

การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอดแบบอนุกรม
เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา



นางสาวธัญธรณ์ สวัสดิวงษ์

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

APPLICATION OF HYDROCYCLONE IN SERIES AND HYDROCYCLONE EQUIPPED
WITH GRIT POT IN SERIES AS A PRE-TREATMENT UNIT IN DRINKING WATER
TREATMENT PROCESS

Miss Thanyathorn Sawatdiwong



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 2010
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้ง
กริทพอดแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิต
น้ำประปา

โดย

นางสาวธัญฉรณ์ สวัสดิวงษ์

สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

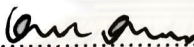
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้แก่นักศึกษานี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต

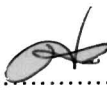


..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศhiritwong)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ)

 
..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.ศรายุทธ ราฐ)

ัญญธรรณ์ สวัสดิวงษ์ : การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอดแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา. (APPLICATION OF HYDROCYCLONE IN SERIES AND HYDROCYCLONE EQUIPPED WITH GRIT POT IN SERIES AS A PRE-TREATMENT UNIT IN DRINKING WATER TREATMENT PROCESS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : อาจารย์ ดร.ชัยพร ภู่งประเสริฐ, 172 หน้า.

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา ที่สถานีสูบน้ำดิบสำแล จังหวัดปทุมธานี โดยศึกษาถึงประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย และผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน ได้แก่ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน และเวลาที่ใช้ในกริทพอด ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 แบบ และเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวจากผลงานที่ผ่านมา

ผลการวิจัยพบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดมีค่าอัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (Flow split, R_p) สูงมาก ส่งผลให้ได้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดต่ำ จึงไม่เหมาะสมจะนำไปใช้งานจริง ส่วนไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 30.89 เปอร์เซ็นต์ ใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียว แต่สามารถแยกของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ออกที่ทางออกด้านล่างได้เกือบทั้งหมด และยังให้ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้สูงโดยเฉลี่ย 2,158 มก./ล. นอกจากนี้ยังพบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มม. ที่ติดตั้งกริทพอด มีประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยสูงที่สุด ใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียว และการใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มม. ยังช่วยป้องกันการอุดตันที่ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มม. ได้เป็นอย่างดี และเมื่อคำนวณค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ลดลง โดยคำนวณจากข้อมูลการผลิตน้ำประปาจริง พบว่า สามารถลดปริมาณสลัดจ์ได้สูงสุด 5.85 ตัน/วัน และลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์สารส้มได้สูงสุดถึง 55,614 บาท/วัน

ดังนั้น ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากมีขนาดเล็ก ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง และยังสามารถช่วยลดสลัดจ์จากสารส้มที่จะเกิดขึ้น ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่บำบัดได้ยากอีกด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ปีการศึกษา.....2553.....

ลายมือชื่อผู้ผลิต.....ัญญธรรณ์ สวัสดิวงษ์.....

ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

5070567421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : HYDROCYCLONE / HYDROCYCLONE IN SERIES / GRIT POT / WATER TREATMENT

THANYATHORN SAWATDIWONG : APPLICATION OF HYDROCYCLONE IN SERIES AND HYDROCYCLONE EQUIPPED WITH GRIT POT IN SERIES AS A PRE-TREATMENT UNIT IN DRINKING WATER TREATMENT PROCESS.

THESIS ADVISOR : CHAIYAPORN PUPRASERT, Ph.D., 172 pp.

Using hydrocyclone in series and hydrocyclone equipped with grit pot in series as a pre-treatment unit in drinking water treatment process at Samlae pumping station Prathumthani, were studied in term of suspended solid separation efficiency and effect of operating parameters such as inlet pressure, diameter of hydrocyclone and grit pot operating time. The results were compared with single hydrocyclone from other research.

The result showed that hydrocyclone in series had a very high flow split (R_f). So it is not possible for applying in the real operation. While the hydrocyclone equipped with grit pot in series showed, in term of solid separation efficiency, slightly low efficiency as 30.89%, which is nearly the same value as a single hydrocyclone. Moreover, the results showed that it can separate most large size of solid. This hydrocyclone also showed a high solid concentration, average 2,158 mg/L. Moreover, this research found that the highest efficiency of hydrocyclone equipped with grit pot in series was hydrocyclone diameter 50 and 10 mm. And, using hydrocyclone diameter 50 mm can prevent in hydrocyclone 10 mm from clogging problem. In term of expense, calculated from the data at Samsaen water treatment plant, this unit can reduce total quantity of sludge and alum usage. The amount of sludge decreased was 5.85 ton/day which can reduce the expense of sludge treatment 55,614 baht/day.

So, hydrocyclone equipped with grit pot in series is a good choice for using as a pre-treatment unit in drinking water treatment process due to its compactness. In addition, it can also decrease the amount of coagulant usage and chemical sludge which is very hard to dispose.

Department : Environmental Engineering
Field of Study : Environmental Engineering
Academic Year : 2010

Student's Signature : ธัญชธรณ์ Sawatdiwong
Advisor's Signature : [Signature]

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร.ชัยพร ภูประเสริฐ ที่กรุณาให้โอกาสในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ อีกทั้งยังให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไข และสนับสนุนในด้านต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนัสกร ราชากรกิจ และ ดร.ศรายุทธ ราชู กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์และบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ได้ให้ความรู้และให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่มอบทุนอุดหนุนบางส่วนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของสถานีสูบน้ำดิบสำแล จังหวัดปทุมธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือสำหรับการทำวิจัย และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของกรมประปานครหลวงที่ให้ข้อมูล ซึ่งเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการวิรัตน์ คันธารัตน์ รองผู้อำนวยการเสน่ห์ วิริยะเจริญธรรม และอาจารย์สุนทร วรเดชลิขิต วิทยาลัยเทคนิคปทุมธานีที่ช่วยเหลือในการติดตั้งและซ่อมแซมอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ นิสิตปริญญาโทในภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกคน โดยเฉพาะ นราวิชต์พร นवलสุวรรณ ที่คอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเป็นอย่างดีทั้งในขณะศึกษาและดำเนินงานวิจัย ตลอดการวิจัยนี้

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคนในครอบครัว ที่ให้ความรัก การสนับสนุน ทั้งด้านกำลังทรัพย์ คำปรึกษา และกำลังใจ ที่มีให้แก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด โดยเฉพาะบิดาและมารดาที่คอยช่วยเหลือ แก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ซึ่งช่วยให้ผู้วิจัยสามารถฟันฝ่าอุปสรรคต่างๆ ได้ตลอดมาจนวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ที่สุด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูปภาพ.....	ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ถ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ทฤษฎีการแยกของแข็งออกจากของเหลว.....	5
2.2 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone).....	5
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นของไฮโดรไซโคลน.....	5
2.2.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน....	9
2.2.3 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน.....	10
2.2.3.1 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง.....	11
2.2.3.2 ความเร็วตามแนวแกน.....	14
2.2.3.3 ความเร็วตามแนวรัศมี.....	15
2.2.4 กฎของสโตค (Stokes's law).....	16
2.2.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของ ไฮโดรไซโคลน.....	18
2.2.6 สรุปผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลน.....	27

	หน้า
2.3 ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด (Grit pot).....	28
2.4 ไฮโดรไซโคลนที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม.....	29
2.5 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน.....	31
2.5.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency).....	31
2.5.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency).....	32
2.5.3 การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน.....	33
2.5.3.1 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด.....	33
2.5.3.2 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด.....	35
2.5.4 ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency).....	36
2.5.5 ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency).....	37
2.5.6 ขนาดตัด (Cut size).....	38
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	39
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	48
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.1.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) ที่ใช้ในงานวิจัย.....	49
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆในงานวิจัย.....	52
3.1.3 หลักการทำงานของโรงงานนำร่อง (Pilot plant).....	52
3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	54
3.3 แผนการทดลอง.....	57
3.3.1 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดที่ขนาดต่างๆ.....	57
3.3.2 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดที่ขนาดต่างๆ.....	58
3.4 วิธีทำการทดลอง.....	62
3.4.1 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดที่ขนาดต่างๆ.....	62

	หน้า
3.4.2 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ที่ติดตั้งกริทพอดขนาดต่างๆ.....	63
3.5 การแสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์.....	64
3.6 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	64
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล.....	66
4.1 ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้ง กริทพอด.....	67
4.1.1 ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกได้.....	67
4.1.2 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย.....	75
4.2 ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด....	75
4.2.1 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้.....	75
4.2.2 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย.....	82
4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่าง ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวที่ ติดตั้งกริทพอด.....	87
4.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่าง ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	87
4.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่าง ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	88
4.4 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ที่ติดตั้งกริทพอด.....	89
4.4.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	90
4.4.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	91

	หน้า
4.4.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	91
4.4.4 เปรียบเทียบมวลของแข็งแขวนลอยที่ถูกแยกออกทางด้านล่าง ระหว่างการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด.....	93
4.5 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด.....	94
4.5.1 ความดันจ่ายเข้า.....	94
4.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน.....	95
4.5.3 เวลาที่ใช้ในกริทพอด.....	96
4.6 ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงเมื่อติดตั้งการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด.....	97
4.7 ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด.....	105
4.7.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	105
4.7.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	107
4.7.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	108
4.7.4 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมกับขนาดอนุภาค.....	110
4.7.5 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด.....	110
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	112
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	112
5.1.1 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม.....	112

หน้า

5.1.2	เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการ จัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลน ตัวเดียวที่ติดตั้งกริทพอด.....	113
5.1.3	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ ปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายที่ลดลง เมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัด ขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา.....	114
5.1.4	พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของ การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม.....	114
5.2	ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	115
	รายการอ้างอิง.....	116
	ภาคผนวก.....	119
	ภาคผนวก ก ผลการทดลอง.....	120
	ภาคผนวก ข การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการ จัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม.....	137
	ภาคผนวก ค การคำนวณมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียง ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม.....	149
	ภาคผนวก ง การคำนวณปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบ อนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา และการคำนวณค่าไฟฟ้าของการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา.....	154
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	172

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 รูปร่างและลักษณะสมบัติต่างๆของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองด้วยการจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลน และไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด.....	55
ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ต่างๆ.....	64
ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง.....	64
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความดันเมื่อผ่านไฮโดรไซโคลนของการจัดเรียง ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริทพอด ที่ความดัน 1 บาร์.....	72
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้กับประสิทธิภาพใน การแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร.....	73
ตารางที่ 4.5 ความขุ่นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบ อนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ.....	77
ตารางที่ 4.6 อัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริทพอด โดยใช้เวลาในกริทพอด 240 นาที.....	85
ตารางที่ 4.7 ความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริทพอด.....	85
ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลน แบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ในทุกการจัดเรียงแบบอนุกรม ที่ความดัน 3 บาร์ ที่เวลา 240 นาที.....	93
ตารางที่ 4.9 ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงและค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำการจัดเรียง ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดมาติดตั้งเป็นหน่วยบำบัด ขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา.....	102
ตารางที่ 4.10 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	105

	หน้า
ตารางที่ 4.11 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	106
ตารางที่ 4.12 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	107
ตารางที่ 4.13 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	107
ตารางที่ 4.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	108
ตารางที่ 4.15 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	109

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 เส้นทางการไหลทั้ง 3 ส่วนภายในไฮโดรไซโคลอน.....	6
รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอน.....	9
รูปที่ 2.3 เส้นทางการไหลของของไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลอน.....	10
รูปที่ 2.4 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลอน.....	11
รูปที่ 2.5 ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท.....	13
รูปที่ 2.6 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ภายในไฮโดรไซโคลอน....	14
รูปที่ 2.7 การกระจายความเร็วตามแนวแกน (V_z) ภายในไฮโดรไซโคลอน.....	15
รูปที่ 2.8 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสรัศมี (V_x) ภายในไฮโดรไซโคลอน.....	16
รูปที่ 2.9 ผลของความยาวของ Vortex finder ต่อ Grade efficiency และขนาดตัด.....	23
รูปที่ 2.10 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริทพอด.....	29
รูปที่ 2.11 การเรียงลำดับไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรม 3 ตัว ที่ช่องทางออกด้านบนแบบทั่วไป.....	30
รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพระดับชั้นของไฮโดรไซโคลอน 1 ตัว 2 ตัว และ 3 ตัวที่ต่ออนุกรมที่ช่องทางออกด้านบน.....	30
รูปที่ 2.13 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด.....	34
รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริทพอด.....	35
รูปที่ 2.15 เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง.....	36
รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการจัดเรียงแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอนและไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริทพอด (กรณี 75 50 และ 10 มิลลิเมตร).....	49
รูปที่ 3.2 ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร.....	50
รูปที่ 3.3 ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร.....	51
รูปที่ 3.4 ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร.....	52
รูปที่ 3.5 แผนผังการทำงานของโรงงานนำร่อง (Pilot plant).....	53
รูปที่ 3.6 Pilot plant ที่ใช้ทำการทดลองในสถานที่จริง และไฮโดรไซโคลอนที่ต่อกันแบบอนุกรม.....	54

	หน้า
รูปที่ 3.7 การติดตั้งกริพพอดที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน.....	57
รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองด้วยการจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ.....	59
รูปที่ 3.9 แผนผังการทดลองด้วยจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตรตามลำดับ.....	60
รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองด้วยการจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตรตามลำดับ.....	61
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด.....	68
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด.....	68
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด.....	69
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด.....	70
รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด.....	71
รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด.....	71

	หน้า
รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	76
รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	76
รูปที่ 4.9 ลักษณะน้ำตัวอย่างจาก 5 ช่องทางการไหลของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 3 บาร์ ใช้เวลาในกริทพอด 240 นาที.....	77
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	78
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	79
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	80
รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	80
รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยทุกเส้นทางการไหลของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	81
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับที่ติดตั้งกริทพอด.....	82

	หน้า
รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับที่ติดตั้งกริทพอด.....	83
รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับที่ติดตั้งกริทพอด.....	84
รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในทุกการจัดเรียงที่ติดตั้งกริทพอด.....	86
รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	88
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	89
รูปที่ 4.21 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	90
รูปที่ 4.22 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	91
รูปที่ 4.23 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ที่ทางออกด้านบนจากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	92
รูปที่ 4.24 ลักษณะของตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ช่องการไหลที่ได้จากการทดลองด้วยไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด.....	92
รูปที่ 4.25 แผนผังแสดงระบบผลิตน้ำประปา (ก) ระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน และ (ข) จำลองระบบผลิตน้ำประปาเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา.....	97
รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของแข็งแขวนลอยและปริมาณสารส้มที่ใช้เติมลงไปในระบบผลิตน้ำประปา.....	99

	หน้า
รูปที่ 4.27 ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงเมื่อติดตั้งการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ทุกชุดการจัดเรียงแบบอนุกรม.....	101
รูปที่ 4.28 การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด โดยการต่อแบบขนาน.....	104



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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) (%)
$F_f(x)$	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (%)
$F_o(x)$	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านบน (%)
$F_u(x)$	เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่าง (%)
g	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที ²
$G(x)$	เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve)
$G'(x)$	เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency curve)
%GE	Granulometric separation efficiency
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)
T	เวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริทพอด (นาทีก)
t	ความหนาของผนัง vortex finder (เมตร)
V_{GP}	ปริมาตรของกริทพอด (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_{50}	ขนาดตัด (Cut size) (ไมโครเมตร)
Δp	ความดันลด (Pressure drop)
$\Delta \rho$	ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว (กิโลกรัมต่อเมตร ³)
α	อัตราส่วนระหว่างความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน (V_y) กับความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า (V_i) (Bradley, 1965)
ρ_p	ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (กิโลกรัมต่อเมตร ³)
ρ_w	ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อเมตร ³)
ζ	ความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone) (เมตรต่อวินาที)
μ	ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) (นิวตันวินาทีต่อเมตร ²)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ขั้นตอนของกระบวนการผลิตน้ำประปาในปัจจุบันนั้น ประกอบด้วยกระบวนการหลักๆ ต่อไปนี้ คือ กระบวนการโคแอกกูเลชัน – ฟล็อกกูเลชัน (Coagulation- Flocculation processes) เพื่อรวมของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กให้เป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่เรียกว่าฟล็อก (Floc) ต่อมาจะทำการแยกฟล็อกดังกล่าวออกจากน้ำ ซึ่งมีวิธีแยกฟล็อก ได้แก่ การตกตะกอน (Sedimentation) จากนั้นเป็นกระบวนการกรอง (Filtration) เพื่อกำจัดความขุ่นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำออกให้หมด และสุดท้ายเป็นกระบวนการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกำจัดความขุ่นออกจากน้ำดิบต้องใช้กระบวนการหลายขั้นตอน

ในกระบวนการผลิตน้ำประปาขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่งคือการกำจัดความขุ่น ซึ่งส่วนใหญ่มาจากของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบ ในปัจจุบันได้ใช้สารส้มเป็นสารรวมตะกอน (Coagulant) ให้เกาะตัวกันเป็นก้อน เพื่อง่ายต่อการตกตะกอน ซึ่งหากน้ำดิบที่นำมาผลิตน้ำประปามีความขุ่นมากก็จะใช้ปริมาณสารส้มมาก ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์สารส้มซึ่งบำบัดได้ยากในปริมาณสูง ดังนั้นการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบให้น้อยลงก่อนที่จะนำน้ำดิบไปผลิตน้ำประปานั้น จะสามารถลดปริมาณสารส้มที่ใช้และยังสามารถลดผลิตภัณฑ์สารส้มได้ด้วย ด้วยเหตุนี้ จึงนำไปสู่แนวคิดที่จะใช้ไฮโดรไซโคลอนเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้น (Pre-treatment unit) เพื่อใช้กำจัดของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำดิบก่อนเข้าสู่หน่วยบำบัดต่อไป

ไฮโดรไซโคลอนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแยกของผสมออกจากกันโดยอาศัยการหมุนเหวี่ยงของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอนทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เพื่อให้อนุภาคของแข็งที่ผสมอยู่ถูกแยกโดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไปยังขอบของไฮโดรไซโคลอน การแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นหรือขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน (ในกรณีของแข็ง) การจ่ายของผสมเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอนนั้นส่วนใหญ่จะจ่ายทางด้านข้างเพื่อให้เกิดแนวสัมผัสเส้นรอบวง ทำให้เกิดการหมุนเหวี่ยงแล้วแยกของผสมออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ ส่วนที่ออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) จะนำเอาน้ำใสหรือของแข็งแขวนลอยที่มีความหนาแน่นต่ำหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กออก ส่วนที่สองคือ ส่วนที่ออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) ซึ่งจะนำเอาของแข็งแขวนลอยที่มีความหนาแน่นสูงหรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกมาพร้อมกับน้ำบางส่วน

ข้อดีของไฮโดรไซโคลนคือ เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกชนิดอื่นๆ มีราคาถูก มีการดำเนินการและติดตั้งได้ง่าย อีกทั้งมีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาไม่สูง เนื่องจากในการทำงานไม่มีชิ้นส่วนใดๆ ของไฮโดรไซโคลนเคลื่อนที่ ส่วนข้อเสียของไฮโดรไซโคลนคือ มีความต้องการพลังงานสูงในการสร้างความเร็วในการไหลเข้า โดยนิยมควบคุมความดันจ่ายเข้าเพื่อปรับอัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน

ไฮโดรไซโคลนที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้มี 2 ชนิด คือ ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอต (Grit pot) ข้อแตกต่างของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอต คือ ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอตจะให้ความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางออกด้านล่างมากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 5 ถึง 15 เท่า ทำให้สามารถใช้งานได้ทั้งของแข็งแขวนลอยบางส่วนออกจากน้ำดิบได้และใช้เวลาในการรวบรวมความเข้มข้นของตะกอนที่ต้องการกำจัดน้อยกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา แต่ข้อเสียของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอต คือ มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งจะต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา (Puprasert และ คณะ, 2004)

งานวิจัยของอ้อทิพย์ จีระพรชัย (2551) ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบตัวเดียว โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มิลลิเมตร โดยไฮโดรไซโคลนขนาดเดียวกันนี้ประกอบด้วย กริทพอต เพื่อใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในระบบผลิตน้ำประปา ซึ่งได้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในระดับหนึ่งเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดที่จะนำไฮโดรไซโคลนมาต่อแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนแบบทั่วไป (Simple overflow series) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำดิบ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอต ที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม
- 1.2.2 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอตที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม กับไฮโดรไซโคลนเดี่ยวทั้ง 3 ขนาด ในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบสำหรับระบบผลิตน้ำประปา

- 1.2.3 เพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลนที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรมและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม เพื่อใช้ในการบำบัดขั้นต้นในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบสำหรับระบบผลิตน้ำประปา

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 งานวิจัยนี้เป็นการทดลองในระดับการทดลอง โดยดำเนินการ ณ สถานีสูบน้ำดิบสำแล ตำบลสำแล จังหวัดปทุมธานี โดยใช้น้ำดิบจริงจากบริเวณปากทางน้ำที่ผ่านสถานีสูบน้ำก่อนส่งผ่านไปทางคลองประปา ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปามาใช้ในการทดลอง
- 1.3.2 งานวิจัยนี้จะนำโรงงานนำร่อง (Pilot plant) ไปติดตั้ง ณ บริเวณสถานีสูบน้ำ หลังจากนั้นจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำดิบที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- 1.3.3 ไฮโดรไซโคลนที่ใช้มี 3 ขนาด โดยไฮโดรไซโคลนยี่ห้อ NEYRTEC ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ทำจากโพลียูเรเทน (Polyurethane) และไฮโดรไซโคลนยี่ห้อ Dorr Oliver ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม และกริพพอดทำจากพลาสติกทรงกระบอกโปร่งใส ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตรและมีปริมาตร 1.2 ลิตร
- 1.3.4 การศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด ทำใน 2 แนวทาง โดยแนวทางแรกจะศึกษาในกรณีของการแยกมวลของแข็งแขวนลอย ได้แก่ ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอย ส่วนแนวทางที่สองจะศึกษาในกรณีของขนาดของของแข็งแขวนลอย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 ได้ข้อมูลในการใช้ไฮโดรไซโคลนหลากหลายขนาดและไฮโดรไซโคลนหลากหลายขนาดที่ติดตั้งกริพพอดที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นสำหรับระบบผลิตน้ำประปา

- 1.4.2 ได้ข้อมูลประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนทั้งสองระบบมาใช้ในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำดิบ เพื่อให้ น้ำดิบมีปริมาณของแข็งแขวนลอยลดลง
- 1.4.3 ได้ข้อมูลพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลนทั้งสองระบบในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการแยกของแข็งออกจากของเหลว (Rushton and Holdich, 2000)

เทคนิคในการแยกของแข็งออกจากของเหลวมี 2 วิธี

2.1.1 การกรอง (Filtration)

คือการนำของผสมที่มีทั้งของแข็งและของเหลวมาผ่านตัวกลาง (เช่น ตะแกรง กระดาษทราย กรวด เป็นต้น) ของเหลวจะไหลผ่านตัวกลาง ในขณะที่ของแข็งจะถูกกรองอยู่ด้านบนผิวหน้าของตัวกลาง

2.1.2 การตกตะกอน (Sedimentation)

การแยกโดยการตกตะกอนนั้นอาศัยแรงกระทำ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แรงโน้มถ่วง (Gravity force) และแรงเหวี่ยง (Centrifugal force) ซึ่งทั้ง 2 แรงนี้อาศัยความแตกต่างกันของความหนาแน่นของของแข็งและของเหลว ซึ่งของแข็งจะจมอยู่ในของเหลว

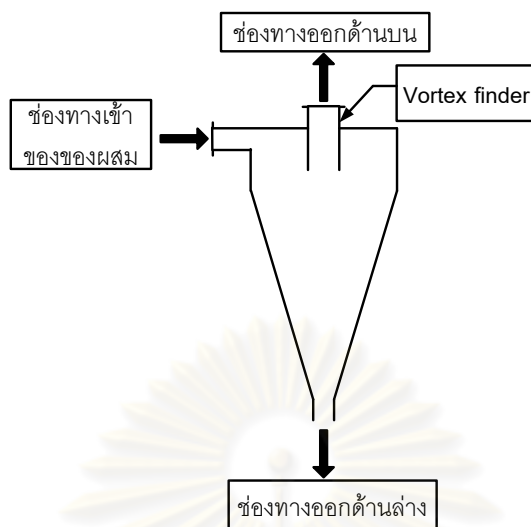
ในการตกตะกอนนั้น ผู้วิจัยสนใจในเรื่องของไฮโดรไซโคลน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเหลวโดยใช้แรงเหวี่ยง ซึ่งจะกล่าวในเรื่องของทฤษฎีต่อไป

2.2 ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone)

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลน (วรศิริ เสียงสนั่น, 2549)

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกของแข็งออกจากของเหลว ซึ่งการไหลของของเหลวในไฮโดรไซโคลน จะประกอบด้วย 3 ช่องทาง ดังแสดงได้ดังรูปที่ 2.1 คือ

1. ช่องทางเข้าของของผสม (Feed) จะอยู่ทางด้านข้างของไฮโดรไซโคลนเพื่อให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสเส้นรอบวง เกิดการกระจายตัวของอนุภาค ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่สามารถแยกตัวออกมาใกล้ผนังของไฮโดรไซโคลนและออกมาที่ช่องทางออกด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน
2. ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูง
3. ช่องทางออกด้านบน (Overflow) เป็นทางออกของน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 2.1 เส้นทางการไหลทั้ง 3 ส่วนภายในไฮโดรไซโคลน

หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลน เริ่มจากการจ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลนด้วยแรงดันของน้ำ โดยที่ช่องท่อจ่ายเข้าของไฮโดรไซโคลนส่วนใหญ่มีหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้นเมื่อมีการจ่ายของผสมหรือน้ำที่ต้องการบำบัดเข้าไปในไฮโดรไซโคลนทางด้านข้าง จะทำให้เกิดความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity) เพื่อให้เกิดการหมุนเหวี่ยง แล้วแยกการไหลของของผสมที่มีอนุภาคและความหนาแน่นที่แตกต่างกันออกจากกันเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือ การไหลของอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงจะไหลออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) พร้อมกับน้ำด้วยบางส่วน ส่วนที่สองคือ การไหลของน้ำใสและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำจะไหลขึ้นออกสู่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) ผ่านท่อที่อยู่ภายใน ซึ่งท่อดังกล่าว เรียกว่า Vortex finder

การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนจะมีลักษณะการไหลแบบหมุนวน สามารถแบ่งออกได้สองประเภท คือ การไหลแบบหมุนวนภายนอก (Outer vortex) เป็นการหมุนอยู่ด้านนอกติดกับผนังของไฮโดรไซโคลนในทิศทางลง ทำหน้าที่นำอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงไหลออกทางช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน และการหมุนวนภายใน (Inner vortex) เป็นการหมุนวนขึ้นด้านบนในทิศทางหมุนเดียวกันที่บริเวณแกนกลางของไฮโดรไซโคลน ทำหน้าที่นำอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำไหลออกทางช่องทางออกด้านบน และที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนจะเกิดแกนอากาศ (Air core) ขึ้น

ส่วนทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนจะพบว่าการไหลอีกแบบหนึ่ง ซึ่งของผสมจะเคลื่อนที่ผ่านส่วนปิดบน Vortex finder และรอบๆ ผนังของไฮโดรไซโคลนที่ของผสมนั้นจะไหลวนอยู่เฉพาะ

บริเวณในส่วนบนของไฮโดรไซโคลนและไหลออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) โดยไม่ผ่านการหมุนวนใน Outer และ Inner vortex ดังนั้นจึงไม่เกิดการแยกอนุภาคในเส้นการไหลนี้ ของผสมที่ไหลออกทางช่องทางออกด้านบนจะไหลไปรวมกับของผสมที่ไม่ได้ไหลลงมาที่ตัวไฮโดรไซโคลน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ซึ่งทำให้ความเร็วของการหมุนวนในไฮโดรไซโคลนลดลง เนื่องจากการไหลวนอยู่เฉพาะบริเวณภายในช่วงบนของไฮโดรไซโคลนแล้ว ไหลลัดออกทางช่องทางออกด้านบน

ไฮโดรไซโคลนสามารถทำหน้าที่เป็นได้ทั้งอุปกรณ์สำหรับทำใส (Clarifier) และอุปกรณ์สำหรับทำข้น (thickeners) นั่นคือ ส่วนการไหลที่ไหลออกทางด้านบน (Overflow) เป็นการเจือจางของของแข็งหรืออนุภาคขนาดละเอียด ซึ่งแสดงว่ามีปริมาณอนุภาคของแข็งน้อยลง ส่วนการไหลที่แยกออกทางด้านล่าง (Underflow) จะมีอนุภาคขนาดใหญ่และมีความเข้มข้นของของแข็งมากกว่า

การใช้ไฮโดรไซโคลนในภาคอุตสาหกรรม ในกรณีที่ค่าความดันลดของไฮโดรไซโคลนมีค่าสูงมาก หรืออัตราการไหลของของผสมมีค่ามาก อาจจำเป็นต้องใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อกันแบบขนานหรือแบบอนุกรมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยออกจากกัน

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบขนาน นิยมใช้เพื่อรับอัตราการไหลของของผสมได้สูงขึ้นตามต้องการ ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบขนานนี้อาจใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีรูปร่างและขนาดเดียวกันหลายๆ ตัว มาต่อบนแบบขนานโดยต้องออกแบบให้ของไหลผ่านเข้ามาในไฮโดรไซโคลนเท่าๆ กัน

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม หมายถึงการใช้ไฮโดรไซโคลนหลายตัวมาต่อกันแบบอนุกรม อนุภาคที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำในส่วนที่ออกทางช่องทางออกด้านบน จะไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวที่สองและต่อไป ค่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนตัวที่สองจะน้อยกว่าของไฮโดรไซโคลนตัวแรก ดังนั้นอาจออกแบบให้ไฮโดรไซโคลนตัวถัดมามีขนาดเล็กลงตามลำดับ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กที่หลุดรอดออกมาจากไฮโดรไซโคลนตัวต้นๆ อนุภาคที่ออกมาจากไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวมีการกระจายตัวของขนาดแตกต่างกัน ในการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบนี้อาจใช้สำหรับแยกอนุภาคของผสมออกเป็น 2-3 ขนาดก็ได้ นอกจากนี้ยังใช้ได้กับในกรณีของผสมมีการกระจายขนาดกว้าง ดังนั้นควรใช้ไฮโดรไซโคลนตัวแรกแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เพื่อป้องกันการอุดตันและเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนตัวต่อไปซึ่งมีขนาดเล็กกว่า

โดยทั่วไปขนาดของไฮโดรไซโคลน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 มิลลิเมตรถึง 2.5 เมตร ขนาดของอนุภาคที่แยกได้อยู่ระหว่าง 2-250 ไมโครเมตร และอัตราการไหลที่ใช้จะมีปริมาตร

อยู่ระหว่าง 0.1-7200 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง ค่าความดันลด (pressure drop) ระหว่างช่องทางที่จ่ายน้ำเข้ากับช่องทางที่น้ำไหลออก ซึ่งค่าที่ใช้ในการทำงานอยู่ระหว่างความดันขนาด 0.34-6 บาร์ ซึ่งไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กจะทำงานที่ความดันสูงกว่าไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดใหญ่ (Svarovsky, 1984)

ข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลน สามารถสรุปได้ดังนี้

ข้อดีของไฮโดรไซโคลน

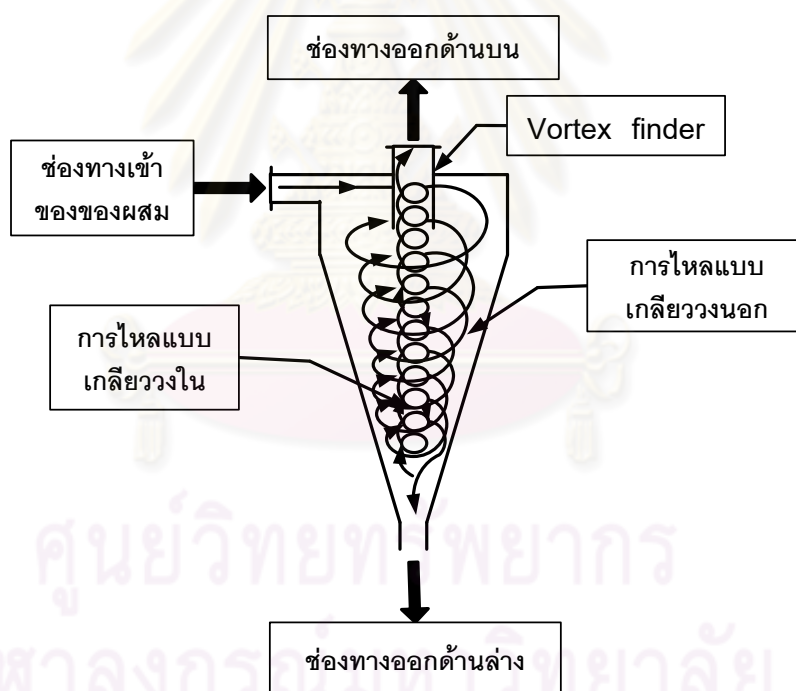
1. ไฮโดรไซโคลนใช้เวลาในการแยกตะกอนน้อยกว่าในกระบวนการแยกวิธีอื่นๆ
2. ไฮโดรไซโคลนมีราคาถูก ติดตั้งง่าย และมีความต้องการการบำรุงรักษาต่ำ
3. ไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์การแยกชนิดอื่นๆ
4. ไฮโดรไซโคลนสามารถประยุกต์ใช้กับการแยกของแข็งออกจากของเหลว แยกของเหลวสองชนิดที่อยู่ร่วมกัน แยกก๊าซออกจากของเหลว หรือแยกของแข็งออกจากของแข็งด้วยกันในภาวะที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน

ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

1. ไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกขนาดของอนุภาคออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากมีการปะปนของอนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดเล็ก หรือมีการปะปนของอนุภาคขนาดเล็กในส่วนที่ต้องการแยกอนุภาคขนาดใหญ่
2. ตัวเรือนไฮโดรไซโคลนเกิดการกัดกร่อนและสึกหรอได้ เนื่องจากการกระทบกันระหว่างอนุภาคของแข็งกับผนังภายในไฮโดรไซโคลน อย่างไรก็ตามสามารถป้องกันได้โดยการเคลือบผิวภายในไฮโดรไซโคลนหรือเลือกวัสดุของตัวเรือนไฮโดรไซโคลนที่มีคุณสมบัติทนต่อการกัดกร่อน
3. แรงเฉือน (Shear force) ที่มีมากในไฮโดรไซโคลน ทำให้อนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นก้อนจากกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน (Coagulation-Flocculation) เกิดการแตกตัวออกจากกันได้
4. ใช้พลังงานสูงในการสร้างความเร็วในการไหลเข้า โดยนิยมควบคุมความดันจ่ายเข้าเพื่อปรับอัตราไหลเข้าไฮโดรไซโคลน

2.2.2 การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน (Fluid Flow and Particle Motion in Hydrocyclone)

การไหลของของไหลและการเคลื่อนที่ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลน อาศัยหลักการของแรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน แรงดังกล่าวเกิดจากการหมุนวน ซึ่งเกิดจากการจ่ายของผสมเข้าไปในลักษณะสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน ดังรูปที่ 2.2 แสดงให้เห็นรูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่ใช้กันอยู่ แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนบนที่เป็นทรงกระบอกจะถูกปิดที่ส่วนบนด้วยตัวครอบและมีท่อทะลุสำหรับให้ของไหลออกทางด้านบน เรียกว่า Vortex finder มีระยะยื่นออกมาจากตัวไฮโดรไซโคลน และส่วนล่างที่เป็นกรวยจะมีลักษณะเป็นช่องเปิดปลายกรวยเพื่อให้อนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลนออกมาทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) ของผสมจะถูกจ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลนตามแนวสัมผัสผิวเส้นรอบวง ในทางปฏิบัติช่องทางเข้าของของผสมจะเป็นตัวกำหนดอัตราการไหลที่จะเข้ามาในไฮโดรไซโคลน

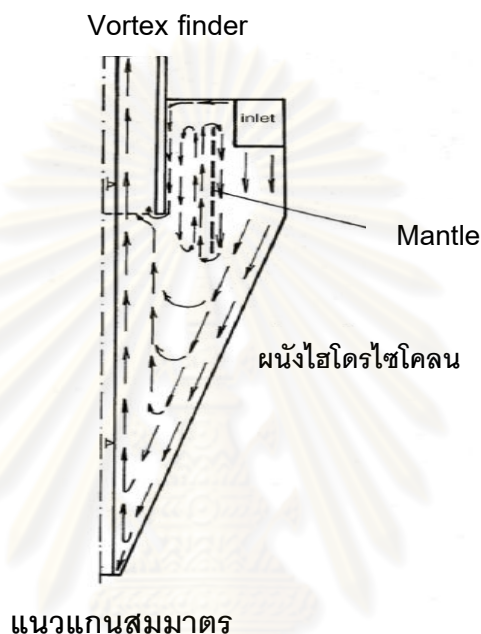


รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลแบบหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลน

บริเวณด้านในและบริเวณรอบๆ ของท่อทางเข้า การเคลื่อนที่ของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนเป็นลักษณะสมมาตร ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ของไหลที่ไหลเข้ามาส่วนใหญ่มักจะเคลื่อนที่ในลักษณะการไหลแบบเกลียววงนอก (Outer vortex) ไปสู่ด้านล่างของกรวยและทำให้ของไหลและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่ไหลออกทางช่องเปิดด้านล่าง (Underflow) ที่ปลายแหลมของกรวย

จากนั้นน้ำและอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กบางส่วนจะไหลกลับขึ้นมาในแนวแกนกลางของไฮโดรไซโคลน (Inner vortex) เคลื่อนที่ในแนวตั้งขึ้นมาและไหลออกทาง Vortex finder

นอกจากนี้ยังมีการไหลวนที่เรียกว่า Mantle ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งทำให้เกิดเส้นทางไหลที่แบ่งออกจากกันระหว่างการไหลลงที่บริเวณผนังของกรวยและการเคลื่อนที่ขึ้นที่บริเวณด้านในใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

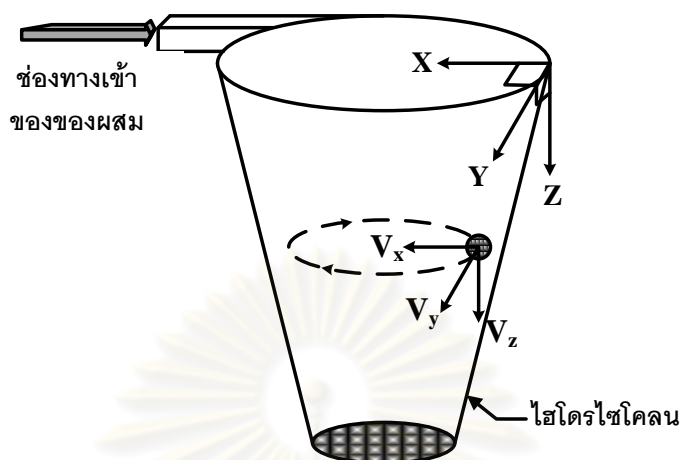


รูปที่ 2.3 เส้นทางไหลของของไหลตามแนวแกนและตามแนวรัศมีภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

2.2.3 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน (velocity in hydrocyclone)

(Puprasert, 2004)

ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลนเกิดจากการจ่ายของผสมระหว่างของไหลกับของแข็งเข้าไปในไฮโดรไซโคลนตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ส่งผลให้ของผสมในไฮโดรไซโคลนมีความเร็วของของไหลซึ่งสามารถแบ่งออกตามทิศทางของความเร็วนั้นๆ ได้ 3 ชนิด คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y) ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, V_z) และความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, V_x) ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ความเร็วของของไหลในไฮโดรไซโคลน (Puprasert, 2004)

2.2.3.1 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y)

ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง คือ ความเร็วเชิงเส้นของของผสมที่จ่ายไปที่บริเวณทางเข้าโดยมีทิศทางสัมผัสกับผิวเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน และมีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของของผสมที่จ่ายเข้าที่บริเวณทางเข้ากับพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลน ดังสมการที่ 2.1

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

เมื่อ V_i คือ ความเร็วของของผสมที่จ่ายไปที่ช่องทางเข้าไฮโดรไซโคลน

Q คือ อัตราการไหลเข้าของของผสมที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน

A_i คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลน

โดยที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ในไฮโดรไซโคลน สามารถแสดงได้ดังนี้

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

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

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

เมื่อ α คือ อัตราส่วนระหว่างความเร็วภายในไฮโดรไซโคลน (V_y) กับความเร็วที่ช่องจ่ายเข้า (V_i) ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.8 (Bradley, 1965)

จากสมการที่ 2.4 แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่หน้าตัดของช่องทางเข้าของไฮโดรไซโคลนลดลง เมื่อมีอัตราการไหล (Q) คงที่

การจ่ายของผสมตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน จะทำให้เกิดลักษณะการหมุนวน 2 ประเภท คือ Free vortex หรือ Outer vortex ซึ่งจะหมุนวนอยู่ภายนอกในทิศทางลงตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง และ Force vortex หรือ Inner vortex ซึ่งจะหมุนขึ้นในทิศทางเดียวกันกับบริเวณใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน

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

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

เมื่อ A_t คือ ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง ซึ่งเปรียบเสมือนความเร็วลัทธิที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน

R คือ รัศมีของไฮโดรไซโคลน

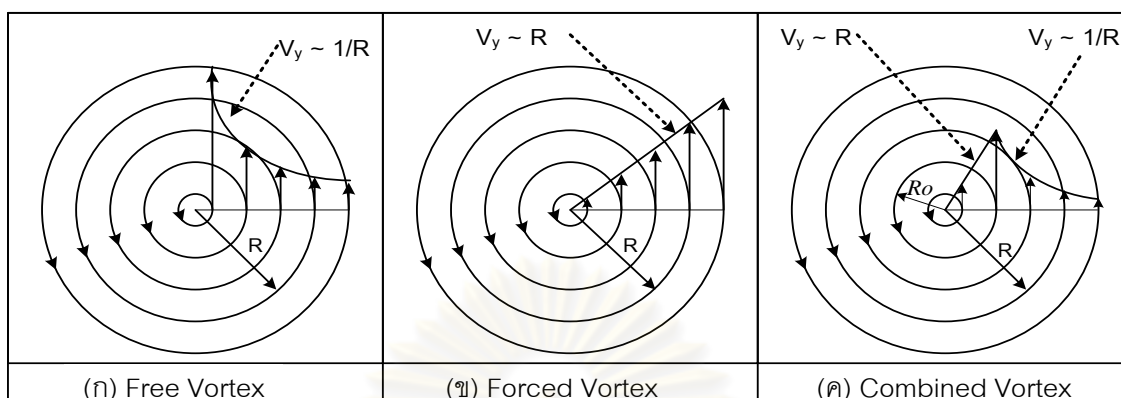
แต่ในทางปฏิบัติจริงจะมีการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุม (Angular momentum) จะทำให้ได้ค่าน้อยกว่าสมการข้างต้น ดังนั้น

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

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

สมการที่ 2.5 และ 2.6 ใช้ได้กับการหมุนวนภายนอก (Outer vortex) นั่นคือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลง ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกัน การหมุนวนภายใน (Inner vortex) ในทิศทางขึ้นใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลน เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางเพิ่มขึ้น ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงก็จะเพิ่มขึ้น ดังสมการ

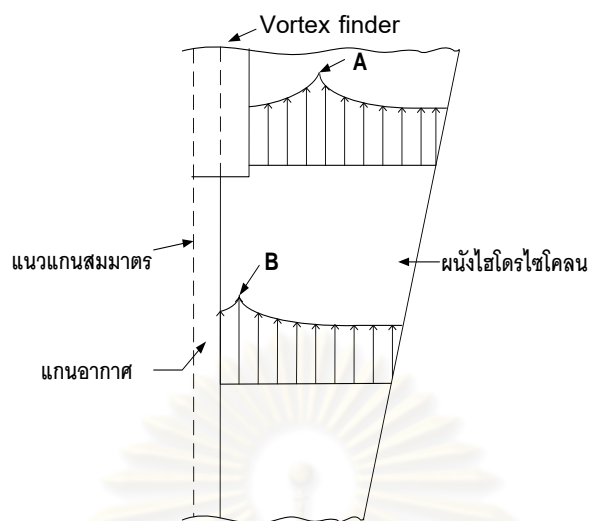
$$\frac{V_y}{R} = \text{constant} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกระจายความเร็วตามแนวรัศมีเส้นรอบวงทั้ง 3 ประเภท
(Puprasert, 2004)

จากรูปที่ 2.5 แสดงให้เห็นว่า การหมุนวนแบบ (ค) Combined vortex คือ สภาพจริงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะดีที่สุด เมื่ออนุภาคอยู่ในบริเวณใกล้กับตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวรัศมีเส้นรอบวงมากที่สุด ดังนั้นจึงควรออกแบบไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยแหลมและยาว เพื่อเพิ่มโอกาสให้อนุภาคเข้าสู่ตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวรัศมีเส้นรอบวงมากขึ้น

Kelsall, 1952 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ทดลองพบว่าตามแนวรัศมีเส้นรอบวงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีการหมุนลดลงเข้าใกล้แกนอากาศ ซึ่ง Kelsall ทำการทดลองวัดความเร็วตามแนวรัศมีเส้นรอบวง (Tangential velocity, V_y) โดยทดลองกับน้ำสะอาดที่มีการผสมอนุภาคอลูมิเนียม (Aluminium) แล้วใช้กล้องไมโครสโคป (Microscope) วัดตำแหน่งที่มีการโปร่งใสในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร ผลการทดลองแสดงดังในรูปที่ 2.5 ทั้งนี้ ผลดังกล่าวเป็นค่าความเร็วตามแนวรัศมีเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนเฉพาะในส่วนที่เป็นทรงกรวย ไม่รวมส่วนที่เป็นทรงกระบอก



รูปที่ 2.6 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

จากรูปที่ 2.6 ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลน จะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีของไฮโดรไซโคลนลดลง ตามสมการที่ 2.6 และ 2.7 แต่บริเวณรอบๆ Vortex finder ไม่สามารถใช้สมการนี้อธิบายได้ เนื่องจากที่บริเวณเหนือขอบ Vortex finder ขนาดรัศมีที่ทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดใหญ่กว่าขนาดรัศมีของ Vortex finder ที่ตำแหน่ง A และ ตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงส่น้อยกว่ารัศมีของ Vortex finder ที่ตำแหน่ง B

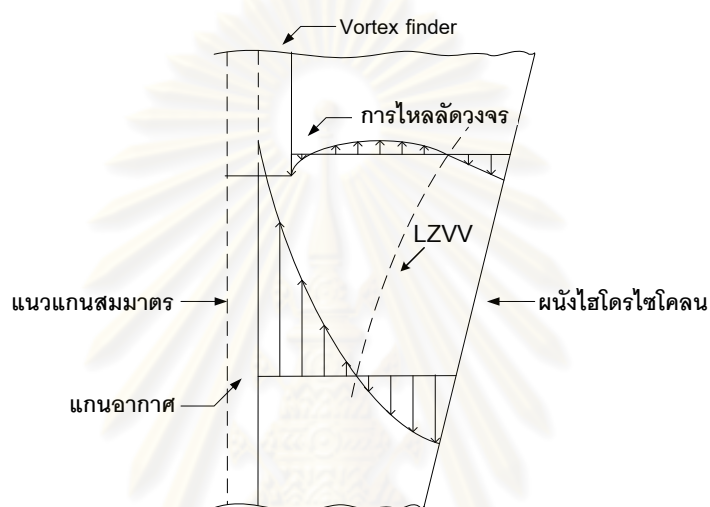
ตำแหน่ง A และ B ต่างเป็นตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนสูงสุด ซึ่งรัศมีจากขอบผนังไฮโดรไซโคลนไปถึงขอบ Vortex finder จะมีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง A และในทำนองเดียวกัน รัศมีจากขอบผนังไฮโดรไซโคลนไปถึงขอบของแกนอากาศ (Air core) จะมีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง B จากปรากฏการณ์นี้แสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลนไม่ขึ้นกับตำแหน่งใดๆ ตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลน

อย่างไรก็ตาม ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) ก็ยังเป็นความเร็วของของไหลที่สำคัญที่สุดที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลน เนื่องจากมีค่ามากที่สุดจากความเร็วของไหลทั้งหมด

2.2.3.2 ความเร็วตามแนวแกน (Axial velocity, V_z)

ความเร็วตามแนวแกน คือ ความเร็วที่มีทิศทางตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลนโดยอาจมีทิศทางขึ้นหรือลง นั่นคือ การหมุนวนภายนอก (Outer vortex) ที่มีทิศทางลงสู่ทางออกด้านล่าง ในขณะที่การหมุนวนภายใน (Inner vortex) มีทิศทางขึ้นไปสู่ทางออกด้านบน จากทิศทางการ

ไหลในส่วนการหมุนวนภายนอกและการหมุนวนภายในที่มีทิศทางไหลสวนทางกัน จะทำให้เกิดตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวแกนเท่ากับศูนย์ (Locus of Zero Vertical Velocity หรือ LZV) ซึ่งตำแหน่งดังกล่าวจะอยู่ระหว่างการหมุนวนภายนอก (Outer vortex) และการหมุนวนภายใน (Inner vortex) และเป็นตำแหน่งที่ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงมีค่ามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.7 และบริเวณด้านบนของไฮโดรไซโคลนตรงขอบด้านนอกของ Vortex finder จะเกิดการไหลลัดวงจร (Short circuit flow) ขึ้นอีกด้วย

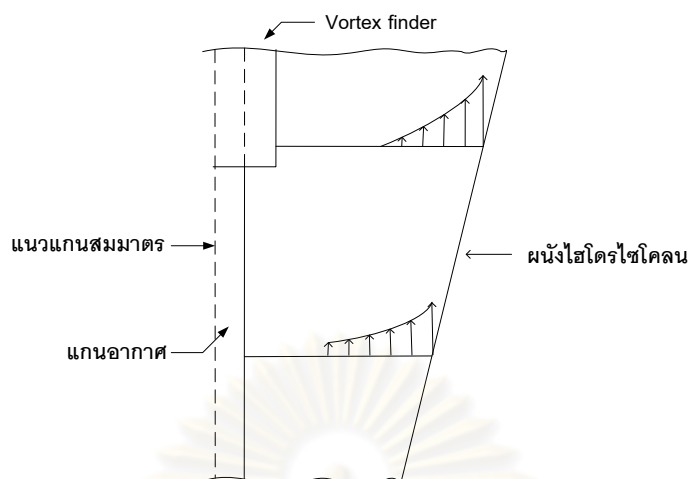


รูปที่ 2.7 การกระจายความเร็วตามแนวแกน (V_z) ภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

2.2.3.3 ความเร็วตามแนวรัศมี (Radial velocity, V_x)

