที)
	$\rho_s$	คือ ความหนาแน่นของของแข็ง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	$\rho_l$	คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

- อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล ( $R_f$ ) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้น
- ความหนืดไม่มีผลกระทบต่อเส้นโค้งประสิทธิภาพขั้นที่ลดลง (Reduced efficiency curve)



## 2. การศึกษาถึงลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลน

2.1 Chu. และคณะ (2002) ศึกษาถึงผลกระทบของรูปทรง พารามิเตอร์ในการดำเนินการและลักษณะการจ่ายเข้าต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลนโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของอนุภาค (Particle dynamic analyzer, PDA) ในการหาความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวรัศมีของไฮโดรไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ของผสมมีสองเฟส คือ น้ำและอนุภาคของแข็งประกอบด้วย Polystyrene Polyvinyl chloride และ Quartz ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.05, 1.40 และ 2.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยขนาดของอนุภาค ความเข้มข้นของอนุภาคในของผสมจ่ายเข้า และ ความดันเข้า จะแปรผันไปตามการทดลอง จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า

1. ความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ) ของอนุภาคของแข็งจะลดลงเมื่อตำแหน่งรัศมีเพิ่มขึ้น โดยรูปแบบของกราฟมีลักษณะพาราโบลา
2. ความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ) ของอนุภาคของแข็งจะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันเข้าและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น
3. เมื่อความหนาแน่นของอนุภาคหรือขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น ค่าความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ) ของอนุภาคของแข็งก็จะลดลง
4. ความเร็วตามแนวรัศมี ( $V_x$ ) ของอนุภาคของแข็งจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น
5. กราฟการกระจายความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ ) จะมีลักษณะพาราโบลา ความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายใน (Inner helical flow) จะมีค่ามากกว่าการหมุนวนภายนอก (Outer helical flow)
6. ความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ ) ในการไหลวนภายในจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของทางออกด้านบนเพิ่มขึ้น และความเร็วตามแนวแกน ( $V_z$ ) ในการไหลวนภายนอกจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น

2.2 Shah. และคณะ (2006) ศึกษาการทำแบบจำลองการแยกน้ำ (Water split) ในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำแบบจำลองเพื่อทำนายการแยกน้ำในไฮโดรไซโคลน ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) เป็นตัวแปรควบคุม และใช้ความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเป็นตัวแปรตามที่จะสามารถควบคุมลักษณะการแยกน้ำในไฮโดรไซโคลนได้

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน หรือเรียกว่า อัตราส่วนกรวย (Cone ratio) โดยทำการทดลองกับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร และให้อัตราส่วนกรวยเท่ากับ 0.5 ในการทดลองแรกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและช่องทางออกด้านบนเท่ากับ 11 และ 22 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนในการทดลองที่สองใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและช่องทางออกด้านบนเท่ากับ 13 และ 26 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยให้ตัวแปรอื่นๆคงที่ พบว่า ถึงแม้อัตราส่วนกรวยจะเท่ากันแต่การแยกน้ำในไฮโดรไซโคลนนั้นต่างกันอย่างชัดเจน

จากการศึกษาพบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนเพิ่มขึ้น การแยกน้ำจะลดลงแบบเอกโพเนนเชียล ในทำนองเดียวกันเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น การแยกน้ำก็จะเพิ่มขึ้น และสามารถอนุมานได้ดังสมการ

$$S = 0.023(D_o)^{-6.5} \cdot (D_u)^{5.1} \cdot (P)^{-0.5} \quad (2.45)$$

เมื่อ  $S$  คือ การแยกน้ำ (Water split)

$D_o$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (เมตร)

$D_u$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (เมตร)

$P$  คือ ความดันที่จ่ายเข้า (ปอนด์ต่อลูกบาศก์นิ้ว)

จากผลการทดลองได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Abbot (1962) Lindner (1956) Moder และ Dahlstrom (1952) Plitt (1976) Stass (1957) และ Yoshioka และ Hotta (1955) (อ้างถึงใน Shah, 2006) พบว่าสอดคล้องกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด 5.26 เปอร์เซ็นต์

**2.3 Yalcin. และคณะ (2003)** ศึกษาถึงผลของการจ่ายของผสมเข้าตามแนวแกน (Axial inlet) รอบ Vortex finder ในอุตสาหกรรมคัดแยกแร่ โดยในการทดลองจะเปรียบเทียบระหว่างการจ่ายของผสมเข้าตามแนวแกน (Axial inlet) รอบ Vortex finder และการจ่ายของผสมเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential inlet) สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 88.9 มิลลิเมตร มีมุมกรวย 15 องศา ความยาวของส่วนทรงกรวยและทรงกระบอกรวมกันเท่ากับ 452.1 มิลลิเมตร ทำให้สัดส่วนระหว่างความยาวต่อความกว้างเท่ากับ 5 ซึ่งสอดคล้องกับไฮโดรไซโคลนแบบ Rietema (1961) โดยของผสมที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วย กากแร่ เช่น ทองแดง นิกเกิล ซึ่งมีขนาดอนุภาค 300 ไมโครเมตร ตัวแปรที่ใช้คือ ความดันที่จ่ายเข้าแปรผัน

ระหว่าง 24.1 กิโลปาสคาล ถึง 103.4 กิโลปาสคาล ความหนาแน่นของอนุภาคระหว่าง 15 ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ความยาวของ Vortex finder อยู่ระหว่าง 0 ถึง 127 มิลลิเมตร

จากการทดลองพบว่าเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ปริมาณของกากแร่ (Throughput) ของการจ่ายของผสมตามแนวแกนจะมากกว่าการจ่ายของผสมตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ และขนาดตัด ( $d_{50}$  size) ก็จะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่เมื่อเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาคจ่ายเข้า ขนาดตัดจะเพิ่มขึ้นในการจ่ายของผสมตามแนวแกนมากกว่า การจ่ายของผสมตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง นั่นคือ การจ่ายของผสมตามแนวแกนจะให้อนุภาค หยาบกว่าและเมื่อเพิ่มความยาวของ Vortex finder ขนาดตัดจะลดลง เนื่องจากอนุภาคมีเวลาอยู่ในไฮโดรไซโคลนมากขึ้น

**2.4 Yang. และคณะ (2004)** ศึกษาการทำแบบจำลองสามมิติของไฮโดรไซโคลน เพื่อทำนายการไหลและประสิทธิภาพในการแยกของอนุภาค สำหรับใช้แยกสลัดจ์ในโรงผลิตน้ำ บริสุทธิ์และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้ก็เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของไฮโดรไซโคลน ในการทำชั้น สลัดจ์ในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากกระบวนการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันต้องการพื้นที่มากและใช้ เวลานานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสลัดจ์มาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำแบบจำลองสามมิติเพื่อ ทำนายการไหลและประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลนในแง่ของขนาดอนุภาค และ ทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง

ในการคำนวณวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคจะต้องสมมติว่า ผลของการเคลื่อนที่ของ อนุภาคของการไหลและปฏิกริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาค มีค่าน้อยมาก ซึ่งพอที่จะ มองข้ามไปได้ สำหรับสลัดจ์เจือจางที่ใช้ในการศึกษานี้ ดังนั้นวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถคำนวณได้โดย การอินทิเกรตสมการสมดุลแรง (Force balance equations) ของอนุภาคบนพื้นฐานของการ ทำนายการไหล

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองด้วยของผสมระหว่างน้ำและอนุภาคของแข็ง ที่นำ มาจาก สลัดจ์ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์ของ Seong-Hwan water purifying plant โดยที่สลัดจ์มี ส่วนประกอบของแร่ต่างๆ เช่น หินเขี้ยวหุมาน (quartz) แร่ไฮดรอกซิลลูมิเนียมซิลิเกต (Kaolinite) และหินอัลไบต์ (Albite) อนุภาคของของแข็งมีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และขนาดอนุภาคของของแข็งมีการกระจายตัวตั้งแต่ขนาดเล็กกว่าไมครอน (Sub-micron) จนถึง 100 ไมครอน โดยมีความเข้มข้นของของแข็งที่จ่ายเข้าเท่ากับ 7.46 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของช่องทางเข้า (Feed) อัตราการไหลออกด้านบน (Overflow) อัตราการไหลออก ด้านล่าง (Underflow) มีค่าเท่ากับ 49.9, 35.0 และ 14.9 กิโลกรัมต่อนาที ตามลำดับ ทำการเก็บ

ตัวอย่างในเวลาเดียวกันที่บริเวณทางน้ำเข้า ทางออกด้านบน และทางออกด้านล่าง จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มข้นของของแข็งและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคทั้ง 3 ตัวอย่าง

จากผลการวิจัยโดยใช้การคำนวณพลังงานจลน์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อเข้าใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลอน ส่วนค่าความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนทรงกระบอกใกล้กับช่องทางเข้า (Feed inlet) และมีค่าน้อยสุดที่บริเวณใกล้กับช่องทางออกด้านบน จากนั้นได้มีการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่ไหลออกด้านล่าง (Underflow) ของแบบจำลองสามมิติและจากการทดลอง โดยผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาดอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่างประมาณ 5-45 ไมโครเมตร

สรุปได้ว่าวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถทำนายประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองสามมิติ พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน

### 3. การศึกษาถึงการแยกอนุภาคของแข็ง-ของเหลวออกจากกันด้วยไฮโดรไซโคลอน

3.1 Burt. และ Thomas. (2002) ศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการลดปริมาณของเสียเส้นใย (fibre waste) ในอุตสาหกรรมกระดาษ (Paper mill) ด้วยไฮโดรไซโคลอนในการแยกสิ่งสกปรกออกจากน้ำเยื่อในขั้นตอนที่ 3 และ 4 ตามกระบวนการผลิตที่สะอาด (Cleaner production) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้ได้เส้นใยน้อยที่สุด เพื่อสามารถปล่อยลงสู่ระบบระบายสิ่งปฏิกูล ในการศึกษานี้ได้ทำการวัดความดันเพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ไฮโดรไซโคลอนมีประสิทธิภาพในการแยกเส้นใย เพื่อที่จะได้ส่วนของเส้นใยที่สามารถนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตกระดาษ (recycled fibre) ทั้งนี้เป็นการลดการสูญเสียเส้นใยและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความดันมีผลต่อระบบการแยกเยื่อด้วยไฮโดรไซโคลอน เมื่อความดันสูงขึ้น ผลที่ได้จะทำให้มีการสูญเสียเส้นใยลดลง แต่เมื่อค่าความดันของไฮโดรไซโคลอนในขั้นตอนที่ 4 ของการผลิตที่สะอาด มีค่าระหว่าง 150-160 กิโลปาสคาล มีผลทำให้ความเข้มข้นน้ำเยื่อลดลง คุณภาพของเส้นใยก่อนข้างต่ำ เนื่องจากมีปริมาณของ shive มาก ไม่เหมาะสมสำหรับนำกลับมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษต่อไป

3.2 Pasquier. และคณะ (2000) ศึกษาการใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ในการรีดน้ำ (Dewatering) ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Sub-microb) เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ซึ่งประกอบด้วย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2.0 และ 3.2 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่าน



ศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) 1.0 และ 2.0 มิลลิเมตร ทำการจ่ายของผสมซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ผงซิลิกา (Silica flour) ขนาดเฉลี่ย 8.5 ไมโครเมตร โดยมีความเข้มข้นที่จ่ายเข้าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าน้อยเพียงพอที่จะไม่มีผลกระทบต่อความหนืดหรือปริมาตรย้อนกลับ (Volumetric recovery) อย่างมีนัยสำคัญ และทำการเก็บตัวอย่างที่ทางเข้า ทางออกด้านล่าง ทางออกด้านบน หลังจากนั้นทำให้แห้ง เพื่อนำไปหาค่าความเข้มข้นของของแข็งต่อไป

จากการทดลองพบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder จาก 3.2 เป็น 2 มิลลิเมตร จะส่งผลให้ของแข็งและปริมาตรย้อนกลับเพิ่มขึ้น 20 และ 60 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง พบว่าของแข็งและปริมาตรย้อนกลับก็มีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

จากการศึกษาถึงผลกระทบของความดัน พบว่า เมื่อลดความดันเข้า (Inlet pressure) จาก 4 บาร์เป็น 2 บาร์ ทำให้ของแข็งย้อนกลับลดลง เพียง 6.5 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรย้อนกลับเพิ่มขึ้น 9.5 เปอร์เซ็นต์ อาจสรุปได้ว่าการเปลี่ยนความดันมีผลกระทบต่อของแข็งและปริมาตรย้อนกลับน้อยกว่าการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกอย่างมีนัยสำคัญ และจากการศึกษาการรีดน้ำที่มีอนุภาคขนาดเล็ก พบว่าไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีสัดส่วนของการไหลย้อนกลับจะมีมากกว่านี้บางส่วนที่ไหลออกไปทางออกด้านล่าง (Water recovery) แสดงให้เห็นว่า ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกของแข็งที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ออกจากของเหลวได้ ซึ่งจะได้ปริมาณของแข็งที่สูงและปริมาณน้ำที่ออกทางด้านล่างน้อย

**3.3 Puprasert. และคณะ (2004)** ศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลที่ทำการติดตั้งกริตพอท เพื่อใช้ในการบำบัดน้ำขุ่นต้นของน้ำไหลนอง (Run-off water) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบวนการที่ผสมผสานระหว่างไฮโดรไซโคลและถังตกตะกอนขนาดเล็กเข้าด้วยกัน โดยใช้กริตพอท ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริตพอท

ในงานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรไซโคลตามรูปแบบของ Rietema ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 75 มิลลิเมตร วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้าและช่องทางออกด้านบน 32 มิลลิเมตร แปรผันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร และแปรผันความดันจ่ายเข้าตั้งแต่ 1-4 บาร์ กริตพอทที่นำมาใช้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกพลาสติกโปร่งใสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร ปริมาตร 1.2 ลิตร และติดตั้งวาล์วที่ด้านล่างของกริตพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร สำหรับปล่อยตะกอนภายในกริตพอทออก ในงานวิจัยนี้ใช้น้ำดิบสังเคราะห์โดยใช้น้ำป ระปาและใช้อนุภาคของแข็ง 2 ชนิด คือ

microsand และ Glass powder ซึ่งมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 และ 25 ไมโครเมตร ตามลำดับ ค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 และ 1.2 ตามลำดับ ความเข้มข้นของน้ำดิบที่ใช้ คือ 1 และ 3 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการควบคุมกริตพอท คือ 0.5, 1 และ 2 นาที ส่วนอุณหภูมิของน้ำเป็นอุณหภูมิห้อง (ไม่ได้ควบคุม)

ทำการศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนใน 3 รูปแบบ คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency) ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในแง่ของขนาด (Granulometry separation efficiency) และขนาดตัด (Cutting diameter) จากผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทจะต่ำกว่า ไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดาประมาณ 5-15 เปอร์เซ็นต์ แต่ไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทจะมีปริมาณความเข้มข้นที่ทางออกด้านล่างมากกว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอน คือ เมื่อขนาดของอนุภาคเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการกฎของสโตค อีกทั้งเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ขนาดตัดก็จะลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของของแข็งที่จ่ายเข้ามีผลกระทบน้อยที่สุดต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนทั้งสองแบบ ส่วนในกรณีของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้ง กริตพอท เมื่อเวลาในการควบคุมกริตพอทเพิ่มขึ้น ปริมาณอนุภาคของแข็งที่สะสมในกริตพอทก็จะมีมากขึ้น ส่งผลทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้ามา ดังนั้นอนุภาคของแข็งจึงไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งลดลง ดังนั้น เพื่อลดปัญหาควรเพิ่มปริมาตรของกริตพอทหรือ ปล่อยตะกอนในกริตพอทออกบ่อยครั้ง

นอกจากนี้ ยังมีการเปรียบเทียบไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทกับถังตกตะกอนที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ที่ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งเดียวกัน จากการคำนวณด้วยสมการกฎของสโตค พบว่า ไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทต้องการพื้นที่น้อยกว่า เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำในครัวเรือนที่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ ดังนั้น ไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำไหลนอง ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกันกับ ไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา แต่ให้ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนที่ทางออกด้านล่างมากกว่า อีกทั้งยังใช้พื้นที่น้อยกว่า ถังตกตะกอนอีกด้วย

3.4 Schwerzler. (2005) ศึกษาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีของไฮโดรไซโคลอนในการใช้แยกของเสียวัสดุเคลือบเงา (Glaze waste) เพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม โดยในการทดลองจะใช้ไฮโดรไซโคลอนตัวที่ 1 ถึง 3 ต่ออนุกรมกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นิ้ว และตัว

ที่ 4 ถึง 6 ต่ออนุกรมกันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 นิ้ว เพื่อทำการแยกอนุภาคออกเป็น 3 ช่วงขนาด คือ น้อยกว่า 5 ไมโครเมตร ระหว่าง 5 ถึง 20 ไมโครเมตร และมากกว่า 20 ไมโครเมตร

จากการศึกษาสรุปได้ว่าระบบไฮโดรไซโคลอนสามารถใช้ในการแยกอนุภาคที่ความเร็วในการตกตะกอนต่างกัน ซึ่งคำนวณได้จากกฎของสโตค แต่ไม่สามารถแยกของผสมที่มีขนาดและความหนาแน่นแตกต่างกันที่ความเร็วในการตกตะกอนใกล้เคียงกันได้ และการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุเคลือบเงา สามารถแยกได้ตามช่วงค่าขนาดอนุภาคต่างๆ แต่ก็มีเพียงเล็กน้อยที่มีการซ้อนทับหรือปะปนกัน การเลือกองค์ประกอบของวัสดุเคลือบเงาที่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน เพื่อเพิ่มความเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค ดังนั้น ในการศึกษาพฤติกรรมของอนุภาคที่สัมพันธ์กันในระบบสามารถทำนายได้จากกฎของสโตคซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการไหลของอนุภาคของเหลวที่วิ่งเป็นชั้นที่แยกจากกัน (laminar flow)



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิจัยในภาคสนาม โดยใช้น้ำเสียจริงจากสถานีส่งสูบน้ำ (Inlet Pumping Station) โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง การทดลองจะใช้เครื่องทดลองแบบนำร่อง (Pilot plant) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ที่ติดตั้งอยู่บนรถพ่วงเพื่อ อสะดวกต่อการเคลื่อนย้ายไปดำเนินการวิจัยภาคสนาม



รูปที่ 3.1 เครื่องทดลองแบบนำร่อง (Pilot plant) ที่ใช้ในงานวิจัย

##### 3.1.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งใน Pilot plant ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร รูปร่างและลักษณะแสดงดัง ตารางที่ 3.1
2. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร รูปร่างและลักษณะแสดงดัง ตารางที่ 3.1
3. กริตพอททำจากพลาสติกโปร่งใส ปริมาตร 1.2 ลิตร
4. เครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์
5. ไบพัดกวนผสมน้ำชนิด Rushton turbine ขนาด 1.1 กิโลวัตต์



6. ถังเก็บน้ำพลาสติกปริมาตร 350 ลิตร
7. วาล์วสามทาง
8. เครื่องมือวัดความดัน (Pressure gauge)
9. เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)

รูปร่างและลักษณะสมบัติต่างๆของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 รูปร่างและลักษณะของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของไฮโดรไซโคลน	ไฮโดรไซโคลน NEYRTEC	
	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร
พารามิเตอร์ต่างๆ		
เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า (มิลลิเมตร)	20	32
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (มิลลิเมตร)	20	32
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มิลลิเมตร)	4,6,9,10	8,10,12
ความดัน (บาร์)	0.5-3	0.5-2
วัสดุที่ใช้ทำตัวเรือนไฮโดรไซโคลน	โพลียูเรเทน	เหล็กกล้าไร้สนิม

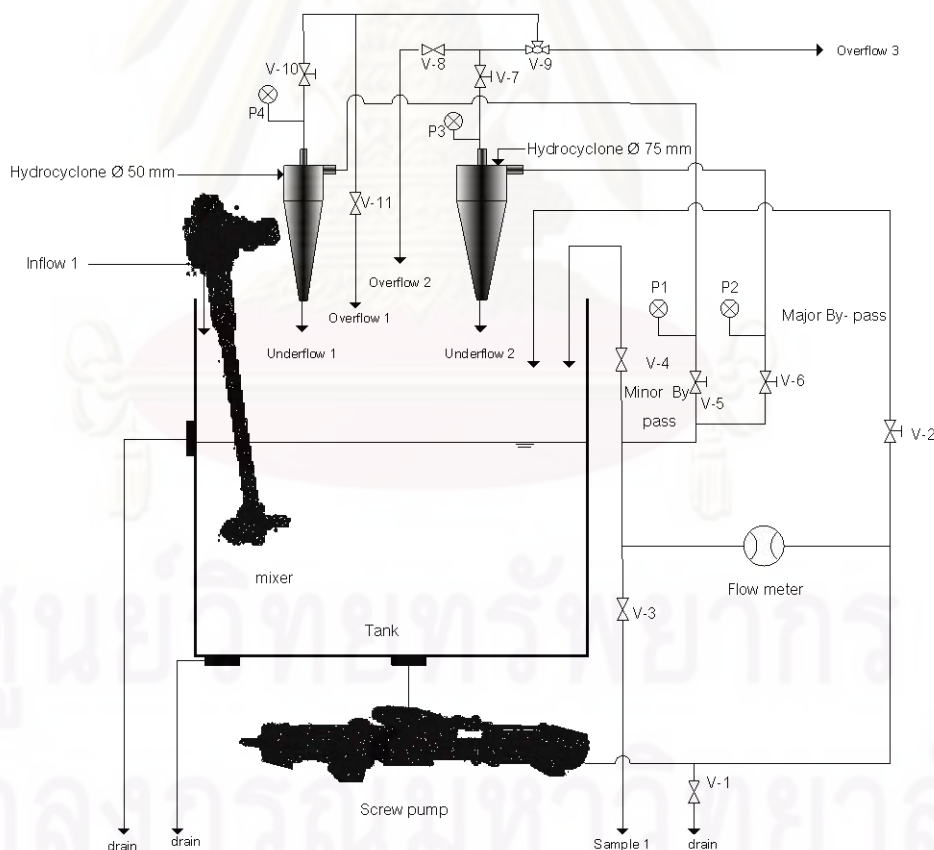
### 3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในงานวิจัย

1. ชุดอุปกรณ์การกรองสำหรับหาปริมาณของแข็งแขวนลอย
2. ชุดอุปกรณ์ในการหาปริมาณของแข็งคงตัว
3. กระดาษกรอง GF/C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร
4. ตู้อบ อุณหภูมิ 103-105 °C
5. เตาเผา อุณหภูมิ 550 °C
6. เครื่องชั่งไฟฟ้าทศนิยม 4 ตำแหน่ง
7. เครื่องมือวัดขนาดอนุภาค Mastersizer 2000 with hydro 2000 MU
8. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ

### 3.1.3 หลักการทำงานของ Pilot plant

Pilot plant มีหลักการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3.2 น้ำเสียจะไหลผ่านเข้าสู่ถังขนาด 0.35 ลูกบาศก์เมตร และมีการกวนผสมด้วยใบกวน (Mixer) ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งทำหน้าที่กวนของแข็งและของเหลวภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นน้ำเสียในถังจะถูกสูบเข้าไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งไว้ด้วยเครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ การควบคุมความดันเพื่อปรับอัตราการไหลโดยการปรับการไหลทางอ้อม (By pass) เพื่อให้ได้ความดันตามที่กำหนด

Pilot plant ที่นำมาทดลองได้มีการติดตั้งท่อสำหรับปรับการไหลทางอ้อม (By pass) ไว้ 2 ทาง โดยเส้นทางแรกทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลอย่างหยาบโดยใช้ประตูน้ำ V2 และเส้นทางที่สองทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลอย่างละเอียดโดยใช้ประตูน้ำ V4 อัตราการไหลที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลอนสามารถหาได้จากการอ่านค่าที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) ส่วนอัตราการไหลที่ออกจากไฮโดรไซโคลอนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาตรกับเวลา โดยการวัดปริมาตรน้ำและจับเวลา



รูปที่ 3.2 แผนผังการทำงานของเครื่องทดลองแบบนําร่อง (Pilot plant)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองแบบเปิด นั่นคือ ใช้น้ำเสียจริงจ่ายเข้าสู่ถังเก็บน้ำที่มีการกวนผสมน้ำตลอดเวลา และไหลล้นออกตลอดเวลา ที่ท่อน้ำล้นส่วนบนของถังเก็บน้ำ เมื่อมีปริมาณน้ำเสียมากเกินไปขีดจำกัดของถังเก็บน้ำ โดยจะมีน้ำไหลล้นออกตลอดเวลาที่ทำการทดลอง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 ช่องการไหล ซึ่งประกอบด้วย น้ำตัวอย่างที่จ่ายเข้า (Feed in) น้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) และ น้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow)

### 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรกได้ทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 75 มิลลิเมตร ส่วนที่สองทำการติดตั้งกริตพอท โดยจะติดตั้งที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทั้งสองขนาด ดังรูปที่ 3.3 และ 3.4



รูปที่ 3.3 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท



รูปที่ 3.4 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอก

### 3.2.1 การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอก

#### 3.2.1.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของไฮโดรไซโคลน <ul style="list-style-type: none"> <li>• ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร</li> <li>• ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• รายละเอียดของไฮโดรไซโคลนแสดงดังตารางที่ 3.1</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) <ul style="list-style-type: none"> <li>• ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร</li> <li>• ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร</li> <li>• 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร</li> </ul>



ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ตัวแปรควบคุม (ต่อ)	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
2. ความดัน <ul style="list-style-type: none"> <li>ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร</li> <li>ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.5, 1, 2 และ 3 บาร์</li> <li>0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์</li> </ul>
ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ 2. ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>ขึ้นอยู่กับสภาพจริง</li> <li>ขึ้นอยู่กับสภาพจริง</li> </ul>
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์
1. อัตราการไหล 2. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) 3. ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed Solids) 4. ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids) 5. ขนาดอนุภาคของแข็งในน้ำเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา</li> <li>วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือค้างบนกระดาษกรองเมื่อนำไปอบแห้งที่ อุณหภูมิ 103 °C<sup>a</sup></li> <li>วิธีการหาของแข็งที่เหลืออยู่จากการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C<sup>a</sup></li> <li>วิธีวิเคราะห์หาปริมาณตะกอนหนักโดยน้ำหนัก<sup>a</sup></li> <li>วิเคราะห์ด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาค (รายละเอียด ดังหัวข้อ 3.1.2)</li> </ul>

<sup>a</sup> วิเคราะห์ตามวิธี Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA และ WEF , 2005)

### 3.2.2 การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอก

#### 3.2.2.1 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของไฮโดรไซโคลน <ul style="list-style-type: none"> <li>• ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร</li> <li>• ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร</li> </ul> 2. กริตพอก	<ul style="list-style-type: none"> <li>• รายละเอียดของไฮโดรไซโคลนแสดงดังตารางที่ 3.1</li> <li>• ทรงกระบอกโปร่งแสง</li> <li>• ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร</li> <li>• ปริมาตร 1.2 ลิตร</li> </ul>
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) <ul style="list-style-type: none"> <li>• ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร</li> <li>• ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร</li> </ul> 2. ความดัน <ul style="list-style-type: none"> <li>• ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร</li> <li>• ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร</li> </ul> 3. เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอก	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 มิลลิเมตร</li> <li>• 10 มิลลิเมตร</li> <li>• 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์</li> <li>• 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์</li> <li>• 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที</li> </ul>

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ 2. ลักษณะสมบัติของน้ำเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ขึ้นอยู่กับสภาพจริง</li> <li>• ขึ้นอยู่กับสภาพจริง</li> </ul>
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์
1. อัตราการไหล 2. ปริมาณของแข็งแขวนลอย(Suspended Solids) 3. ปริมาณของแข็งคงตัว (Fixed Solids) 4. ปริมาณตะกอนหนัก (Settleable Solids) 5. ขนาดอนุภาคของแข็งในน้ำเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกับเวลา</li> <li>• วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือคั่งบนกระดาษกรองเมื่อนำไปอบแห้งที่ อุณหภูมิ 103 °C <sup>a</sup></li> <li>• วิธีการหาของแข็งที่เหลืออยู่จากการเผาที่อุณหภูมิ 550 °C <sup>a</sup></li> <li>• วิธีวิเคราะห์หาปริมาณตะกอนหนักโดยน้ำหนัก <sup>a</sup></li> <li>• วิเคราะห์ด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาค (รายละเอียด ดังหัวข้อ 3.1.2)</li> </ul>

<sup>a</sup> วิเคราะห์ตามวิธี Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA และ WEF , 1998)

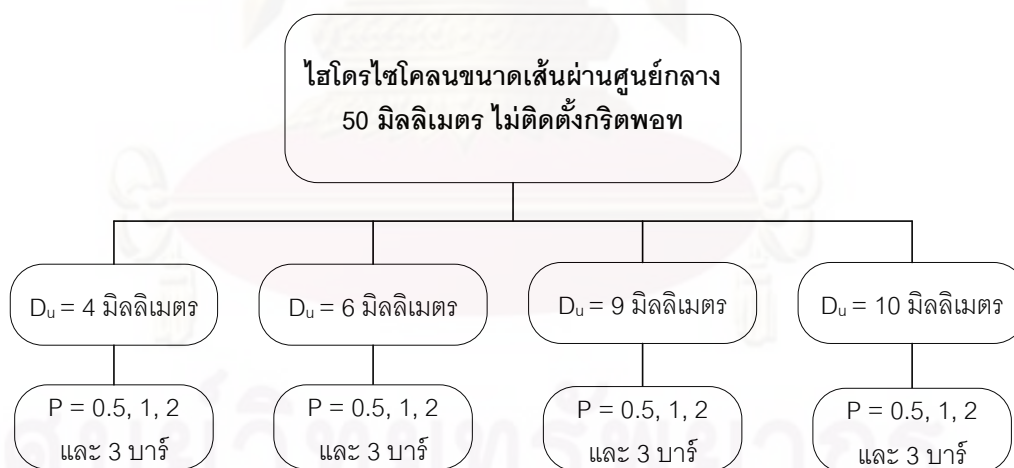
### 3.3 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้ตัวอย่างน้ำเสียจริง จากรางส่งน้ำเสียหลังสถานีส่งสูบน้ำเสีย (Inlet Pumping Station) ของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง ถนนมิตรไมตรี แขวงดินแดง เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำ Pilot plant ไปติดตั้ง ณ บริเวณสถานีส่งสูบน้ำเสีย หลังจากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ช่วงเวลาที่ทำการทดลอง คือ ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2551 ถึงเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2551

พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในน้ำตัวอย่างที่เก็บมาจากการทดลอง คือ ค่าปริมาณของแข็งแขวนลอย ของแข็งคงตัว ปริมาณตะกอนหนัก และขนาดของอนุภาคทั้งก่อนและหลังเข้าไฮโดรไซโคลน ทั้งนี้การทดลองออกเป็นสองส่วน ได้แก่

1. การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอทที่ขนาดต่างๆ ดังนี้
  - 1.1 ทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง จำนวน 4 ค่า คือ 4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร โดยแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างทำการแปรผันค่าความดันเพื่อปรับอัตราการไหล จำนวน 4 ค่า คือ 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 ตำแหน่ง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และ ทางออกด้านล่าง (Underflow)

แผนภาพสรุปการทดลองไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท แสดงได้ดังรูปที่ 3.5



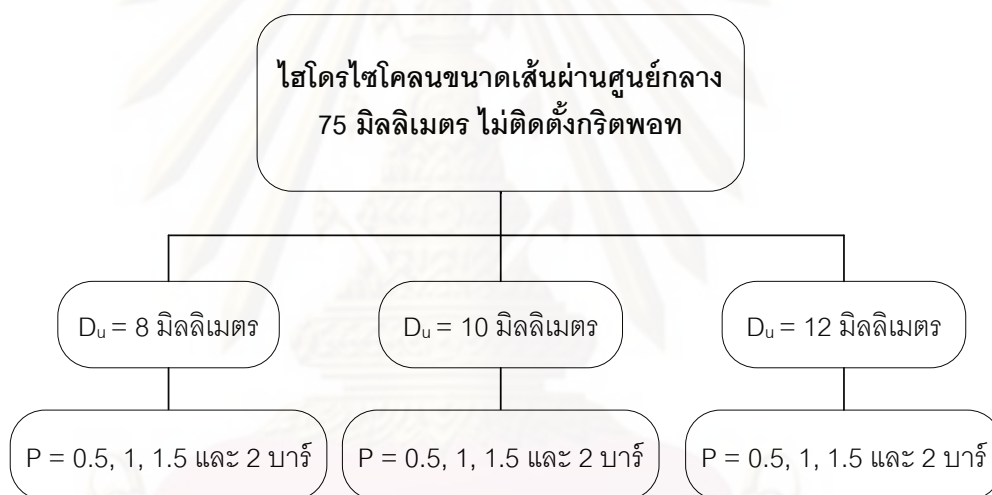
เมื่อ  $D_u$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง หน่วยมิลลิเมตร  
 $P$  คือ ความดันจ่ายเข้า หน่วยบาร์

รูปที่ 3.5 แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร



1.2 ทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร โดยเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง จำนวน 3 ค่า คือ 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร โดยแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างทำการแปรผันค่าความดันเพื่อปรับอัตราการไหล จำนวน 4 ค่า คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 ตำแหน่ง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow)

แผนภาพสรุปการทดลองไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท แสดงได้ดังรูปที่ 3.6



เมื่อ  $D_u$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง หน่วยมิลลิเมตร  
 $P$  คือ ความดันจ่ายเข้า หน่วยบาร์

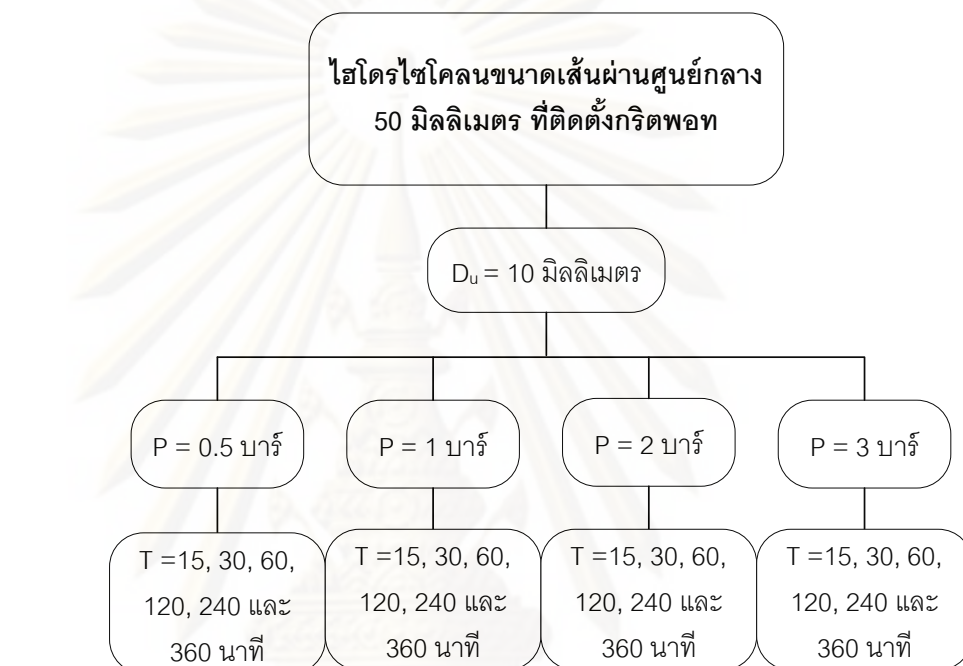
รูปที่ 3.6 แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

2. การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทที่ขนาดต่างๆ ดังนี้

2.1 ทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอทที่ทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยแปรผันค่าความดันเพื่อปรับอัตราการไหล จำนวน 4 ค่า คือ 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ และในแต่ละค่าความดัน แปรผันเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท คือ 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที จากนั้นทำการเก็บ

ตัวอย่างน้ำ 3 ตำแหน่ง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow)

แผนภาพสรุปการทดลองไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอทแสดงได้ดังรูปที่ 3.7



เมื่อ  $D_u$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง หน่วยมิลลิเมตร

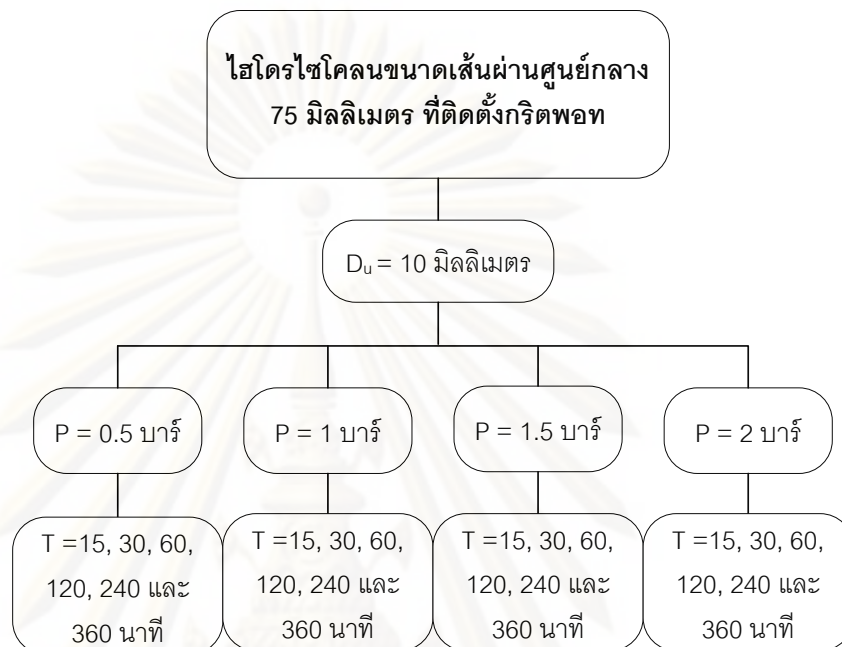
$P$  คือ ความดันจ่ายเข้า หน่วยบาร์

$T$  คือ เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่างจากกริตพอท หน่วย นาที

รูปที่ 3.7 แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอทบริเวณช่องทางออกด้านล่าง

2.2 ทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอทที่ทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยแปรผันค่าความดันเพื่อปรับอัตราการไหลจำนวน 4 ค่า คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ และในแต่ละค่าความดัน แปรผันเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท คือ 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 ตำแหน่ง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow)

แผนภาพสรุปการทดลองไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้ง  
กริตพอท แสดงได้ดังรูปที่ 3.8



- เมื่อ  $D_u$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง หน่วยมิลลิเมตร  
 $P$  คือ ความดันจ่ายเข้า หน่วยบาร์  
 $T$  คือ เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่างจากกริตพอท หน่วย นาที

รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่  
ติดตั้งกริตพอทบริเวณช่องทางออกด้านล่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.3.1 วิธีทำการทดลอง

#### 3.3.1.1 การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง มิลลิเมตรที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอก 50

1. สูบตัวอย่างน้ำเสียจริงจากสถานีส่งสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังเก็บน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำเสียไหลล้นออกไปที่ท่อน้ำล้นตลอดเวลา
2. เปิดใบกวนเพื่อทำการกวนของผสมภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
3. เดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำ เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร
4. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ทางจ่ายน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน
5. เปิดวาล์ว V-5 และ V-10 เพื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2
6. ปรับความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่ 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลทางอ้อม (By pass) เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดไฮโดรไซโคลน
7. จดบันทึกค่าอัตราการไหล (Feed flowrate) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) และค่าความดันลด (Pressure drop)
8. เก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ออก จากไฮโดรไซโคลนที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow)
9. วัดอัตราการไหลออกทางด้านบนและทางด้านล่าง โดยการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาตรน้ำครบ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
10. นำน้ำที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
11. เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร) และทำตามการทดลองดังกล่าวข้างต้นซ้ำ



### 3.3.1.2 การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ไม่ได้ติดตั้งกริดพาท

1. สูบตัวอย่างน้ำเสียจริงจากสถานีส่งสู บน้ำเสียเข้าสู่ถังเก็บน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำเสียไหลล้นออกไปที่ท่อน้ำล้นตลอดเวลา
2. เปิดใบกวนเพื่อทำการกวนของผสมภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
3. เดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร
4. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ทางจ่ายน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน
5. เปิดวาล์ว V-5, V-6, V-7 และ V-8 เพื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 3.2
6. ปรับความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลทางอ้อม (By pass) เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดไฮโดรไซโคลน
7. จดบันทึกค่าอัตราการไหล (Feed flowrate) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) และค่าความดันลด (Pressure drop)
8. เก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ออกจากไฮโดรไซโคลนที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow)
9. วัดอัตราการไหลออกทางด้านบนและทางด้านล่าง จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
10. นำน้ำที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
11. เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (8, 10 และ 12 มิลลิเมตร) และทำตามการทดลองดังกล่าวข้างต้นซ้ำ

### 3.3.1.3 การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

1. ประกอบกริตพอทที่ช่องทางออกด้านล่าง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
2. สูดตัวอย่างน้ำเสียจริงจากสถานีส่งสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังเก็บน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำเสียไหลล้นออกไปที่ท่อน้ำล้นตลอดเวลา
3. เปิดใบกวนเพื่อทำการกวนของผสมภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
4. เดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำ เข้าสู่ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท
5. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ทางจ่ายน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคล
6. เปิดวาล์ว V-5 และ V-10 เพื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ดังรูปที่ 3.2
7. ปรับความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลที่ 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลทางอ้อม (By pass) เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดไฮโดรไซโคล
8. จดบันทึกค่าอัตราการไหล (Feed flowrate) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) และค่าความดันลด (Pressure drop)
9. เก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ออกจากไฮโดรไซโคลที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่างของกริตพอท (Underflow)
10. วัดอัตราการไหลออกทางด้านบนและทางด้านล่าง จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
11. นำน้ำที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

### 3.3.1.4 การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอก

1. ประกอบกริตพอกที่ช่องทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร
2. สูดตัวอย่างน้ำเสียจริงจากสถานีส่งสูบน้ำเสียเข้าสู่ถังเก็บน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำเสียไหลล้นออกไปที่ท่อน้ำล้นตลอดเวลา
3. เปิดใบกวนเพื่อทำการกวนของผสมภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
4. เดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำ เข้าสู่ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอก
5. เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ทางจ่ายน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน
6. เปิดวาล์ว V-5, V-6, V-7 และ V-8 เพื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอก ดังรูปที่ 3.2
7. ปรับความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลทางอ้อม (By pass) เนื่องจากข้อจำกัดของขนาดไฮโดรไซโคลน
8. จดบันทึกค่าอัตราการไหล (Feed flowrate) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) และค่าความดันลด (Pressure drop)
9. เก็บน้ำเสียตัวอย่างที่ออกจากไฮโดรไซโคลนที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่างของกริตพอก (Underflow)
10. วัดอัตราการไหลออกทางด้านบนและทางด้านล่าง จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
11. นำน้ำที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

### 3.3.2 การแสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทและถังดักกรวดทราย โดยทำใน 2 แนวทาง ดังนี้

1. ในแง่การแยกมวลกรวดทราย นั่นคือ ประสิทธิภาพการแยกลด (Reduced Total Efficiency) ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่ใช้ในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow Split) ด้วย

- ไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งกริตพอท สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.29

$$E'_T = \frac{Q_u(C_u - C_f)}{Q_o C_f} \times 100$$

- ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท สามารถคำนวณได้จากประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลน ดังสมการที่ 2.32

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100$$

2. ในแง่ขนาดของกรวดทรายที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลนในส่วนการไหลออกสู่ช่องทาง ออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) เพื่อเปรียบเทียบขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกได้กับขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้า (Feed in) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วย %GE (Granulometric separation Efficiency)

- การไหลออกสู่ทางออกด้านบน (Overflow) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.41

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Feed} - D_{50} \text{Overflow}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100$$

- การไหลออกสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.42

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Underflow} - D_{50} \text{Feed}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100$$



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ส่วนที่สองทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ซึ่งทั้งสองส่วน แปรเปลี่ยน ความดัน ง่ายเข้า 4 ค่า คือ 0.5-3 บาร์ สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 0.5-2 บาร์ สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท คือ 15-360 นาที

ในการดำเนินการทดลอง ทำการเดินระบบแบบเปิดในสถานที่จริง คือ สูบน้ำเสียดิบจริงจากรางส่งน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง เข้าสู่ถังเก็บน้ำใน pilot plant และล้นออกตลอดเวลาในการดำเนินการทดลอง การเก็บตัวอย่างสำหรับการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ตำแหน่งการเก็บน้ำเสียดิบสามารถเก็บที่ท่อสำหรับการไหลข้าม (by pass) และตำแหน่งในการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่าน ไฮโดรไซโคลน แล้วอีก 2 แห่ง คือ น้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) และ ทางออกด้านบน (Overflow) สามารถเก็บได้โดยตรงจากท่อน้ำสำหรับทางออกด้านล่างและทางออกด้านบนที่ต่อออกนอกถังเก็บน้ำพลาสติก ซึ่งการต่อท่อน้ำที่ไหลออกนอกถังเก็บน้ำพลาสติกทั้งสองทางนั้น เพื่อป้องกันน้ำไหลวนกลับเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ในส่วนของการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลน ที่ติดตั้งกริตพอทนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างของน้ำเสียดิบ และน้ำตัวอย่างที่ไหลออกทางด้านบนเช่นเดียวกับ ไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดา ส่วนน้ำตัวอย่างที่สะสมอยู่ในกริตพอทนั้นสามารถเก็บได้โดยตรงจากวาล์วน้ำทิ้งของกริตพอท ซึ่งจะเก็บตามเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทที่กำหนดไว้ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2

หลังจากนั้น นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ผลที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดพารามิเตอร์ ดังนี้ คือ ของแข็งแขวนลอย ตะกอนหนัก ของแข็งคงตัว และขนาดอนุภาค ทั้งก่อนและหลังเข้าไฮโดรไซโคลน

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล ผู้วิจัยนำเสนอออกมาด้วยกัน 6 หัวข้อหลัก คือ ความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จาก ไฮโดรไซโคลน มวลของกรวดทรายที่แยกได้จาก ไฮโดรไซโคลน ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของ ไฮโดรไซโคลน พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของ ไฮโดรไซโคลน ขนาดอนุภาคกรวดทรายที่แยกได้จาก ไฮโดรไซโคลน และเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพ การแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศ

#### 4.1 ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

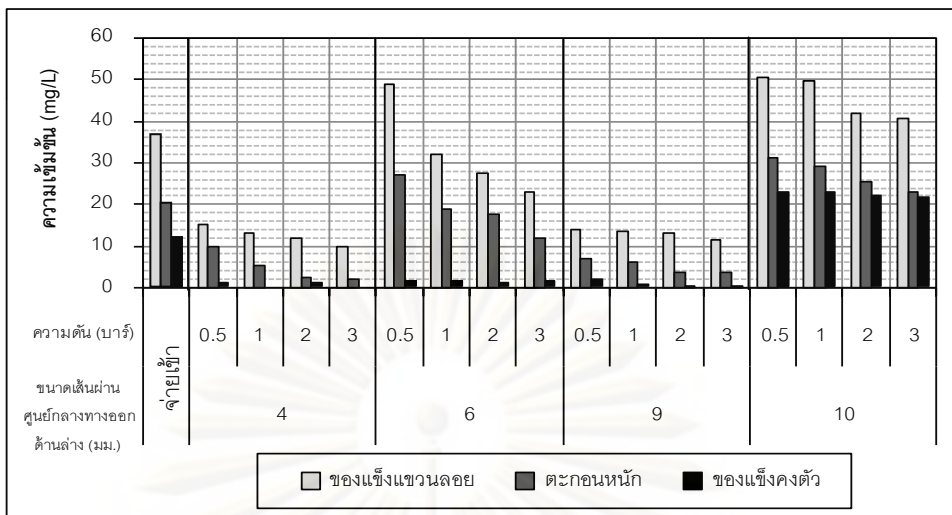
งานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำเสียดิบจริงในทุกการทดลอง ดังนั้นความเข้มข้นของ ของแข็ง ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ในแต่ละการทดลองจะมีค่าแตกต่างกันตามสภาวะแวดล้อมของน้ำเสียดิบจริงในขณะนั้นๆ

จากผลการวิเคราะห์ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลน ที่ติดตั้งกริด พบว่า ความเข้มข้นของ ของแข็ง ที่ได้จากน้ำตัวอย่างที่ทางออกด้านบนจะมีค่า น้อยกว่าความเข้มข้นของ ของแข็ง ในน้ำตัวอย่างที่จ่ายเข้าและทางออกด้านล่างเสมอ ซึ่งในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้น ของของแข็ง ใน 3 รูปแบบ คือ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ซึ่งเป็นของแข็งที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ (Organic matter) และสารอนินทรีย์ (Inorganic matter) มากมายหลายชนิด ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (Settleable Solids) และความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอนินทรีย์ เช่น กรวดทราย เป็นต้น

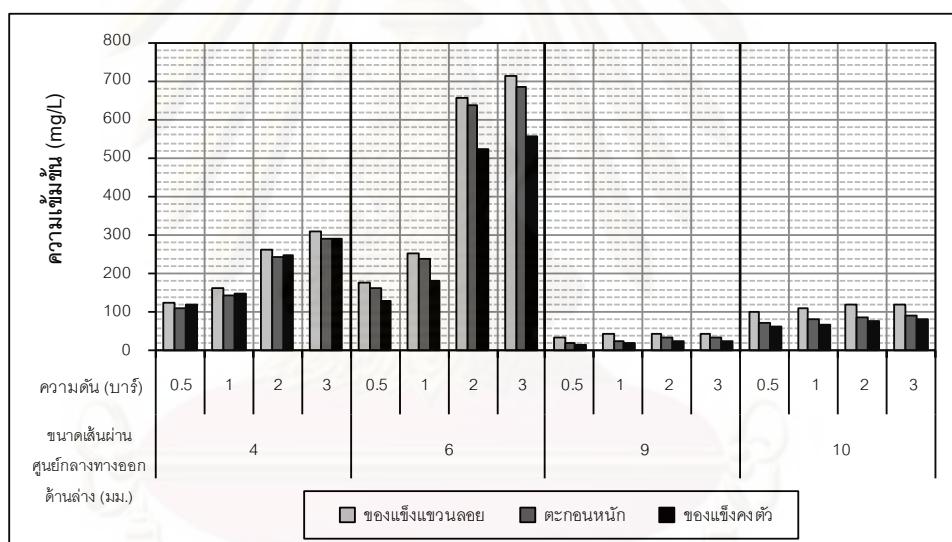
##### 4.1.1 ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

###### 4.1.1.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ผลการวิเคราะห์ หาค่าความเข้มข้นของของ แข็ง ทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) โดยความเข้มข้นของของแข็งจ่ายเข้าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอย ตะกอนหนัก และของแข็งคงตัว มีค่าเท่ากับ 37.14, 20.40 และ 12.17 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 10-51 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 34-712 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ ระหว่าง 2-31 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ทางออกด้านล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 17-686 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 0-23 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 13-559 มิลลิกรัมต่อลิตร

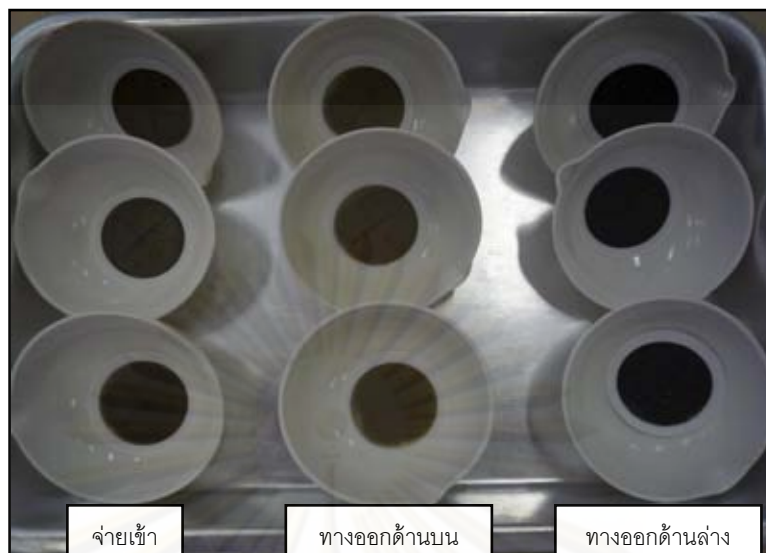


รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรโซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านบน

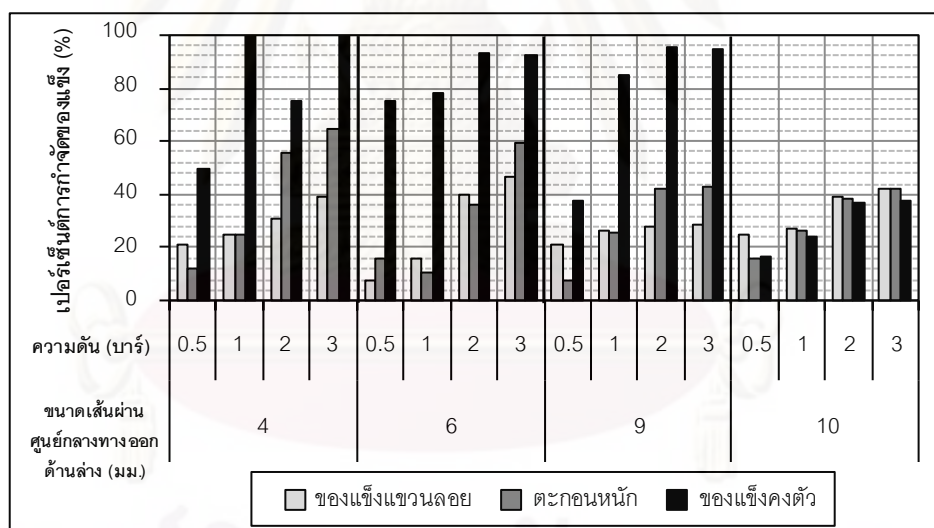


รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรโซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ คือ ของแข็งแขวนลอย ตะกอนหนัก และของแข็งคงตัว ที่ทางออกด้านบน มีแนวโน้มลดลง ซึ่งแสดงว่าไฮโดรโซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งดีมากขึ้น เมื่อเพิ่มความดันจ่ายเข้า โดยสังเกตจากรูปที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกัน กล่าวคือ เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นของของแข็งที่ทางออกด้านล่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 6 มิลลิเมตร ความดัน 2 และ 3 บาร์ ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 6 มิลลิเมตร ความดัน 3 บาร์



รูปที่ 4.4 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

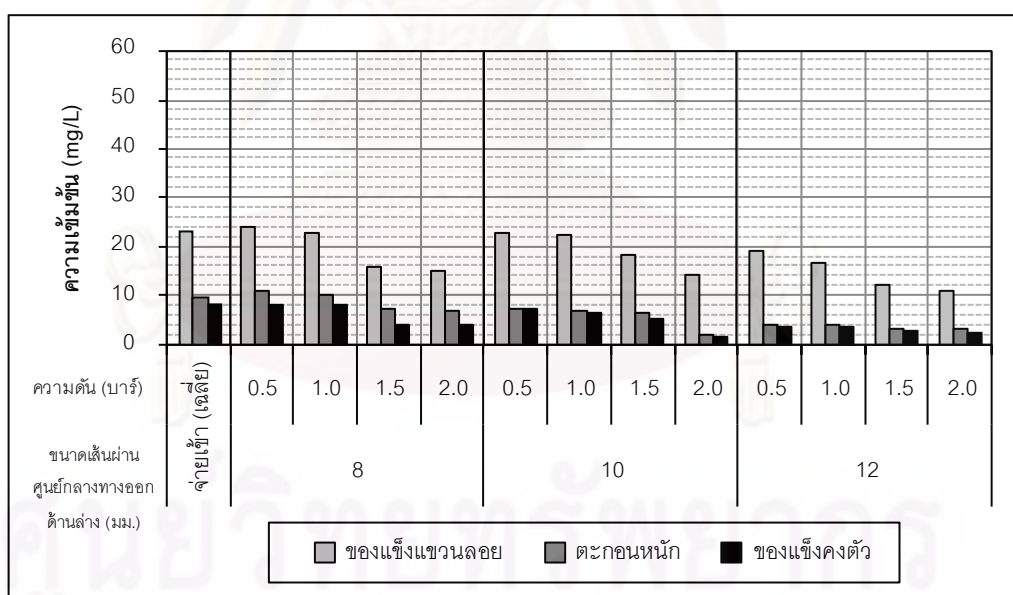
จากรูปที่ 4.4 ซึ่งแสดงถึงเปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้ที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) จะเห็นได้ว่า ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สามารถแยกของแข็งคงตัวได้ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ความดันสูง อาจเนื่องมาจากของแข็งคงตัวที่แยกได้นั้นมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ทำให้



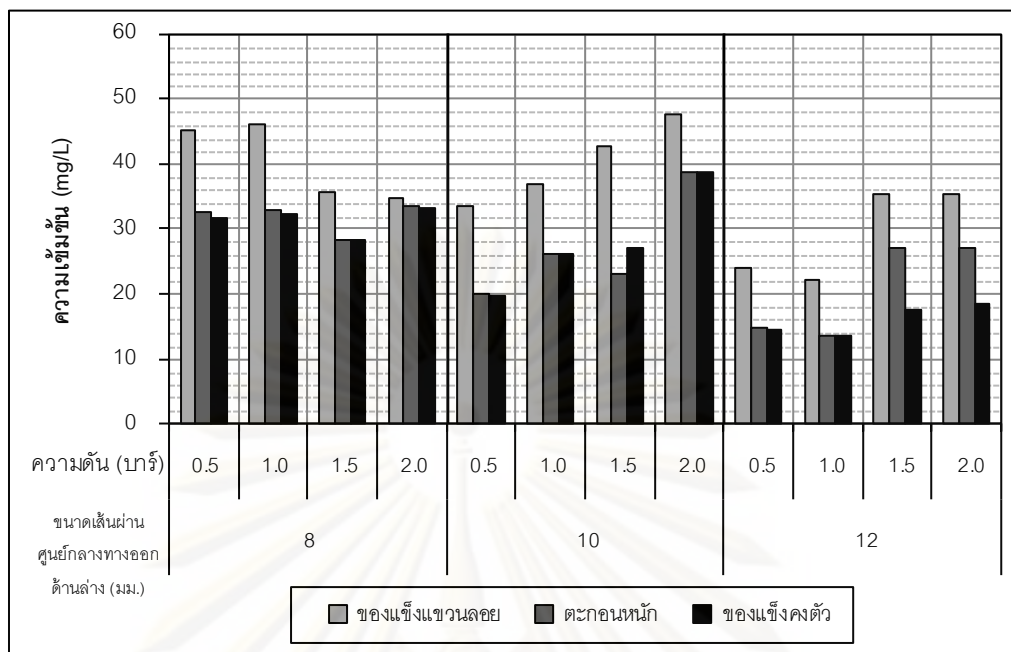
ความเร็วในการตกตะกอนสูง ส่งผลให้อนุภาคของแข็งถูกแยกออก สู่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมากขึ้น

#### 4.1.1.2 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ผลการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 (รายละเอียด แสดงในภาคผนวก ก ) โดยความเข้มข้นของของแข็งจ่ายเข้าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอย ตะกอนหนัก และของแข็งคงตัว มีค่าเท่ากับ 23, 9.58 และ 8.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 11-24 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 22-48 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 2-11 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ทางออกด้านล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 14-39 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 2-8 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านล่างมีค่าอยู่ระหว่าง 13-39 มิลลิกรัมต่อลิตร

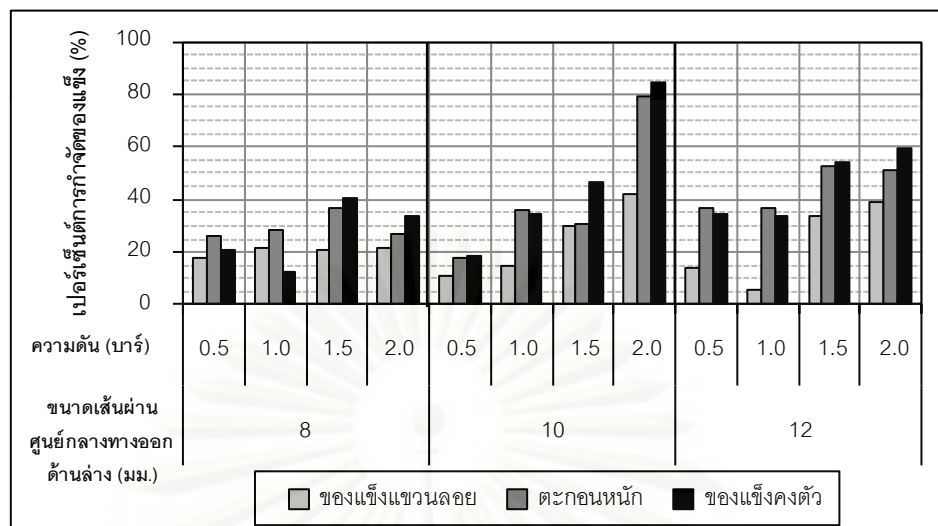


รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านบน



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สามารถแยกตะกอนหนักและของแข็งคิงตัวได้ดี ทำให้ความเข้มข้นของตะกอนหนักและของแข็งคิงตัวที่ทางออกด้านบนมีความเข้มข้นต่ำ ในขณะที่ของแข็งแขวนลอยที่ออกสู่ทางออกด้านบนยังมีความเข้มข้นสูงอยู่ และเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ความเข้มข้นของของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น อาจเนื่องจากของแข็งที่แยกได้นั้นมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ทำให้ความเร็วในการตกตะกอนสูง อีกทั้งแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันจ่ายเข้า จึงส่งผลให้ไฮโดรไซโคลนสามารถแยกของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพดี



รูปที่ 4.7 เปอร์เซนต์การกำจัดของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4.7 ซึ่งแสดงถึงเปอร์เซนต์การกำจัดของแข็งทั้ง 3 รูปแบบ ที่แยกได้ที่ทางออก ด้านบนของไฮโดรไซโคลน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก ) จะเห็นได้ว่า ไฮโดรไซโคลนแบบ ธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สามารถแยกตะกอนหนักและของแข็งคงตัวได้ดี และเมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้น ของแข็ง คงตัว ที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบ ธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 160 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของ แข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรวดทรายนั้น มีความเข้มข้นสูงกว่า ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ประมาณ 6 เท่า สังเกตได้จาก รูปที่ 4.8 เนื่องจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลง ทำให้แรงเหวี่ยงหนี ศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของแข็ง ที่มีความหนาแน่นมาก ใน ไฮโดรไซโคลนถูกเหวี่ยงปะทะกับผนังของไฮโดรไซโคลน อนุภาคขนาดใหญ่จึงไหลออกทางด้าน ล่างได้มากขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนจึงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้ที่ทางออกด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

#### 4.1.2 ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

จากการวิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท พบว่าความเข้มข้น ทั้ง 3 รูปแบบ คือ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (Settleable Solids) และความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ที่สะสมอยู่ในกริตพอทมีค่าสูง กว่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน

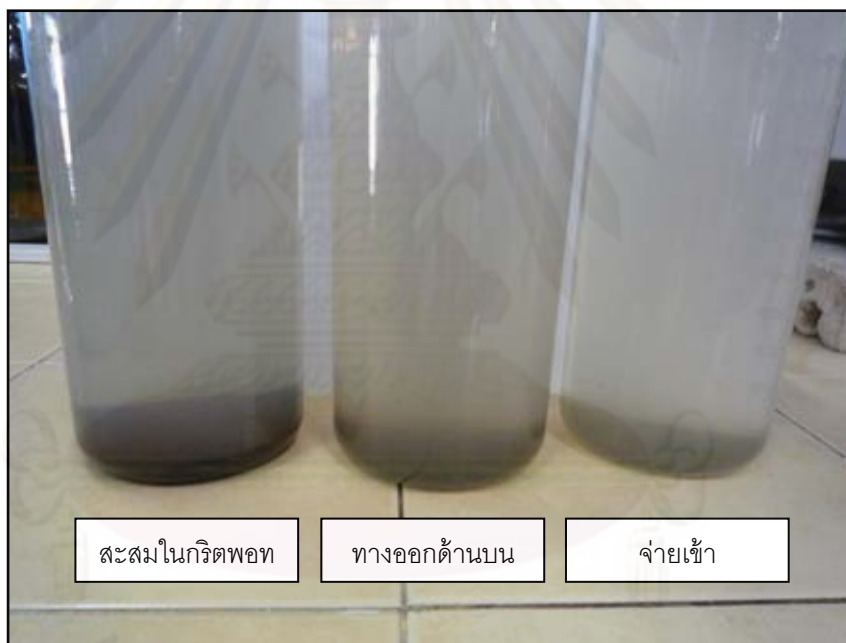
##### 4.1.2.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ผลการวิเคราะห์ หาค่าความเข้มข้นของของแข็ง ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอทที่ทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ควบคุมความดันจ่ายเข้า 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ โดยความเข้มข้นของของแข็งจ่ายเข้าเฉลี่ยของของแข็งแขวนลอย ตะกอนหนัก และของแข็งคงตัว มีค่าเท่ากับ 70, 53 และ 32 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 22-92 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ สะสมในกริตพอท มีค่าอยู่ระหว่าง 385-29,140 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 2-70 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกอนหนักที่สะสมในกริตพอทมีค่าอยู่ระหว่าง 364-29,095 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 4-87 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่สะสมในกริตพอทมีค่าอยู่ระหว่าง 309-24,980 มิลลิกรัมต่อลิตร ( รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก )





รูปที่ 4.9 ลักษณะของของแข็งที่ตกตะกอนและสะสมอยู่ในกริตพอท

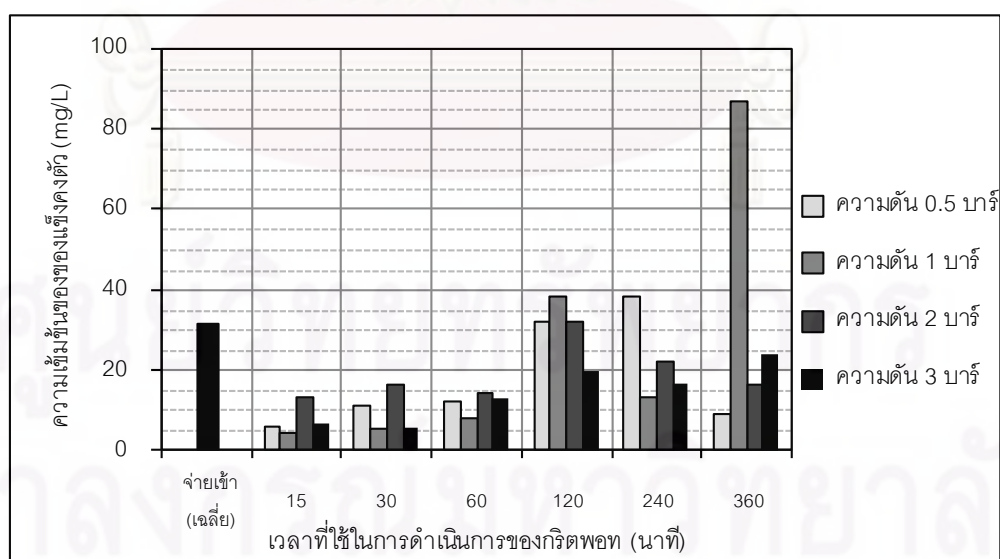


รูปที่ 4.10 ลักษณะน้ำทั้ง 3 ช่องการไหล ที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท ที่ความดันจ่ายเข้า 2 บาร์ เวลาในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที หลังจากตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง

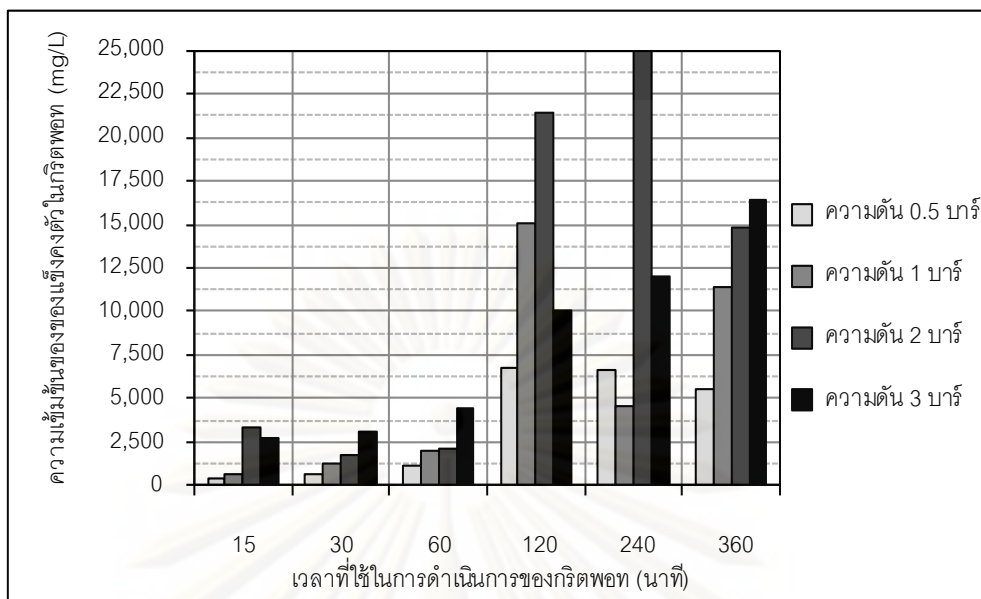
รูปที่ 4.9 แสดงถึงลักษณะของแข็งที่ตกตะกอนและสะสมอยู่ในกริตพอทของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท และเมื่อเก็บตัวอย่างน้ำจาก 3 ช่องการไหลของไฮโดรไซโคลน มาตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็น

ได้ว่าของแข็งที่สะสมอยู่ภายในกริตพอท และตกตะกอนได้ ด้วยแรงโน้มถ่วงนั้น มีปริมาณมากกว่าของแข็งที่ตกตะกอนได้ที่ทางออกด้านบนและจ่ายเข้ามา

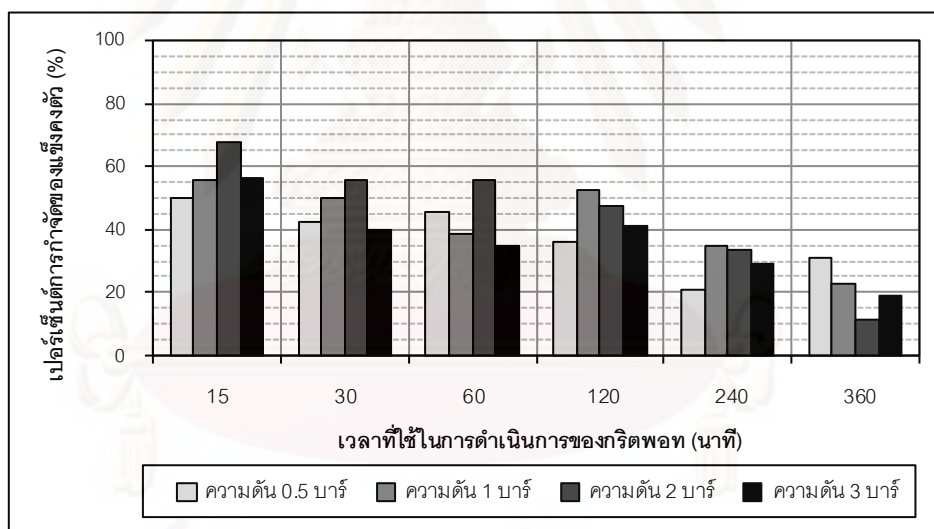
เมื่อพิจารณาถึงผลของความดันจ่ายเข้าและเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทที่มีต่อความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอท ดังแสดง ในรูปที่ 4.11 และ 4.12 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของของแข็งคงตัวกับเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท ที่ความดันต่างๆ จะเห็นได้ว่า ความดันไม่มีผลอย่างชัดเจนในส่วนของความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านบน แต่ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวในกริตพอท มีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่จ่ายเข้าอีกด้วย เมื่อความเข้มข้นจ่ายเข้ามาก ก็จะส่งผลให้ความเข้มข้นของของแข็งที่สะสมในกริตพอทมีค่าสูงมากขึ้นด้วย อีกทั้งเมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มมากขึ้น ความเข้มข้นของของแข็งที่สะสมในกริตพอทจึงเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ความเข้มข้นของของแข็งที่ทางออกด้านบนก็มีค่าสูงขึ้นด้วย อาจเนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไป ความเข้มข้นของของแข็งที่สะสมในกริตพอทมีเป็นจำนวนมาก เมื่อถูกความดันของของไหลที่ทางออกด้านล่างเข้าสู่กริตพอท จึงทำให้มีโอกาสที่ของแข็งในกริตพอทเกิดการปั่นป่วนและเล็ดลอดออกสู่ทางออกด้านบนได้ง่ายขึ้น ซึ่งสังเกตได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งคงตัวดังแสดงในรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งคงตัวลดลง เมื่อเวลาในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกกวดทราย ของไฮโดรไซโคลอนลดลง ด้วย ในส่วนของความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยและตะกอนหนักก็มีความสอดคล้องเช่นเดียวกัน (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก)



รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน



รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริตพอทของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท



รูปที่ 4.13 เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

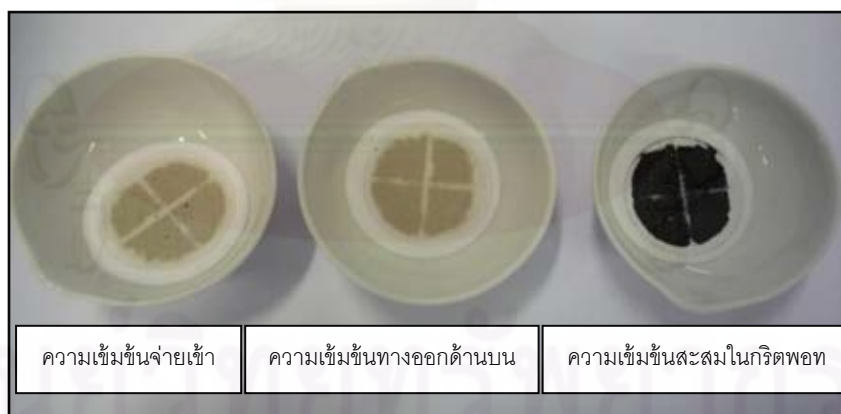
#### 4.1.2.2 ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ผลการวิเคราะห์ ค่าความเข้มข้นของของแข็ง ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอทที่ทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ควบคุมความดันจ่ายเข้า 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ โดยความเข้มข้นของของแข็งจ่ายเข้า

เฉลี่ยของของแข็งแขวนลอย ตะกอนหนัก และของแข็งคงตัว มีค่าเท่ากับ 57, 48 และ 36 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 15-55 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ สะสมในกริตพอท มีค่าอยู่ระหว่าง 230-20,790 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 11-51 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของตะกอนหนักที่สะสมในกริตพอทมีค่าอยู่ระหว่าง 215-20,755 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 5-49 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่สะสมในกริตพอทมีค่าอยู่ระหว่าง 210-20,730 มิลลิกรัมต่อลิตร ( รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก )

นอกจากนี้ ความดันจ่ายเข้า ความเข้มข้นของของแข็งที่จ่ายเข้า และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทยังส่งผลต่อความเข้มข้นของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรเช่นเดียวกับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และความเข้มข้นของของแข็งที่ออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอททำให้ของแข็งไหลออกสู่ทางออกด้านล่างและสะสมอยู่ภายในกริตพอทเป็นจำนวนมากโดยที่ความเข้มข้นของของแข็งที่สะสมภายในกริตพอทนั้นมีค่ามากกว่าทางออกด้านบนประมาณ 300 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นข้อดีของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทซึ่งทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก

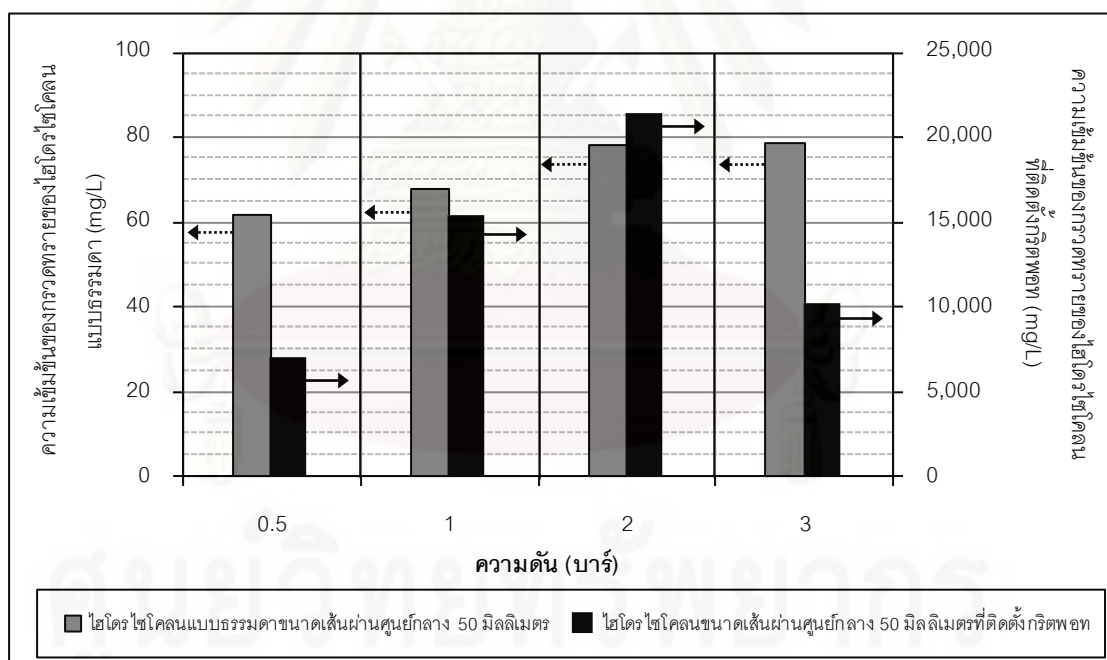


รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของของแข็งทั้ง 3 เส้นทางการไหลของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

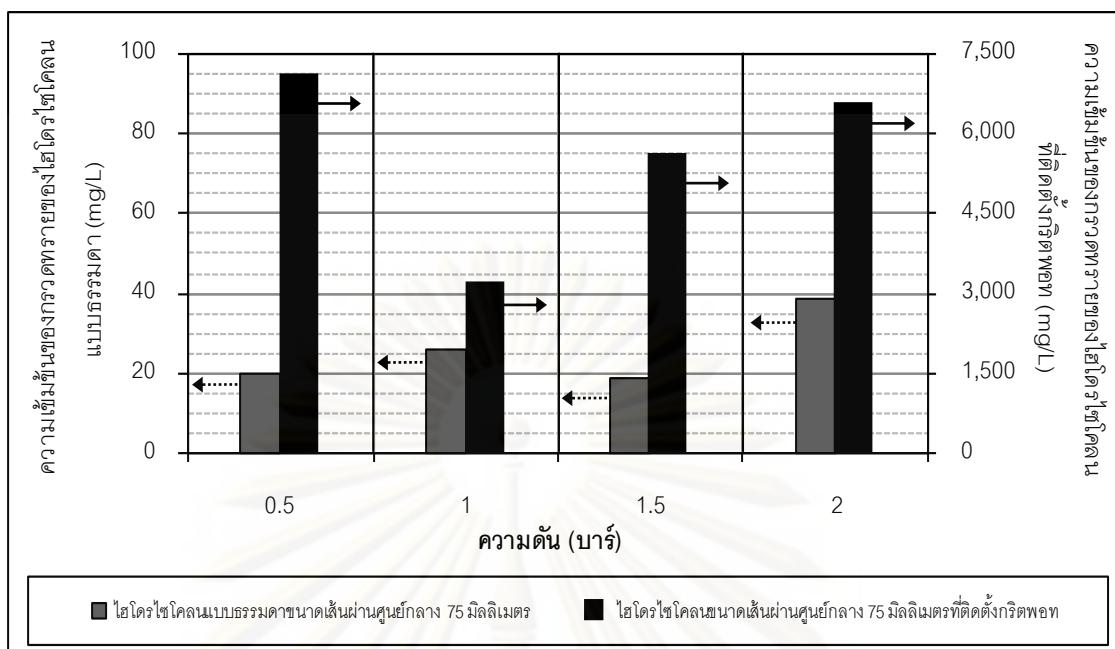


#### 4.1.3 เปรียบเทียบความเข้มข้นของกรวดทรายที่ถูกแยกออกทางด้านล่าง ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา กับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

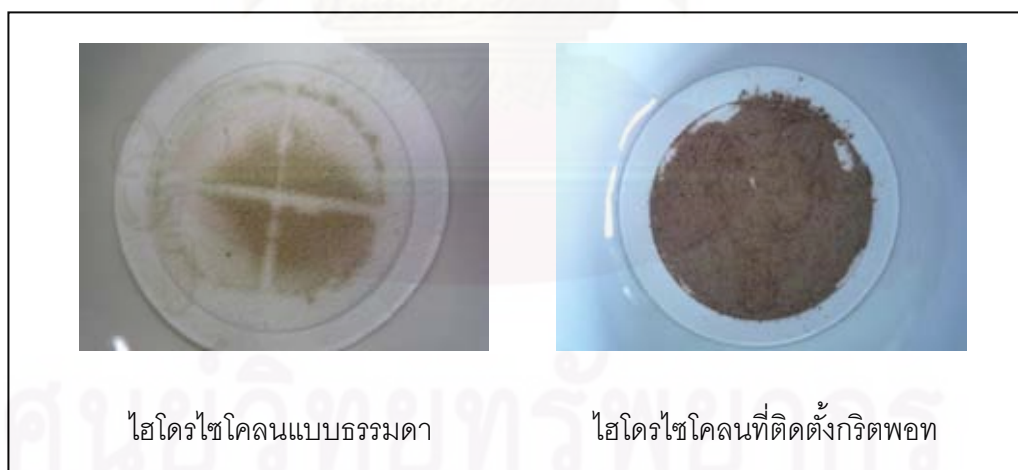
เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของกรวดทรายที่วัดในรูปแบบของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้เป็นตัวแทนของกรวดทราย ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตรกับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท เวลาในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที ที่สภาวะความดันเดียวกัน พบว่า ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท จะมีความเข้มข้นของกรวดทรายที่สะสมตัวใน กริตพอทมากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ประมาณ 200 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.15 - 4.17 (สังเกตได้จากค่าความเข้มข้นในแกนตั้งของรูปกราฟ) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Puprasert, 2004 ที่กล่าวว่า กริตพอททำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก อนุภาคกรวดทรายที่ไหลออกจากทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนเข้าสู่กริตพอท เกิดการตกตะกอนและสะสมตัวอยู่ภายในกริตพอท จึงทำให้มีความเข้มข้นของกรวดทรายสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปที่ 4.17 สังเกตเห็นได้ว่ามีกรวดทรายที่ติดค้างอยู่บนกระดาดกรองเป็นจำนวนมากอย่างชัดเจน



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน 50 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความเข้มข้นระหว่างไอโคโรไซโคลนแบบธรรมดาและไอโคโรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไอโคโรไซโคลน 75 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.17 ความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้ระหว่างไอโคโรไซโคลนแบบธรรมดา กับไอโคโรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

## 4.2 มวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

### 4.2.1 ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

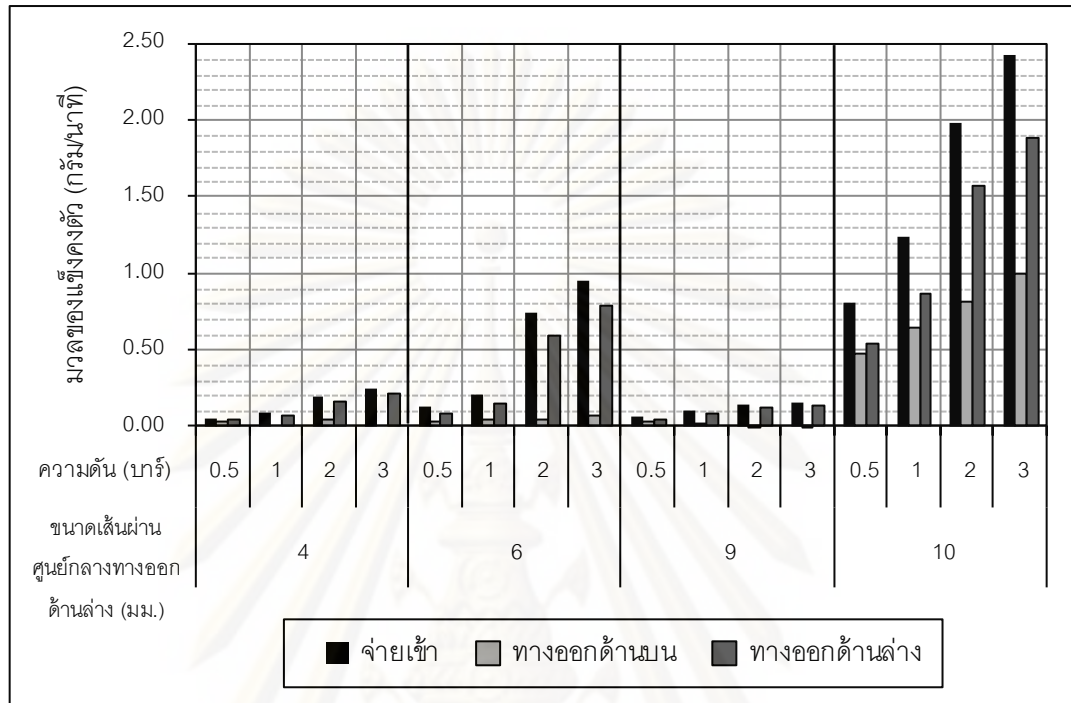
ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนสามารถประเมินในรูปของมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ซึ่งในข้อนี้ได้นำผลการทดลองที่วิเคราะห์หาความเข้มข้นใน 3 รูปแบบ คือ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (Settleable Solids) และความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ในหัวข้อที่ 4.1 มาคำนวณให้อยู่ในรูปของมวล โดยการนำสมมูลมวลของทางเข้าและออกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 เส้นทางการไหลของระบบ ได้แก่ จ่ายเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) มวลในแต่ละเส้นทางการไหล สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลคูณกับความเข้มข้น ผลการคำนวณที่ได้จะอยู่ในรูปของหน่วยน้ำหนักต่อเวลา (ตัวอย่างรายการคำนวณ แสดงในภาคผนวก ข) และมวลที่คำนวณได้จากหัวข้อ 4.2 สามารถนำไปใช้คำนวณหาประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายในหัวข้อ 4.3 ต่อไป

#### 4.2.1.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

จากการคำนวณมวลของแข็ง ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า ไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สามารถแยกมวลของของแข็งแขวนลอยได้ไม่ ดีนัก มวลของของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีปริมาณน้อยกว่ามวลของของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนมาก ถึงแม้ว่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่าง มีค่ามากกว่าความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย ที่ทางออกด้านบน เนื่องจากอัตราการไหลที่ออกทางด้านบน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตรมีค่ามากกว่าอัตราการไหลที่ออกทางด้านล่าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างเล็กๆ ดังนั้น จึงส่งผลให้มวลของของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนมีค่ามากขึ้นด้วยเช่นกัน

แต่เมื่อคำนวณมวลของตะกอนหนักและของแข็งคงตัว ซึ่งในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานไว้ว่า ของแข็งคงตัวที่ทำกรวดทรายนั้นเป็นตัวแทนของกรวดทรายในน้ำเสียชุมชน ดินแดง พบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สามารถแยกมวลของตะกอนหนักและมวลของกรวดทรายได้ดี โดยส่วนใหญ่มวลของกรวดทราย ที่ถูกแยกออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีปริมาณมากกว่ามวลของกรวดทรายที่ถูกแยกออกทางด้านบน อาจเนื่องจากความหนาแน่นของของกรวดทราย นั้นมีค่ามากกว่าน้ำ จึงทำให้ความเร็วในการตกตะกอนสูง ซึ่ง

สอดคล้องกับสมการกฎของสโตค อีกทั้งเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น มวลของกรวดทราย ที่ถูกแยกออกทางด้านล่างมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.18

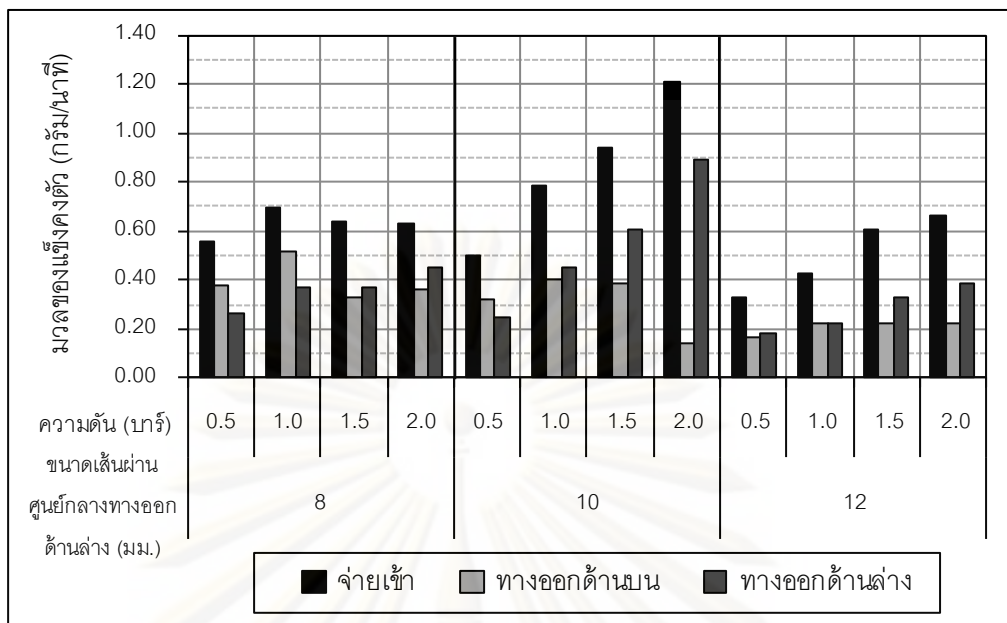


รูปที่ 4.18 มวลของของแข็งคั่งตัวที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

#### 4.2.1.2 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

จากการคำนวณมวลของของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร ที่ความดัน 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ (รายละเอียด แสดงในภาคผนวก ข) พบว่าไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สามารถแยกมวลของแข็งแขวนลอยได้ไม่ ดี แต่สามารถ แยกมวลของตะกอนหนักและมวลของ แข็งคั่งตัว ได้ดีเช่นเดียวกับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร นั่นคือ มวลของแข็งที่แยกออกทางด้านล่างมีปริมาณมากกว่ามวลของแข็งที่แยกออกทางด้านบน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ ความดันจ่ายเข้าสูงๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.19





รูปที่ 4.19 มวลของของแข็งคงตัวที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบในแง่ของมวลของแข็งที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านล่าง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างเท่ากัน คือ 10 มิลลิเมตร และความดัน 1 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และ 4.19 จะเห็นได้ว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร สามารถแยกมวลของแข็งคงตัวได้ 0.87 กรัมต่อนาที ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สามารถแยกมวลของแข็งคงตัวได้ 0.45 กรัมต่อนาที ซึ่งไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีแนวโน้มที่จะแยกมวลของแข็งคงตัวได้มากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร อาจเนื่องจากผลของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลน กล่าวคือ เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลง ทำให้ความเร็วลัพท์ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้กวอดทรายซึ่งมีความหนาแน่นมากถูกเหวี่ยงปะทะกับผนังของไฮโดรไซโคลนและไหลออกสู่ทางออกด้านล่างมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### 4.2.2 ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

การคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ ติดตั้งกริตพอท สามารถหาได้จากการนำผลการทดลองที่วิเคราะห์หาความเข้มข้นใน 3 รูปแบบ คือ ของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids) ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (Settleable Solids) และความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ในหัวข้อที่ 4.1 มาคำนวณให้อยู่ในรูปของมวล โดยการ ทำสมมูลมวลของทางเข้าและออกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 เส้นทาง การไหลของระบบ ได้แก่ จ่ายเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) มวลที่จ่ายเข้าและมวลที่แยกออกทางด้านบน สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลกับความเข้มข้น เช่นเดียวกับการคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนธรรมดา แต่การคำนวณมวลที่สะสมในกริตพอท สามารถคำนวณได้จากมวลที่จ่ายเข้าลบกับมวลที่แยกออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ผลการคำนวณที่ได้จะอยู่ในรูปของหน่วยน้ำหนักต่อเวลา (ตัวอย่างรายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข)

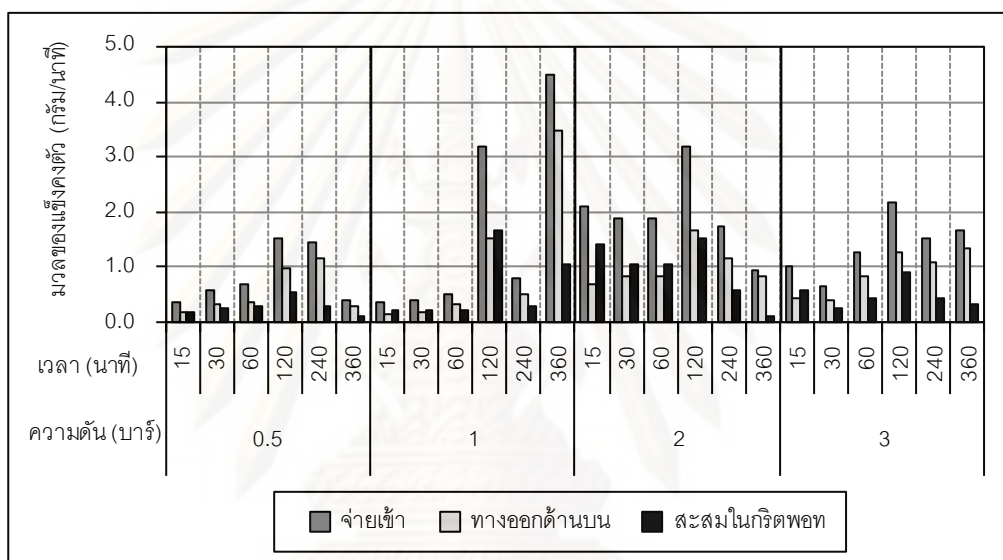
##### 4.2.2.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

จากผลการคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ความดัน 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) พบว่าโดยส่วนใหญ่ มวลของของแข็งแขวนลอย มวลของตะกอนหนัก และมวลของของแข็งคงตัว ที่สะสมในกริตพอทมีปริมาณน้อยกว่ามวลที่แยกออกทางด้านบน แต่จากการทดลองจะสังเกตได้ว่า ตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท นั้นจะมีความเข้มข้นมากกว่าน้ำที่จ่ายเข้าและออกทางด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 แสดงลักษณะของตัวอย่างน้ำที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ทั้ง 3 ช่องการไหล

ผลการคำนวณมวลที่ได้เช่นนี้ อาจเนื่องจากอัตราการไหลที่ทางออกด้านบนมีค่าเท่ากับอัตราการไหลที่จ่ายเข้า เมื่อนำมาคำนวณโดยการคูณมวล (มวลเข้า-มวลที่ออกทางด้านบน) จึงอาจทำให้มวลที่สะสมในกริตพอทมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่จ่ายเข้าในขณะนั้นอีกด้วย เช่น ในกรณีที่ ความดัน 1 บาร์ เวลาในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที ซึ่งมีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยถึง 143 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงทำให้มวลของแข็งแขวนลอย มวลของตะกอนหนัก และมวลของของแข็งคงตัว มีค่ามากกว่ามวลที่แยกได้ที่ทางออกด้านบน นอกจากนี้ ความดันจ่ายเข้ายังส่งผลต่อมวลที่ แยกได้ นั่นคือ ที่ความดันจ่ายเข้าสูง มวลที่แยกได้นั้นจะมีปริมาณมากกว่าที่ความดันต่ำ ดังตัวอย่างมวลของแข็งคงตัวในรูปที่ 4.21