ความเร็วตามแนวรัศมี คือ ความเร็วที่มีทิศทางตั้งฉากกับแนวแกนของไฮโดรไซโคลน และเป็นความเร็วที่มีค่าน้อยที่สุดจากความเร็วของของไหลทั้ง 3 ชนิดภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งความเร็วในแนวแกนรัศมีจะมีค่าสูงที่สุดที่บริเวณเหนือขอบของ Vortex finder ใกล้กับผนังของไฮโดรไซโคลน ดังแสดงในรูปที่ 2.8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.8 การกระจายความเร็วตามแนวสัมผัสรัศมี (V_x) ภายในไฮโดรไซโคลน (Svarovsky, 1984)

2.2.4 กฎของสโตค (Stokes's law)

กฎของสโตคเป็นกฎพื้นฐานที่ใช้อธิบายพฤติกรรมของการแยกของแข็งโดยใช้ไฮโดรไซโคลน โดยมีสมมติฐานว่าอนุภาคนั้นมีรูปร่างเป็นทรงกลม และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในระบบที่พิจารณา อนุภาคจะตกตะกอนลงเนื่องจากความเร่งโน้มถ่วงของโลก ซึ่งการเคลื่อนที่ลงของอนุภาคจะมีแรงต้านที่เรียกว่า แรงลาก (Drag force) และความหนืดของของเหลว (Viscosity) ที่มีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค

แรงสำคัญที่ทำให้เกิดการแยกของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน คือ แรงหนีศูนย์กลางซึ่งเกิดจากการหมุนของกระแสวน ดังนั้นแรงหนีศูนย์กลางจะมีค่าเท่ากับผลคูณของมวลกับความเร่งหนีศูนย์กลาง

$$F = \frac{m \cdot V_y^2}{R} \quad (2.8)$$

ประสิทธิภาพการแยกในไฮโดรไซโคลน ขึ้นอยู่กับความเร็วของการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน การเพิ่มความเร็วของการไหลเข้าจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ปรัชญาการแยกแยะระหว่างของแข็งในไฮโดรไซโคลนสามารถอธิบายได้จากกฎของสโตค (Stokes's law) (Metcalf และ Eddy, 2003)

$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 \cdot g}{18\mu} \quad (2.9)$$

เมื่อ	V_p	คือ	ความเร็วในการตกตะกอน (Terminal velocity) หน่วย เมตรต่อวินาที
	$\Delta\rho$	คือ	ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคและของเหลว หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
	d_p	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (Particle diameter) หน่วย เมตร
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (Acceleration due to gravity) มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที ²
	μ	คือ	ความหนืดพลศาสตร์ของของเหลว (Dynamic viscosity) หน่วยนิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร

โดยทั่วไปในกระบวนการบำบัดน้ำ นิยมใช้การแยกอนุภาคด้วยการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก สำหรับเครื่องมือการแยกอื่นๆ สามารถทำการเพิ่มความเร่งนี้เพื่อให้ความเร็วในการตกตะกอน (V_p) เพิ่มขึ้นได้ และในกรณีของไฮโดรไซโคลนความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนจะมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาก

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนกับความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก สามารถแสดงได้ดังนี้ (Puprasert, 2004)

$$\zeta = \frac{V_y^2}{R \cdot g} \quad (2.10)$$

เมื่อ	ζ	คือ	ความเร่งหนีศูนย์กลางสัมพัทธ์ภายในไฮโดรไซโคลน (Relative centrifugal acceleration in hydrocyclone) หน่วย เมตรต่อวินาที ²
	V_y	คือ	ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลน หน่วย เมตรต่อวินาที
	R	คือ	รัศมีของไฮโดรไซโคลน (บริเวณส่วนที่เป็นทรงกระบอก) หน่วย เมตร
	g	คือ	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีค่าเท่ากับ 9.81 เมตรต่อวินาที ²

ดังนั้น Stokes's law ในกรณีของไฮโดรไซโคลน เป็นดังสมการต่อไปนี้

$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 \cdot \zeta}{18\mu} \quad (2.11)$$

จากสมการกฎของสโตคจะเห็นได้ว่าตัวแปรที่มีผลสำคัญต่อความเร็วในการแยกอนุภาคมีต่างๆ ดังนี้

1. ความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส, $\Delta\rho$

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว เมื่อของผสมนั้นมีความหนาแน่นแตกต่างกัน โดยความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคสองเฟส ($\Delta\rho$) นั้นหมายถึง ค่าความแตกต่างระหว่างความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (ρ_p) และความหนาแน่นของน้ำ (ρ_w), ($\Delta\rho = \rho_p - \rho_w$) นั่นเอง ในการแยกของแข็งออกจากน้ำด้วยไฮโดรไซโคลอนจะไม่เกิดขึ้น หากความหนาแน่นของทั้งสองเฟสไม่มีความแตกต่างกัน ($\Delta\rho = 0$) ซึ่งจะทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาค (V_p) ดังสมการที่ 2.9 มีค่าเท่ากับศูนย์ด้วย เป็นผลทำให้ไฮโดรไซโคลอนไม่สามารถแยกอนุภาคทั้งสองเฟสออกจากกันได้

2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง, d_p

ตัวแปรที่สำคัญอีกตัวหนึ่งก็คือ ขนาดอนุภาคของของแข็ง ซึ่งมาจากสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) จะเห็นได้ว่า d_p อยู่ในรูปของกำลังสอง (d_p^2) นั้นหมายถึง ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่ ความเร็วในการแยกอนุภาค (V_p) ก็จะมีเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย กล่าวคือ ขนาดอนุภาคของของแข็งจะมีผลสำคัญต่อการเกิดความเร็วในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนมากกว่าตัวแปรอื่นๆ ดังนั้น หากสามารถทำการเพิ่มขนาดอนุภาคของแข็งได้ จะทำให้มีประสิทธิภาพการแยกอนุภาคด้วยไฮโดรไซโคลอนเกิดขึ้นได้ดี

3. ความหนืดของของไหล, μ

ความหนืดของของไหลส่งผลต่อความเร็วในการแยกอนุภาค (V_p) เมื่อค่าความหนืดของของไหลสูงจะส่งผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคต่ำ ในทางตรงกันข้าม ถ้าความหนืดของของไหลมีค่าต่ำจะมีผลทำให้ความเร็วในการแยกอนุภาคสูง และความหนืดยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิของของไหลอีกด้วย โดยถ้าหากอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความหนืดของของไหลต่ำ ดังนั้น เพื่อให้ค่าความเร็วในการแยกอนุภาคสูงและส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น ควรให้ของไหลมีความหนืดต่ำหรือควรมีอุณหภูมิสูงนั่นเอง

2.2.5 พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน

1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน, D_C

เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน วัดที่ฐานของส่วนที่เป็นกรวยหรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกระบอก เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (Cut size, x_{50}) โดยที่อัตราการไหล (Q) คงที่ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (x_{50}) และความดันลด (Pressure drop, Δp) ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน (D_C) แสดงได้ดังนี้

$$x_{50} \propto D_C^x \quad (2.12)$$

$$\Delta p \propto D_C^y \quad (2.13)$$

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

ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.12) และ (2.13) เป็นการกล่าวถึงการเปรียบเทียบเมื่ออัตราการไหลคงที่ และความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล (Q) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_C) ที่ความดันลด (Δp) คงที่ เป็นดังนี้

$$Q \propto D_C^z \quad (2.14)$$

โดยที่ z มีค่าอยู่ระหว่าง 1.8 ถึง 2.0 (Bradley, 1965)

ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดตัด (x_{50}) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน (D_C) ที่ความดันลด (Δp) คงที่ เป็นดังนี้

$$x_{50} \propto D_C^x \quad (2.15)$$

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) ควรจะให้ค่าโมเมนต์ (QV) ที่จ่ายเข้าไปมีค่าสูงสุด เพื่อให้ความเร็วเฉลี่ยที่ทางเข้าเท่ากับหรือใกล้เคียงกับความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงที่รัศมีเฉลี่ยทางเข้า (mean radius of entry) การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า จะทำให้โมเมนต์เพิ่มขึ้นจนถึงช่วงค่าหนึ่งแล้วจึงลดลง ดังนั้นในการออกแบบขนาดของช่องจ่ายเข้าจึงควรเลือกช่วงที่มีค่าโมเมนต์สูงสุด (Bradley, 1965)

Chaston, 1965 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ศึกษาถึงขนาดที่เหมาะสมของเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า โดยค่าที่เหมาะสมเป็นที่ยอมรับและใช้กันอยู่ทั่วไป คือ $\frac{D_c}{6}$ ถึง $\frac{D_c}{7}$ เมื่อ D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน

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

2.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Overflow diameter, D_o)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนส่งผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนใน 2 ลักษณะ คือ

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

การไหลลัดวงจรเป็นลักษณะการไหลที่นำอนุภาคหยาบไหลออกด้านบน (Overflow) ซึ่งเกิดจากผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องทางออกด้านบนมีขนาดใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด อนุภาคที่อยู่ในเส้นทางการไหลลัดวงจร จะไหลกลับเข้ามาในบริเวณของการเพิ่มความเร็วตามแนวสัมผัสภายในไฮโดรไซโคลอน และเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ไปตามขอบด้านล่างของ Vortex finder และมีโอกาสที่จะไหลเข้ามาสู่กระบวนการแยกอนุภาคอีกครั้ง ในทางตรงกันข้าม ถ้ารัศมีด้านนอกของช่องทางออกด้านบนมีขนาดเล็กกว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสสูงสุด โอกาสที่อนุภาคจะไหลย้อนกลับไปยังการหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอนก็จะน้อยลงไปด้วย

ดังนั้นเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบนลดลง จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนมีค่าลดลงด้วย

2. ในกรณีถ้าขนาดของช่องทางออกด้านบน (D_o) มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของ LZVV (Locus of zero vertical velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วตามแนวแกนภายในไฮโดรไซโคลอนเท่ากับศูนย์ โดย LZVV จะมีขนาดประมาณ 0.43 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ($0.43 D_c$) เป็นเหตุให้การไหลตามแนวรัศมีลดลง ทำให้อนุภาคไหลแยกออกไปทางด้านบนโดยไม่เข้าสู่กระบวนการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอน เกิดการไหลลัดลงจริงขึ้น

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) พบว่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบจะลดลง เมื่อ $D_o = \frac{D_c}{12}$ หรือเส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก Vortex finder มีค่าเท่ากับ $\frac{D_c}{6}$

Bradley, 1965 แนะนำว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (D_o) ที่มากที่สุดและน้อยที่สุดสามารถพิจารณาได้จากลักษณะการไหล โดยค่ามากที่สุดเท่ากับ $\frac{D_c}{2.3}$ ค่าน้อยที่สุดเท่ากับ $\frac{D_c}{8}$ ค่าที่ทำให้ปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ออกที่ช่องทางออกด้านบนน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ $\frac{D_c}{7}$ และขนาดช่องทางออกด้านบน (D_o) ควรจะใหญ่กว่าช่องทางจ่ายเข้า (D_i) โดยอาจมีค่า $D_o = D_i$ ไปจนถึง $D_o = 1.6D_i$ เพื่อป้องกันการกัดเซาะผนังของไฮโดรไซโคลอนจากการจ่ายของผสมเข้าไป นอกจากนี้ค่า $2D_i + D_o$ ควรมีค่าน้อยกว่า D_c

ความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสาม สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.16

$$2D_i + D_o = 0.4 - 0.6D_c \quad (2.16)$$

และความสัมพันธ์ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทั้งสามสำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็ก คือ

$$2D_i + D_o = 0.35 - 0.7D_c \quad (2.17)$$

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

2.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Underflow diameter, D_u)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) โดยส่วนใหญ่แล้วจะเป็นขนาดที่แปรผันได้หรือเป็นลักษณะที่ปรับเปลี่ยนได้ เพื่อควบคุมอัตราการไหลออกทางด้านล่าง ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างจึงขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานมากกว่าที่จะกำหนดเป็นค่าคงที่

ปริมาณอัตราการไหลออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (Q_u) ที่น้อยที่สุดจะเท่ากับปริมาณของอนุภาคของแข็งที่แยกออกมารวมกับปริมาณของไหลที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาคของแข็ง นั่นคือ นอกจากจะขึ้นกับการใช้งานแล้วยังขึ้นกับการกระจายขนาดอนุภาค (Size distribution) ในเส้นการไหลลงสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (D_u) โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วง $\frac{D_c}{10}$ ถึง $\frac{D_c}{5}$ และควรมีค่า $D_u = \frac{D_o}{3}$ เมื่อ $D_o = \frac{D_c}{5}$ ภายใต้สภาวะความดันคงที่ ซึ่งจะทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลเข้า (Feed flowrate) กับอัตราการไหลออกที่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow flowrate) หรือ $\frac{Q_f}{Q_u}$ มีค่าประมาณ 10 เปอร์เซนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) อาจถือได้ว่าไม่มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนหรืออาจมีผลกระทบเพียงเล็กน้อย

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) พบว่าประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนจะลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) ลดลง อีกทั้งยังส่งผลกระทบต่อความดันลด สำหรับไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องการไหลต่างๆใหญ่ตามไปด้วย ในขณะที่เดียวกันไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็ก ก็จะได้รับผลกระทบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (D_u) ให้มีค่าประมาณ $\frac{D_c}{7}$

ดังนั้น สามารถสรุปผลของช่องทางออกทั้งสามทาง ในรูปคณิตศาสตร์ที่มีต่อไฮโดรไซโคลอน

$$D_c > 2D_i + D_o + 2t \quad (2.18)$$

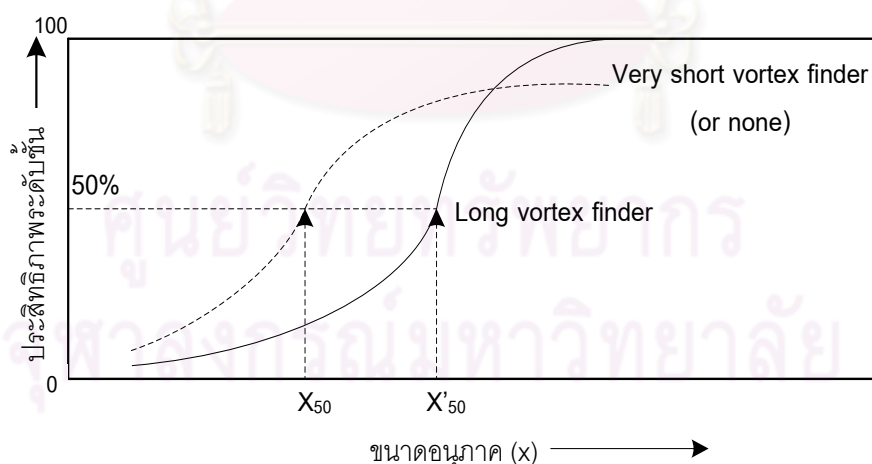
- เมื่อ D_c คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน
 D_i คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องจ่ายเข้า
 D_o คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน

t คือ ความหนาของผนัง Vortex finder

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

Vortex finder คือ ช่องทางที่น้ำไหลออกทางด้านบน (Overflow) และมีไว้เพื่อป้องกันการไหลลัดวงจรด้วย โดยอนุภาคที่จ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนจะเคลื่อนที่ลงตามผนังด้านนอกของ Vortex finder เข้าสู่ตัวเรือนของไฮโดรไซโคลอน ความยาวของ Vortex finder จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (x_{50}) โดยที่การเพิ่มความยาวของ Vortex finder จะทำให้อนุภาคมีเวลาการแยกออกจากน้ำภายในไฮโดรไซโคลอนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบ ในขณะที่เดียวกันก็จะเป็นการลดประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดละเอียด ซึ่งควรที่จะไหลออกไปที่ทางออกด้านบน (Overflow) พร้อมกับน้ำใสแต่ย้อนกลับมาไหลออกที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน ดังนั้น ความยาวของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับการกระจายขนาดของกลุ่มที่จ่ายเข้าไปและจุดตัด (Cut point) ซึ่งสัมพันธ์กับการกระจายของขนาดนั้นๆ

เนื่องจากความยาวของ Vortex finder ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดตัด (x_{50}) ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อความยาวของ Vortex finder ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และจะมีค่าต่ำสุดเมื่อไม่มี Vortex finder ในกรณีนี้จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดใหญ่ลดลง กล่าวคือ อนุภาคขนาดใหญ่ดังกล่าวจะไหลออกสู่ทางออกด้านบน (Overflow) โดยเส้นทางการไหลลัดวงจร



รูปที่ 2.9 ผลของความยาวของ Vortex finder ต่อประสิทธิภาพระดับขั้นและขนาดตัด

(Svarovsky, 1984)

จากที่กล่าวมาข้างต้นจึงทำให้มีการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ที่ใช้ในโรงงาน ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 24 นิ้ว ทำการแยกของผสมที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ที่ความดันต่ำ จากผลการทดลอง พบว่า ความยาวของ Vortex finder ไม่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการ

แยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน อาจอธิบายได้ว่า เกิดจากการที่อนุภาคตกลงมาด้วยแรงโน้มถ่วงของโลก เป็นเหตุให้อนุภาคไหลออกจากเส้นการไหลลัดวงจรเข้าสู่การไหลแบบปกติภายในไฮโดรไซโคลอนได้

Bradley, 1965 ได้ศึกษาถึงรูปร่างที่ต่างกันของ Vortex finder พบว่า ค่าที่เหมาะสมของความยาวของ Vortex finder โดยทั่วไปแล้วจะให้มีระยะตามแนวแกนของไฮโดรไซโคลอนให้เพียงพอระหว่างระดับท้องของช่องจ่ายเข้า (Feed-in) กับส่วนปลายของ Vortex finder โดยที่ส่วนปลายของ Vortex finder ไม่ควรอยู่ในระดับเดียวกันกับท้องท่อจ่ายเข้าและไม่ควรอยู่ใกล้กับบริเวณหน้าตัดที่เป็นรอยต่อระหว่างส่วนทรงกระบอกและทรงกรวย เนื่องจากบริเวณนี้มีการกระจายอนุภาคแบบปั่นป่วน อาจทำให้มีอนุภาคขนาดใหญ่ปนออกไปพร้อมกับน้ำใส่ที่ออกทางออกด้านบน (Overflow) ได้

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ผนังด้านนอกของ Vortex finder ก็มีความสำคัญอีกเช่นกัน จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องออกทางออกด้านบน (D_o) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนลดลง เนื่องจากการไหลลัดวงจรกับตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงของไฮโดรไซโคลอน ในขณะเดียวกันก็พบข้อดีของการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องออกทางออกด้านบน เมื่อควบคุมให้ผนังด้านนอกของ Vortex finder มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าตำแหน่งที่มีความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงสูงสุด โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบนของ Vortex finder ที่เหมาะสมจึงไม่ควรเกิน $D_c - 2D_i$ และความยาวของ Vortex finder ควรมีความเท่ากับ $\frac{D_c}{3}$

4. ลักษณะทางกายภาพของตัวเรือนไฮโดรไซโคลอน (Body dimensions)

ไฮโดรไซโคลอนจะประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ คือ ส่วนที่เป็นทรงกระบอกและส่วนที่เป็นทรงกรวย การเปลี่ยนขนาดหน้าตัดของไฮโดรไซโคลอนนั้นมีข้อเสียเพียงเล็กน้อย ดังนั้น จึงเกิดการทำให้ไฮโดรไซโคลอนแบบไม่มีส่วนทรงกระบอก หรือการทำไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็กโดยไม่มีส่วนกรวยเช่นกัน อย่างไรก็ตามผลกระทบจากการเปลี่ยนขนาดหน้าตัดต่อไฮโดรไซโคลอนที่มีมุมกรวยเล็กๆ มีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และยังคงมีการทำส่วนกรวยเอาไว้เพื่อช่วยในแง่เชิงการผลิตไฮโดรไซโคลอน ค่าที่เหมาะสมในการออกแบบความยาวของไฮโดรไซโคลอน คือ $2.7D_c$ ถึง $7.7D_c$ (Bradley, 1965)

Rietema, 1961 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า สัดส่วนระหว่างส่วนทรงกรวยกับส่วนทรงกระบอกไม่ควรมีความมากเกินไป โดยแนะนำว่า ความยาวทั้งหมดของไฮโดรไซโคลอนควรมีค่าประมาณ $5D_c$ และควรมีมุมกรวยเล็กกว่า 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 จึงสามารถเพิ่มอัตราการบำบัดน้ำของไฮโดรไซโคลนได้

Dahlstrom, 1949 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) แสดงผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคโดยการเพิ่มความยาวที่อัตราการไหลเดียวกัน พบว่าประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนจะเพิ่มขึ้น เมื่อมุมกรวยลดจาก 45 องศา เป็น 15 องศา

Bradley, 1960 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) ทำการเปรียบเทียบขนาดมุมของไฮโดรไซโคลน ระหว่างไฮโดรไซโคลนมุม 9 องศา และ 20 องศา พบว่าไฮโดรไซโคลนมุม 20 องศา ให้ขนาดตัด (x_{50}) เล็กกว่าที่อัตราไหลเดียวกัน จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดและอัตราการไหล และจากการสังเกตค่าของขนาดตัดที่เปลี่ยนไป พบว่า ที่ความดันลดที่กำหนดไว้ นั้น ไฮโดรไซโคลนมุม 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 ผลจาก

งานวิจัยได้สนับสนุนว่า มุมกรวยที่แหลมจะให้ปริมาณน้ำที่สามารถบำบัดได้ (Capacity) สูงและยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนอีกด้วย

กรณีที่ใช้มุมกรวยที่กว้าง คือ ไฮโดรไซโคลนที่ใช้สำหรับการทำใส (Clarifier) หรือการทำความสะอาด (Washer) มีสองสาเหตุที่ต้องใช้ไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยกว้าง ประเภทแรกคือ ไฮโดรไซโคลนมุมกรวยกว้างมีแนวโน้มที่จะเกิดการอุดตันที่ปลายกรวยน้อยกว่า ประเภทที่สองคือ ความดันลดที่ใช้กับไฮโดรไซโคลนมุมกรวยกว้างที่อัตราการไหลเดียวกัน จะให้ขนาดตัด (x_{50}) เล็กกว่าไฮโดรไซโคลนที่มีมุมกรวยแหลม และมีการทดลองในแง่การใช้ไฮโดรไซโคลนเล็กๆ โดยมีช่องทางจ่ายเข้าตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (Tangential inlet) ปรากฏว่าใช้ในการคัดแยก (Classification) ตามขนาดที่ต้องการได้ดี

5. ขนาดและลักษณะของช่องทางจ่ายของผสมเข้าไปในไฮโดรไซโคลน

Kelsall, 1953 (อ้างถึงใน Bradley, 1965) กล่าวว่า ช่องทางจ่ายเข้าสามารถมีรูปร่างได้หลายแบบและหลายตำแหน่ง ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนไม่มากนัก โดยช่องเปิดแบบสี่เหลี่ยมที่มีด้านยาวขนานกับแกนของไฮโดรไซโคลนจะดีกว่าช่องเปิดแบบวงกลม เมื่อมีพื้นที่เปิดสมมูล (Equivalent area) เท่ากันและความยาวต่อความกว้างควรเป็น 2:1

มีการทดลองที่ทำให้สังเกตได้ว่า เมื่อเปลี่ยนรูปร่างหน้าตัดของช่องทางจ่ายเข้าโดยยังคงพื้นที่เอาไว้ ช่องทางเข้าที่ยาวกว่าและเป็นสี่เหลี่ยมยุ่งยากในด้านการผลิต ดังนั้นโดยส่วนใหญ่ไฮโดรไซโคลนจึงยังคงรูปร่างของช่องทางจ่ายเข้าเป็นวงกลมเอาไว้

ชนิดของช่องทางจ่ายเข้า ส่วนใหญ่จะพิจารณาในไฮโดรไซโคลนสำหรับแยกก๊าซมากกว่าไฮโดรไซโคลนของของไหล ซึ่งมีผลการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลนขนาด 3 นิ้ว พบว่าลักษณะของช่องทางจ่ายเข้าไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคและความดันลด

ตำแหน่งของช่องทางจ่ายเข้าควรจะได้ระดับกับแผ่นปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลนซึ่งมีที่จำกัด ในบริเวณที่มีปัญหาหรือเรียกว่า Dead space เป็นบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจร ซึ่งเกิดขึ้นเป็นปกติอยู่เสมอ แต่ไม่ควรมีมากเกินไป 15 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการไหลทั้งหมด

มุมของช่องทางจ่ายเข้าไม่มีความสำคัญกับไฮโดรไซโคลนที่มีมุมระหว่าง 0 องศา ถึง 10 องศา จากแนวราบ แต่ส่งผลกับอัตราการจ่ายของผสมที่มีอนุภาคขนาดหยาบ ซึ่งส่งผลในเรื่องบริเวณที่เกิดการไหลลัดวงจรที่เกิดขึ้นเหนือช่องทางจ่ายเข้าภายในไฮโดรไซโคลน ดังนั้นการทำมุมของทางจ่ายเข้าก็เพื่อที่จะหลีกเลี่ยงการจ่ายของผสมเข้าไปในเส้นทางการไหลลัดวงจร แต่สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กนั้น ไม่จำเป็นต้องสนใจมุมของทางจ่ายเข้าแต่อย่างใด

6. แกนอากาศ (Air core)

ลักษณะการไหลที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในไฮโดรไซโคลอน คือ แกนอากาศ (Air core) ที่เกิดขึ้นบริเวณแกนกลางด้านในของไฮโดรไซโคลอน ซึ่งมีสาเหตุจากการไหลแบบหมุนวน เมื่อความเร็วของของไหลสูงจะทำให้บริเวณแกนกลางมีความดันต่ำ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างเป็นปกติเมื่อมีพื้นผิวของไหลที่หมุนวนอย่างอิสระภายในทรงกระบอกและเคลื่อนที่ไปตลอดความยาวของไซโคลอน ถ้าทางออกทั้งสองทางหรือทางใดทางหนึ่งต่อออกสู่อากาศโดยตรง แกนกลางของไฮโดรไซโคลอนจะดูดอากาศเข้าไป ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดแกนอากาศด้านในแกนของไฮโดรไซโคลอน นอกจากนี้แกนอากาศดังกล่าวยังเป็นตัวบ่งชี้เสถียรภาพของการไหลแบบหมุนวน (Vortex) ซึ่งควรมีลักษณะเป็นเส้นตรงและเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ตลอดความยาวของไฮโดรไซโคลอน

จากผลงานวิจัยของนักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซีย (อ้างถึงใน Svarovsky, 1984) ได้กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนอากาศ (D_a) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน (D_c) แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{D_a}{D_c} = \frac{D^*}{D_c} \sqrt[3]{\frac{\rho v_i^2}{3\Delta\rho}} \quad (2.19)$$

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

2.2.6 สรุปผลของพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลอน

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

2. การลดอัตราการจ่ายเข้าและลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบน (Overflow) จะทำให้ขนาดตัด (x_{50}) เล็กลงแต่ความดันลด (Δp) เพิ่มขึ้น ขนาดของช่องท่อจ่ายเข้าที่เหมาะสมโดยที่ขนาดตัดและความดันลดน้อยที่สุด ควรมีค่า $D_i = \frac{D_c}{3.5}$ และ $D_o = \frac{D_c}{3}$

3. การเพิ่มความยาวของท่อขึ้นสำหรับช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดหยาบเพิ่มขึ้น และประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคขนาดละเอียดจะลดลง ความยาวที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน แต่ควรมีช่วงระหว่าง $\frac{D_c}{2.5}$ ถึง $\frac{D_c}{3}$ ความหนาของผนังด้านนอกที่ฐานของ Vortex finder ควรหนากว่าส่วนปลายเพื่อป้องกันการสึกกร่อน

4. ไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดยาว ทำให้มีอัตราการจ่ายเข้าสูง โดยไม่คำนึงถึงสัดส่วนความยาวของส่วนทรงกรวยและทรงกระบอก อีกทั้งยังไม่ส่งผลต่อขนาดตัดเมื่อความดันคงที่ แต่มุมกรวยที่เล็กอาจทำให้เกิดปัญหาการอุดตันที่ปลายกรวยได้

5. ช่องท่อจ่ายเข้าควรมีผนังเป็นเนื้อเดียวกันกับส่วนปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลอน

6. เมื่อมีของแข็งที่สามารถกักร่อนได้อยู่ภายในของผสมที่จะจ่ายเข้า ควรมีการป้องกันการกักร่อนที่บริเวณฐานของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) และส่วนปลาย ซึ่งสามารถทำได้โดยการเคลือบด้วยเทฟลอน (Teflon)

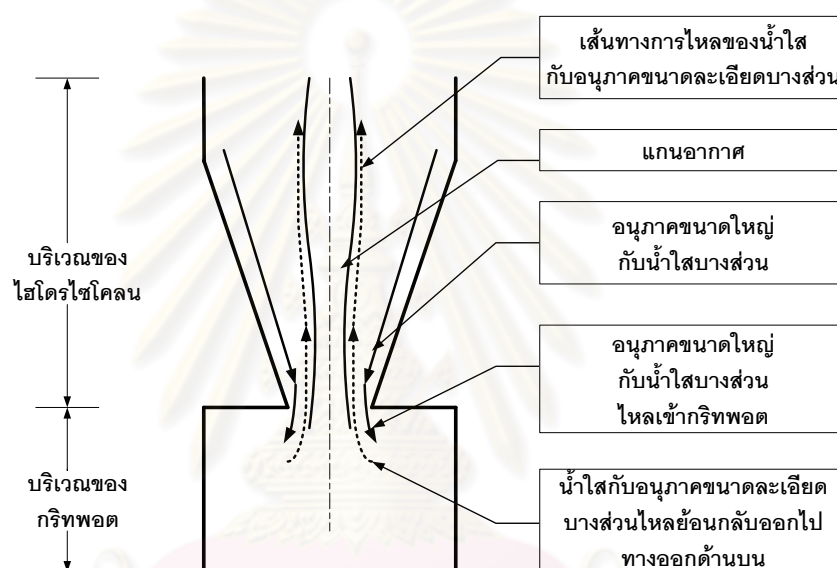
2.3 ไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริทพอต (Hydrocyclone equipped with Grit pot)

กริทพอตทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็กโดยจะติดตั้งอยู่ที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลอน ซึ่งอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลอนจะไหลออกทางด้านล่างและเข้าสู่กริทพอตและจะตกตะกอนอยู่ภายในจนกระทั่งเวลาผ่านไประยะหนึ่ง อนุภาคของแข็งจะสะสมอยู่ภายในจนถึงระดับสูงสุดที่กริทพอตจะรับได้จึงปล่อยออก (Drain off) แล้วนำไปบำบัดต่อไป แต่ในกรณีถ้าอนุภาคของแข็งที่สะสมอยู่ภายในกริทพอตมีความเข้มข้นมาก จะทำให้ไปขัดขวางอนุภาคใหม่ๆ ที่ไหลผ่านช่องทางออกด้านล่างมา จึงทำให้อนุภาคของแข็งไหลออกไปยังทางออกด้านบน เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนลดต่ำลง ดังนั้นเวลาที่ใช้กักรับตะกอนของกริทพอตจึงขึ้นอยู่กับเวลาที่ต้องปล่อยตะกอนเข้มข้นของอนุภาคของแข็งต่อไป ความเข้มข้นที่จ่ายเข้า ลักษณะสมบัติในการตกตะกอนของอนุภาคของแข็ง และตัวแปรทางกายภาพอื่นๆ

Puprasert และคณะ, 2004 ได้ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนที่ทำการติดตั้งกริทพอตบำบัดน้ำฝนไหลนอง (Run off water) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคจะต่ำกว่า

ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 5 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่จะมีปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคที่ไหลออกทางด้านล่างเพิ่มมากขึ้น

การไหลภายในกริพพอดสามารถอธิบายได้โดย Hass และ Bradley, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) บริเวณส่วนบนของกริพพอดนั้นการไหลเข้ากริพพอดจะเท่ากับการไหลย้อนกลับจากกริพพอดเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน การไหลย้อนกลับจะไหลผ่านช่องแคบรอบแกนอากาศ ทำให้อนุภาคขนาดเล็กไหลย้อนกลับไปในไฮโดรไซโคลน และอนุภาคที่เหลืออยู่ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าจะตกตะกอนอยู่ภายในกริพพอดดังแสดงในรูปที่ 2.10

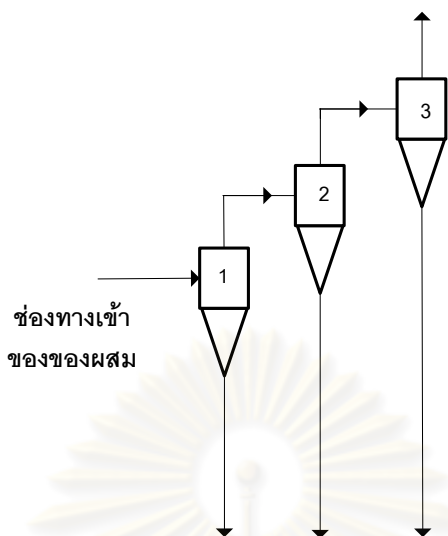


รูปที่ 2.10 เส้นทางการไหลของอนุภาคและน้ำในไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอด

Hass และคณะ, 1957 (อ้างถึงใน Puprasert และคณะ, 2004) ยังกล่าวอีกว่า อัตราส่วนความเข้มข้นสามารถตรวจสอบได้ในรูปของอัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นภายในกริพพอด และความเข้มข้นของของไหลที่จ่ายเข้า มีค่าสูงถึง 4500 เท่า สำหรับไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.635 เมตร และมีขนาดของอนุภาคที่สะสมในกริพพอดเฉลี่ย 1 ไมโครเมตร

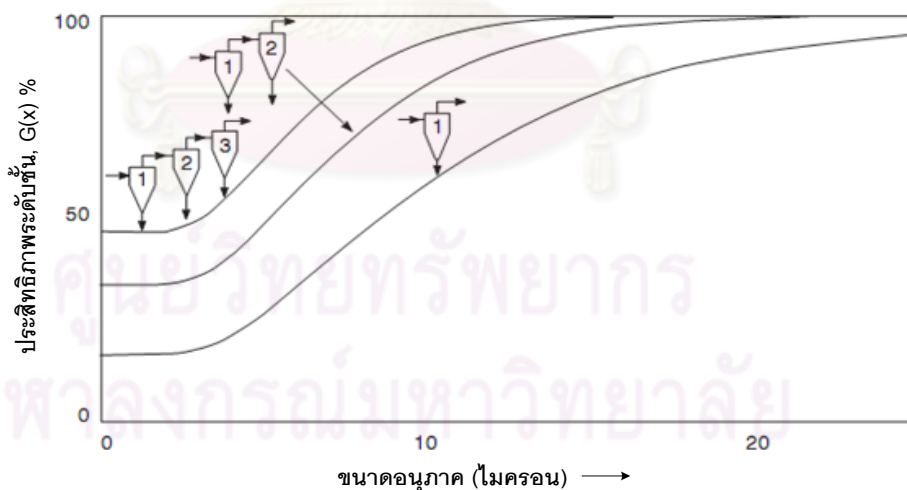
2.4 ไฮโดรไซโคลนที่มีการจัดเรียงแบบอนุกรม (Svarovsky, 2000)

ไฮโดรไซโคลนที่ทำการจัดเรียงแบบอนุกรมนั้น สามารถทำการจัดเรียงอนุกรมได้ทั้งที่ช่องทางออกด้านบน (overflow) ที่ช่องทางออกด้านล่าง (underflow) โดยลักษณะการจัดเรียงนั้นจะขึ้นอยู่กับการทำงาน ซึ่งในงานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการแยกของแข็งแขวนลอยออกเพื่อให้ได้น้ำใส เพื่อนำไปผลิตน้ำประปา ผู้ทำการวิจัยจึงได้เลือกการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบน ดังรูปที่ 2.11 มาใช้ทำการทดลองในงานวิจัยนี้



รูปที่ 2.11 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลน 3 ตัวแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนแบบทั่วไป (Svarovsky, 2000)

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนนั้นทำให้ขนาดตัดเล็กลงได้ ซึ่งเมื่อเพิ่มจำนวนไฮโดรไซโคลนในการจัดเรียงแบบอนุกรมก็จะสามารถแยกอนุภาคเพิ่มขึ้นได้อีก ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ประสิทธิภาพระดับชั้นของไฮโดรไซโคลน 1 ตัว 2 ตัว และ 3 ตัว ที่จัดเรียงแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบน (Svarovsky, 2000)

2.5 ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน (Separation Efficiency)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า การแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวในไฮโดรไซโคลอนไม่สามารถแยกออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอาจมีอนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กหรือมีความหนาแน่นต่ำหลุดออกไปกับน้ำใสที่ทางออกด้านบนและมีของเหลวหลุดออกไปพร้อมกับอนุภาคของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีความหนาแน่นสูงที่ทางออกด้านล่างเสมอ การศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนสามารถทำในสองแนวทาง โดยแนวทางแรกจะทำในกรณีของการแยกมวลของแข็ง ซึ่งได้แก่ ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) แนวทางที่สองจะกล่าวในกรณีของขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกออกมาจากไฮโดรไซโคลอน

2.5.1 ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพรวม คือ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลว โดยพิจารณาจากสัดส่วนระหว่างปริมาณของอนุภาคของแข็งที่ถูกแยกออกสู่ทางออกด้านล่าง (Underflow) กับปริมาณของอนุภาคของแข็งทั้งหมดที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (Feed in) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{M_u}{M} \quad (2.20)$$

โดยที่ $M_u = Q_u \cdot C_u \quad (2.21)$

$$M = Q_f \cdot C_f \quad (2.22)$$

เมื่อ	E_T	คือ ประสิทธิภาพรวม
	M_u	คือ มวลของของแข็งที่ถูกแยกออกมายังทางออกด้านล่าง (มวลต่อเวลา)
	M	คือ มวลของของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (มวลต่อเวลา)
	Q_u	คือ อัตราการไหลที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (ปริมาตรต่อเวลา)
	Q_f	คือ อัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (ปริมาตรต่อเวลา)
	C_u	คือ ความเข้มข้นของผลสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (มวลต่อปริมาตร)
	C_f	คือ ความเข้มข้นของผลสมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (มวลต่อปริมาตร)

ในกรณีที่ความเข้มข้นของของผลสมที่ออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน (Underflow) เท่ากับความเข้มข้นของผลสมที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (Feed in) แสดงว่าไม่เกิด

การแยกอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลอน เพียงแต่เกิดการแบ่งการไหล (Flow split) ออกเป็นสองทางเท่านั้น ดังนั้น ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอนควรมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$C_u = C_f \quad (2.23)$$

จากสมการที่ (2.20)

$$E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_u \cdot C_u}{Q_f \cdot C_f} \quad (2.24)$$

แทน $C_u = C_f$ ในสมการที่ (2.24) จะได้ว่า

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

เมื่อทำการแทนค่าอัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Q_u) หารด้วยอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน (Q_f) พบว่ามีค่ามากกว่าศูนย์ ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอน (E_T) จึงไม่สามารถแสดงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนอย่างแท้จริงได้ ดังนั้นจึงมีการนิยามประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ซึ่งเรียกว่า ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

2.5.2 ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)

ประสิทธิภาพลด คือ ประสิทธิภาพที่ใช้ในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนโดยคำนึงถึงผลของการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ด้วย ทั้งนี้เนื่องจากจุดประสงค์ของการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนนั้นต้องการให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดไหลออกไปยังทางออกด้านล่าง (Underflow) และมีเพียงน้ำใสไหลออกไปยังทางออกด้านบน (Overflow) แต่ในทางปฏิบัตินั้นเป็นไปไม่ได้ เพราะจะมีส่วนของของเหลวไหลออกมายังช่องทางออกด้านล่างด้วยเสมอ ดังนั้นจึงต้องนำสัดส่วนของของเหลวมาคำนวณประสิทธิภาพด้วย ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) น้อยลงและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น ด้วยเหตุนี้จึงนิยมใช้เป็น ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) ในการบ่งบอกประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนมากกว่าประสิทธิภาพรวม (Total efficiency)

ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) สามารถแสดงได้จากสมการ

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

เมื่อ E'_T คือ ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลอน
 E_T คือ ประสิทธิภาพรวมของไฮโดรไซโคลอน
 R_f คือ อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) ระหว่างอัตราการไหลที่ไหล
 ออกทางด้านล่างและอัตราการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอน

อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล (R_f) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.27)$$

ในกรณีที่ $C_u = C_f$ ดังที่กล่าวไปแล้วในสมการที่ (2.23) ซึ่งควรจะทำให้ประสิทธิภาพของ
 ไฮโดรไซโคลอนมีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$

แทน $E_T = \frac{Q_u}{Q_f}$ ในสมการที่ (2.26) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{E_T - E_T}{1 - E_T} = 0 \quad (2.28)$$

ดังนั้นในการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน ควรใช้การ
 คำนวณหาประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency) แทนการใช้ประสิทธิภาพรวม (Total
 efficiency) เพื่อการคำนวณที่ถูกต้องและสอดคล้องกับความเป็นจริงมากกว่า

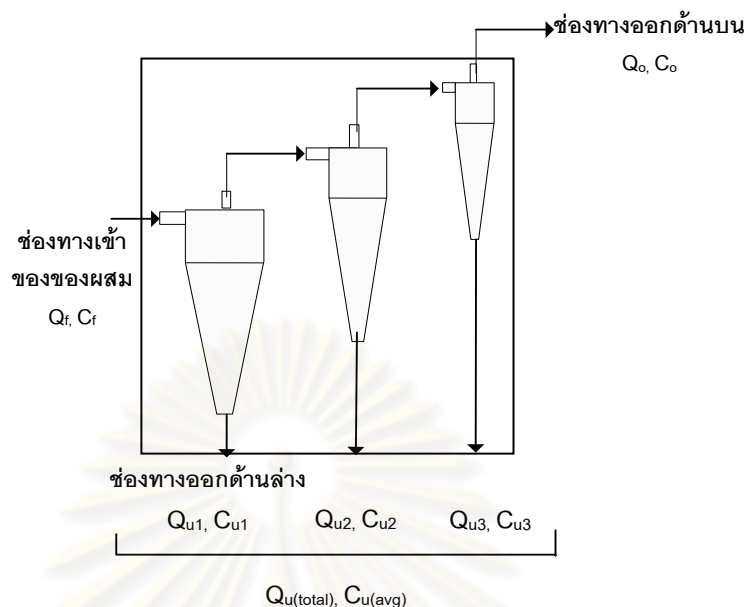
2.5.3 การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน

2.5.3.1 ประสิทธิภาพลดของไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด

ในการหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของเชิงแขวนลอยของไฮโดรไซโคลอนแบบ
 อนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด สามารถคำนวณได้จากสมดุลมวล (Mass balance) โดยในการ
 คำนวณจะมองไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมเป็นเสมือนมีไฮโดรไซโคลอนตัวเดียว กล่าวคือ มีทางเข้า 1
 ช่องทาง ทางออกด้านล่างรวม 1 ช่องทาง และทางออกด้านบน 1 ช่องทาง

จากสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดดังรูป
 ที่ 2.13 จะได้ว่า

$$Q_f Q_f = Q_o C_o + Q_{u(total)} C_{u(avg)} \quad (2.29)$$



รูปที่ 2.13 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกรรพอด

จากสมการที่ (2.26) ประสิทธิภาพผล $E'_T = \frac{E_T - R_f}{1 - R_f}$

เมื่อ $E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_{u(total)} C_{u(avg)}}{Q_f C_f}$ และ $R_f = \frac{Q_{u(total)}}{Q_f}$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (2.26) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{Q_{u(total)} (C_{u(avg)} - C_f)}{C_f (Q_f - Q_{u(total)})} \quad (2.30)$$

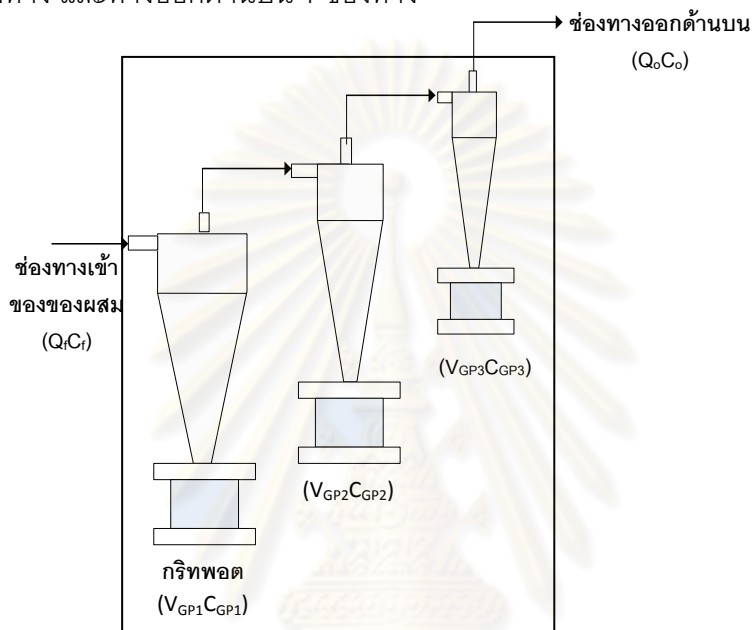
เมื่อ $Q_f - Q_{u(total)} = Q_o$

ดังนั้น ประสิทธิภาพในการแยกของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกรรพอด (E'_T) แสดงได้ดังสมการ

$$E'_T = \frac{Q_{u(total)} (C_{u(avg)} - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (2.31)$$

2.5.3.2 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอด

ในการหาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริพอดสามารถหาได้จากสมดุลมวล (Mass balance) เช่นกัน โดยในการคำนวณจะมองไฮโดรไซโคลแบบอนุกรมเป็นเสมือนมีไฮโดรไซโคลตัวเดียว กล่าวคือ มีทางเข้า 1 ช่องทาง ทางออกด้านล่างรวม 1 ช่องทาง และทางออกด้านบน 1 ช่องทาง



รูปที่ 2.14 ทิศทางการไหลเข้าออกของของไหลในไฮโดรไซโคลแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอด

จากสมดุลมวลของของไหลในไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริพอด ดังรูปที่ 2.14 จะได้ว่า

$$Q_f C_f T = Q_o C_o T + (V_{GP1} C_{GP1} + V_{GP2} C_{GP2} + V_{GP3} C_{GP3}) \quad (2.32)$$

$$(V_{GP1} C_{GP1} + V_{GP2} C_{GP2} + V_{GP3} C_{GP3}) = Q_f C_f T - Q_o C_o T \quad (2.33)$$

เมื่อ T คือ เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่างจากกริพอด

V_{GP} คือ ปริมาตรของกริพอด

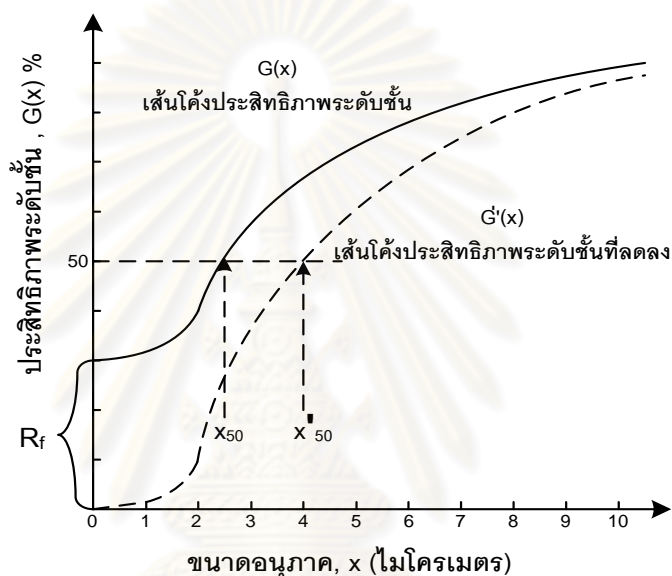
C_{GP} คือ ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งในกริพอด

ดังนั้นประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency, %SE) สำหรับไฮโดรไซโคลที่ติดตั้งกริพอด หรือประสิทธิภาพรวม (E_T) สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \quad (2.34)$$

2.5.4 ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency)

ประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency) มีความหมายคล้ายคลึงกับประสิทธิภาพรวม (Total efficiency) เพียงแต่ประสิทธิภาพรวมหรือประสิทธิภาพผลจะหมายถึงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเพียงขนาดเดียว ส่วนประสิทธิภาพระดับชั้นเป็นการนำค่าประสิทธิภาพของทุกๆ ขนาดมาทำเป็นกราฟ ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นรูปตัวเอส (S) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นและเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Svarovsky, 1984)

การสร้างเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) สามารถสร้างได้จากการทดลอง 2 วิธี ดังนี้ วิธีแรกคือ การจ่ายของแข็งที่มีชนิดและขนาดอนุภาคขนาดเดียว (Monosized solids) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนหลายๆ ครั้ง หรือ วิธีที่สองซึ่งประหยัดและเร็วกว่าการทดลองวิธีแรก คือการจ่ายของแข็งที่มีการกระจายของอนุภาคหลายขนาดตามต้องการ โดยทั้งสองวิธีทดลองต้องมีการวัดเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของอนุภาคแต่ละขนาด ในกรณีที่สองจะต้องมีการนำการกระจายของอนุภาคของการไหลออกสู่ด้านบนและทางออกด้านล่างไปทำการวิเคราะห์ห้ด้วย ดังนั้นการทำสมดุลมวล (Mass balance) ของการไหลทั้ง 3 ทิศทาง สามารถนำไปคำนวณสมการพื้นฐานของประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency, $G(x)$) ได้ดังนี้

$$G(x) = E_T' \cdot \frac{dF_u(x)}{dF_f(x)} \quad (2.35)$$

$$G(x) = 1 - (1 - E_T) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_f(x)} \quad (2.36)$$

$$\frac{1}{G(x)} = 1 + \left(\frac{1}{E_T} - 1 \right) \cdot \frac{dF_o(x)}{dF_u(x)} \quad (2.37)$$

- เมื่อ $G(x)$ คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve)
 E'_T คือ ประสิทธิภาพลด (Reduced total efficiency)
 $F_f(x)$ คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของของที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน (%)
 $F_u(x)$ คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของของที่ทางออกด้านล่าง (%)
 $F_o(x)$ คือ เปอร์เซ็นต์การสะสมอนุภาคของของที่ทางออกด้านบน (%)

จากสมการข้างต้นทั้ง 3 สมการ สามารถคำนวณหรือแสดงผลของประสิทธิภาพระดับชั้น (ในแต่ละขนาดอนุภาค) ออกมาได้ในรูปแบบของกราฟ ซึ่งการแสดงผลในรูปแบบของกราฟ จะมีความแม่นยำมากกว่าการคำนวณ

ในการหาค่าประสิทธิภาพระดับชั้น ของแข็งที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนจะต้องเป็นชนิดเดียวกันเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบอื่นๆ เช่น ความหนาแน่น และควรเลือกใช้วัสดุที่ไม่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อน (Non-flocculating) และมีการกระจายตัวออกจากกันได้ง่าย (Easily dispersed)

2.5.5 ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency)

ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency) จะคำนึงถึงผลที่ได้จากการแบ่งอัตราการไหล (Flow split) เช่นเดียวกับที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 2.4.2 นั่นคือ มีการนำอัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล ($R_f = \frac{Q_u}{Q_f}$) มาคำนวณด้วย ดังรูปที่ 2.15

ประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency) ในแต่ละขนาดอนุภาค หาได้จาก

$$G'(x) = \frac{G(x) - R_f}{1 - R_f} \quad (2.38)$$

- เมื่อ $G'(x)$ คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง
 $G(x)$ คือ เส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น
 R_f คือ อัตราส่วนการแบ่งอัตราการไหล

2.5.6 ขนาดตัด (cut size)

ขนาดตัดของไฮโดรไซโคลอน คือ ขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้ 50 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ขนาดตัดสามารถหาได้จากขนาดของอนุภาคที่อยู่บนตำแหน่งของเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) บนแกน x เรียกว่า x_{50} ดังนั้นขนาดตัดจึงเป็นตัววัดประสิทธิภาพในแง่ของขนาดอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้ มีบางไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ขนาดถึง 95 เปอร์เซ็นต์ เป็นขนาดตัดเมื่อต้องการให้อนุภาคที่แยกได้มีขนาดเล็กๆ แต่โดยทั่วไปที่ยอมรับกันจะอยู่ที่ขนาด 50 เปอร์เซ็นต์ ที่จะถูกแยกโดยไฮโดรไซโคลอน ซึ่งอนุภาคที่ถูกแยกออกจะมีขนาดค่อนข้างใหญ่และ/หรือหยาบ ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กและ/หรือละเอียด ที่มีขนาดเล็กกว่า Equiprobable size x_{50} จะไหลออกไปยังทางออกด้านบน

จากรูปที่ 2.15 ตำแหน่ง x_{50} (ขนาดอนุภาคที่ให้ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นตำแหน่งที่ได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้น (Grade efficiency curve) และตำแหน่ง x'_{50} (ขนาดอนุภาคที่ให้ประสิทธิภาพ 50 เปอร์เซ็นต์) เป็นตำแหน่งที่ได้จากเส้นโค้งประสิทธิภาพระดับชั้นที่ลดลง (Reduced grade efficiency)

ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในแง่ของขนาดของอนุภาคของแข็ง (D_{50}) ที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลอนที่ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) เพื่อเปรียบเทียบกับขนาดของอนุภาคที่ไฮโดรไซโคลอนสามารถแยกได้กับอนุภาคที่จ่ายเข้า (Feed in) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วย %GE (Granulometric separation efficiency) ในส่วนของกาไหลออกทางด้านบน สามารถแสดงได้ดังสมการ (Puprasert, 2004)

$$\% \text{ GE} = \frac{D_{50} \text{Feed} - D_{50} \text{Overflow}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.39)$$

และในส่วนของการไหลออกทางด้านล่าง สามารถแสดงได้ดังสมการ

$$\% \text{ GE} = \frac{D_{50} \text{Underflow} - D_{50} \text{Feed}}{D_{50} \text{Feed}} \times 100 \quad (2.40)$$

เมื่อ D_{50} คือ ขนาดของอนุภาคที่อยู่ในส่วนการไหลใดๆ ปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. วิธีการผลิตน้ำประปา (การประปาส่วนภูมิภาค, <http://www.pwa.co.th>)

ขั้นตอนในการผลิตน้ำประปาโดยทั่วไปจะประกอบเป็นขั้นตอนต่อไปนี้

1. **การสูบน้ำจากแหล่งน้ำดิบ** การผลิตน้ำประปาเริ่มจากทำการสูบน้ำดิบจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เพื่อลำเลียงเข้าสู่ระบบผลิต ซึ่งน้ำดิบที่สามารถนำมาผลิตน้ำประปาได้นั้นต้องผ่านการตรวจสอบ วิเคราะห์ และควบคุมคุณภาพของน้ำดิบ

2. **ถังกวน** ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำดิบ โดยจะผสมด้วยสารเคมี เช่น สารส้มและปูนขาว ซึ่งสารละลายสารส้มจะช่วยให้มีการตกตะกอนได้ดียิ่งขึ้น และสารละลายปูนขาวจะช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของตะไคร่น้ำหรือสาหร่ายในน้ำ หรือบางครั้งจะมีการเติมคลอรีน เพื่อทำการฆ่าเชื้อโรคที่อาจปะปนมากับน้ำในขั้นต้นนี้ก่อน

3. **ถังตกตะกอน** ใช้ในการตกตะกอน ในขั้นตอนนี้จะปล่อยน้ำที่ผสมสารส้มและปูนขาวแล้ว ทำให้เกิดการหมุนวนเวียนเพื่อให้น้ำกับสารเคมีรวมตัวกันจะช่วยให้มีการจับตัวของตะกอนได้ดีขึ้น และจะนำน้ำเหล่านั้นเข้าสู่ถังตกตะกอนขนาดใหญ่ เพื่อทำให้เกิดน้ำนิ่ง ตะกอนที่มีขนาดใหญ่ น้ำหนักมากจะตกลงสู่ก้นถัง และถูกดูดทิ้ง น้ำใสด้านบนจะไหลตามรางรับน้ำเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป

4. **ถังกรอง** สำหรับกรองเพื่อกำจัดตะกอน หรือสิ่งปนเปื้อนที่มีขนาดเล็กมากอีกครั้ง และให้มีความใสสะอาดมากขึ้น โดยในการกรองจะใช้ทรายหยาบและทรายละเอียด ซึ่งในขั้นตอนนี้ น้ำที่ผ่านการกรองมีความใสมากแต่จะมีความขุ่นหลงเหลืออยู่ประมาณ 0.2 ถึง 2.0 หน่วยความขุ่น และทรายกรองจะมีการล้างทำความสะอาดอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้การกรองมีประสิทธิภาพ

5. **การฆ่าเชื้อโรค** น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วจะมีความใส แต่อาจจะมีเชื้อโรคเจือปนมากับน้ำ ฉะนั้นจึงต้องทำการฆ่าเชื้อโรคโดยใช้คลอรีน โดยใส่คลอรีนในอัตราส่วนที่พอเหมาะ เพื่อฆ่าเชื้อโรคแต่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกาย แล้วนำไปเก็บในถังน้ำใส เพื่อรอการสูบน้ำจ่ายต่อไป

6. **การควบคุมคุณภาพน้ำประปา** ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่สำคัญ เป็นขั้นตอนที่ต้องวิเคราะห์ตรวจสอบอีกครั้ง และการตรวจสอบนี้จะดำเนินการอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ได้น้ำประปาที่สะอาด ปลอดภัย สำหรับอุปโภคบริโภค

7. **การสูบน้ำจ่ายน้ำประปา** น้ำประปาที่ผลิตมาแล้วนั้น จะต้องให้บริการถึงบ้านเรือนของผู้ใช้น้ำโดยส่งผ่านไปตามเส้นท่อ ดังนั้นการสูบน้ำจ่ายจึงมีความจำเป็น ด้วยการส่งจากหอถังสูงที่สามารถบริการได้ในพื้นที่ใกล้เคียง และในพื้นที่ที่ไกลออกไปหรือมีความสูงมากจำเป็นต้องใช้เครื่องอัดแรงดันน้ำ เพื่อให้น้ำประปาสามารถบริการได้อย่างทั่วถึง

2. ลักษณะน้ำดิบ (การประปานครหลวง, www.mwa.co.th)

น้ำดิบที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยา ซึ่งแม่น้ำเจ้าพระยาเกิดจากน้ำจากแม่น้ำปิงและแม่น้ำน่านไหลมาบรรจบกัน ที่บริเวณตำบลปากน้ำโพและตำบลแควใหญ่ อำเภอเมือง จังหวัดนครสวรรค์ โดยมีเส้นทางที่ไหลผ่าน ได้แก่ พื้นที่จังหวัดอุทัยธานี ชัยนาท สิงห์บุรี อ่างทอง พระนครศรีอยุธยา ปทุมธานี นนทบุรี กรุงเทพมหานคร และไหลลงสู่ปากอ่าวไทย ที่อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ มีความยาวประมาณ 372 กิโลเมตร น้ำจากแม่น้ำเจ้าพระยา จะไหลเข้าสู่สถานีสูบน้ำดิบสำแลซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยามายังคลองประปาตะวันออก ซึ่งมีลักษณะเป็นคลองดิน เส้นทางของคลองประปาจะผ่านชุมชนและสิ่งก่อสร้างมากมาย เพื่อส่งน้ำต่อไปยังโรงงานผลิตน้ำ 3 แห่ง โดยให้บริการแก่พื้นที่ทางฝั่งตะวันออกของแม่น้ำเจ้าพระยาเป็นหลัก ได้แก่ โรงงานผลิตน้ำบางเขน โรงงานผลิตน้ำสามเสน และโรงงานผลิตน้ำธนบุรี

สถานีสูบน้ำดิบสำแลเป็นจุดเริ่มต้นของการรับน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยาเข้าสู่คลองประปาตะวันออก ที่ตำบลสำแล จังหวัดปทุมธานี ห่างจากกรุงเทพ 41 กิโลเมตร ไกลจากปากอ่าวไทย 90 กิโลเมตร มีปริมาณการสูบน้ำดิบประมาณวันละ 3.8 ล้านลูกบาศก์เมตร และจากการสอบถามข้อมูลลักษณะน้ำดิบตลอดช่วงปี 2552 พบว่า มีค่าความขุ่นเฉลี่ย 47 เอ็นทียู โดยจากข้อมูลช่วงที่มีความขุ่นโดยเฉลี่ยสูงที่สุดอยู่ในช่วงเดือนกันยายน – ตุลาคม มีค่าประมาณ 88 – 107 เอ็นทียู

3. การศึกษาการแยกอนุภาคของแข็ง – ของเหลว ออกจากกันด้วยไฮโดรไซโคลอน

Pasquier และคณะ (2000) ศึกษาการใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเล็กซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ในการรีดน้ำ (Dewatering) ที่มีอนุภาคขนาดเล็ก (Sub-micron)

การทดลองทำโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนเซรามิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2.0 และ 3.2 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) 1.0 และ 2.0 มิลลิเมตร ใช้ผงซิลิกา (Silica flour) เป็นของผสม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 8.5 ไมโครเมตร ความเข้มข้นเฉลี่ยที่จ่ายเข้าประมาณ 35 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าน้อยเพียงพอที่จะไม่มีผลกระทบต่อความหนืดหรือปริมาตรย้อนกลับ (Volumetric recovery) อย่างมีนัยสำคัญ ทำการเก็บน้ำตัวอย่างที่ทางเข้า ที่ช่องทางออกด้านบน และที่ช่องทางออกด้านล่าง จากนั้นนำไปทำให้แห้งเพื่อหาค่าความเข้มข้นของของแข็งต่อไป

จากการทดลอง พบว่า การเพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder จาก 2 มิลลิเมตร เป็น 3.2 มิลลิเมตร ทำให้สัดส่วนความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจาก 5 เป็น 12.2 ในขณะที่ค่าของแข็งและปริมาตรย้อนกลับมีค่าลดลงจาก 80.1 เป็น 64.8 เปอร์เซ็นต์ และจาก 15.9 เป็น 5.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง พบว่า ของแข็งและปริมาตรย้อนกลับมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนความเข้มข้นมีค่าลดลง

จากการศึกษาถึงผลกระทบของความดัน พบว่า เมื่อลดความดันเข้า (Inlet pressure) ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2 มิลลิเมตร และเส้นผ่านศูนย์กลางที่ช่องทางออกด้านล่าง 1 มิลลิเมตร จาก 4 บาร์ เป็น 2 บาร์ ทำให้ของแข็งย้อนกลับลดลงเพียง 6.5 เปอร์เซ็นต์ และปริมาตรย้อนกลับเพิ่มขึ้น 9.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าการเปลี่ยนความดันมีผลกระทบต่อของแข็งและปริมาตรย้อนกลับน้อยกว่าการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกอย่างมีนัยสำคัญ

Puprasert. และคณะ (2004) เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและแบบที่ติดตั้งกริทพอด เพื่อใช้ในการบำบัดขั้นต้นของน้ำไหลนอง (run-off water) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบวนการที่ผสมผสานระหว่างไฮโดรไซโคลนและถังตกตะกอนขนาดเล็กเข้าด้วยกัน โดยใช้ กริทพอดทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด

งานวิจัยนี้ใช้ไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาตามรูปแบบของ Rietema วัสดุทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 75 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าและทางออกด้านบนขนาด 32 มิลลิเมตร โดยแปลผันเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างขนาด 8 10 และ 12 มิลลิเมตร และแปรผันความดันจ่ายเข้าตั้งแต่ 1 - 4 บาร์ ส่วนกริทพอดที่นำมาใช้เป็นพลาสติกโปร่งใสทรงกระบอก มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ปริมาตร 1.2 ลิตร ติดตั้งวาล์วที่ด้านล่างของกริทพอดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 15 มิลลิเมตร สำหรับปล่อยตะกอนออกมา งานวิจัยนี้ใช้น้ำดิบสังเคราะห์โดยใช้น้ำประปาผสมกับอนุภาคของแข็ง 2 ชนิด คือ microsand และ glass power ซึ่งมีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.64 และ 1.2 ตามลำดับ และมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 5 และ 25 ไมโครเมตร ตามลำดับ ใช้ความเข้มข้นของน้ำดิบเท่ากับ 1 และ 3 กรัมต่อลิตร เวลาที่ใช้ในการควบคุมกริทพอด คือ 0.5 1 และ 2 นาที

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน 3 แบบ คือ ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็ง (Solid separation efficiency) ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในแง่ของขนาดอนุภาค (Granulometry separation efficiency) และขนาดตัด, d_c (Cutting diameter)

พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของแข็งของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตค่อนข้างสูงประมาณ 70 และ 65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตจะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา แต่จะมีความเข้มข้นของตะกอนที่ทางออกด้านล่างมากกว่า พารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนคือ ขนาดของอนุภาค โดยต่ำถึง 24 ไมโครเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบนี้สามารถแยกอนุภาคของแข็งขนาดใหญ่ได้จำนวนหนึ่ง ดังนั้นจึงเหมาะที่จะใช้เป็นการบำบัดขั้นต้นของน้ำไหลนอง

นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตกับถังตกตะกอน ที่ประสิทธิภาพการแยกอนุภาคของแข็งเดียวกัน จากการคำนวณโดยใช้สมการกฎของสโตค พบว่าไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอต ต้องการพื้นที่น้อยกว่า ซึ่งเหมาะสำหรับในเมืองที่มีพื้นที่จำกัด นอกจากนี้ ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตจะดีขึ้นเมื่อเพิ่มความดันจ่ายเข้า

ดังนั้นไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบำบัดน้ำไหลนอง ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา แต่ให้ปริมาณความเข้มข้นของตะกอนที่ทางออกด้านล่างมากกว่า และใช้พื้นที่น้อยกว่าถังตกตะกอนอีกด้วย

ข้อพิพาท จีรพรชัย (2551) เป็นงานวิจัยระดับการทดลอง โดยใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร และใช้น้ำดิบจริงที่โรงกรองน้ำสามเสน 2 และสถานีสูบน้ำดิบสำแล โดยทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอต มาลดปริมาณสารแขวนลอยในน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา และศึกษาประสิทธิภาพในการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำดิบถึงพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนทั้งสองชนิด คือ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการเก็บกักตะกอนในกริพอต เป็นต้น โดยตัวแปรที่มีผลสำคัญที่สุด คือ ความดันจ่ายเข้า ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ มีผลน้อยกว่ามาก เมื่อนำไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบไปใช้ในการแยกสารแขวนลอยในน้ำดิบ พบว่า ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอตมีประสิทธิภาพในการแยกสารแขวนลอยระหว่างร้อยละ 20 ถึง 34 และร้อยละ 8 ถึง 70 ตามลำดับ

จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ เช่น ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน :

1. เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้สามารถแยกของแข็งออกจากของเหลวได้มากขึ้น
2. เมื่อไฮโดรไซโคลนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเล็กกลง จะทำให้สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กได้ดีขึ้น
3. เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนเล็กกลง ทำให้มวลที่ออกทางด้านล่างมีค่าลดลง

นอกจากนี้จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา นั้น ได้มีการนำกริพพอตมาติดตั้งที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ซึ่งกริพพอตจะทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก สามารถรวบรวมตะกอนไว้ในกริพพอต ทำให้มีความเข้มข้นของตะกอนที่ช่องทางออกด้านล่างมากกว่าไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอต

สนธิลักษณ์ สุขะสุนันท์ (2552) เป็นงานวิจัยระดับการทดลอง โดยใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร แทนที่ถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศในการแยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียชุมชนดินแดง โดยศึกษาถึงผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลนทั้งสองแบบ ได้แก่ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านล่าง และเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริพพอต อีกทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลน ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอต และถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศที่ใช้อยู่ปัจจุบัน ณ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง โดยประสิทธิภาพในการแยกกรวดทรายในรูปของของแข็งคงตัวของไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอต มีค่าสูงสุดเท่ากับ 86 และ 68 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอตมีความเข้มข้นของกรวดทรายที่สะสมในกริพพอตโดยเฉลี่ย 6,272 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าสูงกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดาประมาณ 200 เท่า ส่วนความเข้มข้นของกรวดทรายที่แยกได้จากถังตกกรวดทรายแบบเติมอากาศ มีค่าเท่ากับ 1,800 มิลลิกรัมต่อลิตร และพารามิเตอร์ที่มีผลต่อไฮโดรไซโคลนมากที่สุด คือ ความดันจ่ายเข้า ส่วนพารามิเตอร์อื่นๆ มีผลน้อยกว่ามาก

4. การศึกษาพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน

Cilliers. และคณะ (2004) ศึกษาผลกระทบต่อการแยกอนุภาคและการรีดน้ำออก (Dewatering) ที่ความเข้มข้นของอนุภาคต่ำ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

ในการทดลองใช้ไฮโดรไซโคลอนเซรามิคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของ Vortex finder 2.6 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (Spigot) 1.5 มิลลิเมตร และให้ความดันคงที่ที่ 3.5 บาร์ ทำการทดลองโดยใช้ผงซิลิกา (Silica flour) ที่มีขนาดอนุภาค 0.8 6 และ 11 ไมโครเมตร ผสมกับน้ำที่มีอุณหภูมิระหว่าง 10 ถึง 60 องศาเซลเซียส จ่ายเข้าไปในไฮโดรไซโคลอน พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความเข้มข้นของอนุภาคที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) ก็จะเพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การที่ของแข็งกลับคืน (Solid recovery) มีค่ามากขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนการไหลล้น (By pass) และการลดลงของขนาดตัด (Cut size)

2. สัดส่วนความเข้มข้น ($\frac{Q_u}{Q_f}$) เพิ่มขึ้น เนื่องจากการลดลงของน้ำกลับคืน (Water Recovery) และการเพิ่มขึ้นของของแข็งกลับคืน (Solid recovery)

3. ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคขนาดละเอียด โดยเฉพาะอย่างยิ่งการรวบรวมอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร

4. อุณหภูมิไม่มีผลต่อความคมชัดในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน

5. การศึกษาการทำงานของไฮโดรไซโคลอนในลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลอน

Chu. และคณะ (2002) ศึกษาผลกระทบของรูปร่าง พารามิเตอร์ในการดำเนินการ และลักษณะการจ่ายเข้าของการเคลื่อนที่ของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลอน

ในการทดลองนี้ใช้ไฮโดรไซโคลอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มิลลิเมตร ของผสมมีสองเฟส คือ น้ำและอนุภาคของแข็งซึ่งประกอบด้วย Polystyrene Polyvinyl chloride และ Quartz มีความหนาแน่น 1.05 1.40 และ 2.27 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตามลำดับ โดยขนาดอนุภาค ความเข้มข้นของอนุภาคในของผสมที่จ่ายเข้า และความดันเข้าจะแปรผันตามการทดลอง แล้ววิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ทางพลศาสตร์ของอนุภาค (Particle dynamic analyzer, PDA) ในการหาความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวแกนรัศมีของไฮโดรไซโคลอน สามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

1. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งจะลดลง เมื่อตำแหน่งรัศมีเพิ่มขึ้นและกราฟการกระจายตามแนวแกนจะมีลักษณะเป็นรูปพาราโบลา
2. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งจะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันจ่ายเข้าเพิ่มขึ้นหรือเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ช่องทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น
3. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งลดลง เมื่อความหนาแน่นหรือขนาดของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น
4. ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคของแข็งจะลดลง เมื่อความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งที่จ่ายเข้าเพิ่มขึ้น
5. ความเร็วตามแนวแกนของอนุภาคของแข็งในการไหลวนภายใน (Inner helical flow) จะมีค่ามากกว่าความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายนอก (Outer helical flow)
6. ความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายในของอนุภาคของแข็งเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการไหลของช่องทางออกด้านบนเพิ่มขึ้น และความเร็วตามแนวแกนในการไหลวนภายนอกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของช่องทางออกด้านล่างเพิ่มขึ้น

Shah. และคณะ (2006) ศึกษาการทำแบบจำลองการแยกน้ำ (Water split) ในไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำแบบจำลองเพื่อทำนายการแยกน้ำในไฮโดรไซโคล ซึ่งใช้อัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) เป็นตัวแปรควบคุม และใช้ความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลเป็นตัวแปรตามที่จะสามารถควบคุมลักษณะการแยกน้ำในไฮโดรไซโคลได้

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน หรือที่เรียกว่า อัตราส่วนกรวย (Cone ratio) ทำการทดลองโดยใช้ไฮโดรไซโคลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 76 มิลลิเมตร อัตราส่วนกรวยมีค่า 0.5 โดยในการทดลองแรกใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน คือ 11 และ 22 มิลลิเมตร ตามลำดับ และในการทดลองที่สองใช้เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างและเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน คือ 13 และ 26 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยที่ให้ตัวแปรอื่นๆ คงที่ พบว่า ถึงแม้ว่าอัตราส่วนกรวยจะเท่ากัน แต่การแยกน้ำในไฮโดรไซโคลนั้นแตกต่างกันอย่างชัดเจน

จากการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านบน การแยกน้ำจะลดลง และเมื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง จะทำให้เกิดการแยกน้ำเพิ่มขึ้น

Yang. และคณะ (2004) ศึกษาการทำแบบจำลองสามมิติของไฮโดรไซโคลอน เพื่อทำนายการไหลและประสิทธิภาพในการแยกของอนุภาค สำหรับใช้แยกสลัดจ์ในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการวิจัยนี้เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของไฮโดรไซโคลอน ในการทำชั้นสลัดจ์ในโรงผลิตน้ำบริสุทธิ์ เนื่องจากกระบวนการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันต้องการพื้นที่มากและใช้เวลานานเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสลัดจ์มาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำแบบจำลองสามมิติเพื่อทำนายการไหลและประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนในแง่ของขนาดอนุภาค และทำการเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองจริง

คของแข็ง ที่นำมาจากสลัดจ์งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองด้วยของผสมระหว่างน้ำและอนุภาค ในกระบวนการผลิตน้ำบริสุทธิ์ของ Seong-Hwan water purifying plant โดยที่สลัดจ์มีส่วนประกอบของแร่ต่างๆ เช่น หินเขี้ยวหนุมาน (quartz) แร่ไฮดรอสลูมิเนียมซิลิเกต (Kaolinite) และหินอัลไบต์ (Albite) อนุภาคของของแข็งมีความหนาแน่นโดยเฉลี่ย 2.1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และขนาดอนุภาคของของแข็งมีการกระจายตัวตั้งแต่ขนาดเล็กกว่าไมครอน (Sub-micron) จนถึง 100 ไมครอน โดยมีความเข้มข้นของของแข็งที่จ่ายเข้าเท่ากับ 7.46 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของช่องทางเข้า (Feed) อัตราการไหลออกด้านบน (Overflow) อัตราการไหลออกด้านล่าง (Underflow) มีค่าเท่ากับ 49.9 35.0 และ 14.9 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างในเวลาเดียวกันที่บริเวณทางน้ำเข้า ทางออกด้านบน และทางออกด้านล่าง จากนั้นนำปหาค่าความเข้มข้นของของแข็งและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคทั้ง 3 ตัวอย่าง

ผลการวิจัยโดยใช้การคำนวณพลังงานจลน์ด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า ความเร็วตามจากผแนวสัมผัสเส้นรอบวงจะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดเมื่อเข้าใกล้แกนกลางของไฮโดรไซโคลอน ส่วนค่าความดันสูงสุดจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนทรงกระบอกใกล้กับช่องทางเข้า (Feed inlet) และมีค่าน้อยสุดที่บริเวณใกล้กับช่องทางออกด้านล่าง จากนั้นได้มีการเปรียบเทียบขนาดอนุภาคที่ไหลออกด้านล่าง (Underflow) ของแบบจำลองสามมิติและจากการทดลอง โดยผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งขนาดอนุภาคของแข็งที่ทางออกด้านล่างประมาณ 5 ถึง 45 ไมโครเมตร

สรุปได้ว่าวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาคสามารถทำนายประสิทธิภาพการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอน และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองสามมิติ พบว่าได้ผลใกล้เคียงกัน

แม้ว่าในงานวิจัยที่ผ่านมาไม่มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ซึ่งจากการศึกษาตามทฤษฎีแล้วสามารถทำได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของแข็งออกจากของเหลว จึงเป็นที่น่าสนใจในการนำไฮโดรไซโคลนมาจัดเรียงกันแบบอนุกรม

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการนำไฮโดรไซโคลนมาจัดเรียงแบบอนุกรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยขนาดเล็กออกจากน้ำดิบได้มากขึ้น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

การนำไฮโดรไซโคลนมาทำการจัดเรียงแบบอนุกรมเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยให้ดีขึ้นจากไฮโดรไซโคลนเพียงตัวเดียว โดยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมนี้มีทั้งการจัดเรียงแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านล่าง และที่ช่องทางออกด้านบน ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านล่าง จะทำเพื่อให้ได้ตะกอนชั้น ส่วนการจัดเรียงแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบน จะทำเพื่อให้ได้น้ำใส ในการผลิตน้ำประปานั้นมีความต้องการน้ำดิบที่สะอาด ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนทั้งหมด