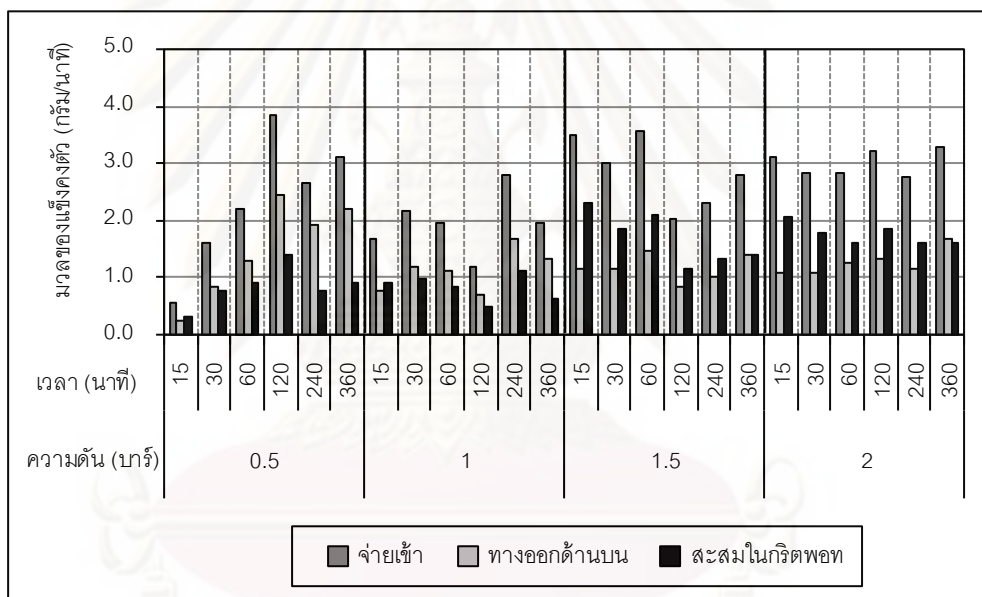


รูปที่ 4.21 มวลของของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

นอกจากนี้ ของแข็งคงตัวที่แยกได้นั้นอาจมีทั้งของแข็งที่มีความหนาแน่นมาก เช่น กววดทราย และของแข็งที่มีความหนาแน่นน้อย ซึ่งอาจประกอบไปด้วย สารอินทรีย์ที่ระเหยได้เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส แต่จากการสังเกตในรูปที่ 4.20 ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทสามารถแยกมวลของของแข็ง ซึ่งส่วนใหญ่เป็น กววดทรายได้ดี และมีความเข้มข้นสูงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2

#### 4.2.2.2 ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

จากผลการคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ความดัน 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า ที่ความดัน 0.5 และ 1 บาร์ มวลของของแข็งแขวนลอย มวลของตะกอนหนัก และมวลของของแข็งคงตัวที่สะสมในกริตพอทโดยส่วนใหญ่มีปริมาณน้อยกว่ามวลของแข็งคงตัวที่แยกออกทางด้านบน แต่ที่ความดัน 1.5 และ 2 บาร์ มวลของของแข็งแขวนลอย มวลของตะกอนหนัก และมวลของของแข็งคงตัว ที่สะสมในกริตพอท โดยส่วนใหญ่มีปริมาณมากกว่ามวลที่แยกออกทางด้านบน ดังตัวอย่างมวลของของแข็งคงตัว ในรูปที่ 4.22 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันจ่ายเข้ามีผลต่อมวลที่แยกได้เช่นเดียวกับไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท



รูปที่ 4.22 มวลของของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

เมื่อเปรียบเทียบมวลที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท จะเห็นได้ว่ามวลที่แยกได้ของไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่าไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร อาจเนื่องจากอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลมากกว่า ในขณะที่ความเข้มข้นของของแข็งที่ออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลทั้ง 2 ขนาดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2



จากผลการคำนวณมวลที่แยกได้ของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา และไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท พบว่าให้ผลในการทำงานเดียวกัน นั่นคือ ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท สามารถแยกมวลของแข็งที่มีความหนาแน่นสูงได้ดี เช่น กรวดทราย แต่แยกมวลของของแข็งแขวนลอยได้น้อย ซึ่งส่วนใหญ่จะไหลออกสู่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากของแข็งแขวนลอยอาจเป็นพวกตะกอนลอย หรือมีน้ำหนักเบา จึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยแรงโน้มถ่วงหรือแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ดังนั้นไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทจึงเหมาะสำหรับใช้แทนที่ถังดักกรวดทราย แต่ไม่เหมาะสำหรับใช้แทนถังตกตะกอนขั้นต้น(Primary sedimentation tank) ในระบบบำบัดขั้นต้น

#### 4.2.3 เปรียบเทียบ มวลของ กรวดทรายที่ถูกแยกออกทางด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

เมื่อเปรียบเทียบมวลของกรวดทรายที่วัดในรูปแบบของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร กับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที ที่สภาวะความดันเดียวกัน คือ 2 บาร์ ดังตารางที่ 4.1 พบว่า มวลที่แยกได้ของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรมีค่าใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ให้ผลที่แตกต่างกัน คือ ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทสามารถแยกมวลได้มากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา แต่ทั้งนี้มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้นั้นยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่จ่ายเข้าในขณะทำการทดลองอีกด้วย

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบมวลของของแข็งคงตัวที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ที่ความดัน 2 บาร์

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน	มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)					
	ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา			ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท		
	จ่ายเข้า	ทางออกด้านล่าง	% การแยก	จ่ายเข้า	สะสมในกริตพอท	% การแยก
50 มิลลิเมตร	2.00	1.57	78.50	3.20	1.52	47.50
75 มิลลิเมตร	1.22	0.89	72.95	3.20	1.87	58.44

และเมื่อเทียบมวลของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านล่างเป็นเปอร์เซ็นต์แล้ว พบว่ามวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่

ติดตั้งกритพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 78.5 และ 47.5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนมวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกритพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีค่าเท่ากับ 72.95 และ 58.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตัวอย่างการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข ) แสดงให้เห็นว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาสามารถแยกมวลของแข็งคงตัวได้ ดีมากกว่าไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกритพอท อาจเนื่องจากอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีค่ามาก แต่ทั้งนี้ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกритพอทมีความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่สะสมภายในกритพอทมากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ประมาณ 200 เท่า ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 และจากการสังเกตของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกритพอทในรูปที่ 4.17 พบว่า ของแข็งที่เหลืออยู่บนกระดานรองจากการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นกรวดทรายเกือบทั้งหมด แสดงว่าไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกритพอทนั้นสามารถแยกกรวดทรายได้ดีซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

#### 4.3 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน

การหาประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของ ไฮโดรไซโคลน ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) เพื่อบ่งบอกประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนมากกว่าประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) เนื่องจากประสิทธิภาพลดได้คำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล ดังที่กล่าวมาในบทที่ 2

ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายที่วัดในรูปของของแข็งคงตัว (Fixed Solids) ของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.29 ดังสมการต่อไปนี้

$$E'_T = \frac{Q_u(C_u - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (2.29)$$

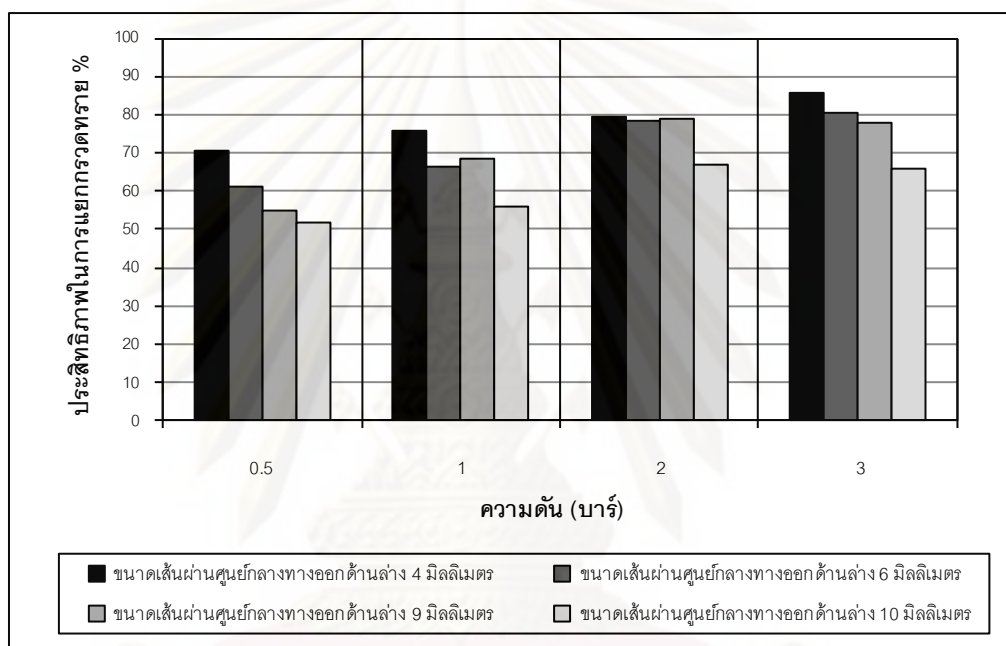
ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายที่วัดในรูปของของแข็งคงตัวของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกритพอท (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.32 ดังสมการต่อไปนี้

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \quad (2.32)$$

#### 4.3.1 ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

##### 4.3.1.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

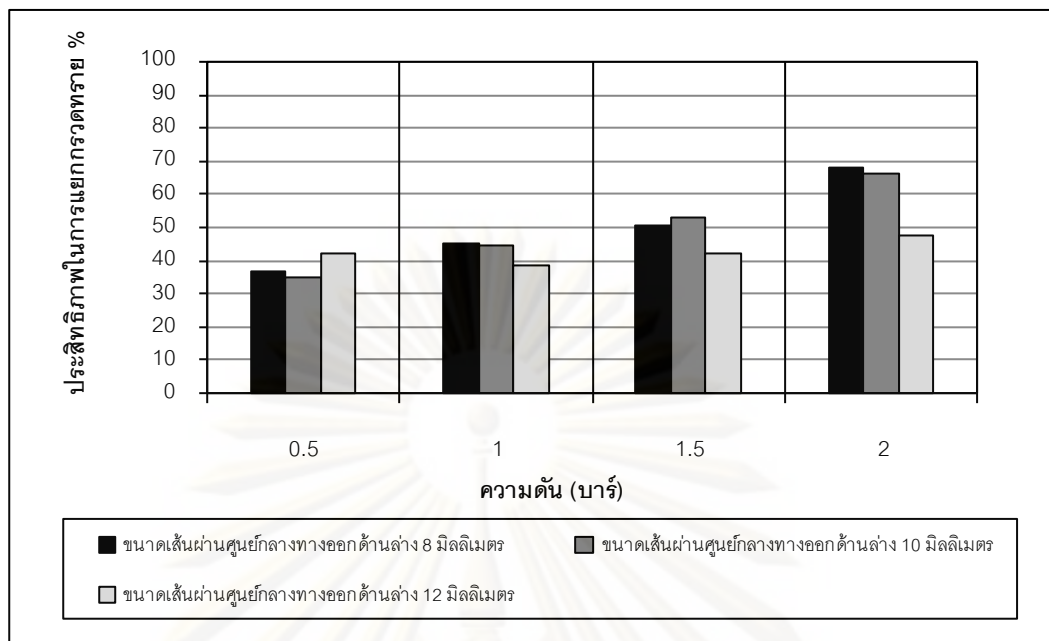
เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนดังสมการที่ 2.29 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค. 1.1) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 52 – 86 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 86 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3 บาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.23



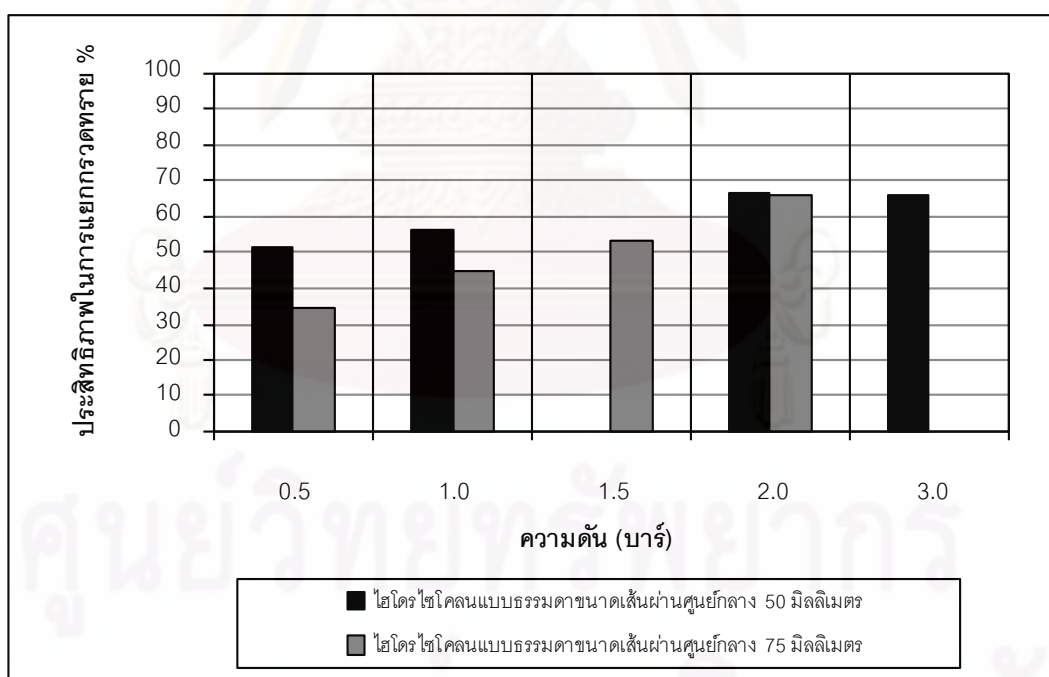
รูปที่ 4.23 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

##### 4.3.1.2 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนดังสมการที่ 2.29 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค. 1.2) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 35 – 68 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 2 บาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพในการแยกกววดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร



รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกววดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ระหว่างไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร



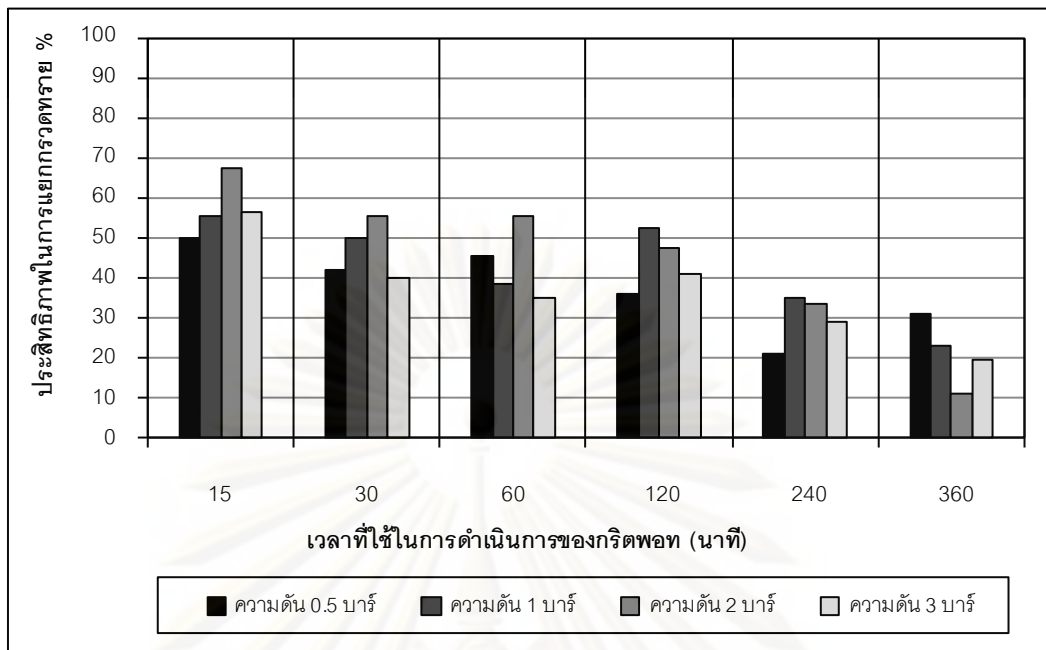
จากรูปที่ 4.25 ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายสูงกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Helmholtz's law กล่าวคือ เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลง ทำให้ความเร็วลัพท์ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายเพิ่มขึ้นเช่นกัน

นอกจากนี้ ความดันจ่ายเข้ายังส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วในการตกตะกอนเพิ่มขึ้น ดังอธิบายได้จากสมการกฎของสโตค ดังนั้น ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนจึงเพิ่มขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ดัง แสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 จะเห็นได้ว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างลดลง ทำให้ความเข้มข้นของกรวดทรายมีมากขึ้น แม้ว่าอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างจะลดลง แต่เนื่องจากกรวดทรายนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ทำให้ความเร็วในการตกตะกอนสูง ส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งให้ผลแตกต่างจาก ผลการทดลองของ Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ที่กล่าวว่าประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนจะลดลงเพียงเล็กน้อยเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างลดลง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าไฮโดรไซโคลนสามารถแยกของผสมที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก เช่น กรวดทราย ได้ดี นอกจากนี้หากใช้ไฮโดรไซโคลนแยกของผสมที่มีความหนาแน่นสูง เช่น กรวดทราย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างน่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกมากยิ่งขึ้น

#### 4.3.2 ผลการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

##### 4.3.2.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

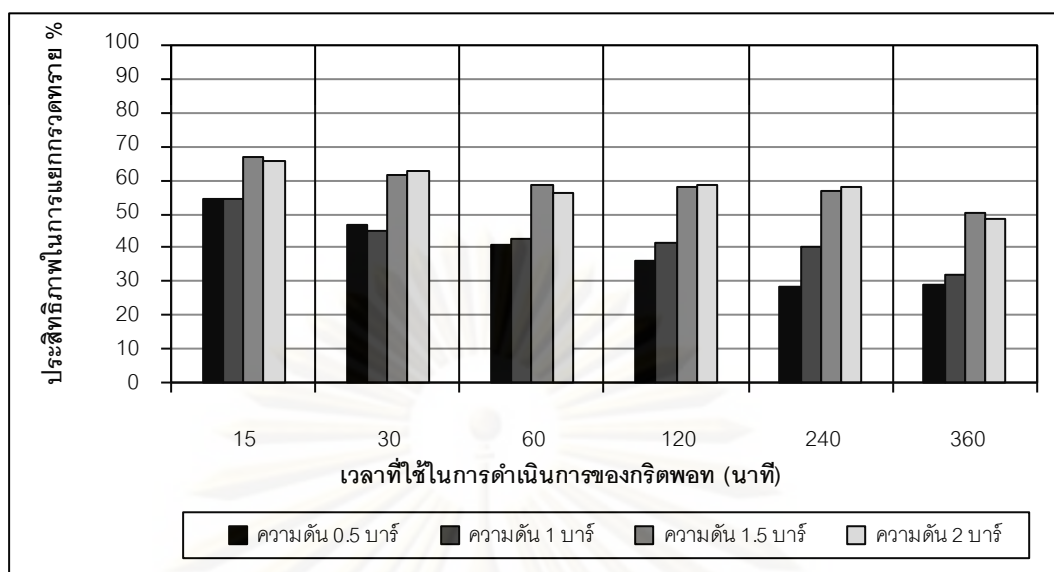
เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ดังสมการที่ 2.32 (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค. 1.3) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท มีค่าอยู่ระหว่าง 11 – 68 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 41 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 2 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.26



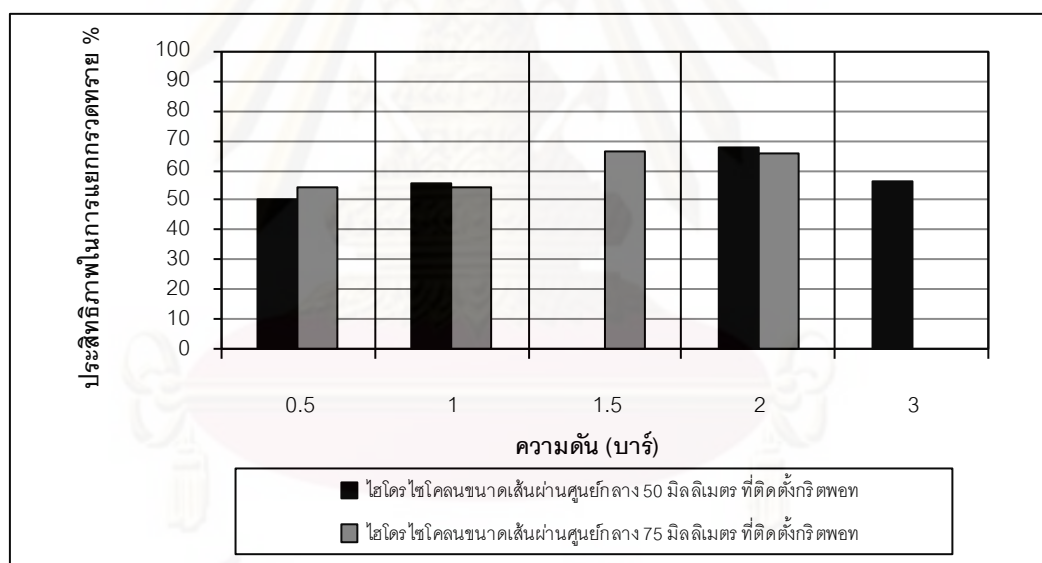
รูปที่ 4.26 ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

#### 4.3.2.2 ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริตพอท ดังสมการที่ 2.32 (แสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค. 1.4) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท มีค่าอยู่ระหว่าง 28 – 67 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 67 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 1.5 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ประสิทธิภาพในการแยกกวาดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรีตพอก



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกวาดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรีตพอก

จากรูปที่ 4.28 ซึ่งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกวาดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรีตพอก ที่เวลาในการดำเนินการของกรีตพอก 15 นาที พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกวาดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกรีตพอกมีค่าใกล้เคียงกัน และเมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกกวาดทรายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วยเช่นเดียวกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

เมื่อพิจารณาถึงผลของเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอกับประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอก ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอกเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องจากลักษณะน้ำเสียมีปริมาณกรวดทรายอยู่ เป็นจำนวนมาก เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอกเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกรวดทรายที่สะสมอยู่ภายในกริตพอกก็จะมีมากขึ้น ทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้ามา ดังนั้น อนุภาคของแข็งจึงมีโอกาสไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Puprasert, 2004

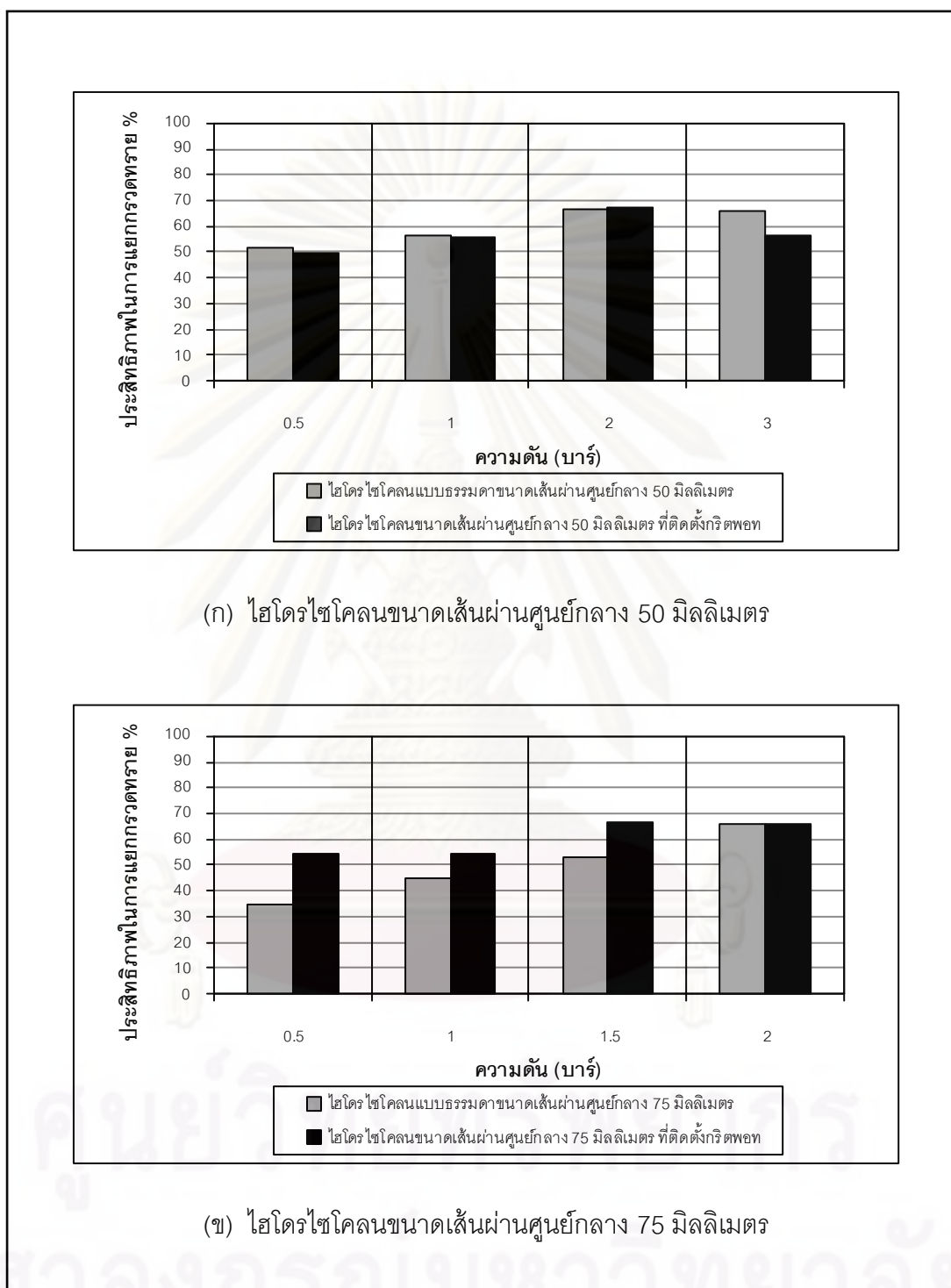
#### 4.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา กับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอก

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวด ทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตรกับไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอก เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอก 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (ก) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอกจะมีค่าต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา เพียงเล็กน้อย สูงสุดประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3 บาร์ อาจเนื่องจาก ลักษณะของน้ำเสียดิบมีปริมาณกรวดทรายอยู่จำนวนมาก เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอกเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกรวดทรายที่สะสมในกริตพอกก็จะมีมากขึ้น ทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้าสู่กริตพอก ดังนั้น อนุภาคของแข็งจึงไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Puprasert, 2004

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตรกับไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอก เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอก 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.29 (ข) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอกมีค่าสูงกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ อาจเนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.3.1 จึงทำให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทราย



ของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร มีค่าค่อนข้างต่ำ



รูปที่ 4.29 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดากับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริดพอท

อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทจะมีค่าต่ำกว่า ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดาเพียงเล็กน้อย แต่ความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา ประมาณ 200 เท่า ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.1.3 ซึ่งเป็นข้อดีของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอท

จากทฤษฎีของ Helmholtz's law ที่กล่าวว่า เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอนลง ทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายเพิ่มขึ้นเช่นกัน ผู้วิจัยจึงมีความคิดเห็นว่าควร จะประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กๆ ที่ติดตั้งกริตพอท และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนที่ต่อเข้าสู่กริตพอทเล็กๆ ด้วยเช่นกัน เนื่องจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่าเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนลดลง ทำให้ความเข้มข้นของกรวดทรายเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อที่ 4.3 แต่ทั้งนี้เพื่อป้องกันปัญหาการอุดตันของไฮโดรไซโคลอนน้ำเสียที่ต้องการแยกกรวดทรายอาจ จำเป็นต้องผ่านตะแกรงละเอียด ก่อนหรืออาจประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากใหญ่ไปเล็ก หลายตัวต่ออนุกรมกันเพื่อแยกอนุภาคขนาดใหญ่ๆ ออกก่อน

#### 4.4 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท

##### 4.4.1 ความดันจ่ายเข้า

จากผลการทดลองที่ได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ซึ่งทดลองแปรเปลี่ยนความดันเพื่อปรับอัตราการไหล โดยควบคุมความดัน 4 ค่า คือ 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.23-4.27 ซึ่งการดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองด้วยไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทที่ทางออกด้านล่าง พบว่า การเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนทำให้อัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลอนมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัส

เส้นรอบวง ( $V_y$ ) มีค่าสูงขึ้น สามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.4 ( $V_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$ ) ซึ่งส่งผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนหรือความเร่งหนีศูนย์กลาง ( $\zeta$ ) มีค่าเพิ่มมากขึ้นเช่นกัน ดังอธิบายได้จากสมการที่ 2.9 ( $\zeta = \frac{V_y^2}{R \cdot g}$ ) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนกับความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง และเนื่องจากในไฮโดรไซโคลน ความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนจะมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาก ดังนั้นความเร็วในการตกตะกอนของไฮโดรไซโคลน ( $V_p$ ) จากสมการกฎของสโตค (Stoke's law equation) (Metcalf และ Eddy, 2003) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 \cdot \zeta}{18\mu}$$

จะเห็นได้ว่า เมื่อความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนมีมากขึ้น

ดังนั้น เมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วและประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน รวมไปถึงความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกออกทางด้านล่าง มวลที่แยกออกทางด้านล่าง สำหรับไฮโดรไซโคลน แบบธรรมดา และมวลที่สะสมอยู่ในกริตพอท สำหรับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทจึงเพิ่มตามไปด้วย ดังผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1-4.3

#### 4.4.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

จากผลการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด ดังแสดงในรูปที่ 4.25 เมื่อสภาวะความดันเดียวกัน ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าสูงกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Helmholtz's law (Puprasert, 2004) ที่แสดงถึงการหมุนวนของของไหล เมื่อมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม ดังสมการที่ 2.6

$$V_y \times R^n = \text{ค่าคงที่} \quad (2.6)$$

เมื่อ  $n$  มีค่าระหว่าง 0.5-0.9 (Kelsall, 1952 อ้างถึงใน Svarovsky, 1984)

จากสมการที่ 2.6 แสดงถึงการหมุนวนภายนอกในทิศทางลงตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Outer Vortex) นั่นคือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลง ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงเพิ่มขึ้น

กล่าวคือ เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลง ทำให้ความเร็วลัพธ์ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ทำให้กวอดทรายในไฮโดรไซโคลนถูกเหวี่ยงปะทะกับผนังของไฮโดรไซโคลน ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ไหลออกสู่ทางด้านล่างได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### 4.4.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

จากผลการทดลองสำหรับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 4.23 และ 4.24 พบว่า เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างลดลง ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น อีกทั้งความเข้มข้นของกวอดทรายมี มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และ 4.6 ถึงแม้ว่าอัตราการไหลออกทางด้านล่างจะลดลง เนื่องจากกวอดทรายนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำ ทำให้ความเร็วในการตกตะกอนมีค่าสูงขึ้น ดังอธิบายได้จากสมการกฎของสโตค จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าไฮโดรไซโคลนสามารถแยกของผสมที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันมาก เช่น กวอดทราย ได้ดี นอกจากนี้หากใช้ไฮโดรไซโคลนแยกของผสมที่มีความหนาแน่นสูง เช่น กวอดทราย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างน่าจะมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกมากยิ่งขึ้น

#### 4.4.4 เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท

จากผลการทดลองสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.26 และ 4.27 พบว่า เมื่อดำเนินการทดลอง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะไหลออกสู่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนด้วยการหมุนวนภายนอกและเกิดการสะสมตัวอยู่ภายในกริตพอท โดยที่น้ำใสและอนุภาคขนาดเล็กไหลย้อนกลับผ่านช่องแคบรอบแกนอากาศออกสู่ทางออกด้านบนด้วยการหมุนวนภายใน และเมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทจะลดลง อาจเนื่องมาจากลักษณะของน้ำเสียดิบมีปริมาณกวอดทรายอยู่จำนวนมาก เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกวอดทรายที่สะสมในกริตพอทก็จะมีมากขึ้น ทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้าสู่กริตพอท ดังนั้น อนุภาคของแข็ง ที่มีความหนาแน่นต่ำ จึงมีโอกาสที่จะไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกวอดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท



ลดลง ดังนั้น เพื่อลดปัญหาควรเพิ่มปริมาตรของกิริตพอทหรือ ปล่อยทิ้งตะกอนในกิริตพอทออก เมื่อมวลในกิริตพอทเริ่มเต็ม

อย่างไรก็ดี เมื่อมีการนำกิริตพอทไปติดตั้งที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน มีข้อดีคือ กรวดทรายที่สะสมภายในกิริตพอท มีความเข้มข้นสูงมาก ในขณะที่ประสิทธิภาพลดลงเพียง เล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา

#### 4.5 ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำเสียดิบจริง ซึ่งขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้า ไฮโดรไซโคลอนจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อม ณ เวลาที่ดำเนินการทดลอง ดังนั้นผู้วิจัยจึง ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายในแง่ของขนาดอนุภาค ( $D_{50}$ ) ที่ถูกแยก ออกจากไฮโดรไซโคลอนที่ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) กับ ขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้า (Feed) ซึ่งสามารถแสดงได้จาก %GE (Granulometric separation efficiency) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.6.5 ในส่วนการไหลออกทางด้านบน สามารถคำนวณได้จาก สมการที่ 2.41 ดังสมการต่อไปนี้

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Feed} - D_{50} \text{Overflow}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.41)$$

และในส่วนการไหลออกทางด้านล่าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.42 ดังสมการ ต่อไปนี้

$$\% GE = \frac{D_{50} \text{Underflow} - D_{50} \text{Feed}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.42)$$

#### 4.5.1 ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

##### 4.5.1.1 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และ %GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) (ไมครอน)			Granulometric separation efficiency (%)	
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	การไหลออกด้านบน	การไหลออกด้านล่าง
4	0.5	52.75	42.02	82.01	20.35	55.47
	1	60.77	48.91	98.52	19.52	62.12
	2	63.59	53.27	98.68	16.23	55.18
	3	57.14	48.87	94.53	14.46	65.43
6	0.5	39.11	29.21	61.64	25.32	57.60
	1	43.83	33.22	69.90	24.21	59.47
	2	33.57	26.10	54.82	22.25	63.29
	3	24.35	20.41	39.95	16.17	64.10
9	0.5	37.26	19.08	56.95	48.79	52.83
	1	34.68	17.26	57.96	50.22	67.15
	2	25.64	21.52	41.16	16.06	60.51
	3	28.74	24.65	46.72	14.21	62.57
10	0.5	27.58	21.08	34.43	23.56	24.87
	1	28.54	22.43	40.85	21.40	43.13
	2	28.92	22.82	42.84	21.09	48.11
	3	26.20	22.49	39.77	14.16	51.79

#### 4.5.1.2 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร แสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และ %GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง ทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) (ไมครอน)			Granulometric separation efficiency (%)	
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	การไหลออก ด้านบน	การไหลออก ด้านล่าง
8	0.5	41.58	38.58	48.20	7.21	15.94
	1	34.73	32.88	43.54	5.31	25.39
	1.5	42.37	39.32	52.14	7.19	23.08
	2	37.45	35.52	50.63	5.17	35.17
10	0.5	33.17	28.23	42.00	14.88	26.62
	1	28.69	24.68	37.50	13.98	30.72
	1.5	24.35	20.90	33.71	14.16	38.45
	2	33.36	30.88	47.00	7.43	40.90
12	0.5	74.16	61.87	80.28	16.57	8.25
	1	72.90	61.26	83.70	15.98	14.82
	1.5	60.41	49.22	99.06	18.53	63.98
	2	70.84	59.69	89.70	15.75	26.61

#### 4.5.2 ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอท

##### 4.5.2.1 ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท แสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.5

ตารางที่ 4.4 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) (ไมครอน)					
		จ่ายเข้า		ทางออกด้านบน		กริตพอท	
		$D_{50}$	SD*	$D_{50}$	SD*	$D_{50}$	SD*
0.5	15 - 360	43.09	14.38	29.14	11.48	89.12	10.83
1.0		30.73	11.46	25.85	10.01	69.91	11.98
2.0		41.06	13.80	35.30	11.65	61.07	20.04
3.0		38.88	5.72	31.74	5.29	52.19	7.32

\* SD หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ตารางที่ 4.5 % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)	
		ทางออกด้านบน	กริตพอท
0.5	15	36.65	281.11
	30	35.75	172.25
	60	35.56	220.47
	120	35.05	54.77
	240	35.81	35.27
	360	20.76	45.26
1.0	15	13.07	288.36
	30	13.45	187.06
	60	34.61	57.73
	120	12.12	255.23
	240	13.62	77.40
	360	4.65	75.45



ตารางที่ 4.5 % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)	
		ทางออกด้านบน	กริตพอท
2.0	15	25.08	39.97
	30	22.80	21.77
	60	8.79	17.44
	120	7.72	76.06
	240	10.39	87.06
	360	3.40	82.18
3.0	15	26.62	69.78
	30	19.35	43.14
	60	18.94	43.17
	120	20.52	24.13
	240	13.39	25.71
	360	11.84	7.96

#### 4.5.2.2 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท แสดงในตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) (ไมครอน)					
		จ่ายเข้า		ทางออกด้านบน		กริตพอท	
		$D_{50}$	SD*	$D_{50}$	SD*	$D_{50}$	SD*
0.5	15 - 360	43.78	5.96	33.12	3.68	68.11	15.48
1.0		40.55	2.47	32.18	0.86	73.10	13.93
1.5		51.69	10.59	38.23	5.45	76.42	18.47
2.0		44.77	7.19	34.19	5.62	61.01	12.04

\* SD หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ตารางที่ 4.7 % GE ที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)	
		ทางออกด้านบน	กริตพอท
0.5	15	31.38	89.67
	30	32.75	81.15
	60	26.00	64.07
	120	25.63	33.37
	240	13.33	30.43
	360	13.36	31.70
1.0	15	23.24	104.61
	30	23.92	103.22
	60	22.88	90.79
	120	18.73	80.53
	240	18.50	49.55
	360	15.60	46.89
1.5	15	32.66	51.70
	30	30.36	50.29
	60	26.53	47.93
	120	22.23	68.07
	240	17.04	33.30
	360	22.22	31.12
2.0	15	39.85	45.08
	30	29.70	43.20
	60	20.03	47.63
	120	19.49	39.11
	240	15.57	21.05
	360	13.39	18.92

#### 4.5.3 เปรียบเทียบขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบ ธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

น้ำเสียดิบที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำเสียดิบจริงจากรางส่งน้ำเสียของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ดังนั้น ขนาดอนุภาคของแข็งที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนจึงมีขนาดที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง และจากผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ดังแสดงในตารางที่ 4.2 และ 4.3 และไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และ 4.6 จะเห็นได้ว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ( $D_{50}$ ) ที่แยกออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แยกออกทางด้านบนเสมอ ในทุกกรณี ในขณะที่เดียวกัน ขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แยกออกทางด้านบน ก็จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำงานของไฮโดรไซโคลน ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท พบว่า ขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนไม่มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน

#### 4.5.4 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนกับขนาดอนุภาค

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน พบว่า อนุภาคที่จ่ายเข้ามีค่าประมาณ 42 ไมครอน ซึ่งจะเห็นได้ว่าอนุภาคนั้นมีขนาดใหญ่ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนมีค่าค่อนข้างสูง ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของสโตค (สมการที่ 2.8) กล่าวคือ ขนาดอนุภาค ( $d_p$ ) และความหนาแน่นของอนุภาค ( $\Delta\rho$ ) เป็นอีกตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วในการตกตะกอน นั่นคือ เมื่ออนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงตามไปด้วย เนื่องจากขนาดอนุภาคอยู่ในรูปกำลังสอง ( $d_p^2$ ) อีกทั้งความหนาแน่นของอนุภาคกรวดทรายมีค่าเท่ากับ 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เมื่อพิจารณาถึง %GE พบว่า %GE มีแนวโน้มลดลงทั้งการไหลออกทางด้านบนและทางด้านล่างที่สะสมในกริตพอทของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของ กริตพอทเพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจาก เมื่อเวลาผ่านไป อนุภาคที่สะสมในกริตพอทมีปริมาณมากขึ้น จึงไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้ามา ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่มีโอกาสออกสู่ทางออกด้านบนได้ จึงทำให้อนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบนมีขนาดใหญ่ขึ้น ส่งผลให้ %GE ที่ทางออกด้านบนและทางออกด้านล่างมีค่าลดลง ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท ลดลง เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณมวลที่แยกได้และความเข้มข้นของของแข็งในหัวข้อที่ 4.1-4.3

#### 4.5.5 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร ควบคุมความดัน 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ และไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร ควบคุมความดัน 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ พบว่า

1. เมื่อเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ขนาดอนุภาคของแข็งที่ไหลออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีแนวโน้มขนาดใหญ่ขึ้น จากตารางที่ 4.2 และ 4.3 จะสังเกตได้ว่า %GE ที่ทางออกด้านล่างมีค่าสูงขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น ในขณะที่ขนาดอนุภาคของแข็งที่ไหลออกทางด้านบนมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนในแง่ของขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้น

2. จากการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร พบว่า ขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้ที่ทางออกด้านล่างมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่เมื่อพิจารณา %GE ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบกับขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน พบว่า %GE ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า %GE ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าขนาดอนุภาคที่ออกทางด้านล่างมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ในทำนองเดียวกันกับ %GE ที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่ามากกว่า %GE ที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร เนื่องจากขนาดอนุภาคของแข็งที่ไหลออกทางด้านบนมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนมาก สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่มีขนาดอนุภาคที่ทางออกด้านบนและขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนในแง่ของขนาดอนุภาคมากกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร



3. เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างแตกต่างกัน พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนลดลง ขนาดอนุภาคที่แยกได้ที่ทางออกด้านล่างมีขนาดใหญ่ขึ้น จึงส่งผลให้ %GE ที่ทางออกด้านล่างก็มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน

#### 4.5.6 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอท

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท โดยควบคุมความดัน 0.5, 1, 2 และ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของกริตพอท 15-360 นาที และไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท โดยควบคุมความดัน 0.5, 1, 1.5 และ 2 บาร์ เวลาที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของกริตพอท 15-360 นาที พบว่า

1. เมื่อความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้น ขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อาจกล่าวได้ว่า ความดันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดอนุภาคสำหรับไฮโดรไซโคลอนทั้งสองขนาดที่ติดตั้งกริตพอท

2. เมื่อเปรียบเทียบขนาดอนุภาคของแข็งที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท พบว่า ขนาดอนุภาคของแข็งทั้งสองเส้นทางการไหลออกมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน อาจกล่าวได้ว่า ขนาดของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริตพอทไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน

3. เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มขึ้น %GE ที่ทางออกด้านล่างมีแนวโน้มลดลง และ %GE ที่ทางออกด้านบนก็ลดลงเช่นกัน แสดงให้เห็นว่า ขนาดอนุภาคของแข็งที่สะสมในกริตพอทมีขนาดเล็กลง ส่วนขนาดอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบนมีขนาดใหญ่ขึ้น อาจเนื่องมาจาก เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณกรวดทรายที่สะสมในกริตพอทมีจำนวนมากทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้ามาอนุภาคของแข็งในกริตพอทจึงเกิดการบั่นป่วน ส่งผลให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่มีโอกาสหลุดออกไปในเส้นทางการไหลออกด้านบนมากขึ้น อีกทั้งทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของกรวดทรายลดลงอีกด้วย ดังนั้น เพื่อลดปัญหาจึงควรเพิ่มปริมาตรของกริตพอทหรือปล่อยทิ้งตะกอนในกริตพอทออก เมื่อกริตพอทเริ่มเต็ม

แต่อย่างไรก็ดี เมื่อนำ กริตพอทไปติดตั้งที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ทำให้กรวดทรายที่สะสมในกริตพอทมีความเข้มข้นสูงมาก ดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 4.1.3 ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายจะลดลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

#### 4.6 เปรียบเทียบการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ

ในงานวิจัยนี้พิจารณาถึงมวลของกรวดทรายที่แยกได้ระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ โดยใช้ข้อมูลความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ในหัวข้อที่ 4.1 คูณกับอัตราการไหลเข้าจริง ผลการคำนวณที่ได้จะอยู่ในรูปของมวล หน่วยน้ำหนักต่อเวลา จากนั้นทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลของถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ ณ โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ซึ่งมีขนาด  $3.2 \times 9.45 \times 5.2$  เมตร โดยนำข้อมูลมาคำนวณหาปริมาตรของกรวดทราย พบว่ามีค่าประมาณ 3.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน คำนวณโดยอ้างอิงจาก Metcalf & Eddy, 2003 (รายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง ) และคำนวณจากปริมาตรจริงในโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ผลการคำนวณแสดงดัง ตารางที่ 4.8 ซึ่งเปรียบเทียบมวลของกรวดทรายที่ถูกแยกออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่สภาวะความดัน 1 บาร์ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที กับมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ ณ โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง เมื่ออัตราการไหลเข้าเท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทกับถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ

มวลของกรวดทรายที่แยกได้ ( กรัมต่อนาที)	
ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท	ถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ
3,465	3,890

จากผลการคำนวณในตารางที่ 4.8 พบว่า มวลของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ ณ โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง มีค่าเท่ากับ 3,890 กรัมต่อนาที (ความหนาแน่นของกรวดทรายเท่ากับ 1,600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และผลการวิเคราะห์หาความเข้มข้นของกรวดทรายที่วัดในรูปของของแข็งคงตัว มีค่าเท่ากับ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร

เมื่อเปรียบเทียบกับมวลของกรวดทรายที่ถูกแยกออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.8 พบว่า มวลของกรวดทรายที่ถูกแยกออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าน้อยกว่ามวลของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศเล็กน้อย นอกจากนี้ จากการสังเกตยังพบว่า มวลของกรวดทรายที่ไฮโดรไซโคลนแยกได้ น่าจะมีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ปะปนมา น้อยกว่ามวลที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ เนื่องจากแรงเฉือนในไฮโดรไซโคลนมีค่ามากกว่า อีกทั้งความเข้มข้นของกรวดทรายก็มีค่าสูงกว่ามาก จึงสะดวกในการนำกรวดทรายไปกำจัดต่อไป

#### 4.6.1 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ

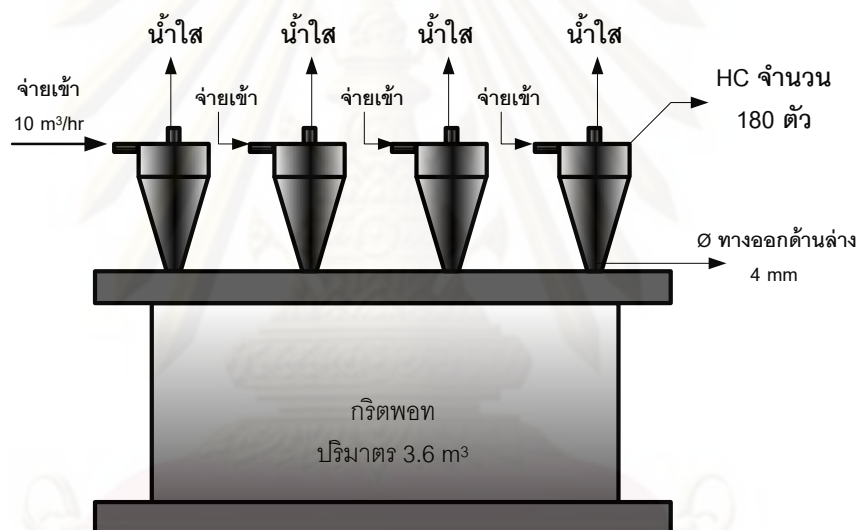
เมื่อคำนวณค่าไฟฟ้าโดยใช้อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU) ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด เท่ากับ 2.695 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง อัตราการไหลเข้าของน้ำเสียสูงสุด 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังตารางที่ 4.9 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ) พบว่า ไฮโดรไซโคลนสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายต่อวัน มากกว่าถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศที่ต้องเปลืองพลังงานในการเติมอากาศและมีค่าใช้จ่ายสูง

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าไฟฟ้าระหว่างไฮโดรไซโคลนกับถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ

ค่าไฟฟ้า ( บาทต่อลูกบาศก์เมตรน้ำเสีย )	
ไฮโดรไซโคลน	ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ
0.44	2.33

ดังนั้นไฮโดรไซโคลนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการกำจัดกรวดทราย ออกจากน้ำเสียชุมชน เนื่องจากไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็ก จึงติดตั้งได้ง่าย ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง จึงเหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียในชุมชนที่มีปัญหาเรื่องพื้นที่ อีกทั้งไฮโดรไซโคลนยังมีประสิทธิภาพสูงอีกด้วย ผู้วิจัยจึงคาดหวังว่าไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทจะสามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ได้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนต่อไป

จากงานวิจัยนี้ สามารถออกแบบไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทเพื่อใช้ในการกำจัดกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนได้จริงในโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง ซึ่งมีอัตราการไหลเข้าของน้ำเสียชุมชน 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยเลือกใช้พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนมากที่สุด นั่นคือ ประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท ซึ่งสามารถรับอัตราการไหลของน้ำเสียได้สูงสุด 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ดังนั้นจึงเลือกใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท จำนวน 180 ตัว ต่อขนานกัน และติดตั้งกริตพอทปริมาตร 3.6 ลูกบาศก์เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.30 เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 30 นาที (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวกง)



รูปที่ 4.30 แสดงลักษณะการประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนโดยการต่อแบบขนาน และติดตั้งกริตพอทเพื่อกำจัดกรวดทรายในโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง

อย่างไรก็ตาม การคำนวณหาจำนวนไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทที่ใช้ในการกำจัดกรวดทรายเป็นเพียงแนวคิดเท่านั้น หากต้องการใช้ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทจริงจะต้องคำนึงถึง การติดตั้งไฮโดรไซโคลน กริตพอท ระบบท่อในการจ่ายน้ำเข้า -ออกไฮโดรไซโคลนและอื่นๆอีก มากมาย



## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทมาใช้ในการแยกกรวด ททรายออกจากน้ำเสียชุมชนและผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 75 มิลลิเมตร ส่วนที่สองทำการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ซึ่งทั้งสองระบบ ควบคุมความดันเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน 4 ค่า คือ 0.5-3 บาร์ และเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4, 6, 9 และ 10 มิลลิเมตร สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร และ 8, 10 และ 12 มิลลิเมตร สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ในส่วนของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทจะทดลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท คือ 15-360 นาที

##### 5.1.1 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน

###### ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุดเท่ากับ 86 เปอร์เซ็นต์ และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของกรวดทรายที่วัดในรูปของของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีค่ามากกว่าความเข้มข้นของกรวดทรายที่จ่ายเข้าและที่แยกออกทางออกด้านบน

###### ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

เมื่อทดลองนำกริตพอทมาติดตั้งที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ทำให้อุณหภูมิของแข็งที่ถูกแยกออกจากรวมไฮโดรไซโคลนที่ทางออกด้านล่างไหลเข้าสู่กริตพอทและเกิดการตกตะกอนสะสมอยู่ภายในทำให้ความเข้มข้นของอนุภาคภายในกริตพอทเพิ่มขึ้น โดยประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรและ 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท มีค่าสูงสุดเท่ากับ 68 เปอร์เซ็นต์ และ 67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา กับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท พบว่า ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทมีประสิทธิภาพน้อยกว่า ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ แต่ไฮโดรไซโคลน ที่ติดตั้งกริตพอทมีความเข้มข้นของกรวดทรายที่สะสมในกริตพอทมากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 200 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบการแยกกรวดทรายระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทกับถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศในแง่ของมวล ลของกรวดทรายที่แยกได้ พบว่า มวล ของกรวดทรายที่ถูกแยกออกที่ทางออกด้านล่างและตกตะกอนอยู่ภายในกริตพอทมีค่าน้อยกว่ามวลของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศเพียงเล็กน้อย แต่ความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทมีค่าสูงกว่าถึง 3 เท่า จึงสะดวกต่อการนำไปกำจัดต่อไป

ดังนั้น อาจกล่าวได้ว่า ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้แทนที่ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ เนื่องจากมีขนาดเล็ก จึงประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง เหมาะสำหรับการบำบัดน้ำเสียในตัวเมืองที่มีข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายสูงและมีความเข้มข้นมาก นอกจากนี้ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทไม่มีการเติมอากาศ เหมือนกับถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศที่นิยมใช้ในปัจจุบัน จึงสามารถประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ อีกทั้งยังสามารถแก้ปัญหาน้ำเสียหลังจากถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศมีปริมาณออกซิเจนละลายสูงก่อนเข้าสู่กระบวนการแยกทิวเต็ดสไลด์จ์แบบ A/O อีกด้วย

### 5.1.2 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลน

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายมากที่สุดคือ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท กล่าวคือ

การเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วและประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น รวมไปถึงความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกออกทางด้านล่าง มวลของกรวดทรายที่แยกออกทางด้านล่างสำหรับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา และมวลของกรวดทรายที่สะสมอยู่ภายในกริตพอทสำหรับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

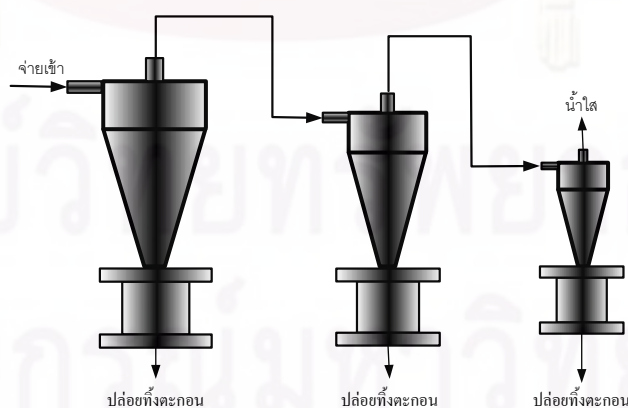
การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ทำให้ความ เหมเร็วล์พธ์ของอนุภาคใน ไฮโดรไซโคลนและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพ ในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทำให้ความเข้มข้นของ กรวดทรายมีค่ามากขึ้น แม้ว่าอัตราการไหลออกทางออกด้านล่างจะลดลง จึงส่งผลให้ ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น

เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทราย จะลดลง เนื่องจากลักษณะน้ำเสียที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีปริมาณกรวดทรายอยู่จำนวนมาก เมื่อ เวลาที่ใช้ในกริตพอทเพิ่มมากขึ้น ปริมาณกรวดทรายที่สะสมในกริตพอทก็จะมีค่าเข้มข้นมากขึ้น ทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ที่เข้ามา ดังนั้น อนุภาคของแข็งจึงมีโอกาสไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทลดลง เพื่อ ลด ปัญหาดังกล่าวจึงควรเพิ่มปริมาตรของกริตพอทหรือปล่อยทิ้งตะกอนในกริตพอทออกเมื่อกริตพอท เริ่มเต็ม

## 5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

จากผลการวิจัยนี้ พบว่า ทางออกด้านบนยังมีอนุภาคขนาดใหญ่ปะปนอยู่ ดังนั้น อาจ ประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทโดยการต่อแบบอนุกรม โดย ปล่อยน้ำเสียเข้าสู่ ไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ก่อนเพื่อลดปัญหาการอุดตัน ดังแสดงในรูปที่ 5.1 อีกทั้งยังต้องปรับปรุง และพัฒนาให้ใช้งานได้จริงในงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมต่อไป



รูปที่ 5.1 ประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทโดยการต่อแบบอนุกรม

## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค . วิธีคิดค่าไฟฟ้าอัตรา TOU และ TOD [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.pea.co.th/th/rates/rates\\_tou\\_tod\\_ft.htm](http://www.pea.co.th/th/rates/rates_tou_tod_ft.htm) [12 มิถุนายน 2552]

ธงชัย พรรณสวัสดิ์ , วีรวรรณ ปัทมาภีรัต , จิรายุ พรพิสุทธิวรกุล , ชัยยา เจริญจิตรธรรม , สมชาติ อัครจิตานนท์ และ ชัยวัฒน์ เครือชะเอม . น้ำเสียชุมชนและปัญหามลภาวะทางน้ำในเขต กทม.และปริมณฑล. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย . 2530, อ้างถึงใน ธงชัย พรรณสวัสดิ์ . การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสทางชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2544.

บริษัท โกลบอล ยูทิลิตี้ เซอร์วิส จำกัด. หน่วยปฏิบัติงานโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.gusco.co.th/th\\_operation\\_dindaeng.asp](http://www.gusco.co.th/th_operation_dindaeng.asp) [20 กรกฎาคม 2552]

สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย. รายละเอียดสนับสนุนเกณฑ์แนะนำการออกแบบระบบรวบรวมน้ำเสียและโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำของชุมชน. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2546.

สำนักงานจัดการคุณภาพน้ำ. ผลการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำของโรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : [http://www.dds.bma.go.th/News\\_dds/information/dindaeng51.html](http://www.dds.bma.go.th/News_dds/information/dindaeng51.html) [18 กุมภาพันธ์ 2552]

### ภาษาอังกฤษ

APHA, AWWA, and WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater., 20<sup>th</sup> Edition. Washington D.C: American Public Health Association, 2005.



Bradley, D. The Hydrocyclone., Volume 4. first Edition. London: Pergamon Press Ltd, 1965.

Burt, M. C. and Thomas, P. R. Analysis of the hydrocyclone stock cleaning process for wasted fibre in a paper mill. Journal of Cleaner Production 10 (2002): 573-579.

Castilho, L. R. and Medronho, R. A. A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and Rietema Hydrocyclone. Mineral Engineering 13 (2000): 183-191.

Chu, L. Y., Chen, W. M., and Lee, X. Z. Effects of geometric and operating parameters and feed characters on the motion of solid particles in hydrocyclones. Separation and Purification Technology 26 (2002): 237-246.

Cilliers, J. J., Diaz-Anadon, L. and Wee, F. S. Temperature, Classification and dewatering in 10 mm hydrocyclones. Mineral Engineering 17 (2004): 591-597.

Kawatra, S. K., Bakshi, A. K. and Rusesky, M. T. The effect of slurry viscosity on hydrocyclone classification. International Journal of Mineral Processing 48 (1996): 39-50.

Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater Engineering Treatment and Reuse., 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill series in civil and environmental engineering. New York: McGraw-Hill, 2003.

Pasquier, S. and Cilliers, J. J. Sub-micron particle dewatering using hydrocyclone. Chemical Engineering Journal 80 (2000): 283-288.

Puprasert, C., Hebrard, G., Lopez, L. and Aurelle, Y. Potential of using Hydrocyclone and Hydrocyclone equipped with Grit pot as pre-treatment in run-off water treatment. Chemical Engineering and Processing 43 (2004): 67-83.

Qasim, S. R. Wastewater treatment plants: Planing, design, and operation. USA: CBS College Publishing, 1985.

Schwerzler, G. I. Recycling of glaze waste through hydrocyclone separation. Powder Technology 160 (2005): 135-140.

Shah, H., Majumder, A. K. and Barnwal, J. P. Development of water split model for a 76 mm hydrocyclone. Minerals Engineering 19 (2006): 102-104.

Svaravsky, L. Hydrocyclone., Pennsylvania: Rinehart and Winston Ltd, 1984.

Yalcin, T., Kaukolin, E. and Byers, A. Axial inlet cyclone for mineral processing applications. Minerals Engineering 16 (2003): 1375-1381.

Yang, I. H., Shin, C. B., Kim, T.-H. and Kim, S. A three-dimensional simulation of a hydrocyclone for the sludge separation in water purifying plants and comparison with experimental data. Minerals Engineering 17 (2004): 637-641.



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็ง ( % Removal )

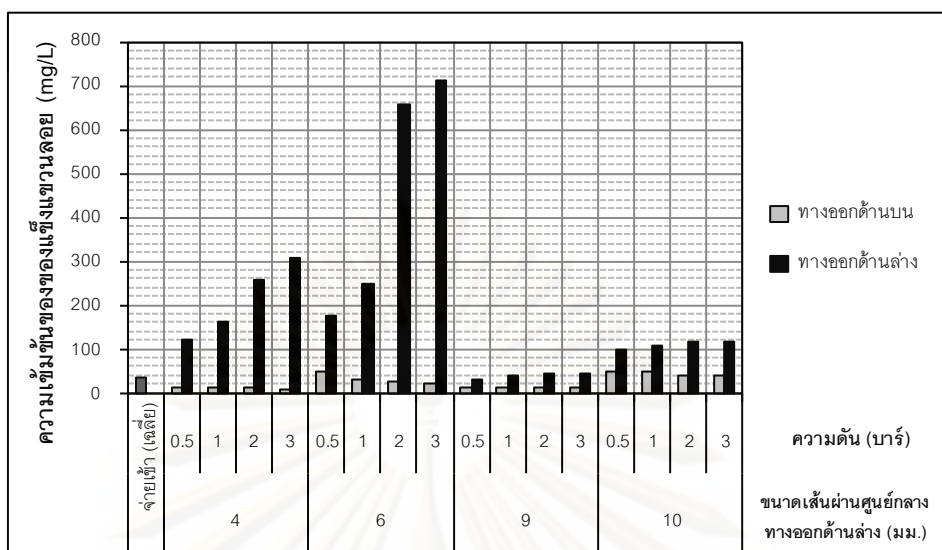
เช่น ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4 มิลลิเมตร ความดัน 3 บาร์ ที่ทางออกด้านบนมีค่าเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่จ่ายเข้ามีค่าเท่ากับ 16.33 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$\text{ดังนั้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดของแข็งแขวนลอย} = \frac{16.33 - 10}{16.33} \times 100 = 38.76 \text{ เปอร์เซ็นต์}$$

### ตารางที่ ก. 1. ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)

ตารางที่ ก. 1.1 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

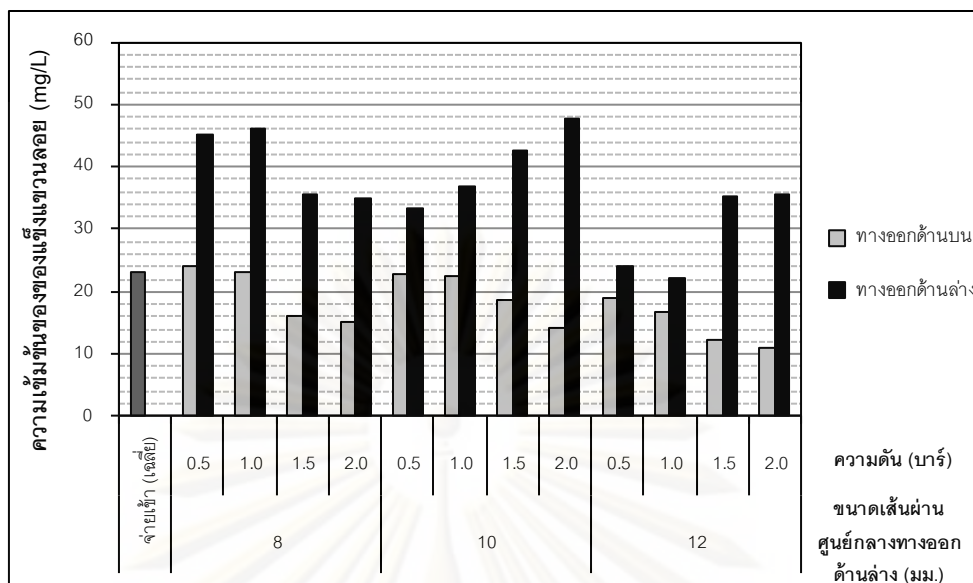
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดของแข็งแขวนลอย
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
4	0.5	19.00	15.00	124.00	21.05
	1	17.33	13.00	163.00	24.99
	2	17.33	12.00	260.00	30.76
	3	16.33	10.00	310.00	38.76
6	0.5	53.00	49.00	176.67	7.55
	1	38.00	32.00	252.00	15.79
	2	45.67	27.33	658.33	40.16
	3	43.00	23.00	712.33	46.51
9	0.5	17.67	14.00	34.00	20.77
	1	18.53	13.60	43.00	26.61
	2	18.33	13.20	43.20	27.99
	3	16.07	11.47	43.60	28.62
10	0.5	67.33	50.67	98.67	24.74
	1	68.00	49.67	110.67	26.96
	2	68.67	42.00	118.67	38.84
	3	70.00	40.67	118.67	41.90



รูปที่ ก-1 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก. 1.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ได้จากไฮโดรไซโคลน  
แบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ของแข็งแขวนลอย
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	29	24.00	45.33	17.24
	1	29.33	23.00	46.17	21.58
	1.5	20.17	16.00	35.67	20.67
	2	19.33	15.17	34.83	21.52
10	0.5	25.5	22.83	33.5	10.47
	1	26.33	22.50	36.83	14.55
	1.5	26.33	18.50	42.83	29.74
	2	24.5	14.17	47.83	42.16
12	0.5	22	19.00	24	13.64
	1	17.67	16.67	22.17	5.66
	1.5	18.33	12.17	35.33	33.61
	2	17.67	10.83	35.5	38.71