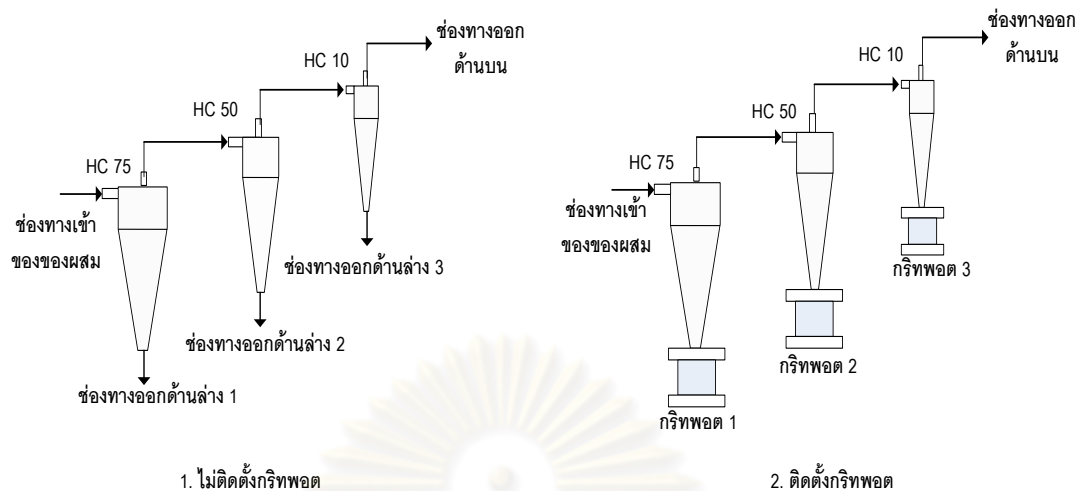
นอกจากนี้ได้ทำการทดลองโดยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกรรพอดและที่ติดตั้งกรรพอดที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกรรพอด

ในการจัดเรียงนั้นจะทำการเรียงจากไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดใหญ่ไปสู่อไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็กจะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคละเอียดได้ดีกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ แต่ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กมีข้อจำกัดคือจะเกิดการอุดตันได้ง่ายกว่า ดังนั้นเพื่อป้องกันการเกิดการอุดตันในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก จึงทำการจัดเรียงโดยจ่ายน้ำตัวอย่างเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ก่อน แล้วจึงไปสู่อไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก โดยทำการจัดเรียงการอนุกรมไฮโดรไซโคลนตามลำดับ ดังนี้

1. ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ
2. ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ
3. ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ในการจัดเรียงนี้ ผู้ทำการวิจัยจะเลือกเป็นสามทางเลือกดังที่กล่าวข้างต้น เพื่อที่จะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของทั้งสามทางเลือกนี้

ตัวอย่างการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนที่ช่องทางออกด้านบน แสดงดังรูปที่ 3.1



HC คือ ไฮโดรไซโคลน

รูปที่ 3.1 ตัวอย่างการจัดเรียงแบบอนุกรมที่ช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน และไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด (กรณี 75 50 และ 10 มิลลิเมตร)

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์ที่ติดตั้งในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) ที่ใช้ในงานวิจัย

1. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร รูปร่างและลักษณะแสดงดังตารางที่ 3.1
2. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร รูปร่างและลักษณะแสดงดังตารางที่ 3.1
3. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร รูปร่างและลักษณะแสดงดังตารางที่ 3.1
4. เครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์
5. ใบพัดกวนผสมน้ำชนิด Rushton turbine ขนาด 1.1 กิโลวัตต์
6. ถังเก็บพลาสติกปริมาตร 350 ลิตร
7. วาล์วสามทาง
8. วาล์วลดความดัน (Releasing valve)
9. เครื่องมือวัดความดัน (Pressure gauge)
10. เครื่องมืออัตราการไหลเข้า (Flow meter)

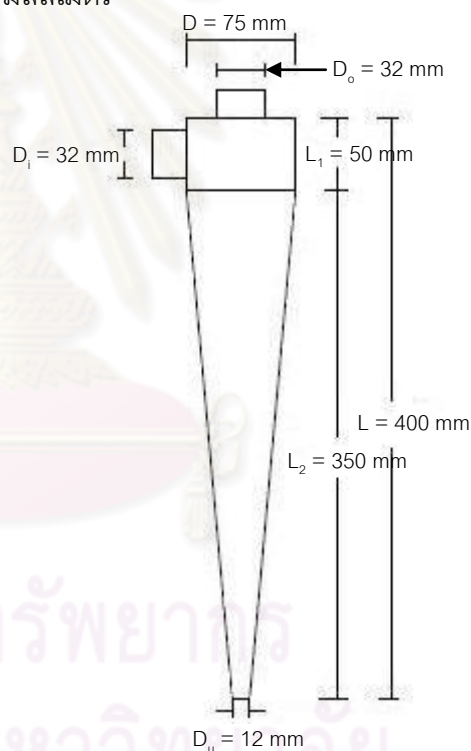
รูปร่างและลักษณะสมบัติต่างๆ ของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย สามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.1 รูปร่างและลักษณะสมบัติต่างๆ ของไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัย

ชนิดของไฮโดรไซโคลน	ไฮโดรไซโคลน		
	ขนาด 75 มม.	ขนาด 50 มม.	ขนาด 10 มม.
พารามิเตอร์ต่างๆ			
เส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้า (มม.)	32	20	2
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบน (มม.)	32	20	2
เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	12 10 8	10 9 6	1
วัสดุที่ใช้ทำตัวเรือนไฮโดรไซโคลน	เหล็กกล้าไร้สนิม	โพลียูเรเทน	เหล็กกล้าไร้สนิม

โดยไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 ขนาดที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ

1. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร



(ก) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง

(ข) แบบภาพเขียนแสดงขนาดของไฮโดรไซโคลน

กรณีทางออกด้านล่าง 12 มิลลิเมตร

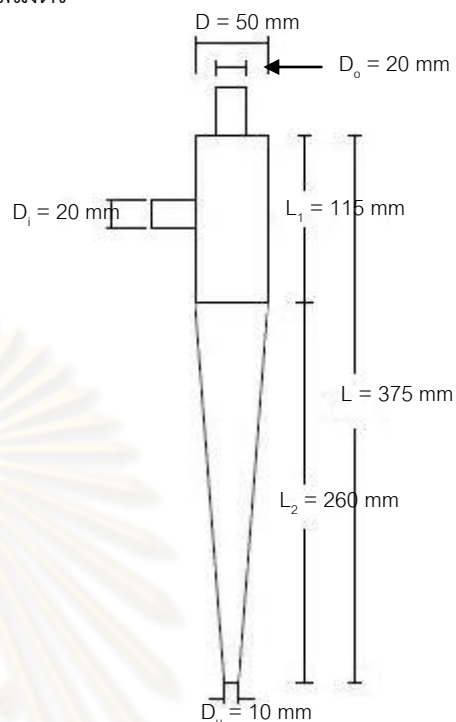
รูปที่ 3.2 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร (ก) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง

(ข) แบบภาพเขียนแสดงขนาดของไฮโดรไซโคลน กรณีทางออกด้านล่าง 12 มิลลิเมตร

2. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร



(ก) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง



(ข) แบบภาพเขียนแสดงขนาดของไฮโดรไซโคลน
กรณีทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร

รูปที่ 3.3 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (ก) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง (ข) แบบภาพเขียนแสดงขนาดของไฮโดรไซโคลน กรณีทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร

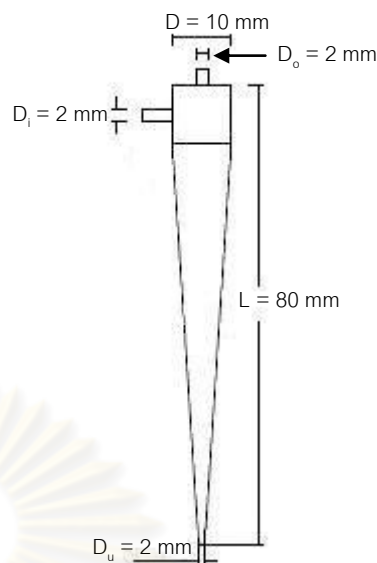
3. ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

โดยจากรูปที่ 3.4 ภายในประกอบไปด้วยไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 6 ตัว

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



(ก) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง



(ข) แบบภาพเขียนแสดงขนาดของไฮโดรไซโคลน

รูปที่ 3.4 ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

(ก) ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลอง (ข) แบบภาพเขียนแสดงขนาดของไฮโดรไซโคลน

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในงานวิจัย

1. ชุดอุปกรณ์การกรองสำหรับหาปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended solids)
2. กระดาษกรองใยแก้วมาตรฐาน (Standard glassfiber filter)
3. ตู้อบ อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส
4. เครื่องชั่งไฟฟ้าตนิยม 4 ตำแหน่ง
5. เครื่องมือวัดขนาดอนุภาค Mastersizer 2000 with hydro 2000 MU
6. เครื่องมือวัดความขุ่นของ HACH รุ่น 2100A Turbidity
7. ขวดพลาสติกสำหรับเก็บตัวอย่างน้ำ
8. นาฬิกาจับเวลา
9. กล้องถ่ายรูป

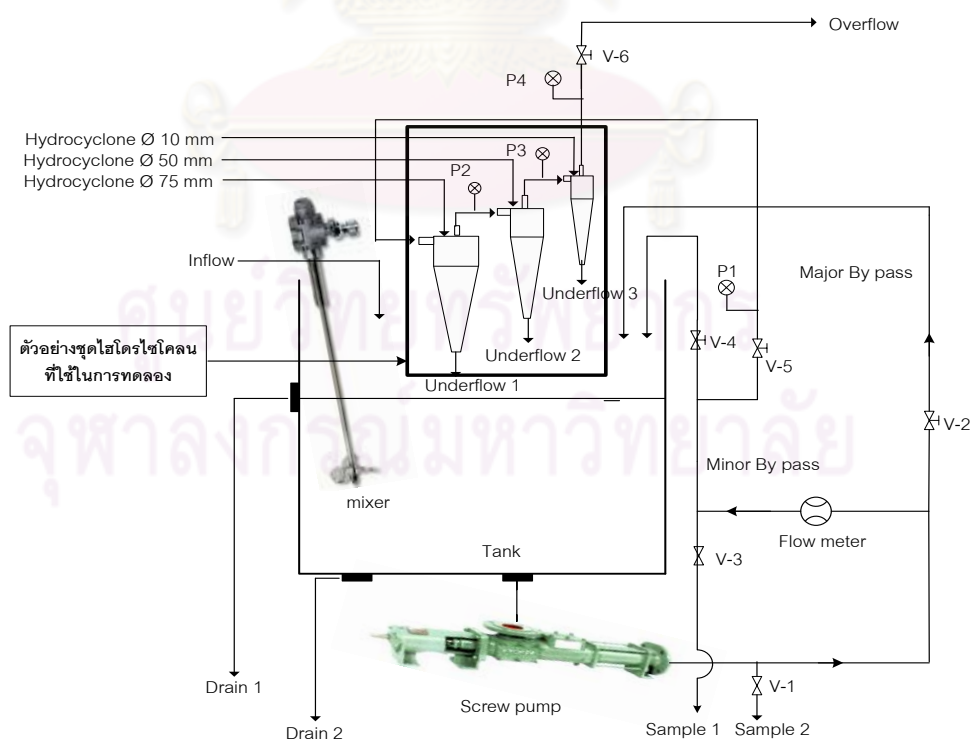
3.1.3 หลักการทำงานของโรงงานนำร่อง (Pilot plant)

น้ำดิบจากแหล่งน้ำตัวอย่างจะไหลผ่านเข้าสู่ถังขนาด 350 ลิตร และมีการกวนผสมด้วยใบกวน (Mixer) ขนาด 1.1 กิโลวัตต์ ที่สามารถปรับความเร็วรอบได้ ซึ่งทำหน้าที่กวนของแข็งและของเหลวภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ จากนั้นน้ำดิบในถังจะถูกสูบเข้าไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งไว้ด้วยเครื่องสูบน้ำชนิด Screw rotary displacement pump ขนาด 5.5 กิโลวัตต์ ในการ

ควบคุมความดัน ควบคุมโดยอัตราการไหลโดยการใช้อัตราการไหลทางอ้อม (By pass) เพื่อให้ได้ความดันตามที่กำหนด

Pilot plant ที่นำมาทดลองได้มีการติดตั้งท่อสำหรับอัตราการไหลทางอ้อม (By pass) ไว้ 2 ทาง โดยเส้นทางแรกทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลอย่างหยาบโดยใช้ประตูน้ำ V-2 และเส้นทางที่สองทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลอย่างละเอียดโดยใช้ประตูน้ำ V-4 อัตราการไหลที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนสามารถหาได้จากการอ่านค่าที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter) ส่วนอัตราการไหลที่ออกจากไฮโดรไซโคลนสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของปริมาตรกับเวลา โดยวัดปริมาตรน้ำและจับเวลา

ในงานวิจัยนี้เป็นการทดลองแบบเปิด คือ ใช้น้ำดิบจริงในการจ่ายเข้าสู่ถังเก็บน้ำที่มีการกวนผสมอยู่ตลอดเวลาและไหลล้นออกตลอดเวลาที่ท่อน้ำล้นส่วนบนของถังเก็บน้ำ เมื่อมีปริมาณน้ำดิบมากเกินไปจำกัดของถังเก็บน้ำ และมีการเปลี่ยนน้ำดิบทุกครั้งหลังจากทำการเก็บน้ำตัวอย่าง จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างน้ำ 3 ช่องการไหล ซึ่งประกอบด้วย น้ำตัวอย่างที่จ่ายเข้า (Feed in) น้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนออกทางช่องทางออกด้านบน (Overflow) และน้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) และมีการวัดความดันโดยใช้ Pressure gauge ที่ไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวด้วย



รูปที่ 3.5 แผนผังการทำงานของโรงงานนำร่อง (Pilot plant)



รูปที่ 3.6 Pilot plant ที่ใช้ทำการทดลองในสถานที่จริง และไฮโดรไซโคลนที่ต่อกันแบบอนุกรม (แสดงการต่ออนุกรมของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาด 75 50 และ 10 มิลลิเมตร)

3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้แบ่งการทดลองออกเป็นสามชุดการทดลอง คือ ชุดแรกได้ทำการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สองทำการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สามทำการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร โดยในแต่ละชุดการทดลองนี้จะแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งไม่ติดตั้งกริทพอด และส่วนที่สองติดตั้งกริทพอด โดยจะติดตั้งที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทั้งหมด

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองด้วยการจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด

ตัวแปรคงที่	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. ชนิดของไฮโดรไซโคลน <ul style="list-style-type: none"> - ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มม. - ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มม. - ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. 2. กริทพอด (ในส่วนของทดลองที่ติดตั้งกริทพอดเท่านั้น)	<ul style="list-style-type: none"> - รายละเอียดของไฮโดรไซโคลนแสดงดังตารางที่ 3.1 - ทรงกระบอกโปร่งแสง ปริมาตร 1.2 ลิตร - ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม.
ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่าง <ul style="list-style-type: none"> 1.1 ในส่วนของทดลองที่ไม่มีการติดตั้งกริทพอด <ul style="list-style-type: none"> 1. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 50 และ 10 มม. 2. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มม. 3. ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 และ 10 มม. 1.2 ในส่วนของทดลองที่ทำการติดตั้งกริทพอด <ul style="list-style-type: none"> 1. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 50 และ 10 มม. 2. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มม. 3. ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 และ 10 มม. 2. ความดัน <ul style="list-style-type: none"> 1. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 50 และ 10 มม. 2. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มม. 3. ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 และ 10 มม. 3. เวลาที่ใช้ในกริทพอด (ที่ติดตั้งกริทพอดเท่านั้น) <ul style="list-style-type: none"> 1. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 50 และ 10 มม. 2. ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มม. 3. ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 และ 10 มม. 	<ul style="list-style-type: none"> - $D_u 75 = 12\ 10\ 8$ มม. - $D_u 50 = 10\ 9\ 6$ มม. - $D_u 10 = 1$ มม. - $D_u 75 = 12\ 10\ 8$ มม. - $D_u 50 = 10\ 9\ 6$ มม. - $D_u 50 = 10\ 9\ 6$ มม. - $D_u 10 = 1$ มม. - $D_u 75$ และ $50 = 10$ มม. $D_u 10 = 1$ มม. - $D_u 75$ และ $50 = 10$ มม. - $D_u 50 = 10$ มม. $D_u 10 = 1$ มม. - 0.5 1 2 3 บาร์ - 0.5 1 2 3 บาร์ - 0.5 1 2 3 บาร์ - 30 60 120 240 และ 360 นาที - 30 60 120 240 และ 360 นาที - 30 60 120 240 และ 360 นาที

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองด้วยการจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพอด (ต่อ)

ตัวแปรอิสระ	ค่าที่ใช้ในการทดลอง
1. อุณหภูมิ	- ขึ้นอยู่กับสภาพจริง
2. ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ	- ขึ้นอยู่กับสภาพจริง
ตัวแปรตาม	การวิเคราะห์
1. อัตราการไหล	- ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
2. ขนาดอนุภาคของของแข็งแขวนลอยในน้ำดิบ	- วิเคราะห์ด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาค
3. ค่าความขุ่น	- วัดค่าความขุ่นด้วยเครื่องวัดความขุ่น
- ทางจ่ายน้ำเข้า 1 ตำแหน่ง	
- ทางออกด้านบน 1 ตำแหน่ง	
- ทางออกด้านล่างทุกตำแหน่ง	
4. ปริมาณของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids)	- วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอยที่เหลือค้ำบนกระดาษกรองเมื่อนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ^a

^a วิเคราะห์ตามวิธี Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA และ WEF, 1998)

และดังที่กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.2 ว่าในงานวิจัยนี้มี 2 ส่วนการทดลองคือ ส่วนแรกไม่ทำการติดตั้งกริพอด และส่วนที่สองทำการติดตั้งกริพอด โดยจะติดตั้งที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.7 การติดตั้งกริพอดที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน



รูปที่ 3.7 การติดตั้งกริฟฟิตที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

3.3 แผนการทดลอง

การทดลองนี้ได้ดำเนินการโดยใช้ตัวอย่างน้ำดิบจริง คือ น้ำดิบจากสถานีสูบน้ำดิบสำแล ตำบลสำแล จังหวัดปทุมธานี บริเวณปากทางน้ำที่ผ่านสถานีสูบน้ำดิบก่อนส่งผ่านไปยังคลองประปา ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำ Pilot plant ไปติดตั้งเพื่อทำการทดลอง หลังจากทำการทดลองแล้วจะนำตัวอย่างมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่เก็บมาจากการทดลอง คือ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย ค่าความขุ่น และขนาดอนุภาคทั้งก่อนและหลังเข้าไฮโดรไซโคลน ทั้งนี้การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่

3.3.1 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ติดตั้งกริฟฟิตที่ขนาดต่างๆ

1. การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

- 1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ
- 1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ
- 1.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

โดยในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมนี้ มีเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มิลลิเมตร จำนวน 3 ค่า โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้น

ผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร คือ 12 10 8 มิลลิเมตร ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร คือ 10 9 6 มิลลิเมตร และไม่มีการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร

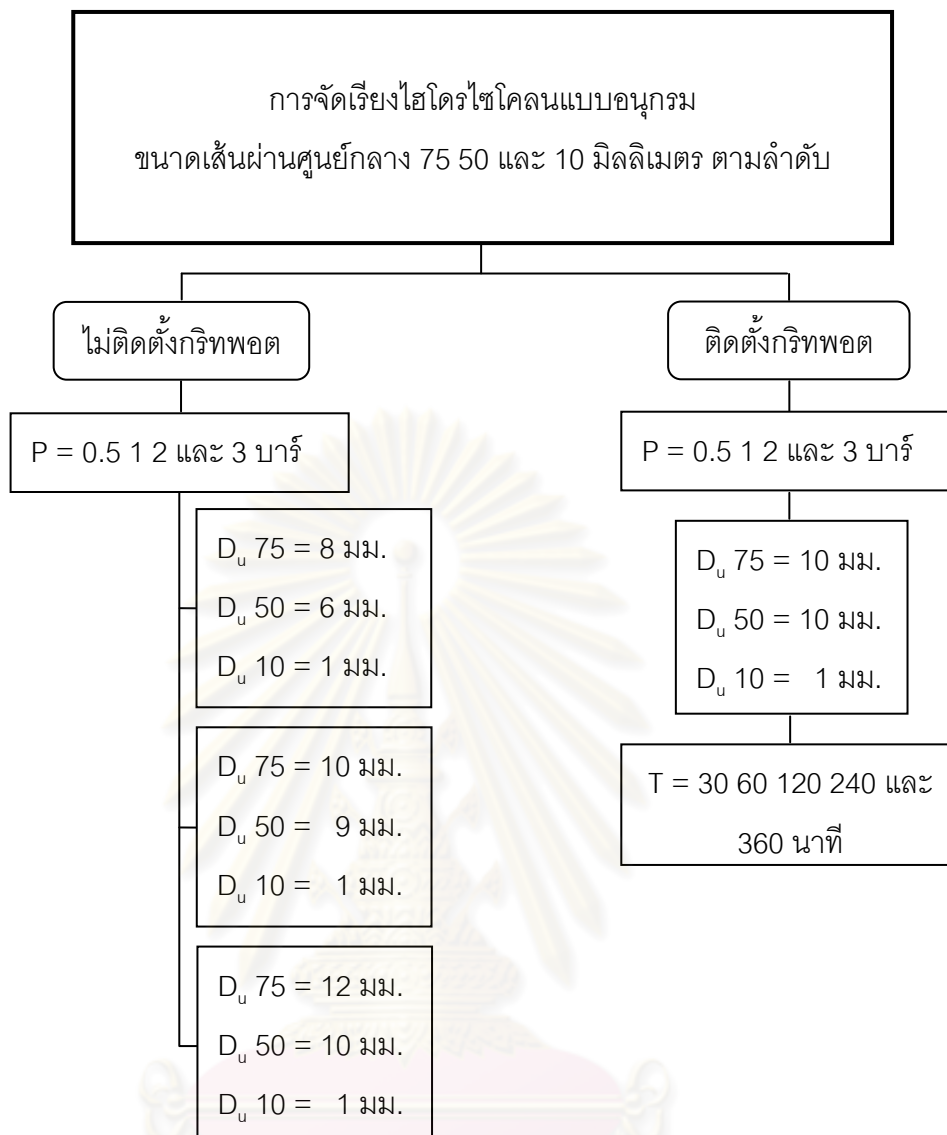
2. ในแต่ละขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างจะแปรผันค่าความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนตัวแรก จำนวน 4 ค่า คือ 0.5 1 2 และ 3 บาร์
3. ทำการเก็บน้ำตัวอย่าง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) 1 ตำแหน่งของไฮโดรไซโคลนตัวแรก ทางออกด้านบน (Overflow) 1 ตำแหน่งของไฮโดรไซโคลนตัวสุดท้าย และทางออกด้านล่าง (Underflow) ทั้งหมดทุกตำแหน่งของไฮโดรไซโคลน

3.3.2 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอตที่ขนาดต่างๆ

1. การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
 - 1.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ
 - 1.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ
 - 1.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ทำการติดตั้งกริพอตที่ทางออกด้านล่าง โดยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 1 มิลลิเมตร
2. แปรผันค่าความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนตัวไฮโดรไซโคลนตัวแรก จำนวน 4 ค่า คือ 0.5 1 2 และ 3 บาร์
3. ในแต่ละความดันจะแปรผันเวลาที่ใช้ในกริพอต คือ 30 60 120 240 และ 360 นาที
4. ทำการเก็บน้ำตัวอย่าง คือ ทางจ่ายน้ำเข้า (Feed in) 1 ตำแหน่งของไฮโดรไซโคลนตัวแรก ทางออกด้านบน (Overflow) 1 ตำแหน่งของไฮโดรไซโคลนตัวสุดท้าย และทางออกด้านล่าง (Underflow) ทั้งหมดทุกตำแหน่งของไฮโดรไซโคลน

การทดลองการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริพอต แสดงดังรูปที่ 3.8



เมื่อ D_{u75} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร หน่วยมิลลิเมตร

D_{u50} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร หน่วยมิลลิเมตร

D_{u10} คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน

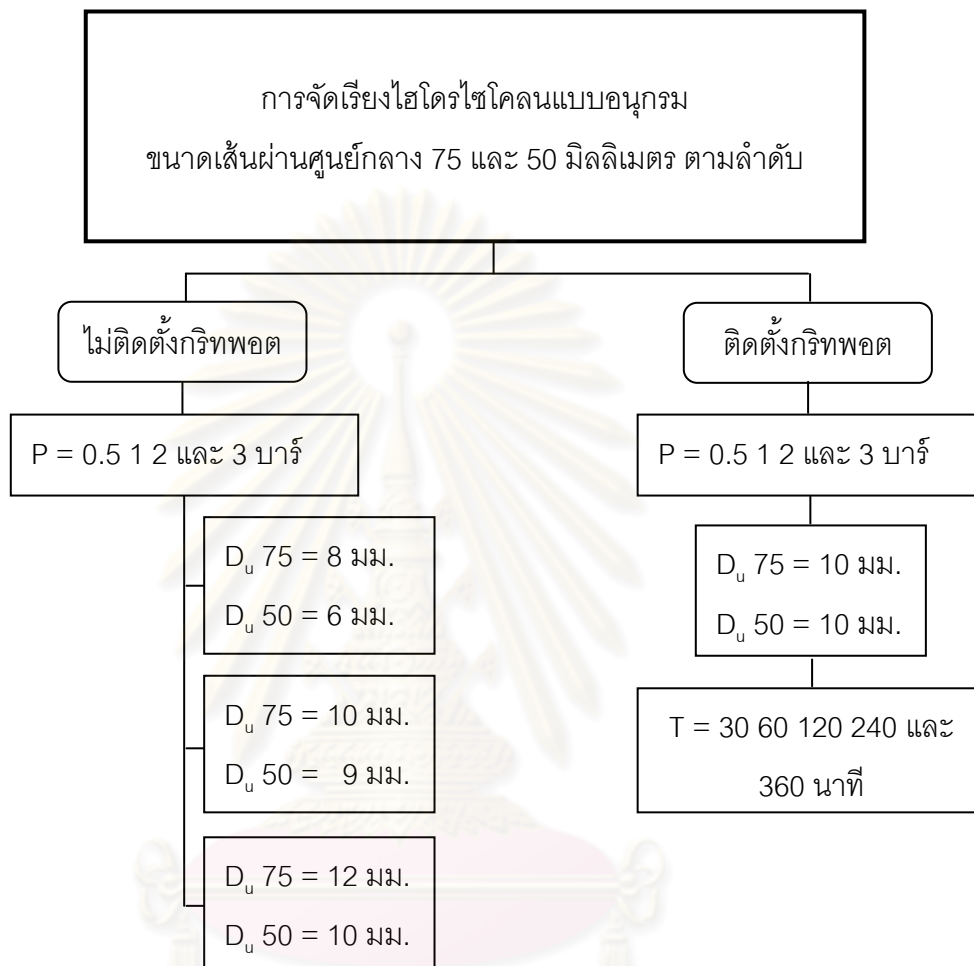
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หน่วยมิลลิเมตร

P คือ ความดันเข้า หน่วยบาร์

T คือ เวลาในการเดินระบบอย่างต่อเนื่องก่อนเก็บตัวอย่างจากกริพพอด
หน่วยนาที

รูปที่ 3.8 แผนผังการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริพพอด

การทดลองการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริพพอด แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แผนผังการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริพพอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริทพอด แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งและที่ติดตั้งกริทพอด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4 วิธีทำการทดลอง

3.4.1 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ติดตั้งกริทพอดที่ขนาดต่างๆ

1. สูบน้ำดิบจริงเข้าสู่ถังเก็บน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำดิบไหลล้นออกไปที่ท่อน้ำล้นตลอดเวลา
2. เปิดใบกวนเพื่อทำการกวนของผสมภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
3. เดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวแรกของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
4. เก็บน้ำตัวอย่างที่ทางจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน
5. เปิดวาล์ว V-5 และ V-6 เพื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ดังรูปที่ 3.5 โดยน้ำที่ปล่อยเข้าไปจะเข้าไฮโดรไซโคลนตัวแรกของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
6. ทำการปรับความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวแรก 4 ค่า คือ 0.5 1 2 และ 3 บาร์ โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลทางอ้อม (By pass) เนื่องจากข้อจำกัดในการปรับแรงดันเข้าไฮโดรไซโคลน
7. จดบันทึกค่าอัตราการไหล (Feed flow rate) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)
8. เก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากไฮโดรไซโคลนที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow)
9. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านล่างและทางออกด้านบน โดยการจับเวลาที่น้ำไหลออกจนได้ปริมาตรน้ำประมาณ 1 ลิตร จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา
10. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ
11. เปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
 - 11.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ
 - 11.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ
 - 11.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร คือ 12 10 8 มิลลิเมตร ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร คือ 10 9 6 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเดียว คือ 1 มิลลิเมตร จากนั้นทำตามการทดลองดังกล่าวข้างต้นซ้ำ

12. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

3.4.2 การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอดที่ขนาดต่างๆ

1. ประกอบกริพพอดที่ช่องทางออกด้านล่าง โดยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 1 มิลลิเมตร
2. สูบน้ำดิบจริงเข้าสู่ถังเก็บน้ำอย่างต่อเนื่อง โดยให้น้ำดิบไหลล้นออกไปที่ท่อน้ำล้นตลอดเวลา
3. เปิดใบกวนเพื่อทำการกวนของผสมภายในถังให้เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์
4. เดินเครื่องสูบน้ำเพื่อสูบน้ำจากถังเก็บน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวแรกของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
5. เก็บน้ำตัวอย่างที่ทางจ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน
6. เปิดวาล์ว V-5 และ V-6 เพื่อปล่อยน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน ดังรูปที่ 3.1 โดยน้ำที่ปล่อยเข้าไปจะเข้าไฮโดรไซโคลนตัวแรกของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
7. ทำการปรับความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนตัวแรกจำนวน 4 ค่า คือ 0.5 1 2 และ 3 บาร์ โดยการปรับอัตราการไหลที่เส้นการไหลทางอ้อม (By pass) เนื่องจากข้อจำกัดของการปรับแรงดันเข้าไฮโดรไซโคลน
8. ทำการแปรผันเวลาที่ใช้ในการเดินระบบที่มีการติดตั้งกริพพอด คือ 30 60 120 240 และ 360 นาที
8. จดบันทึกค่าอัตราการไหล (Feed flow rate) เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนที่เครื่องมือวัดอัตราการไหล (Flow meter)
9. เก็บน้ำตัวอย่างที่ออกจากไฮโดรไซโคลนที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow) และช่องทางออกด้านล่างของกริพพอด (Underflow)
10. วัดอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านล่างและทางออกด้านบน จากการหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับเวลา

11. นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ

3.5 การแสดงผลการวิเคราะห์พารามิเตอร์

วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ในผลการทดลองทำโดยใช้มาตรฐานของ Standard Method ซึ่งวิธีวิเคราะห์ทั้งหมดสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 วิธีวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

ตัวแปรที่ทำการศึกษา	วิธีวิเคราะห์	จำนวนการทดลอง
1. ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (Suspended solid)	- วิธีการกรองหาปริมาณของแข็งแขวนลอย (Standard Method)	เก็บตัวอย่างน้ำ - ช่องทางจ่ายน้ำเข้า 1 ตำแหน่งของไฮโดรไซโคลนตัวแรก
2. ค่าความขุ่น	- วัดค่าความขุ่นด้วยเครื่องวัดความขุ่น	- ช่องทางออกด้านบน 1 ตำแหน่งของไฮโดรไซโคลนตัวสุดท้าย
3. ขนาดอนุภาค	- วิเคราะห์ด้วยเครื่องหาขนาดอนุภาค	- ช่องทางออกด้านล่างทั้งหมดของไฮโดรไซโคลนทุกตัว (ทำการเก็บตำแหน่งละ 3 ครั้ง)

3.6 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

จากรายละเอียดของการทดลองข้างต้นสามารถสรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลองทั้งสิ้นดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม	ตัวแปรที่ทำการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง	จำนวนการทดลอง
1. ไฮโดรไซโคลน 75 50 และ 10 มม. ที่ไม่ติดตั้งกริพพอด	- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง	- $D_u 75 = 12\ 10\ 8$ มม. $D_u 50 = 10\ 9\ 6$ มม. $D_u 10 = 1$ มม.	3
	- ความดัน	- 0.5 1 2 และ 3 บาร์	4

ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง (ต่อ)

ชนิดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม	ตัวแปรที่ทำการทดลอง	ค่าที่ใช้ในการทดลอง	จำนวนการทดลอง
2. ไฮโดรไซโคลน 75 50 และ 10 มม. ที่ติดตั้งกริทพอด	- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง	- $D_u 75 = 10$ มม. $D_u 50 = 10$ มม. $D_u 10 = 1$ มม.	1
	- ความดัน	- 0.5 1 2 และ 3 บาร์	4
	- เวลาที่ใช้ในกริทพอด	- 30 60 120 240 และ 360 นาที	5
3. ไฮโดรไซโคลน 75 และ 50 มม. ที่ไม่ติดตั้งกริทพอด	- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง	- $D_u 75 = 12 10 8$ มม. $D_u 50 = 10 9 6$ มม.	3
	- ความดัน	- 0.5 1 2 และ 3 บาร์	4
4. ไฮโดรไซโคลน 75 และ 50 มม. ที่ติดตั้งกริทพอด	- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง	- $D_u 75 = 10$ มม. $D_u 50 = 10$ มม.	1
	- ความดัน	- 0.5 1 2 และ 3 บาร์	4
	- เวลาที่ใช้ในกริทพอด	- 30 60 120 240 และ 360 นาที	5
5. ไฮโดรไซโคลน 50 และ 10 มม. ที่ไม่ติดตั้งกริทพอด	- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง	- $D_u 50 = 10 9 6$ มม. $D_u 10 = 1$ มม.	3
	- ความดัน	- 0.5 1 2 และ 3 บาร์	4
6. ไฮโดรไซโคลน 50 และ 10 มม. ที่ติดตั้งกริทพอด	- เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง	- $D_u 50 = 10$ มม. $D_u 10 = 1$ มม.	1
	- ความดัน	- 0.5 1 2 และ 3 บาร์	4
	- เวลาที่ใช้ในกริทพอด	- 30 60 120 240 และ 360 นาที	5

รวมการทดลองทั้งสิ้น 96 การทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกทำการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ติดตั้งกริทพอด โดยไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ขนาด คือ 75 50 และ 10 มิลลิเมตร นำมาจัดเรียงกันแบบอนุกรมแบ่งเป็น 3 ชุด คือ ชุดแรก 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 50 และ 10 มิลลิเมตร ส่วนที่สองทำการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด โดยติดตั้งกริทพอดที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทุกขนาด และจัดเรียงชุดการทดลองเช่นเดียวกับในส่วนแรก ซึ่งทั้งสองส่วนการทดลองนั้นแปรผันความดันจ่ายเข้า 4 ค่า ระหว่าง 0.5 - 3 บาร์ สำหรับส่วนการทดลองที่ติดตั้งกริทพอดนั้นจะใช้เวลาในการดำเนินการของกริทพอด ระหว่าง 30 - 360 นาที

ในการดำเนินการทดลอง ทำการเดินระบบแบบเปิดในสถานที่จริง คือ สูบน้ำดิบจริงจากท่อส่งน้ำดิบในสถานีสูบน้ำดิบสำแล สูบเข้าสู่ถังเก็บน้ำในโรงงานนำร่อง (Pilot plant) และไหลล้นออกตลอดเวลาที่ดำเนินการทดลอง เพื่อให้หน้าที่ใช้ในการทดลองเป็นตัวแทนจริงของน้ำดิบนั้นๆ

สำหรับการเก็บตัวอย่างสำหรับการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ติดตั้งกริทพอด ตำแหน่งการเก็บน้ำดิบสามารถเก็บที่ท่อสำหรับการไหลข้าม (by pass) ส่วนตำแหน่งในการเก็บน้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนอีก 2 แห่ง คือ น้ำตัวอย่างที่ผ่านไฮโดรไซโคลนที่ทางออกด้านล่าง (Underflow) และทางออกด้านบน (Overflow) สามารถเก็บได้โดยตรงจากท่อน้ำสำหรับทางออกด้านล่างและทางออกด้านบนที่ต่อออกนอกถังเก็บน้ำพลาสติก ซึ่งการต่อท่อน้ำที่ไหลออกนอกถังเก็บน้ำพลาสติกทั้งสองทางนั้น เพื่อป้องกันน้ำไหลวนกลับเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน

ในส่วนของการทดลองด้วยการจัดเรียงแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอดนั้น จะทำการเก็บตัวอย่างของน้ำดิบและน้ำตัวอย่างที่ไหลออกทางด้านบนเช่นเดียวกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา ส่วนน้ำตัวอย่างที่สะสมอยู่ในกริทพอดนั้นสามารถเก็บได้โดยตรงจากวาล์วน้ำทิ้งของกริทพอด ซึ่งจะเก็บตามเวลาที่ใช้ในการดำเนินการของกริทพอดที่กำหนดไว้ ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.2

หลังจากนั้น นำน้ำตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง มาวิเคราะห์ผลที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดพารามิเตอร์ ดังนี้ คือ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย ความขุ่น และขนาดอนุภาคทั้งก่อนและหลังเข้าไฮโดรไซโคลน

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล ผู้วิจัยนำเสนอออกมาด้วยกัน 6 หัวข้อหลัก คือ ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลน มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลน ปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายทั้งหมดที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนก่อนจ่ายเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา และขนาดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลน

4.1 ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด จะแสดงผลในรูปของความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) และประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย (Solid Separation Efficiency)

4.1.1 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้

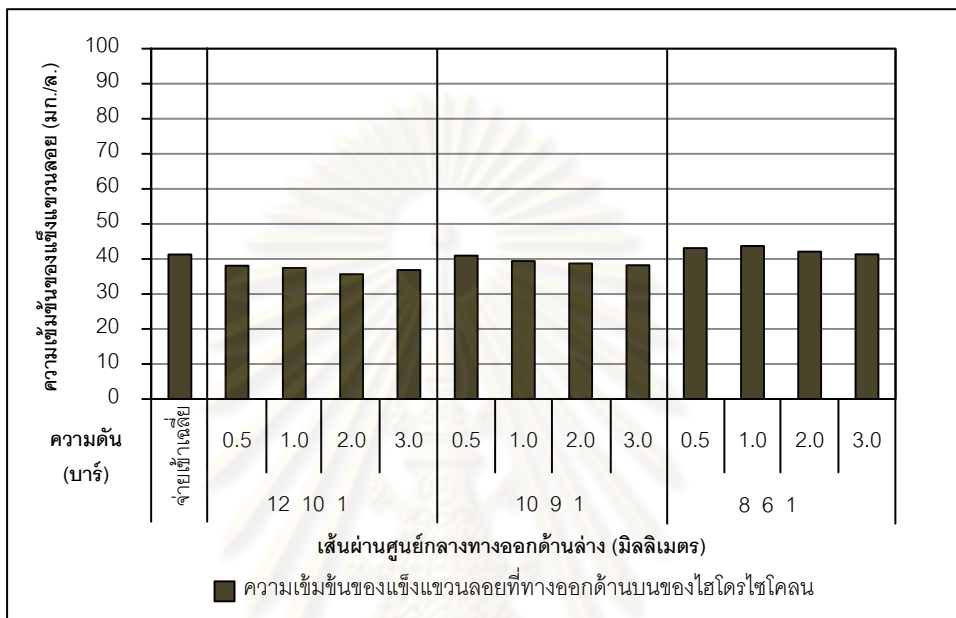
ในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำดิบจริงทุกการทดลอง ดังนั้นความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนในแต่ละการทดลองจะมีค่าแตกต่างกันตามความเข้มข้นและสภาวะแวดล้อมอื่นๆ ของน้ำดิบจริงในขณะนั้นๆ

จากผลการทดลองความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด พบว่า ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากน้ำตัวอย่างที่ทางออกด้านบนจะมีค่าน้อยกว่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยในน้ำตัวอย่างที่จ่ายเข้าและทางออกด้านล่าง และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่างสูงกว่าที่ทางออกด้านบนไม่มากนัก โดยจะแสดงผลในหัวข้อต่อไป

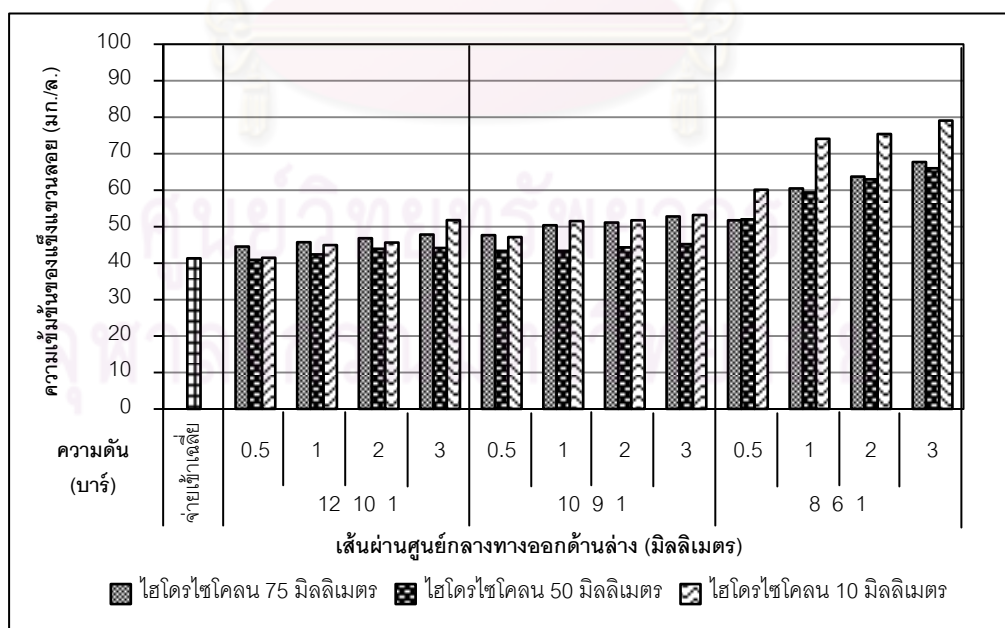
4.1.1.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 3 ชุดการทดลองคือ ชุดแรก 12 10 และ 1 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 10 9 และ 1 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 8 6 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งสามชุดการทดลองใช้ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และ 4.2 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) โดยมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้าเฉลี่ย 41.27 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 36 - 43 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็ง

แขวนลอยที่ทางออกด้านล่างที่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 45 - 68 มิลลิกรัมต่อลิตร ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 41 - 66 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 42 - 79 มิลลิกรัมต่อลิตร



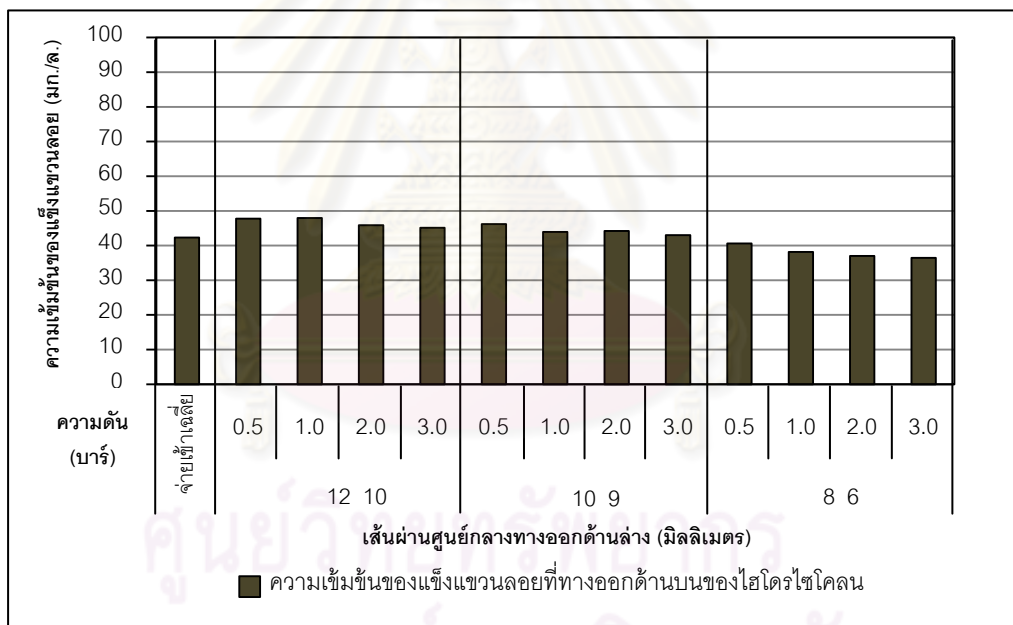
รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด



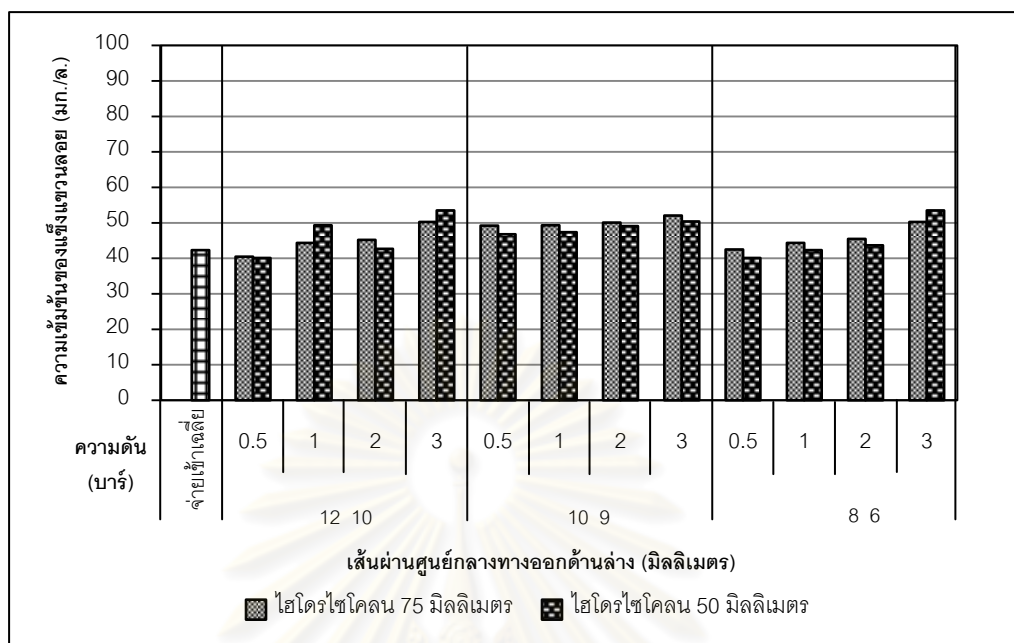
รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

4.1.1.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 3 ชุดการทดลองคือ ชุดแรก 12 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 10 และ 9 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 8 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งสามชุดการทดลองใช้ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 และ 4.4 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) โดยมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้าเฉลี่ย 42.31 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 36 - 48 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่างที่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 43 - 54 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 40 - 54 มิลลิกรัมต่อลิตร



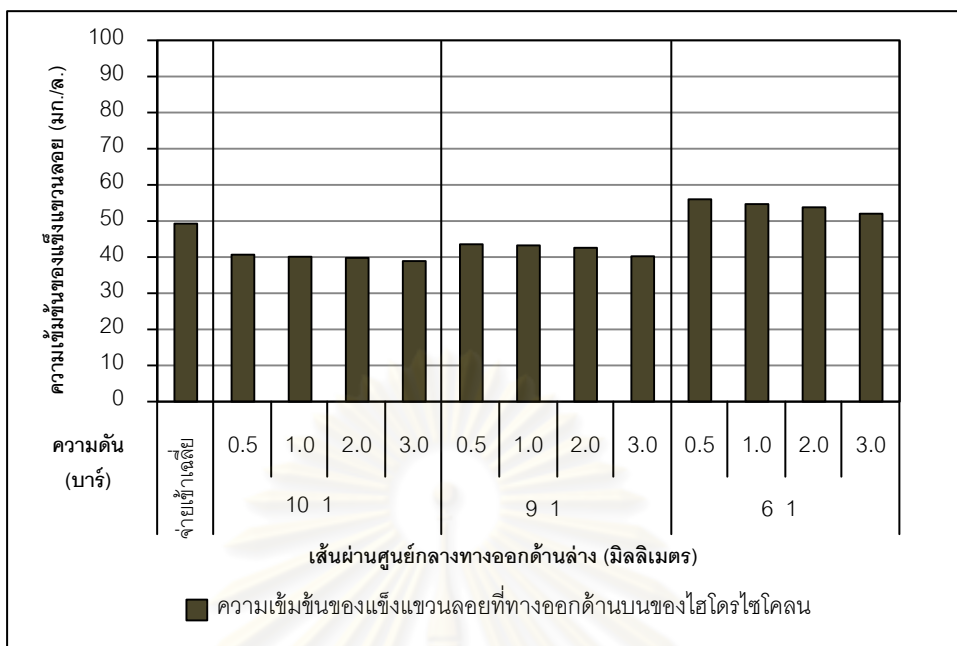
รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด



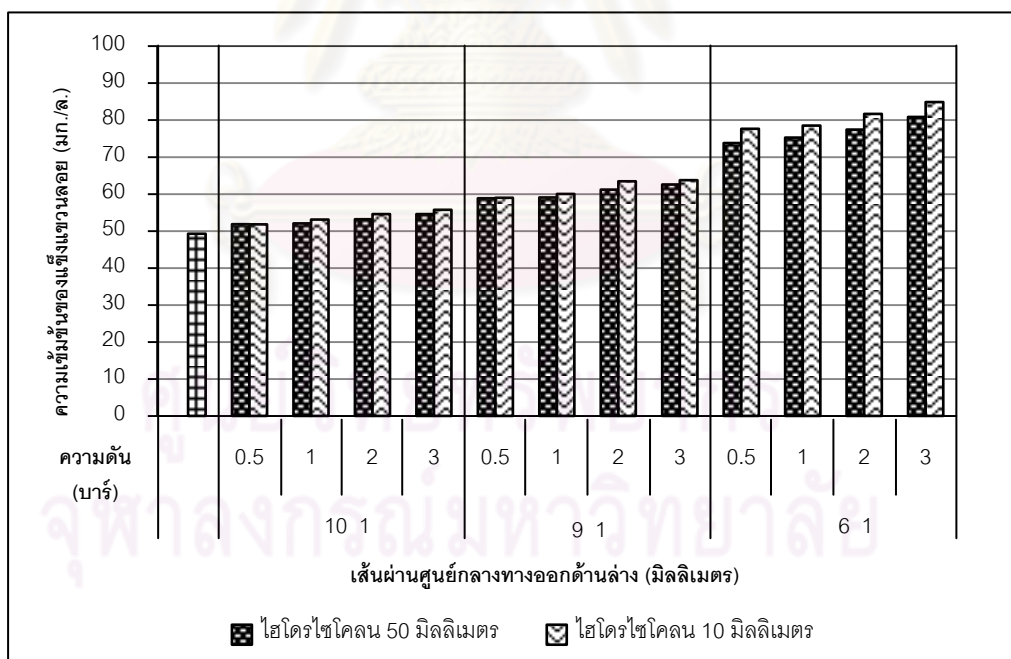
รูปที่ 4.4 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริฟฟอต

4.1.1.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 3 ชุดการทดลองคือ ชุดแรก 10 และ 1 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 9 และ 1 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 6 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ทั้งสามชุดการทดลองใช้ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 และ 4.6 (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ก) โดยมีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้าเฉลี่ย 49.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 39 - 56 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่างที่ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 52 - 81 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีค่าอยู่ระหว่าง 52 - 85 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.5 ความเข้มข้นของแข็งแรงแวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด



รูปที่ 4.6 ความเข้มข้นของแข็งแรงแวนลอยที่ออกทางด้านล่างของการจัดเรียงไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

จากการทดลอง พบว่า การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมโดยเริ่มจากไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ก่อนไปสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก สามารถป้องกันการเกิดการอุดตันที่ช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่คือ ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร จะแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกได้เกือบทั้งหมด และเมื่อมาถึงไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก ซึ่งก็คือไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร จะเหลือแค่อนุภาคขนาดเล็ก ทำให้สามารถแยกอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่เหลือได้โดยไม่เกิดการอุดตันที่ช่องทางออกด้านล่าง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 4.7 นอกจากนี้จากรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่า ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร สามารถแยกความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยได้มากกว่าไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร เนื่องจากอนุภาคที่ง่ายเข้าที่มีขนาดใหญ่จะถูกแยกออกหมดในไฮโดรไซโคลนขนาด 75 มิลลิเมตร ทำให้ในไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยลดลง อีกทั้งเมื่อพิจารณาถึงความดันจ่ายเข้าในไฮโดรไซโคลนแต่ละตัวแล้ว พบว่ามีค่า ความดันลด (Head loss, h_L) สูงมาก กล่าวคือ ที่ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 มิลลิเมตร จ่ายความดันจ่ายเข้าตามที่กำหนดไว้ แต่เมื่อมาถึงไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ค่าความดันจะลดลง 30 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แรงเหวี่ยงภายในไฮโดรไซโคลนลดลง ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไซโคลนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความดันเมื่อผ่านไฮโดรไซโคลนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอดและที่ติดตั้งกริพพอด ที่ความดัน 1 บาร์

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลน แบบอนุกรม ขนาด 75 50 และ 10 มม.	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลนตัวต่อไป (บาร์)		
	HC 75	HC 50	HC 10
ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด	1.0	0.7	0.3
ที่ติดตั้งกริพพอด	1.0	1.0	0.9

จากตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาที่ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ที่ถึงแม้ว่าความดันจ่ายเข้าจะลดลงถึง 57 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็ยังสามารถแยกของแข็งแขวนลอยได้มากกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยสูง เนื่องจากการลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลง ทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ส่งผลให้อนุภาคของแข็งที่มีความหนาแน่นมากในไฮโดรไซโคลนถูกเหวี่ยงปะทะกับผนังของไฮโดรไซโคลน อนุภาคขนาดใหญ่จึงไหลออกทางด้านล่างได้มากขึ้น ดังนั้นความเข้มข้นของแข็ง

แขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไฮโคลนจึงเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Helmholtz's law (Puprasert, 2004) ทั้งนี้อาจสรุปได้ว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไฮโคลนส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยมาก ซึ่งน่าจะส่งผลมากกว่าความดันจ่ายเข้า

4.1.2 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย

ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไฮโคลน (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.31 ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{จากสมการที่ (2.26) ประสิทธิภาพลด } E'_T = \frac{ET - R_f}{1 - R_f}$$

$$\text{เมื่อ } E_T = \frac{M_u}{M} = \frac{Q_{u(\text{total})} \cdot C_{u(\text{avg})}}{Q_f C_f} \quad \text{และ} \quad R_f = \frac{Q_{u(\text{total})}}{Q_f}$$

แทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (2.26) จะได้ว่า

$$E'_T = \frac{Q_{u(\text{total})} (C_{u(\text{avg})} - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (2.31)$$

จากการคำนวณ พบว่า ในการจัดเรียงไฮโดรไฮโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอดทุกการจัดเรียงมีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยสูงมากกว่า 100% ซึ่งไม่สะท้อนกับความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากในการจัดเรียงไฮโดรไฮโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอดมีอัตราการไหลที่ทางออกด้านบนต่ำ และอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างโดยรวมสูงมาก ส่งผลให้อัตราการแบ่งไหล (R_f) มีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน ทั้งที่โดยปกติแล้วควรมีค่าต่ำ และส่งผลให้ไฮโดรไฮโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอดให้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดต่ำเมื่อเทียบกับน้ำเข้า ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยกับประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไฮโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ความ ดัน (บาร์)	ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)					R_f	อัตราไหล ออกด้านบน (Q_0)	อัตราไหล ออกด้านล่าง รวม ($Q_{u(\text{total})}$)	ประสิทธิภาพใน การแยกของแข็ง แขวนลอย (เปอร์เซ็นต์)
	จ่าย เข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง						
			75	50	10				
0.5	38	38	45	41	42	0.96	0.11	3.24	380.75 *
1.0	38	37	46	43	45	0.95	0.15	4.26	446.16 *
2.0	38	36	47	44	46	0.92	0.17	5.18	581.74 *
3.0	38	37	48	45	52	0.97	0.19	5.90	651.13 *

* ค่าที่ได้ไม่สะท้อนกับความเป็นจริง เนื่องจากมีค่า R_f สูงมาก จึงไม่นำค่าที่ได้นี้มาใช้งานจริง

นอกจากนี้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพทอยยังมีอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่าง โดยเฉพาะไฮโดรไซโคลนตัวแรกจะมีอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างสูงมาก ทำให้น้ำที่ผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมตัวต่อไปมีอัตราการไหลต่ำลง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพทอย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 8 6 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)					
	จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน HC 10	ทางออกด้านล่าง			
			HC 75	HC 50	HC 10	รวม
0.5	2.34	0.15	1.57	0.57	0.05	2.19
1.0	3.20	0.17	1.91	0.97	0.13	3.01
2.0	4.10	0.20	2.45	1.20	0.24	3.89
3.0	4.89	0.24	2.75	1.57	0.32	4.64

* ค่าอัตราการไหลที่ได้ มาจากการวัดจริง ทำให้มีความคลาดเคลื่อนอยู่เล็กน้อย

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างโดยรวมมีค่ามากกว่าที่ทางออกด้านบนโดยเฉลี่ยประมาณ 18 เท่า แสดงให้เห็นว่าน้ำที่ผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพทอยโดยส่วนใหญ่จะออกที่ทางออกด้านล่าง ส่งผลให้อัตราไหลออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนขนาด 75 มิลลิเมตร (ซึ่งก็คืออัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร) และอัตราการไหลออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร (ซึ่งก็คืออัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร) มีค่าลดลงเป็นอย่างมากตามลำดับ โดยผลของการที่อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนดังกล่าวลดลง ทำให้ความดันไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนมีค่าต่ำไปด้วย ดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งความดันที่ต่ำลงดังกล่าวทำให้ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยต่ำลงมากไปด้วย นอกจากนี้ยังส่งผลให้น้ำที่ไหลออกที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน 10 มิลลิเมตร มีปริมาณน้อยมากอีกด้วย

ตารางที่ 4.4 ความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 8.6 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ความดันจ่ายเข้า(บาร์)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลนตัวต่อไป (บาร์)	
	ก่อนเข้า HC 50	ก่อนเข้า HC 10
0.5	0.40	0.10
1.0	0.80	0.50
2.0	1.60	1.00
3.0	2.50	1.60

จากเหตุผลที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดที่นำมาใช้บำบัดน้ำดิบในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะสมที่จะไปใช้ในงานจริง ซึ่งจะไม่ขอกล่าวถึงอีกในหัวข้อต่อไป

4.2 ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

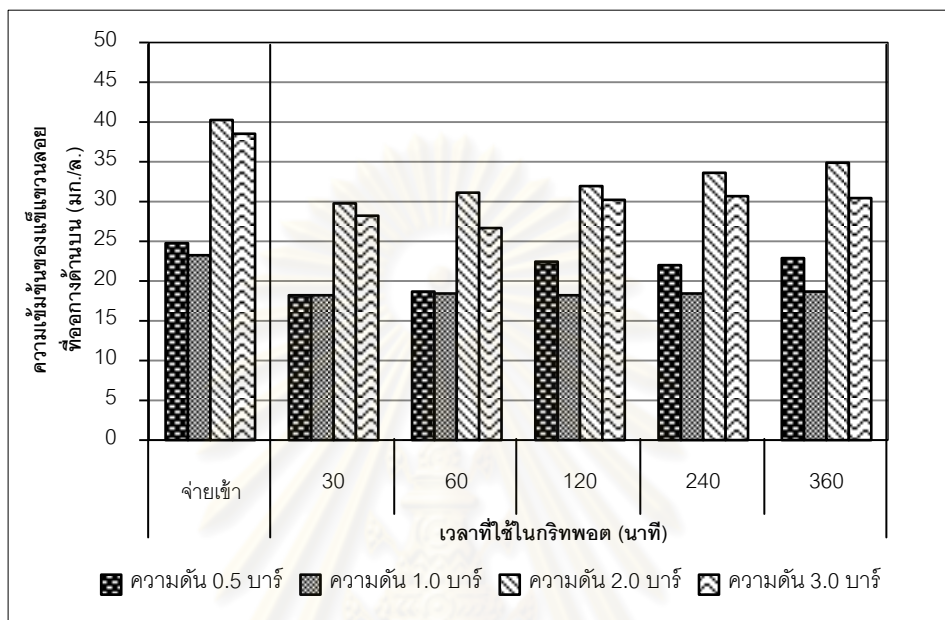
ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด จะแสดงผลในรูปของความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (Suspended Solids, SS) และประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย (Solid Separation Efficiency) เช่นกัน

4.2.1 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้

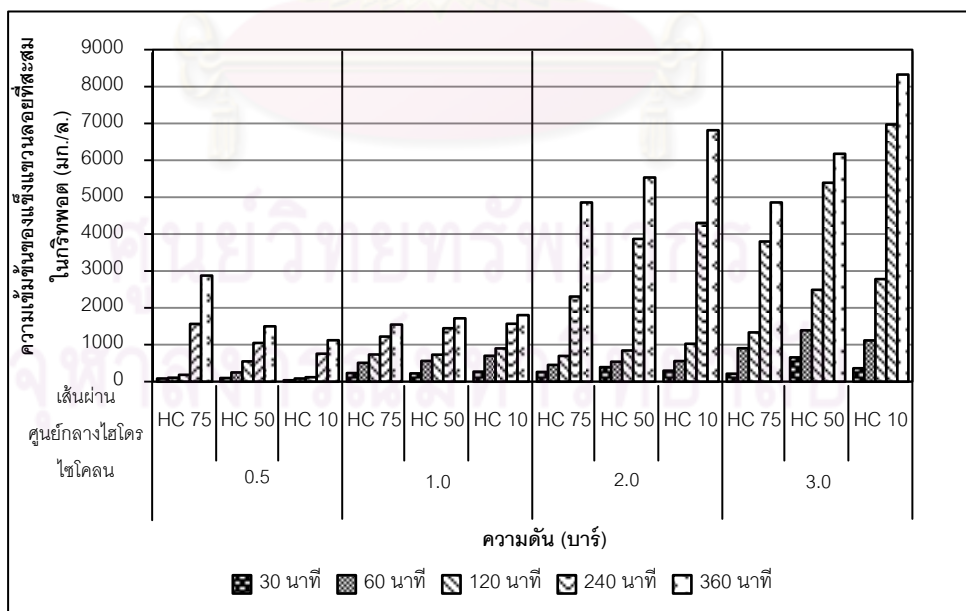
4.2.1.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด โดยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร และโดยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 1 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 และ 4.8 (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก) พบว่า ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้ามีค่าเฉลี่ย 31.70 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 18 - 35 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 85 - 4,861

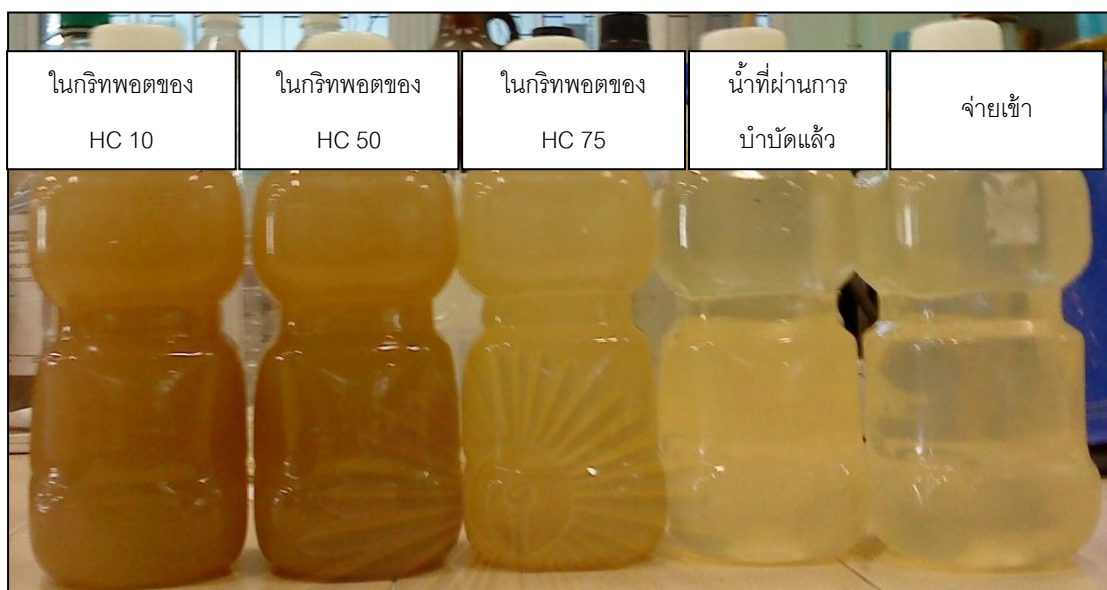
มิลลิกรัมต่อลิตร ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 97 - 6,180 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 40 - 8,331 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.7 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพอด



รูปที่ 4.8 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพอด



รูปที่ 4.9 ลักษณะน้ำตัวอย่างจาก 5 ช่องทางการไหลของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 3 บาร์
ใช้เวลาในกริทพอด 240 นาที

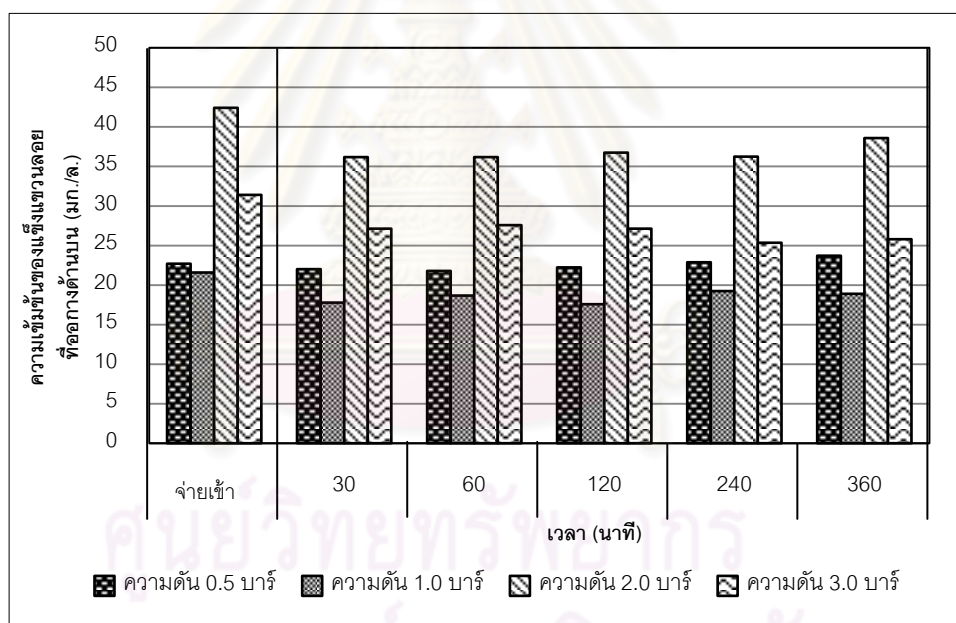
รูปที่ 4.9 แสดงถึงลักษณะน้ำตัวอย่างจาก 5 ช่องทางการไหลของไฮโดรไซโคลน ซึ่งภายใน
มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอด จะเห็นว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่าน
ศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีความขุ่นมากที่สุด ดังตารางที่ 4.5 ตามด้วยไฮโดรไซโคลนขนาด 50
และ 75 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 ความขุ่นของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ

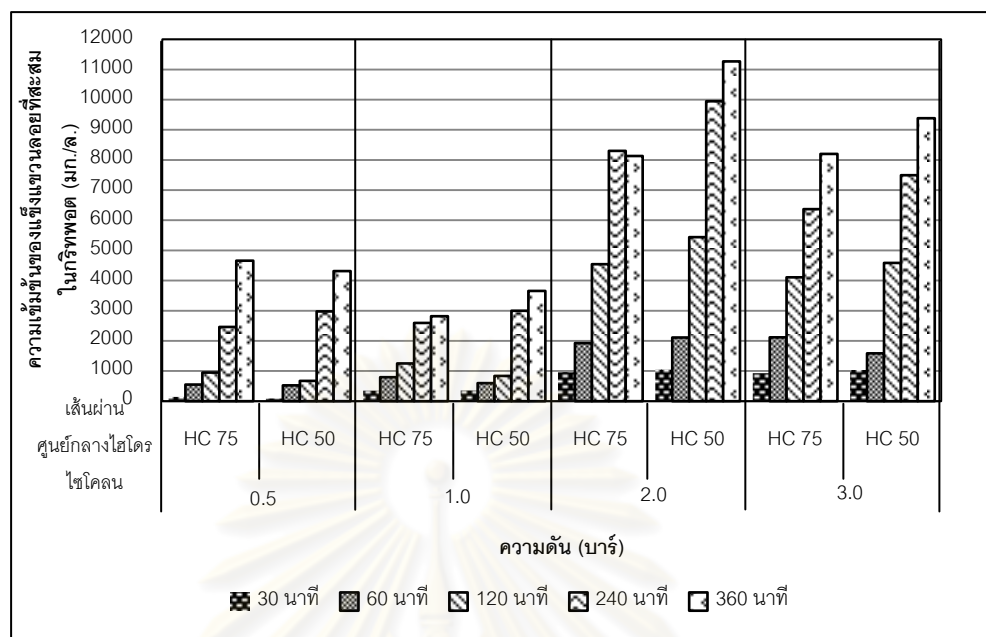
ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ความขุ่นของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)				
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)		
				HC 75	HC 50	HC 10
3.0	30	40	39	44	51	57
	60	40	37	52	61	75
	120	43	41	56	71	94
	240	43	42	59	83	200
	360	43	42	63	86	230

4.2.1.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด โดยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก) พบว่า ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้ามีค่าเฉลี่ย 32.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 18 - 55 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 18 - 8,301 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 91 - 11,271 มิลลิกรัมต่อลิตร



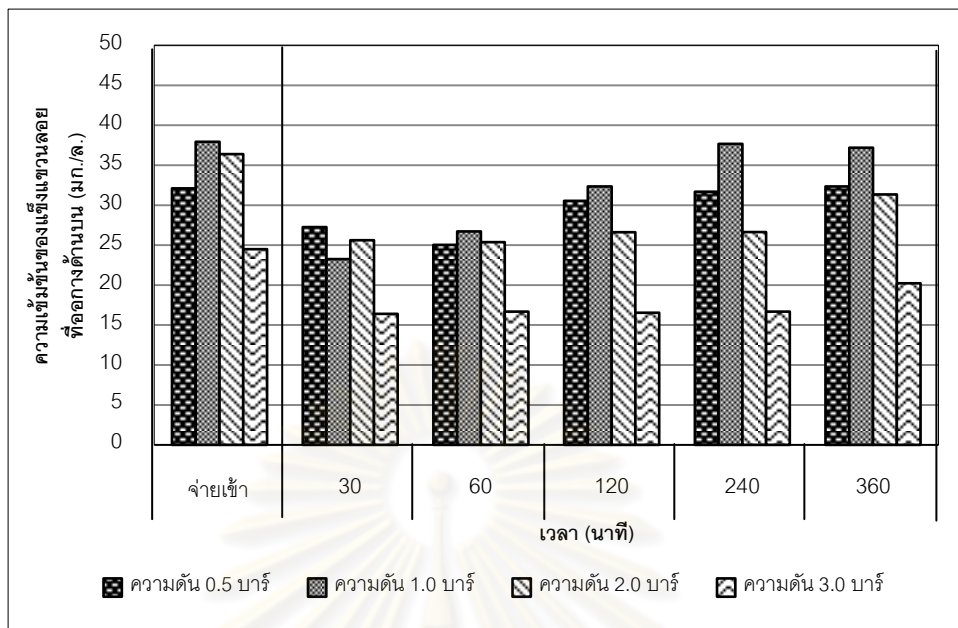
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด



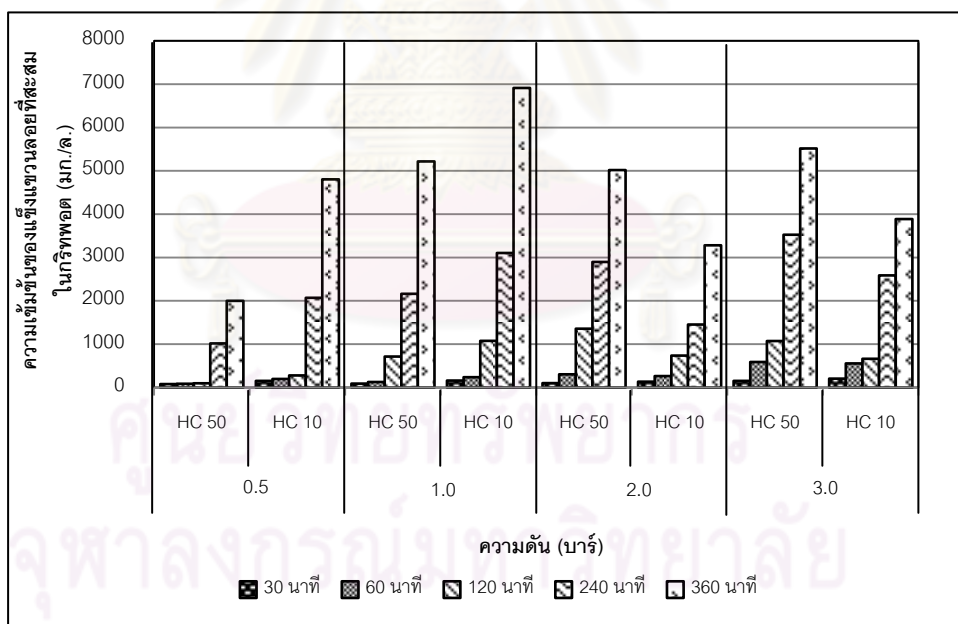
รูปที่ 4.11 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริพพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด

4.2.1.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอด โดยไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 10 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ใช้เส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 1 มิลลิเมตร ที่ความดันจ่ายเข้า 0.5 1 2 และ 3 บาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และ 4.13 (รายละเอียดผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ก) พบว่า ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้ามีค่าเฉลี่ย 32.72 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 16 - 38 มิลลิกรัมต่อลิตร และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริพพอดของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 81 - 5,520 มิลลิกรัมต่อลิตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่เวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 155 - 6,917 มิลลิกรัมต่อลิตร



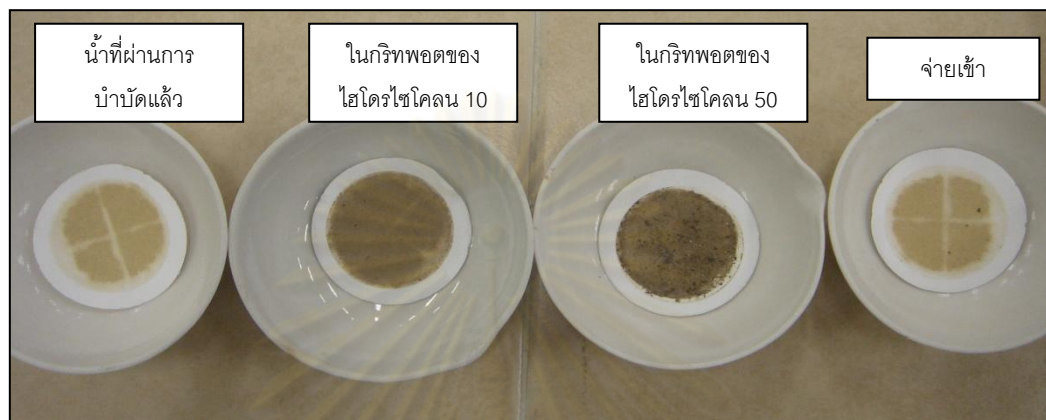
รูปที่ 4.12 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบนของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด



รูปที่ 4.13 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนพบว่า ความเข้มข้นในแต่ละการจัดเรียงของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมทั้ง 3 แบบ มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน แต่อย่างไรก็ตาม การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมทุกการ จัดเรียง

ที่ติดตั้งกริพพอด จะทำให้ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมอยู่ภายในกริพพอดมีค่ามากกว่าที่ทางออกด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.