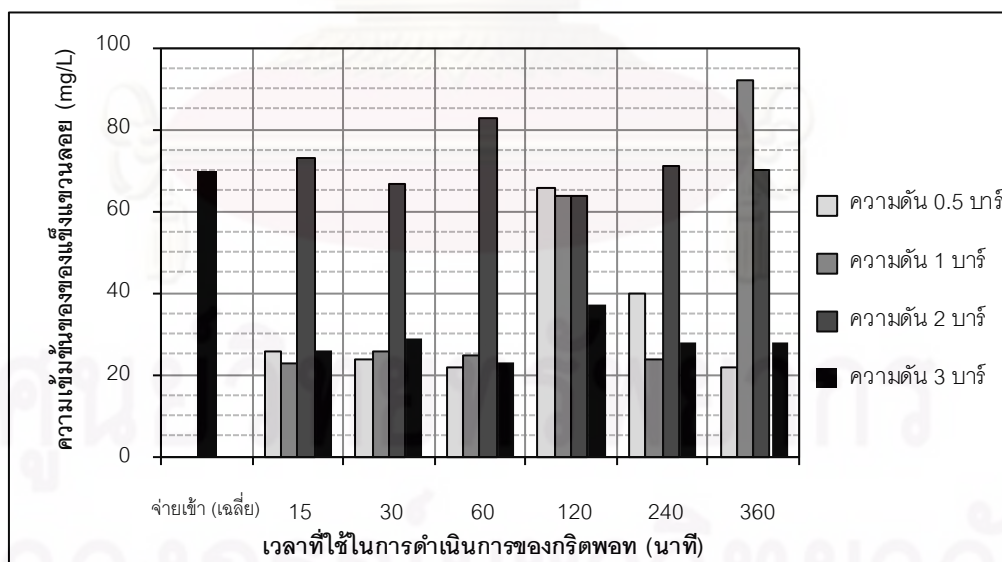
รูปที่ ก-2 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก. 1.3 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ของแข็งแขวนลอย
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
10	0.5	15	40	26	385	35.00
		30	41	24	711	41.46
		60	42	22	1,325	47.62
		120	98	66	7,886	32.65
		240	72	40	7,468	44.44
		360	41	22	6,630	46.34
10	1	15	31	23	774	25.81
		30	32	26	1,556	18.75
		60	32	25	2,380	21.87
		120	204	64	18,040	68.63
		240	39	24	5,375	38.46
		360	143	92	12,990	35.66

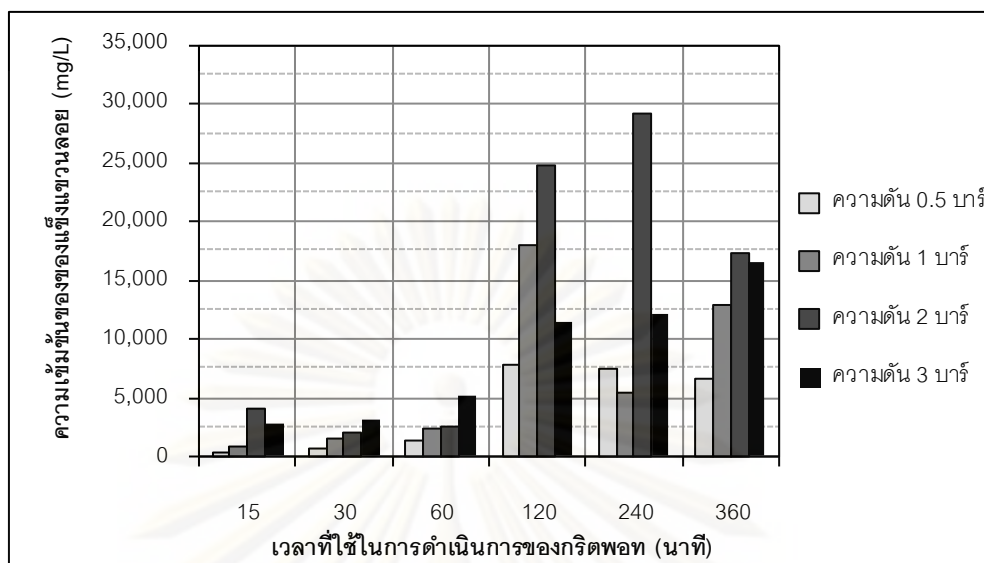
ตารางที่ ก. 1.3 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ของแข็งแขวนลอย
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
10	2	15	83	73	4,030	12.05
		30	88	67	2,075	23.86
		60	115	83	2,500	27.83
		120	143	64	24,760	55.24
		240	81	71	29,140	12.35
		360	96	70	17,290	27.08
10	3	15	52	26	2,785	50.00
		30	38	29	3,125	23.68
		60	30	23	5,020	23.33
		120	43	37	11,450	13.95
		240	44	28	12,100	36.36
		360	42	28	16,510	33.33



รูปที่ ก-3 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน





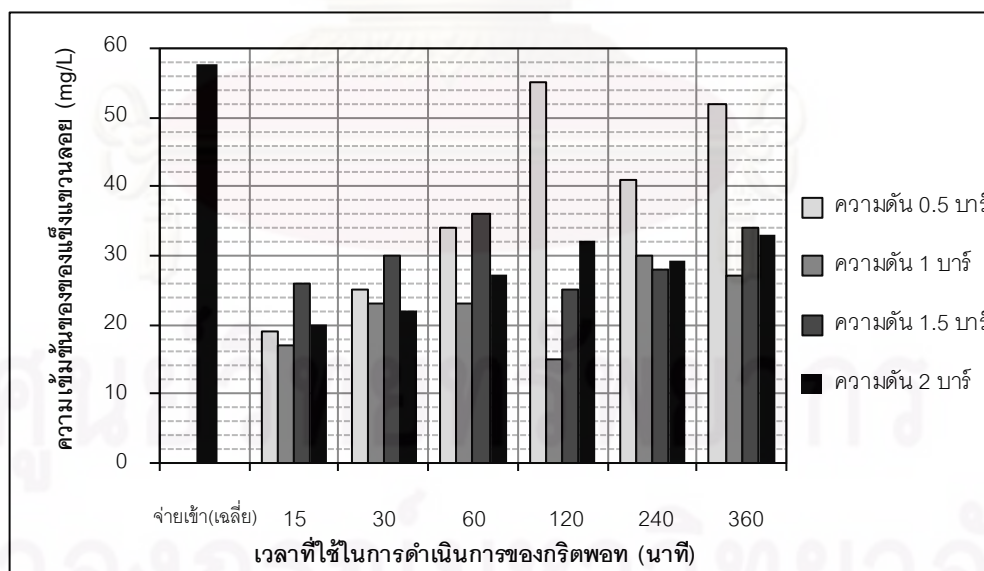
รูปที่ ก-4 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านล่าง

ตารางที่ ก. 1.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของ ของแข็งแขวนลอยที่ได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

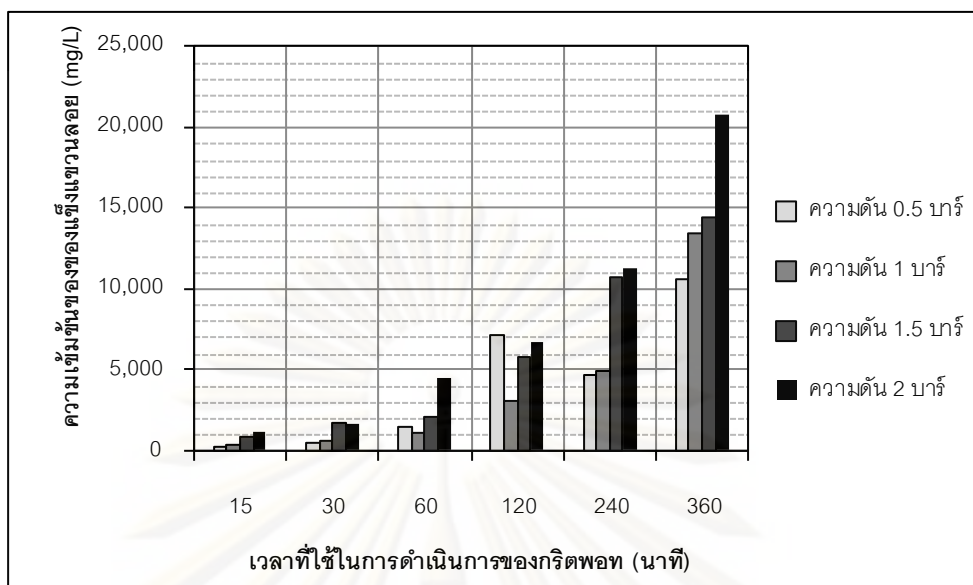
ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการ ดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดของแข็ง แขวนลอย
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
10	0.5	15	33	19	230	42.42
		30	44	25	520	43.18
		60	56	34	1,500	39.29
		120	96	55	7,190	42.71
		240	59	41	4,730	30.51
		360	74	52	10,530	29.73
10	1	15	37	17	390	54.05
		30	42	23	600	45.24
		60	48	23	1,050	52.08
		120	43	15	3,140	65.12
		240	49	30	4,970	38.78
		360	43	27	13,460	37.21

ตารางที่ ก. 1.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่ได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดของแข็งแขวนลอย
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
10	1.5	15	61	26	910	57.38
		30	67	30	1,750	55.22
		60	71	36	2,060	49.30
		120	56	25	5,780	55.36
		240	65	28	10,730	56.92
		360	71	34	14,380	52.11
10	2	15	51	20	1,170	60.78
		30	53	22	1,570	58.49
		60	54	27	4,400	50.00
		120	64	32	6,660	50.00
		240	61	29	11,210	52.46
		360	65	33	20,790	49.23



รูปที่ ก-5 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน



รูปที่ ก-6 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอด ที่ทางออกด้านล่าง

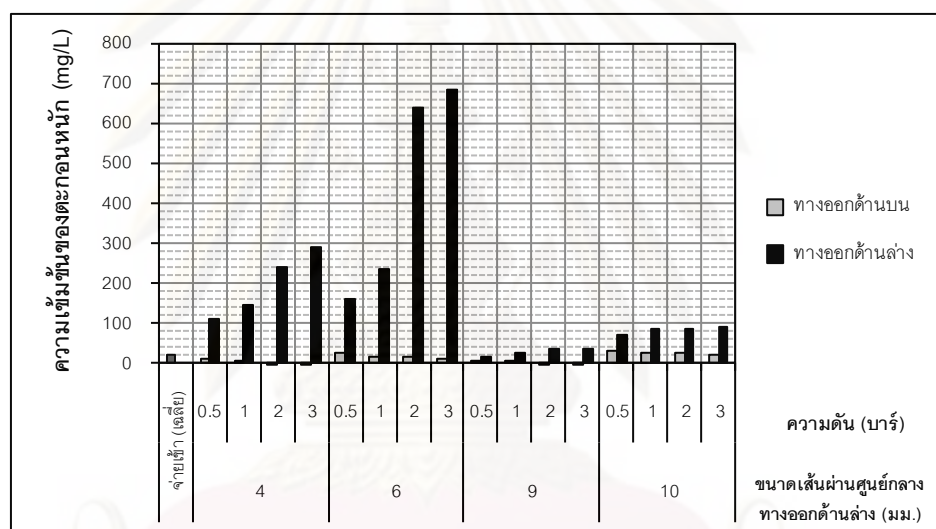
## ตารางที่ ก. 2. ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (Settleable Solids)

ตารางที่ ก. 2.1 ผลการทดลอง หาความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ได้จากไฮโดรไซโคลอนแบบ ธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ตะกอนหนัก
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
4	0.5	11.00	9.67	108.27	12.09
	1	7.33	5.53	144.60	24.56
	2	5.40	2.40	240.93	55.56
	3	5.67	2.00	292.13	64.73
6	0.5	31.93	27.00	160.27	15.44
	1	21.40	19.07	236.67	10.89
	2	27.87	17.73	639.66	36.38
	3	29.50	11.89	686.33	59.69
9	0.5	7.33	6.80	17.33	7.23
	1	8.40	6.27	23.40	25.36
	2	6.67	3.87	32.80	41.98
	3	6.27	3.60	32.80	42.58

ตารางที่ ก. 2.1 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ได้จากไฮโดรไซโคลนแบบ  
ธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ตะกอนหนัก
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
10	0.5	37.33	31.34	70.00	16.05
	1	39.67	29.34	82.67	26.04
	2	41.00	25.33	86.67	38.22
	3	39.67	23.00	89.00	42.02



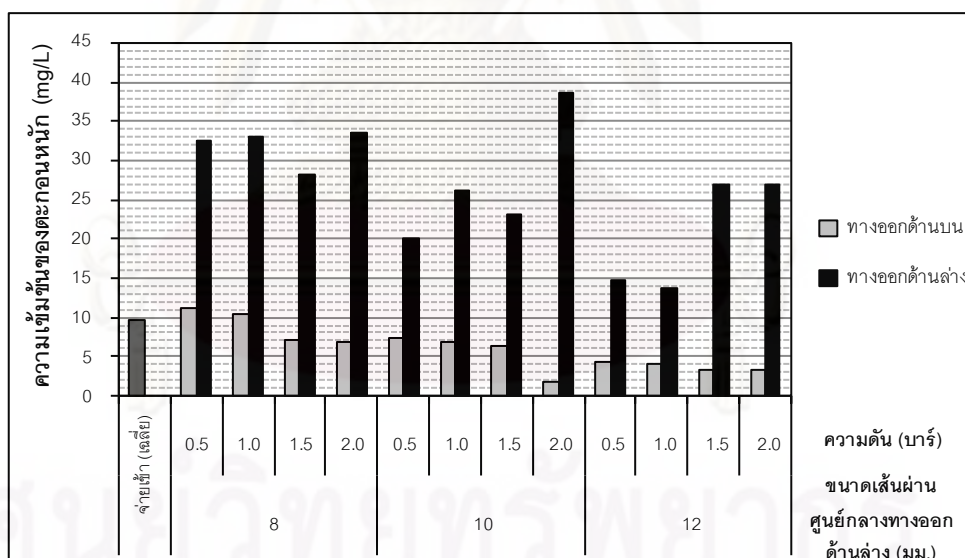
รูปที่ ก-7 ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก. 2.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ได้จากไฮโดรไซโคลนแบบ  
ธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ตะกอนหนัก
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	15.13	11.20	32.66	25.97
	1	14.46	10.33	32.97	28.56
	1.5	11.30	7.20	28.34	36.28
	2	9.46	6.90	33.50	27.06
10	0.5	8.87	7.33	20.03	17.36
	1	10.67	6.87	26.30	35.61
	1.5	9.13	6.37	23.10	30.23
	2	9.03	1.87	38.76	79.29
12	0.5	6.63	4.20	14.67	36.65
	1	6.34	4.00	13.64	36.91
	1.5	7.10	3.37	26.93	52.54
	2	6.87	3.36	26.97	51.09

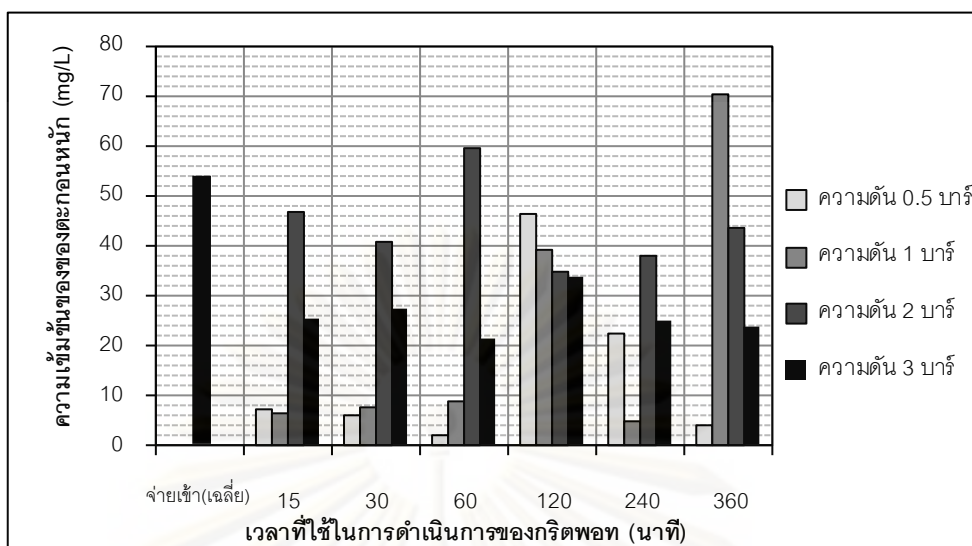


รูปที่ ก-8 ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

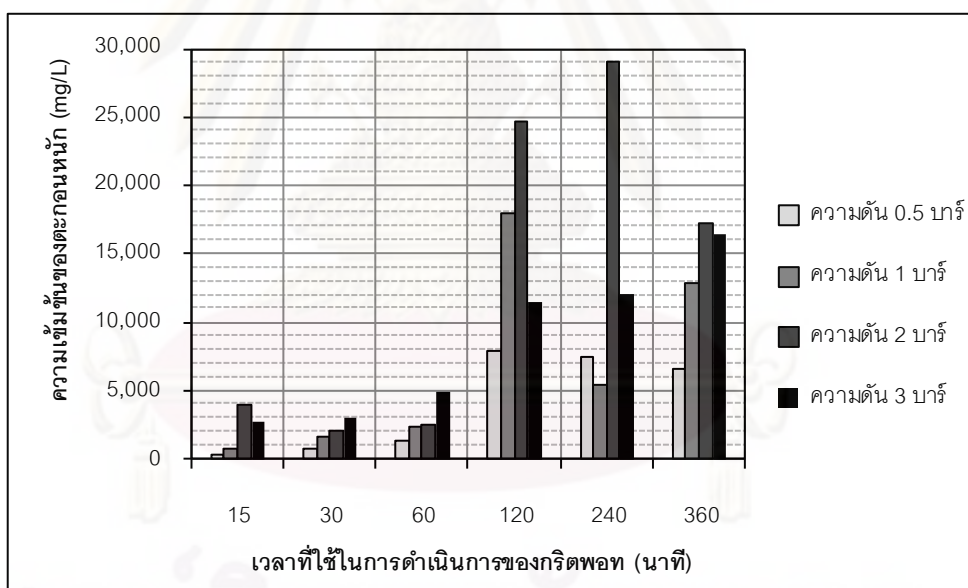
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก. 2.3 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดตะกอนหนัก
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
10	0.5	15	22.40	7.20	364	67.86
		30	21.40	6.00	690	71.96
		60	22.00	2.00	1,303	90.91
		120	78.80	46.40	7,858	41.12
		240	53.20	22.40	7,444	57.89
		360	22.60	4.00	6,606	82.30
10	1	15	13.40	6.20	755	53.73
		30	15.20	7.60	1,537	50.00
		60	12.00	8.60	2,359	28.33
		120	179.60	39.20	18,009	78.17
		240	19.00	4.80	5,354	74.74
		360	117.40	70.40	12,893	40.03
10	2	15	59.40	46.60	4,000	21.55
		30	59.60	40.60	2,049	31.88
		60	87.00	59.40	2,471	31.72
		120	114.60	34.80	24,667	69.63
		240	53.40	38.20	29,095	28.46
		360	78.80	43.60	17,247	44.67
10	3	15	50.40	25.20	2,783	50.00
		30	35.20	27.40	3,123	22.16
		60	28.80	21.40	5,012	25.69
		120	39.40	33.80	11,439	14.21
		240	40.40	24.80	12,089	38.61
		360	38.80	23.60	16,495	39.18



รูปที่ ก-9 ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน

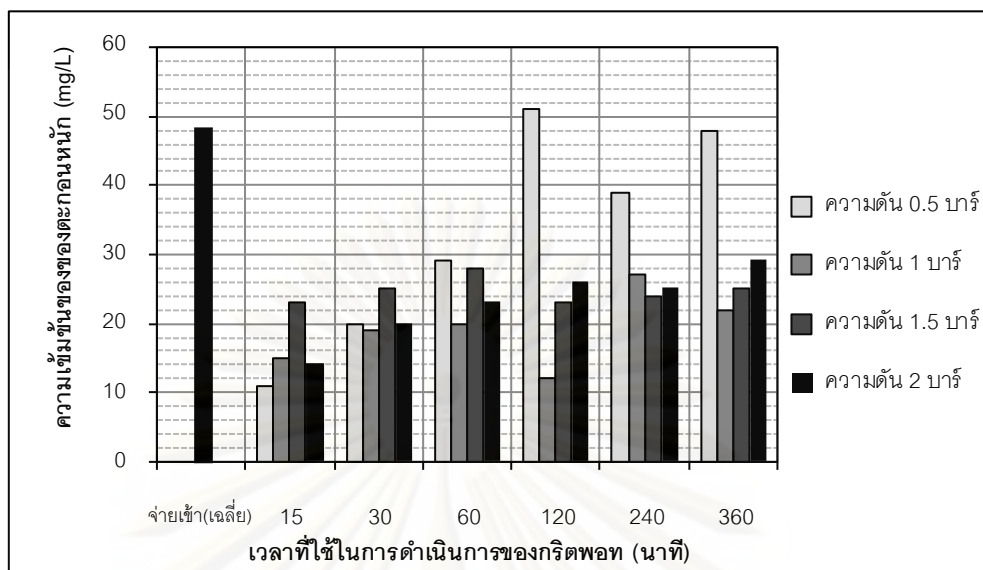


รูปที่ ก-10 ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านล่าง

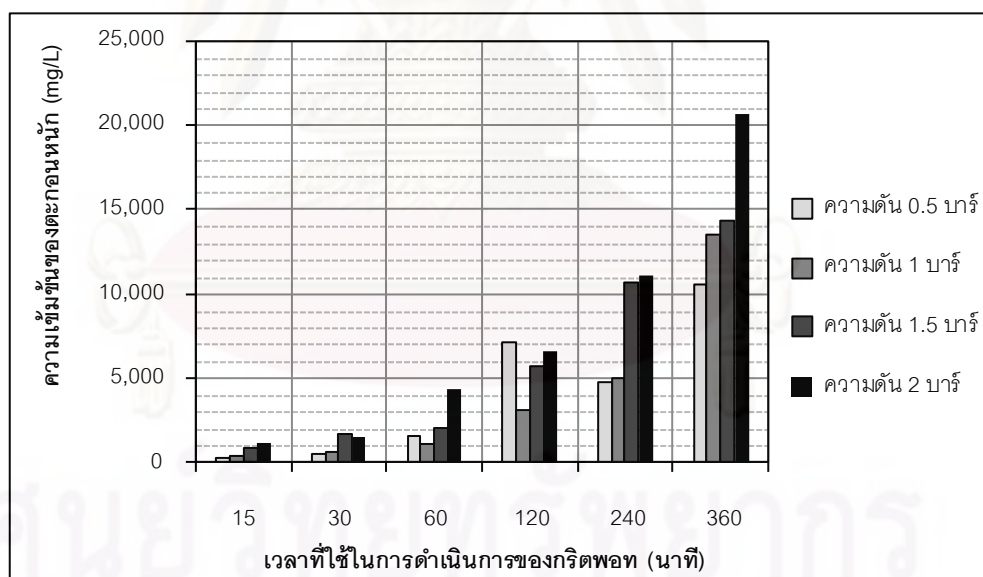
ตารางที่ ก. 2.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของตะกอนหนักที่ได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของตะกอนหนัก (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดตะกอนหนัก
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
10	0.5	15	28	11	215	60.71
		30	36	20	496	44.44
		60	49	29	1,487	40.82
		120	84	51	7,152	39.29
		240	57	39	4,721	31.58
		360	69	48	10,514	30.43
10	1	15	31	15	375	51.61
		30	35	19	549	45.71
		60	37	20	1,023	45.95
		120	39	12	3,127	69.23
		240	43	27	4,949	37.21
		360	37	22	13,451	40.54
10	1.5	15	53	23	874	56.60
		30	56	25	1,687	55.36
		60	58	28	2,020	51.72
		120	48	23	5,730	52.08
		240	47	24	10,720	48.94
		360	54	25	14,338	53.70
10	2	15	46	14	1,140	69.57
		30	41	20	1,530	51.22
		60	47	23	4,348	51.06
		120	53	26	6,625	50.94
		240	56	25	11,195	55.36
		360	58	29	20,755	50.00





รูปที่ ก-11 ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน

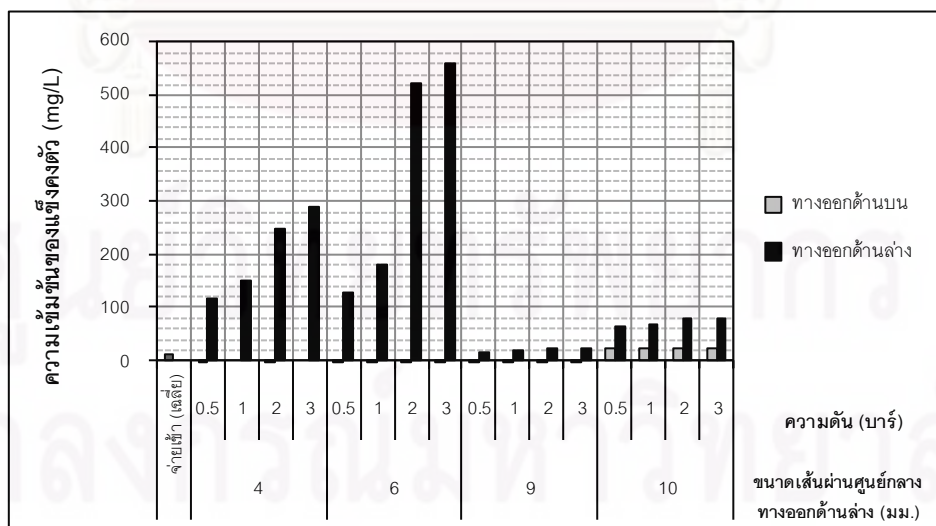


รูปที่ ก-12 ความเข้มข้นของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านล่าง

ตารางที่ ก. 3. ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (Fixed Solids)

ตารางที่ ก. 3.1 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งคงตัว ที่ได้จากไฮโดรไลโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

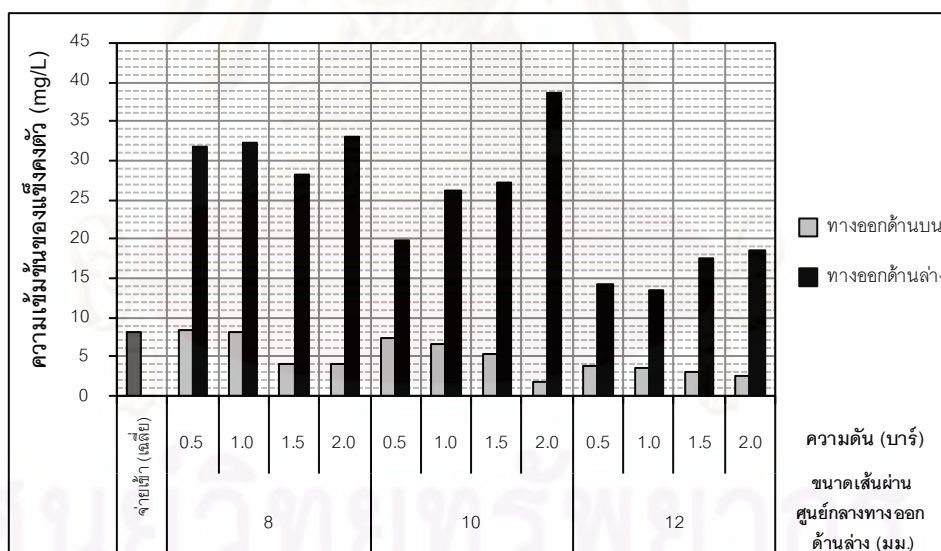
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดของแข็งคงตัว
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
4	0.5	2.00	1.00	117.00	50.00
	1	2.36	0.00	149.00	100.00
	2	4.00	1.00	248.00	75.00
	3	4.67	0.00	289.00	100.00
6	0.5	5.33	1.33	126.33	75.05
	1	6.13	1.33	180.67	78.30
	2	15.13	1.00	522.67	93.39
	3	17.00	1.33	558.33	92.18
9	0.5	2.67	1.67	13.33	37.45
	1	2.67	0.40	17.00	85.02
	2	2.67	0.13	23.20	95.13
	3	2.43	0.13	22.13	94.65
10	0.5	27.67	23.00	62.00	16.88
	1	30.33	23.00	68.00	24.17
	2	35.00	22.00	78.33	37.14
	3	34.67	21.67	78.67	37.50



รูปที่ ก-13 ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไลโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ ก. 3.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งคงตัว ที่ได้จากไฮโดรไซโคลนแบบ  
ธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัด ของแข็งคงตัว
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	10.50	8.33	31.83	20.63
	1	9.33	8.17	32.17	12.43
	1.5	7.00	4.17	28.17	40.43
	2	6.00	4.00	33.17	33.33
10	0.5	9.00	7.33	19.83	18.56
	1	10.17	6.67	26.17	34.41
	1.5	10.00	5.33	27.17	46.70
	2	11.17	1.67	38.67	85.05
12	0.5	5.83	3.83	14.33	34.31
	1	5.50	3.67	13.50	33.27
	1.5	6.50	3.00	17.50	53.85
	2	6.17	2.50	18.50	59.48

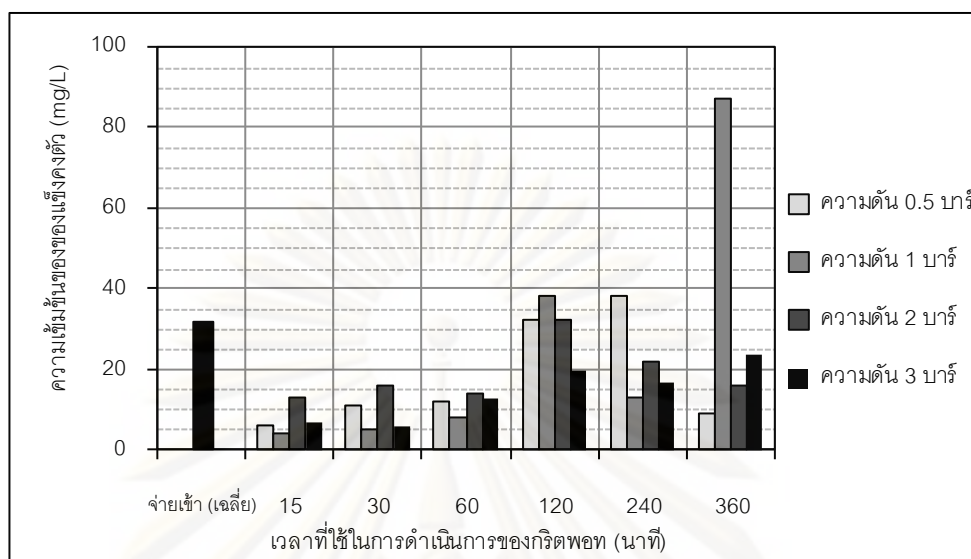


รูปที่ ก-14 ความเข้มข้นของของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

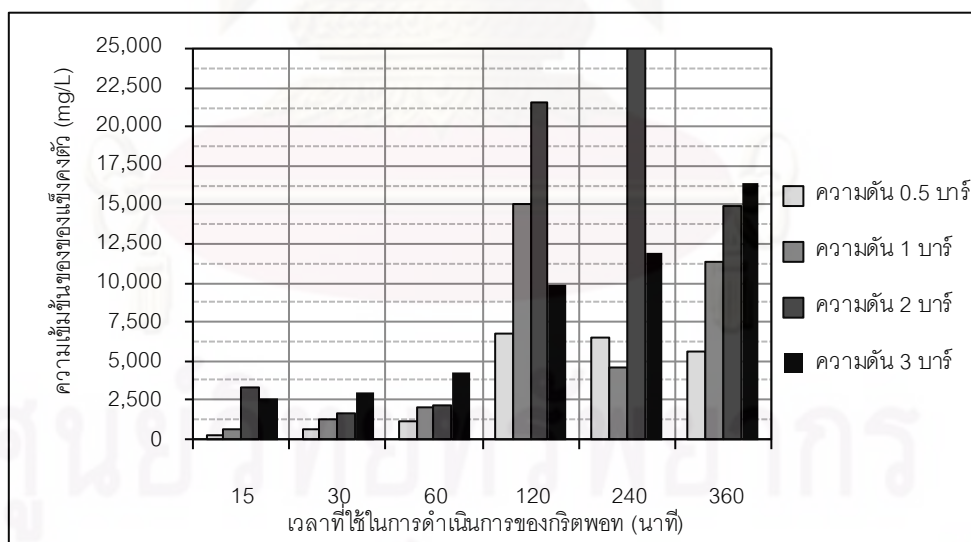
ตารางที่ ก. 3.3 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งคั่งตัว ที่ได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งคั่งตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดของแข็งคั่งตัว
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
10	0.5	15	12	6	309	50.00
		30	19	11	583	42.11
		60	22	12	1,090	45.45
		120	50	32	6,790	36.00
		240	48	38	6,560	20.83
		360	13	9	5,560	30.77
10	1	15	9	4	629	55.56
		30	10	5	1,283	50.00
		60	13	8	2,020	38.46
		120	80	38	15,085	52.50
		240	20	13	4,540	35.00
		360	113	87	11,360	23.01
10	2	15	40	13	3,340	67.50
		30	36	16	1,680	55.56
		60	36	16	2,105	55.56
		120	61	32	21,500	47.54
		240	33	22	24,980	33.33
		360	18	16	14,880	11.11
10	3	15	16	7	2,735	56.25
		30	10	6	3,025	40.00
		60	20	13	4,400	35.00
		120	34	20	10,000	41.18
		240	24	17	12,030	29.17
		360	26	21	16,430	19.23





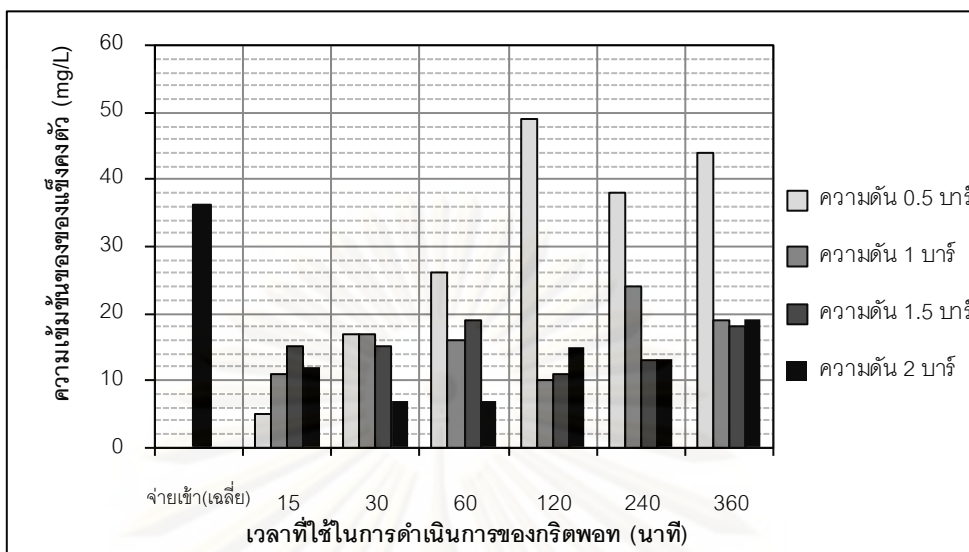
รูปที่ ก-15 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอด ที่ทางออกด้านบน



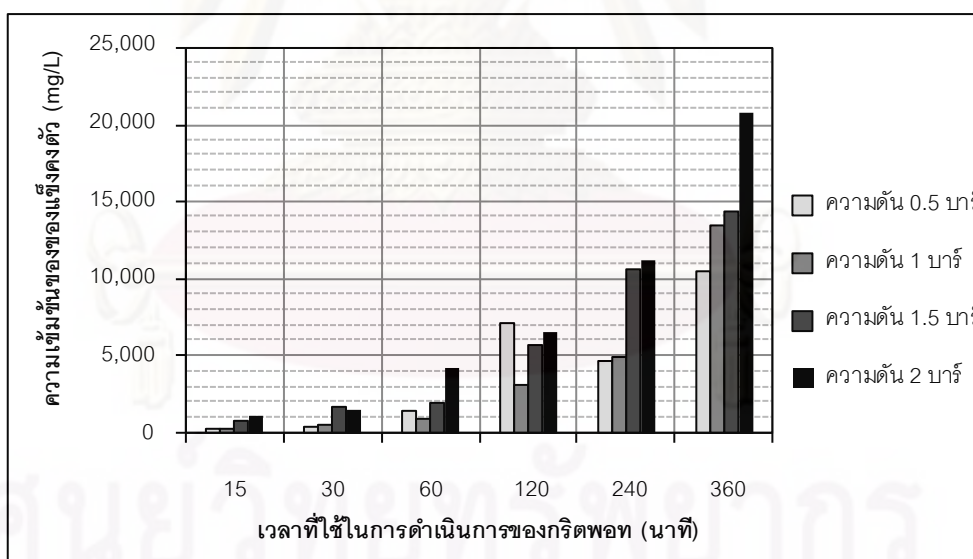
รูปที่ ก-16 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอด ที่ทางออกด้านล่าง

ตารางที่ ก. 3.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของของแข็งคั่งตัว ที่ได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งคั่งตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)			% การกำจัดของแข็งคั่งตัว
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
10	0.5	15	11	5	210	54.55
		30	32	17	450	46.87
		60	44	26	1,470	40.91
		120	77	49	7,140	36.36
		240	53	38	4,690	28.30
		360	62	44	10,490	29.03
10	1	15	24	11	300	54.17
		30	31	17	510	45.16
		60	28	16	970	42.86
		120	17	10	3,090	41.18
		240	40	24	4,890	40.00
		360	28	19	13,430	32.14
10	1.5	15	45	15	840	66.67
		30	39	15	1,650	61.54
		60	46	19	1,950	58.70
		120	26	11	5,690	57.69
		240	30	13	10,670	56.67
		360	36	18	14,320	50.00
10	2	15	35	12	1,110	65.71
		30	32	12	1,490	62.50
		60	32	14	4,300	56.25
		120	36	15	6,590	58.33
		240	31	13	11,150	58.06
		360	37	19	20,730	48.65



รูปที่ ก-17 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านบน



รูปที่ ก-18 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่ทางออกด้านล่าง

ตารางที่ ก. 4. ขนาดอนุภาค (Particles Size)

ตารางที่ ก. 4.1 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่ได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)		
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
4	0.5	52.75	42.02	82.01
	1	60.77	48.91	98.52
	2	63.59	53.27	98.68
	3	57.14	48.87	94.53
6	0.5	39.11	29.21	61.64
	1	43.83	33.22	69.90
	2	33.57	26.10	54.82
	3	24.35	20.41	39.95
9	0.5	37.26	19.08	56.95
	1	34.68	17.26	57.96
	2	25.64	21.52	41.16
	3	28.74	24.65	46.72
10	0.5	27.58	21.08	34.43
	1	28.54	22.43	40.85
	2	28.92	22.82	42.84
	3	26.20	22.49	39.77

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ ก. 4.2 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่ได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)		
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
8	0.5	41.58	38.58	48.20
	1	34.73	32.88	43.54
	1.5	42.37	39.32	52.14
	2	37.45	35.52	50.63
10	0.5	33.17	28.23	42.00
	1	28.69	24.68	37.50
	1.5	24.35	20.90	33.71
	2	33.36	30.88	47.00
12	0.5	74.16	61.87	80.28
	1	72.90	61.26	83.70
	1.5	60.41	49.22	99.06
	2	70.84	59.69	89.70

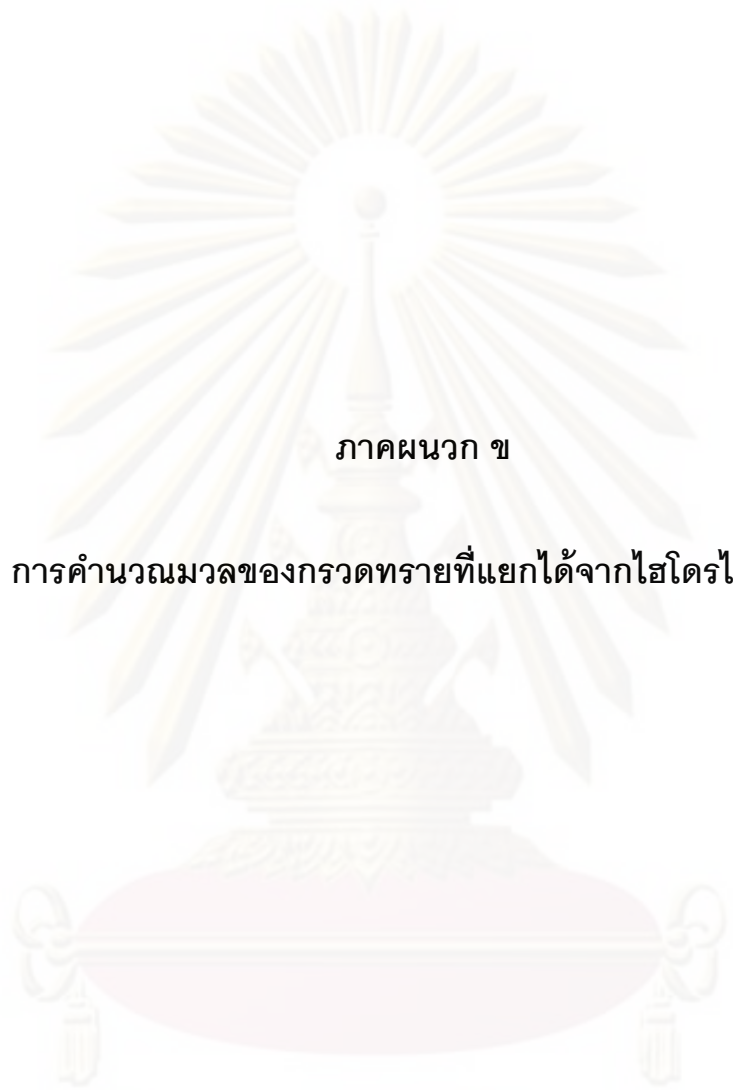
ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 4.3 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่ได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)		
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
10	0.5	15	28.05	17.77	106.89
		30	34.38	22.09	93.59
		60	28.86	18.60	92.50
		120	50.10	32.54	77.54
		240	59.39	38.12	80.33
		360	57.74	45.75	83.88
10	1	15	15.14	13.16	58.81
		30	21.41	18.53	61.46
		60	39.63	25.91	62.51
		120	25.65	22.54	91.11
		240	41.55	35.89	73.71
		360	40.97	39.07	71.89
10	2	15	46.94	35.16	65.70
		30	49.15	37.94	59.85
		60	47.27	43.12	55.52
		120	55.53	51.24	97.77
		240	22.16	19.86	41.45
		360	25.33	24.46	46.14
10	3	15	32.97	24.19	55.97
		30	40.45	32.62	57.91
		60	38.18	30.95	54.67
		120	46.88	37.26	58.19
		240	32.04	27.75	40.27
		360	42.74	37.68	46.15

ตารางที่ ก. 4.4 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่ได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)		
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
10	0.5	15	46.09	31.63	87.42
		30	43.95	29.56	79.62
		60	42.74	31.63	70.13
		120	53.87	40.07	71.85
		240	36.83	31.92	48.03
		360	39.18	33.95	51.60
10	1	15	42.75	32.81	87.46
		30	41.98	31.94	85.32
		60	42.84	33.04	81.74
		120	38.63	31.40	69.74
		240	40.38	32.91	60.38
		360	36.73	31.00	53.96
10	1.5	15	63.77	42.95	96.74
		30	60.09	41.84	90.31
		60	59.51	43.73	88.04
		120	43.84	34.10	73.69
		240	43.98	36.49	58.63
		360	38.97	30.31	51.09
10	2	15	47.52	28.58	68.94
		30	52.36	36.81	74.97
		60	43.72	34.97	64.55
		120	38.76	31.21	53.91
		240	51.82	43.75	62.72
		360	34.46	29.84	40.98



ภาคผนวก ข

การคำนวณมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การคำนวณมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

#### 1. ดุลมวล (Mass balance) ของมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

มวลที่เข้าไฮโดรไซโคลน = มวลที่ออกทางด้านบน + มวลที่ทางออกด้านล่าง

$$Q_f C_f = Q_o C_o + Q_u C_u \quad (1)$$

#### 2. ดุลมวล (Mass balance) ของมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

มวลที่เข้าไฮโดรไซโคลน = มวลที่ออกทางด้านบน + มวลที่สะสมอยู่ในกริตพอท

$$\text{มวลที่สะสมอยู่ในกริตพอท} = Q_f C_f T - Q_o C_o T \quad (2)$$

### ตัวอย่างการคำนวณมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

#### 1. ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4 มิลลิเมตร ความดัน 2 บาร์

##### 1.1 ดุลมวล (Mass balance) ในรูปของของแข็งคงตัว

##### 1.1.1 มวลเข้า (Feed mass)

จากสมการที่ (1) มวลเข้า (Feed mass) =  $Q_f C_f$

$$= 2.85 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 4 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}}$$

$$= 0.19 \text{ กรัมต่อนาที}$$

##### 1.1.2 มวลทางออกด้านบน (Overflow mass)

จากสมการที่ (1) มวลทางออกด้านบน (Overflow mass) =  $Q_o C_o$

$$= 2.81 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 1 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}}$$



$$= 0.05 \text{ กรัมต่อนาที}$$

### 1.1.3 มวลทางออกด้านล่าง (Underflow mass)

$$\text{จากสมการที่ (1) มวลทางออกด้านล่าง (Underflow mass) = } Q_u C_u$$

$$= 0.04 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 248 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}}$$

$$= 0.16 \text{ กรัมต่อนาที}$$

$$\% \text{ ความผิดพลาด} = \frac{(0.16 + 0.05) - 0.19}{0.19} \times 100 = 10.53\%$$

2. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร ความดัน 1 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที

## 2.1 ดุลมวล (Mass balance) ในรูปของของแข็งคงตัว

### 2.1.1 มวลเข้า (Feed mass)

$$\text{จากสมการที่ (2) มวลเข้า (Feed mass) = } Q_f C_f T$$

$$= 2.39 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 80 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 120 \text{ นาที} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}}$$

เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทผ่านไป 120 นาที พบว่า มีมวลจ่ายเข้า 382.4 กรัม ดังนั้น ในเวลา 1 นาที มีมวลจ่ายเข้า

$$= \frac{382.4 \text{ กรัม}}{120 \text{ นาที}}$$

$$= 3.19 \text{ กรัมต่อนาที}$$

### 2.1.2 มวลทางออกด้านบน (Overflow mass)

จากสมการที่ (2) มวลทางออกด้านบน (Overflow mass) =  $Q_o C_o T$

$$= 2.39 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 38 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 120 \text{ นาที} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ลิตร}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}}$$

เมื่อเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอทผ่านไป 120 นาที พบว่า มีมวลจ่ายเข้า 181.64 กรัม ดังนั้น ในเวลา 1 นาที มีมวลจ่ายเข้า

$$\begin{aligned} &= \frac{181.64 \text{ กรัม}}{120 \text{ นาที}} \\ &= 1.51 \text{ กรัมต่อนาที} \end{aligned}$$

### 2.1.3 มวลทางออกด้านล่าง (Underflow mass)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (2) มวลที่สะสมในกริตพอท} &= \text{มวลที่จ่ายเข้า} - \text{มวลที่ทางออกด้านบน} \\ &= 3.19 - 1.51 \\ &= 1.68 \text{ กรัมต่อนาที} \end{aligned}$$

เนื่องจาก ในการเก็บตัวอย่างที่ได้จากกริตพอทนั้นอาจมีปริมาณกรวดทรายในส่วนที่ค้างอยู่ในไฮโดรไซโคลนผสมมาด้วย จึงทำให้ผลไม่น่าเชื่อถือมากนัก ผู้วิจัยจึงใช้ผลมวลที่ทางออกด้านบนมาคำนวณมวลของกรวดทรายที่สะสมในกริตพอทแทน

### ตัวอย่างการคำนวณ % การแยกมวลของแข็งคงตัวจากไฮโดรไซโคลนในหัวข้อที่ 4.2.3

#### 1. ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

$$\text{มวลของแข็งคงตัวจ่ายเข้า} = 2.00 \text{ กรัมต่อนาที}$$

$$\text{มวลของแข็งคงตัวที่ทางออกด้านล่าง} = 1.57 \text{ กรัมต่อนาที}$$

$$\text{ดังนั้น \% การแยก} = \frac{(1.57 \times 100)}{2.00} = 78.5 \%$$

## 2. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตรที่ติดตั้งกริตพอท

มวลของแข็งคงตัวจ่ายเข้า = 3.20 กรัมต่อนาที

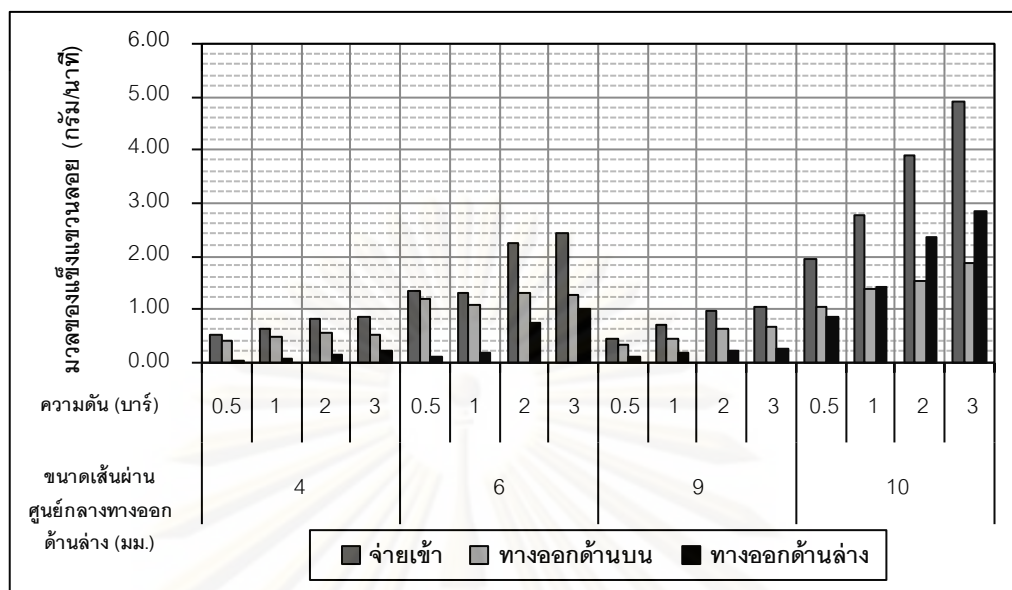
มวลของแข็งคงตัวที่สะสมในกริตพอท = 1.52 กรัมต่อนาที

$$\text{ดังนั้น \% การแยก} = \frac{(1.52 \times 100)}{3.20} = 47.5 \%$$

### ตารางที่ ข. 1. มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ ข. 1.1 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

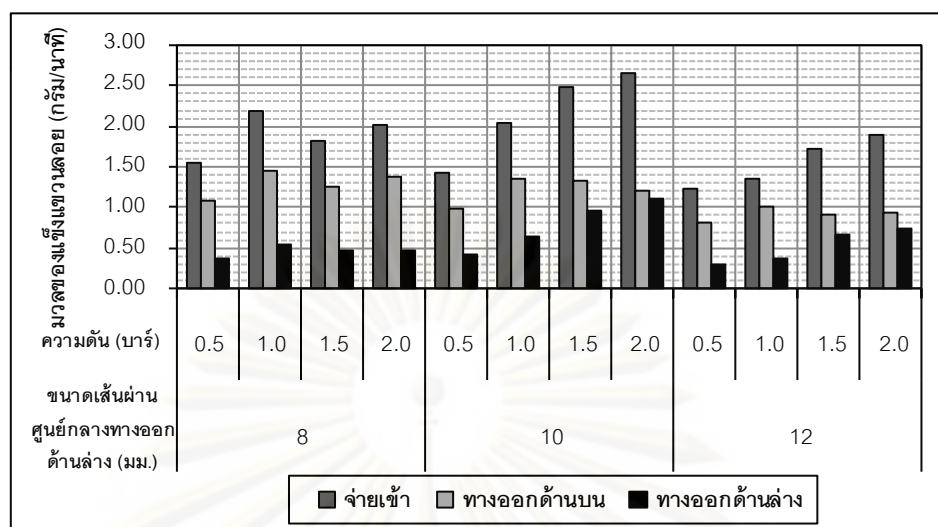
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)			% ความผิดพลาด
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
4	0.5	0.53	0.41	0.04	15.09
	1	0.65	0.48	0.07	15.38
	2	0.82	0.56	0.16	12.19
	3	0.85	0.51	0.22	14.12
6	0.5	1.34	1.21	0.12	0.75
	1	1.31	1.08	0.20	2.29
	2	2.25	1.32	0.75	8.00
	3	2.42	1.26	0.99	7.02
9	0.5	0.46	0.32	0.11	6.52
	1	0.70	0.46	0.18	8.57
	2	0.98	0.64	0.22	12.24
	3	1.04	0.68	0.25	10.58
10	0.5	1.96	1.04	0.85	3.57
	1	2.79	1.40	1.41	0.72
	2	3.91	1.55	2.37	0.26
	3	4.91	1.88	2.85	3.47



รูปที่ ข-1 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข. 1.2 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง ทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)			% ความผิดพลาด
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	1.55	1.08	0.37	6.45
	1	2.18	1.44	0.53	9.63
	1.5	1.83	1.24	0.47	6.56
	2	2.02	1.38	0.47	10.89
10	0.5	1.42	0.99	0.42	14.08
	1	2.04	1.36	0.63	13.24
	1.5	2.48	1.33	0.95	2.02
	2	2.67	1.22	1.10	43.07
12	0.5	1.22	0.82	0.30	8.20
	1	1.36	1.02	0.36	1.47
	1.5	1.72	0.91	0.66	8.72
	2	1.91	0.94	0.73	12.57



รูปที่ ข-2 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

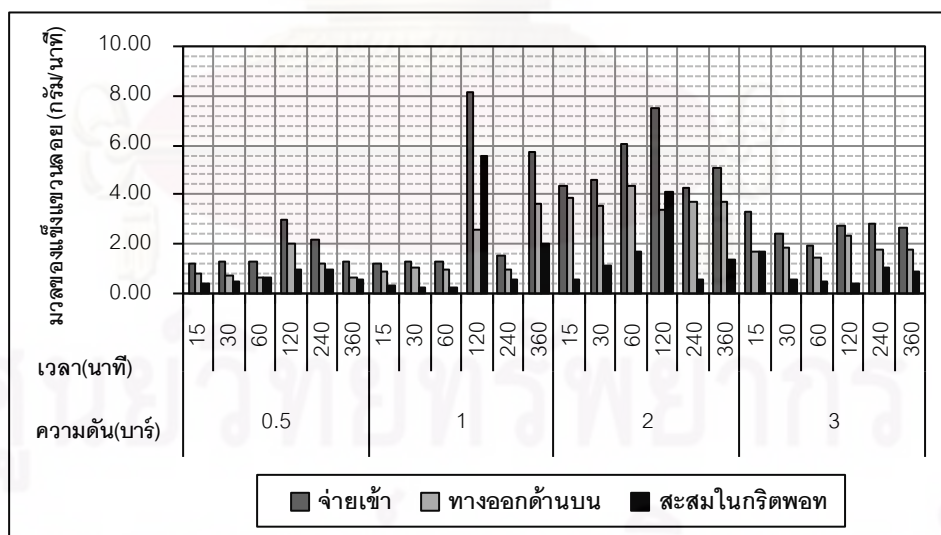
ตารางที่ ข. 1.3 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาท)	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
10	0.5	15	1.22	0.79	0.43
		30	1.25	0.73	0.52
		60	1.28	0.67	0.61
		120	2.99	2.01	0.98
		240	2.20	1.22	0.98
		360	1.25	0.67	0.58
10	1	15	1.24	0.92	0.32
		30	1.28	1.04	0.24
		60	1.28	1.00	0.28
		120	8.14	2.55	5.59
		240	1.56	0.96	0.60
		360	5.70	3.66	2.04



ตารางที่ ข. 1.3 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท (ต่อ)

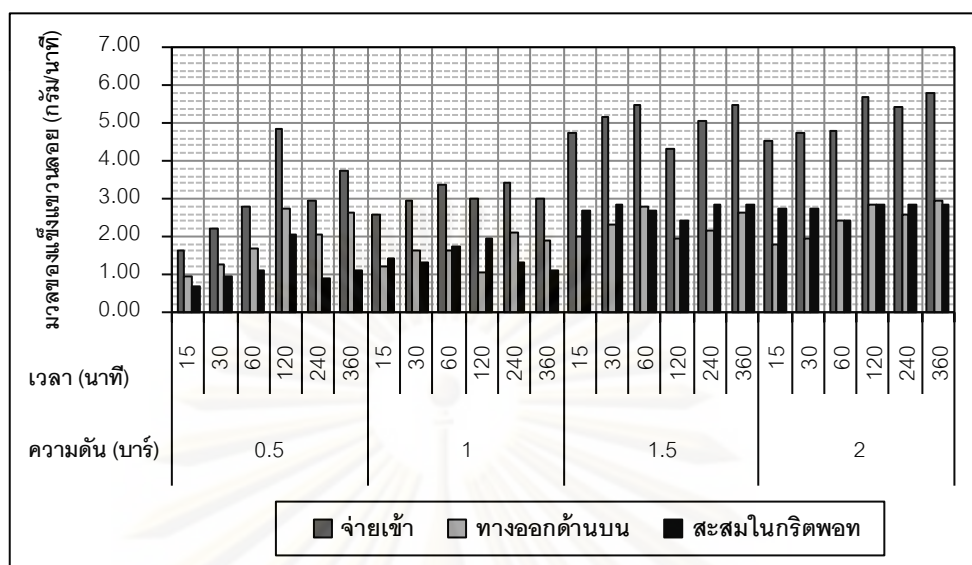
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
10	2	15	4.36	3.83	0.53
		30	4.62	3.52	1.10
		60	6.04	4.36	1.68
		120	7.51	3.36	4.15
		240	4.25	3.73	0.53
		360	5.04	3.68	1.37
10	3	15	3.33	1.66	1.67
		30	2.43	1.86	0.58
		60	1.92	1.47	0.45
		120	2.75	2.37	0.39
		240	2.82	1.79	1.03
		360	2.69	1.79	0.90



รูปที่ ข-3 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ตารางที่ ข. 1.4 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง
10	0.5	15	1.66	0.95	0.70
		30	2.21	1.25	0.95
		60	2.81	1.71	1.10
		120	4.82	2.76	2.06
		240	2.96	2.06	0.90
		360	3.71	2.61	1.10
10	1	15	2.58	1.19	1.40
		30	2.93	1.61	1.33
		60	3.35	1.61	1.75
		120	3.00	1.05	1.96
		240	3.42	2.10	1.33
		360	3.00	1.89	1.12
10	1.5	15	4.72	2.01	2.71
		30	5.18	2.32	2.86
		60	5.49	2.78	2.71
		120	4.33	1.93	2.40
		240	5.03	2.17	2.86
		360	5.49	2.63	2.86
10	2	15	4.54	1.78	2.76
		30	4.72	1.96	2.76
		60	4.81	2.40	2.40
		120	5.70	2.85	2.85
		240	5.43	2.58	2.85
		360	5.78	2.94	2.85



รูปที่ ข-4 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

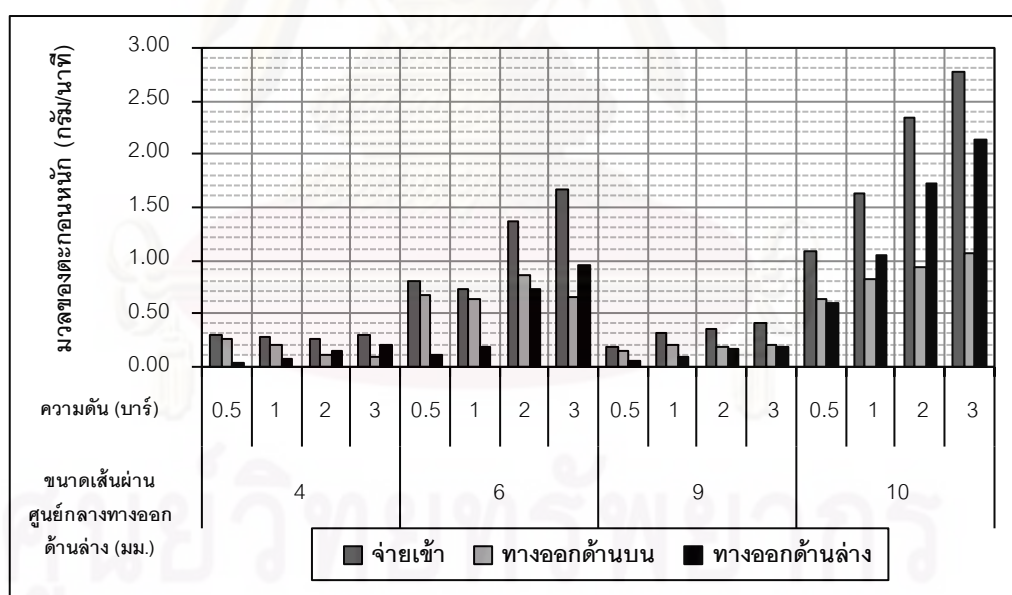
## ตารางที่ ข. 2. มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ ข. 2.1 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่าน  
ศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง ทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของตะกอนหนักที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)			% ความผิดพลาด
		ง่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง	
4	0.5	0.31	0.27	0.04	0.00
	1	0.28	0.21	0.07	0.00
	2	0.26	0.11	0.15	0.00
	3	0.29	0.10	0.21	6.90
6	0.5	0.81	0.67	0.11	3.70
	1	0.74	0.64	0.19	12.16
	2	1.37	0.85	0.72	14.60
	3	1.66	0.65	0.96	3.01

ตารางที่ ข. 2.1 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (ต่อ)

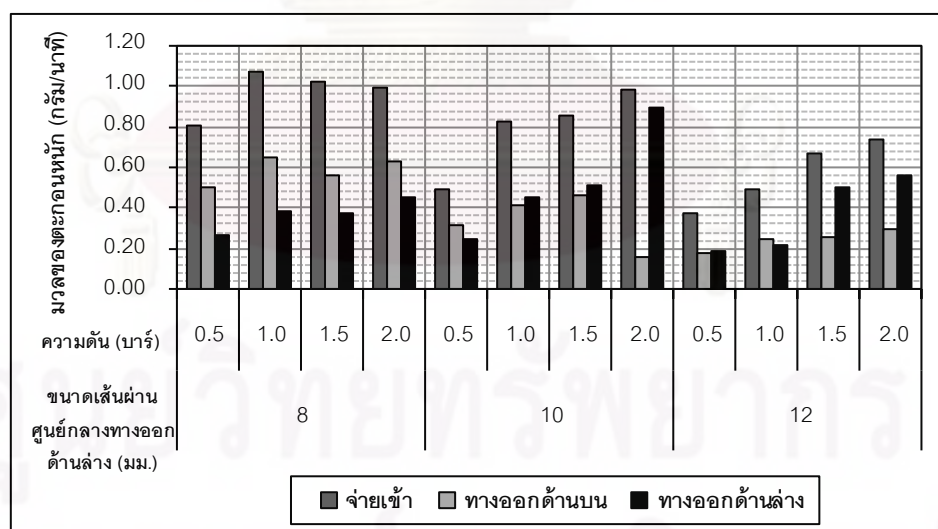
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของตะกอนหนักที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)			% ความผิดพลาด
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
9	0.5	0.19	0.16	0.05	10.53
	1	0.32	0.21	0.10	3.13
	2	0.36	0.19	0.16	2.78
	3	0.41	0.21	0.19	2.44
10	0.5	1.09	0.65	0.60	14.68
	1	1.63	0.83	1.06	15.95
	2	2.34	0.94	1.73	14.10
	3	2.78	1.06	2.14	15.11



รูปที่ ข-5 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข. 2.2 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของตะกอนหนักที่แยกได้ (กรัม/นาทีก)			% ความผิดพลาด
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	0.81	0.51	0.27	3.70
	1	1.07	0.65	0.38	3.74
	1.5	1.02	0.56	0.37	8.82
	2	0.99	0.63	0.46	10.10
10	0.5	0.49	0.32	0.25	16.33
	1	0.83	0.41	0.45	3.61
	1.5	0.86	0.46	0.51	12.79
	2	0.98	0.16	0.89	7.14
12	0.5	0.37	0.18	0.18	2.70
	1	0.49	0.24	0.22	6.12
	1.5	0.67	0.25	0.50	11.94
	2	0.74	0.29	0.56	14.86

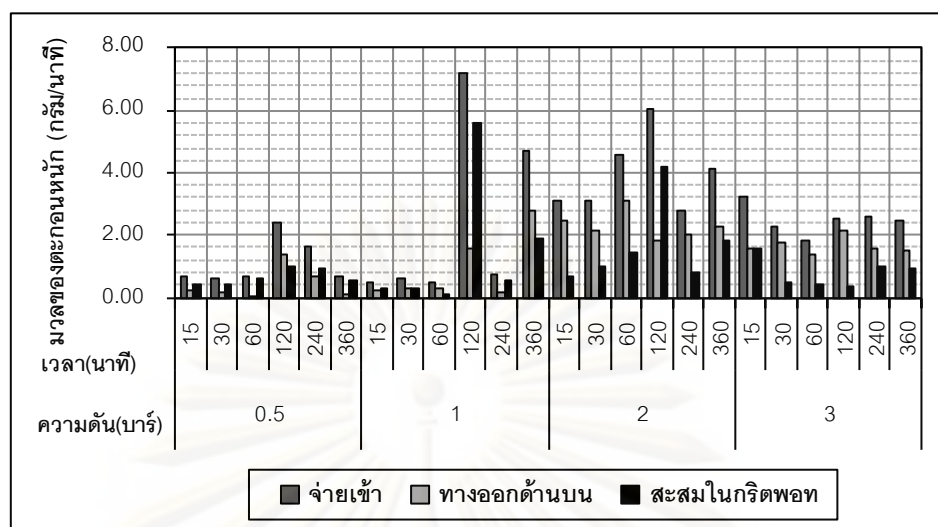


รูปที่ ข-6 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร



ตารางที่ ข. 2.3 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	มวลของตะกอนหนักที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง
10	0.5	15	0.68	0.22	0.46
		30	0.65	0.18	0.47
		60	0.67	0.06	0.61
		120	2.41	1.42	0.99
		240	1.62	0.68	0.94
		360	0.69	0.12	0.57
10	1	15	0.53	0.25	0.29
		30	0.61	0.30	0.30
		60	0.48	0.34	0.14
		120	7.16	1.56	5.60
		240	0.76	0.19	0.57
		360	4.68	2.80	1.88
10	2	15	3.12	2.45	0.67
		30	3.13	2.13	1.00
		60	4.57	3.12	1.45
		120	6.02	1.83	4.19
		240	2.80	2.01	0.80
		360	4.14	2.29	1.85
10	3	15	3.23	1.61	1.62
		30	2.25	1.75	0.50
		60	1.84	1.37	0.48
		120	2.52	2.16	0.36
		240	2.59	1.59	1.00
		360	2.49	1.51	0.97



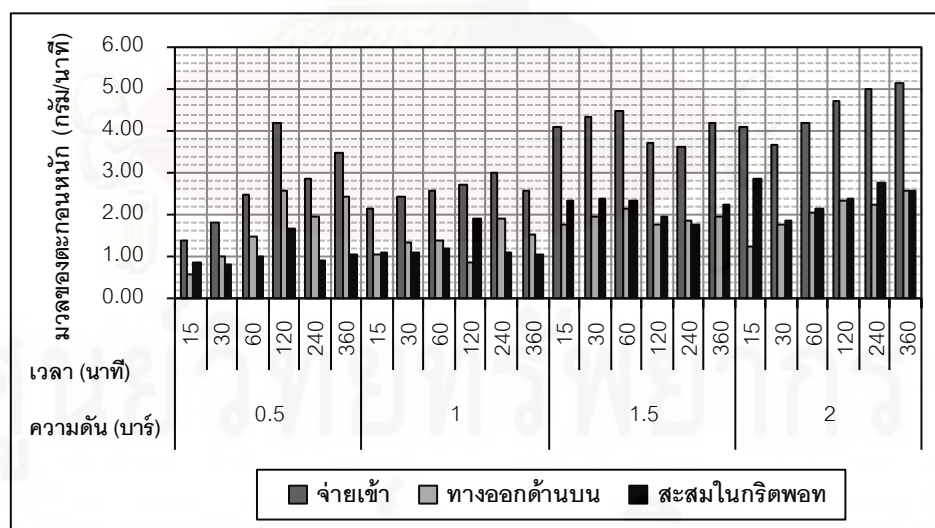
รูปที่ ข-7 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริดพอท

ตารางที่ ข. 2.4 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริดพอท

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริดพอท (นาที)	มวลของตะกอนหนักที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง
10	0.5	15	1.40	0.55	0.85
		30	1.81	1.00	0.80
		60	2.46	1.45	1.00
		120	4.21	2.56	1.66
		240	2.86	1.96	0.90
		360	3.46	2.41	1.05
10	1	15	2.16	1.05	1.12
		30	2.44	1.33	1.12
		60	2.58	1.40	1.19
		120	2.72	0.84	1.89
		240	3.00	1.89	1.12
		360	2.58	1.54	1.05

ตารางที่ ข. 2.4 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	มวลของตะกอนหนักที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง
10	1.5	15	4.10	1.78	2.32
		30	4.33	1.93	2.40
		60	4.49	2.17	2.32
		120	3.71	1.78	1.93
		240	3.63	1.86	1.78
		360	4.18	1.93	2.24
10	2	15	4.09	1.25	2.85
		30	3.65	1.78	1.87
		60	4.18	2.05	2.14
		120	4.72	2.31	2.40
		240	4.98	2.23	2.76
		360	5.16	2.58	2.58

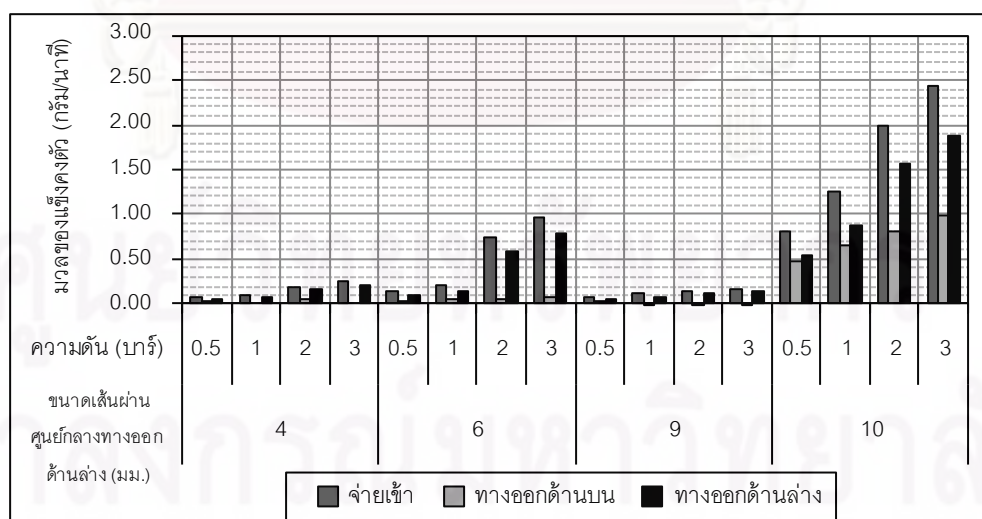


รูปที่ ข-8 มวลของตะกอนหนักที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน  
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

### ตารางที่ ข. 3. มวลของแข็งคังตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

ตารางที่ ข. 3.1 มวลของแข็งคังตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของแข็งคังตัวที่แยกได้ (กรัม/นาทีก)			% ความผิดพลาด
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
4	0.5	0.06	0.03	0.04	16.67
	1	0.09	0.00	0.07	22.22
	2	0.19	0.05	0.16	5.26
	3	0.24	0.00	0.21	12.50
6	0.5	0.14	0.03	0.08	21.43
	1	0.21	0.04	0.14	14.29
	2	0.75	0.05	0.59	14.67
	3	0.96	0.07	0.78	11.46
9	0.5	0.07	0.04	0.04	14.29
	1	0.10	0.01	0.07	20.00
	2	0.14	0.01	0.12	7.14
	3	0.16	0.01	0.13	12.50
10	0.5	0.81	0.47	0.53	23.46
	1	1.24	0.65	0.87	22.58
	2	2.00	0.81	1.57	19.00
	3	2.43	1.00	1.89	18.93

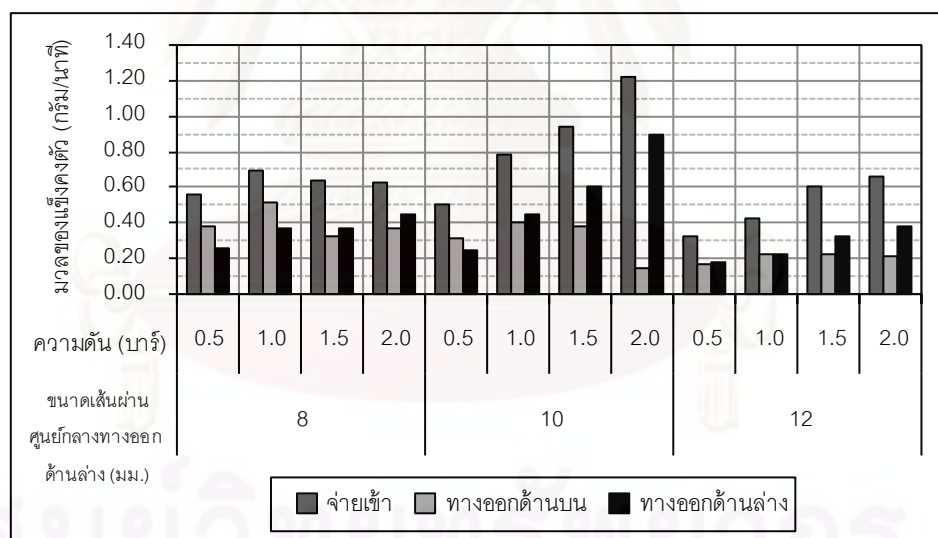


รูปที่ ข-9 มวลของแข็งคังตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ ข. 3.2 มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)			% ความผิดพลาด
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	0.56	0.38	0.26	14.29
	1	0.69	0.51	0.37	27.54
	1.5	0.63	0.32	0.37	9.52
	2	0.63	0.36	0.45	28.57
10	0.5	0.50	0.32	0.25	14.00
	1	0.79	0.40	0.45	7.59
	1.5	0.94	0.38	0.60	4.26
	2	1.22	0.14	0.89	15.57
12	0.5	0.32	0.17	0.18	9.37
	1	0.42	0.22	0.22	4.76
	1.5	0.61	0.22	0.33	9.84
	2	0.67	0.22	0.38	10.45



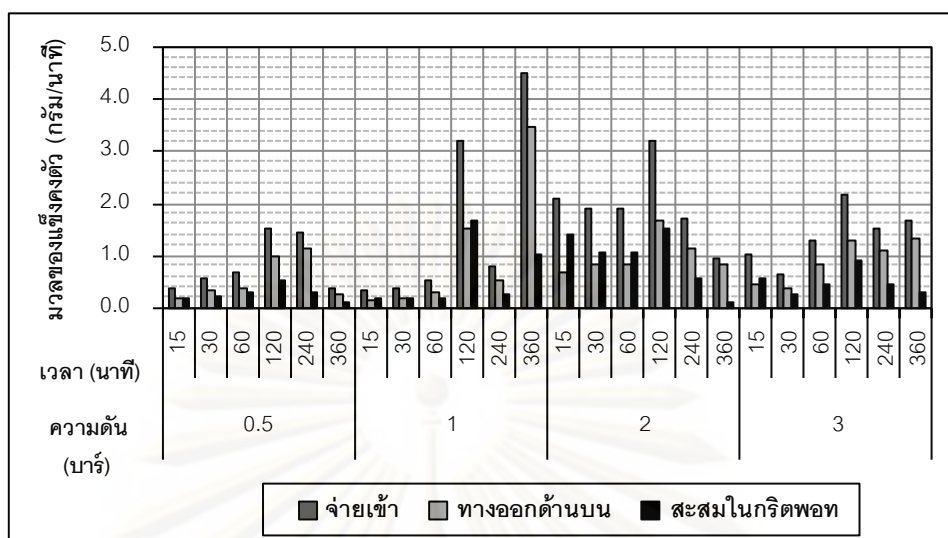
รูปที่ ข-10 มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร



ตารางที่ ข. 3.3 มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง
10	0.5	15	0.37	0.18	0.18
		30	0.58	0.34	0.24
		60	0.67	0.37	0.31
		120	1.53	0.98	0.55
		240	1.47	1.16	0.31
		360	0.40	0.27	0.12
10	1	15	0.36	0.16	0.20
		30	0.40	0.20	0.20
		60	0.52	0.32	0.20
		120	3.19	1.51	1.68
		240	0.80	0.52	0.28
		360	4.51	3.47	1.04
10	2	15	2.10	0.68	1.42
		30	1.89	0.84	1.05
		60	1.89	0.84	1.05
		120	3.20	1.68	1.52
		240	1.73	1.16	0.58
		360	0.95	0.84	0.11
10	3	15	1.02	0.45	0.58
		30	0.64	0.38	0.26
		60	1.28	0.83	0.45
		120	2.18	1.28	0.90
		240	1.54	1.09	0.45
		360	1.67	1.34	0.32



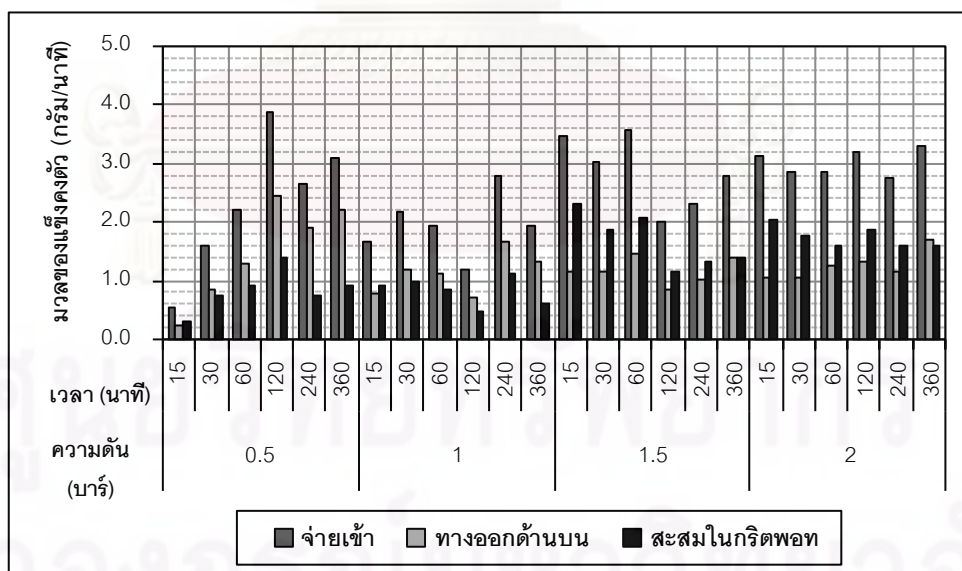
รูปที่ ข-11 มวลของแข็งคั่งตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

ตารางที่ ข. 3.4 มวลของแข็งคั่งตัวที่แยกได้ จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

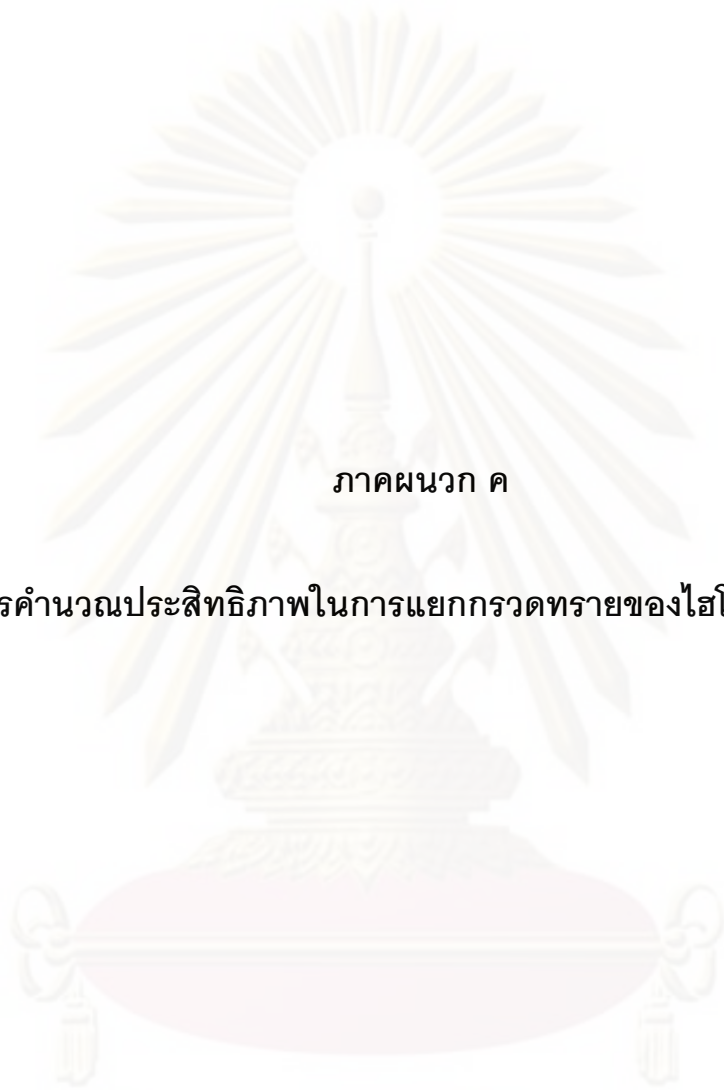
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท (นาที)	มวลของแข็งคั่งตัวที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง
10	0.5	15	0.55	0.25	0.30
		30	1.61	0.85	0.75
		60	2.21	1.30	0.90
		120	3.86	2.46	1.40
		240	2.66	1.91	0.75
		360	3.11	2.21	0.90
10	1	15	1.68	0.77	0.91
		30	2.16	1.19	0.98
		60	1.96	1.12	0.84
		120	1.19	0.70	0.49
		240	2.79	1.68	1.12
		360	1.96	0.95	1.01

ตารางที่ ข. 3.4 มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท (ต่อ)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ ของกริตพอท (นาที)	มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้ (กรัมต่อนาที)		
			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออก ด้านล่าง
10	1.5	15	3.48	1.16	2.32
		30	3.02	1.16	1.86
		60	3.56	1.47	2.09
		120	2.01	0.85	1.16
		240	2.32	1.01	1.31
		360	2.78	1.39	1.39
10	2	15	3.12	1.07	2.05
		30	2.85	1.07	1.78
		60	2.85	1.25	1.60
		120	3.20	1.34	1.87
		240	2.76	1.16	1.60
		360	3.29	1.69	1.60



รูปที่ ข-12 มวลของแข็งคงตัวที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท



ภาคผนวก ค

การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรดทราของไฮโดรไซโคลน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน

### 1. อัตราการไหล

อัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลอน (Feed flowrate),  $Q_f$  : วัดและประมวลผลโดยเครื่องวัดอัตราการไหล (Flow meter)

อัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Underflow flowrate),  $Q_u$  : หาอัตราการไหลโดยวิธีวัดปริมาตรเทียบกับเวลา (Time volume method)

อัตราการไหลออกทางด้านบน (Overflow flowrate),  $Q_o$  : หาอัตราการไหลโดยวิธีวัดปริมาตรเทียบกับเวลา (Time volume method)

### 2. ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา

$$E_T = \frac{Q_u (C_u - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (1)$$

### 3. ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริดพอท

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \quad (2)$$



### ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกกรดทราายของไฮโดรไซโคลน

1. ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 4 มิลลิเมตร ความดัน 3 บาร์

จากสมการที่ (1) ประสิทธิภาพในการแยกกรดทราายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา

$$\begin{aligned}
 E_T &= \frac{Q_u(C_u - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \\
 &= \frac{0.04 \times (289 - 4.67)}{3.08 \times 4.67} \times 100 \\
 &= 85.83 \%
 \end{aligned}$$

2. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร ความดัน 2 บาร์ เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 15 นาที

จากสมการที่ (2) ประสิทธิภาพในการแยกกรดทราายของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

$$\begin{aligned}
 E_T &= \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \\
 &= \frac{(3.15 \times 40 \times 15) - (3.15 \times 13 \times 15)}{(3.15 \times 40 \times 15)} \times 100 \\
 &= 67.52 \%
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ค. 1. ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน

ตารางที่ ค. 1.1 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)			ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพในการแยก กรวดทราย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
4	0.5	1.68	1.66	0.02	2.00	1.00	117.00	70.87
	1	2.26	2.23	0.03	2.36	0.00	149.00	75.90
	2	2.85	2.81	0.04	4.00	1.00	248.00	79.65
	3	3.12	3.08	0.04	4.67	0.00	289.00	85.83
6	0.5	1.52	1.48	0.04	5.33	1.33	126.33	61.36
	1	2.07	2.02	0.05	6.13	1.33	180.67	66.68
	2	2.96	2.89	0.07	15.13	1.00	522.67	78.79
	3	3.38	3.30	0.08	17.00	1.33	558.33	80.88
9	0.5	1.57	1.38	0.19	2.67	1.67	13.33	54.80
	1	2.27	2.01	0.26	2.67	0.40	17.00	68.56
	2	3.22	2.92	0.30	2.67	0.13	23.20	79.00
	3	3.90	3.56	0.34	2.43	0.13	22.13	78.14
10	0.5	1.75	1.24	0.51	27.67	23.00	62.00	51.64
	1	2.46	1.69	0.77	30.33	23.00	68.00	56.16
	2	3.42	2.22	1.20	35.00	22.00	78.33	66.92
	3	4.21	2.25	1.44	39.67	21.67	78.67	62.92

ตารางที่ ค. 1.2 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดัน (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)			ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)			ประสิทธิภาพในการแยก กรวดทราย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
8	0.5	3.20	2.71	0.49	10.50	8.33	31.83	37.02
	1	4.46	3.77	0.69	9.33	8.17	32.17	44.98
	1.5	5.44	4.66	0.78	7.00	4.17	28.17	50.82
	2	6.28	5.46	0.82	6.00	4.00	33.17	67.83
10	0.5	3.34	2.59	0.75	9.00	7.33	19.83	34.85
	1	4.65	3.62	1.03	10.17	6.67	26.17	44.68
	1.5	5.65	4.32	1.33	10.00	5.33	27.17	53.03
	2	6.53	5.15	1.38	11.17	1.67	38.67	66.25
12	0.5	3.34	2.59	0.75	5.83	3.83	14.33	42.22
	1	4.63	3.66	0.97	5.50	3.67	13.50	38.70
	1.5	5.62	4.50	1.13	6.50	3.00	17.50	42.35
	2	6.47	5.23	1.24	6.17	2.50	18.50	47.45

ตารางที่ ค. 1.3 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริดพอท

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริดพอท (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการ แยกกรวดทราย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	
0.5	15	1.83	1.83	12	6	50.05
	30	1.83	1.83	19	11	42.16
	60	1.83	1.83	22	12	45.50
	120	1.83	1.83	50	32	36.06
	240	1.83	1.83	48	38	20.91
	360	1.83	1.83	13	9	30.83
1	15	2.39	2.39	9	4	55.62
	30	2.39	2.39	10	5	50.07
	60	2.39	2.39	13	8	38.55
	120	2.39	2.39	80	38	52.57
	240	2.39	2.39	20	13	35.09
	360	2.39	2.39	113	87	23.12

ตารางที่ ค. 1.3 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริดพอท (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริดพอท (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการ แยกกรวดทราย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	
2	15	3.15	3.15	40	13	67.52
	30	3.15	3.15	36	16	55.58
	60	3.15	3.15	36	16	55.58
	120	3.15	3.15	61	32	47.57
	240	3.15	3.15	33	22	33.37
	360	3.15	3.15	18	16	11.16
3	15	3.84	3.84	16	7	56.29
	30	3.84	3.84	10	6	40.05
	60	3.84	3.84	20	13	35.06
	120	3.84	3.84	34	20	41.23
	240	3.84	3.84	24	17	29.23
	360	3.84	3.84	26	21	19.30



ตารางที่ ค. 1.4 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริดพอท

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริดพอท (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการ แยกกรวดทราย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	
0.5	15	3.01	3.01	11	5	54.55
	30	3.01	3.01	32	17	46.87
	60	3.01	3.01	44	26	40.91
	120	3.01	3.01	77	49	36.36
	240	3.01	3.01	53	38	28.30
	360	3.01	3.01	62	44	29.03
1	15	4.19	4.19	24	11	54.17
	30	4.19	4.19	31	17	45.16
	60	4.19	4.19	28	16	42.86
	120	4.19	4.19	17	10	41.18
	240	4.19	4.19	40	24	40.00
	360	4.19	4.19	28	19	32.14

ตารางที่ ค. 1.4 ประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายของไฮโดรไซโคลอน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริดพอท (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริดพอท (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็งคงตัว (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการ แยกกรวดทราย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	
1.5	15	4.64	4.64	45	15	66.67
	30	4.64	4.64	39	15	61.54
	60	4.64	4.64	46	19	58.70
	120	4.64	4.64	26	11	57.69
	240	4.64	4.64	30	13	56.67
	360	4.64	4.64	36	18	50.00
2	15	5.34	5.34	35	12	65.71
	30	5.34	5.34	32	12	62.50
	60	5.34	5.34	32	14	56.25
	120	5.34	5.34	36	15	58.33
	240	5.34	5.34	31	13	58.06
	360	5.34	5.34	37	19	48.65



ภาคผนวก ง

การคำนวณมวลของกรวดทรายเมื่อเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรไซโคลนที่  
ติดตั้งกริตพอทและถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ

และ

การคำนวณค่าไฟฟ้าของไฮโดรไซโคลนและถังดักกรวดทรายแบบเต็มอากาศ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ตัวอย่างการคำนวณมวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท

1. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท ที่สภาวะความดัน 1 บาร์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 120 นาที เมื่ออัตราการไหลของน้ำเสียจริงที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง เท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (Factor = 2.75)

$$\begin{aligned} \text{มวลจ่ายเข้า} &= 80 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 0.5 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{วินาที}} \times \frac{1000 \text{ล.}}{1 \text{ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ก.}}{1000 \text{มก.}} \times \frac{60 \text{วินาที}}{1 \text{นาที}} \times 2.75 \\ &= 6,600 \text{ กรัมต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{มวลทางออกด้านบน} &= 38 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 0.5 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{วินาที}} \times \frac{1000 \text{ล.}}{1 \text{ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ก.}}{1000 \text{มก.}} \times \frac{60 \text{วินาที}}{1 \text{นาที}} \times 2.75 \\ &= 3,135 \text{ กรัมต่อนาที} \end{aligned}$$

$$\text{มวลที่สะสมในกริตพอท} = 6,600 - 3,135 = 3,465 \text{ กรัมต่อนาที}$$

ดังนั้น มวลของกรวดทรายที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอท เท่ากับ 3,465 กรัมต่อนาที

### ตัวอย่างการคำนวณมวลที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ

1. ถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ ณ โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง มีขนาด  $3.2 \times 9.45 \times 5.2$  เมตร อัตราการไหลของน้ำเสีย เท่ากับ 0.5 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที (Factor=2.75)

ดังนั้น ปริมาตรของถังเติมอากาศ = 157.25 ลูกบาศก์เมตร

$$\text{ปริมาณอากาศที่เติมลงไป (ลบ.ม.ต่อนาทีต่อเมตรของความยาวถัง)} = 0.3$$

$$\text{ดังนั้น ปริมาณอากาศที่ต้องเติมลงไป} = 9.45 \text{ ม.} \times 0.3 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{นาที} \cdot \text{ม.}}$$

$$= 2.835 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{นาที}}$$

$$\text{อัตราการไหลสูงสุด} = 0.5 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{วินาที}} \times 2.75 = 1.375 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{วินาที}}$$

กำหนดให้ ปริมาณกรวดทรายที่เกิดขึ้น เท่ากับ  $0.03 \frac{\text{ลบ.ม.}}{10^3 \text{ ลบ.ม.}}$  (Metcalf & Eddy, 2003)

ดังนั้น ปริมาตรของกรวดทราย

$$= \left[ \left( 1.375 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{วินาที}} \right) \cdot \left( 86,400 \frac{\text{วินาที}}{\text{วัน}} \right) \cdot \left( \frac{0.03 \text{ ลบ.ม.}}{10^3 \text{ ลบ.ม.}} \right) \right]$$

$$= 3.5 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{วัน}} = 0.0024 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{นาที}}$$

ความหนาแน่นของกรวดทรายเท่ากับ  $1,600 \frac{\text{กก.}}{\text{ลบ.ม.}}$

ดังนั้น มวลของกรวดทรายที่แยกได้จากถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ

$$= 0.0024 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{นาที}} \times 1,600 \frac{\text{กก.}}{\text{ลบ.ม.}}$$

$$= 3.889 \frac{\text{กก.}}{\text{นาที}}$$

$$= 3,890 \text{ กรัมต่อนาที}$$

**ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าของไฮดรไซโคลนและถังดักกรวดทรายแบบเติมอากาศ**

### 1. การคำนวณค่าไฟฟ้าของถังดักกรวดทราย

#### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

อัตราการไหลสูงสุด = 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (ต่อ 1 ราง)

ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด = 2.695 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง (ที่มา: <http://www.pea.co.th>)

กำลังไฟของเครื่องสูบน้ำ = 660 กิโลวัตต์

กำลังไฟของเครื่องเติมอากาศ = 900 กิโลวัตต์

ดังนั้น ค่าไฟฟ้า =  $1,560 \text{ กิโลวัตต์} \times 2.695 \frac{\text{บาท}}{\text{กิโลวัตต์} \cdot \text{ชั่วโมง}} = 4,204 \text{ บาทต่อชั่วโมง}$



คิดเดินระบบวันละ 1 ชั่วโมง  $\therefore$  ใช้ไฟฟ้า 4,204 บาทต่อวัน (ต่อ 1,800 ลูกบาศก์เมตร)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จ่ายค่าไฟฟ้า} &= \frac{4,204 \text{ บาทต่อวัน}}{1,800 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน}} \\ &= 2.33 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

## 2. การคำนวณค่าไฟฟ้าของไฮดรอลิคโคลน

$$\text{กำลังไฟของเครื่องสูบน้ำ (กิโลวัตต์)} = \frac{QH}{102\eta}$$

เมื่อ Q = อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)

H = แรงดันสุทธิ (เมตร)

$\eta$  = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

### ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

อัตราการไหลสูงสุด = 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (500 ลิตรต่อวินาที)

แรงดันสุทธิของในไฮดรอลิคโคลนประมาณ 30 เมตร

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

ค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุด = 2.695 บาทต่อกิโลวัตต์-ชั่วโมง

$$\text{ดังนั้น กำลังไฟของเครื่องสูบน้ำ} = \frac{500 \times 30}{102 \times 0.5} = 295 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าไฟฟ้า} = 295 \text{ กิโลวัตต์} \times 2.695 \frac{\text{บาท}}{\text{กิโลวัตต์} \cdot \text{ชั่วโมง}} = 795 \text{ บาทต่อชั่วโมง}$$

คิดเดินระบบวันละ 1 ชั่วโมง  $\therefore$  ใช้ไฟฟ้า 795 บาทต่อวัน (ต่อ 1,800 ลูกบาศก์เมตร)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จ่ายค่าไฟฟ้า} &= \frac{795 \text{ บาทต่อวัน}}{1,800 \text{ ลูกบาศก์เมตรต่อวัน}} \\ &= 0.44 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอทเพื่อใช้ในการกำจัด  
กรวดทรายที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำดินแดง

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

อัตราการไหลเข้าของน้ำเสีย = 1,800 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลเข้าสูงสุดของไฮโดรไซโคลน = 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลทางออก ด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร ( $Q_u$ ) = 0.04 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง

เลือกใช้

ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริตพอท

เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริตพอท 30 นาที

ดังนั้น จึงใช้ไฮโดรไซโคลนจำนวน 180 ตัว ต่อขนานกัน

ปริมาตรของกริตพอท ( $V_{gp}$ ) =  $Q_u \times$  จำนวนไฮโดรไซโคลน  $\times$  เวลาที่ใช้ในการดำเนินการ  
ของกริตพอท

$$= (0.04 \times 180) \frac{\text{ลูกบาศก์เมตร}}{\text{ชั่วโมง}} \times 30 \text{ นาที}$$

$$= 3.6 \text{ ลูกบาศก์เมตร หรือ } 3,600 \text{ ลิตร}$$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์ เกิดเมื่อวันที่ 30 กรกฎาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดเพชรบุรี สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนเบญจมเทพอุทิศจังหวัดเพชรบุรี เมื่อ พ.ศ.2543 และสำเร็จ การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตร บัณฑิต ในสาขา วิชาวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปี พ.ศ. 2547 ต่อมาได้ เข้าศึกษาต่อในระดับ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2548



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย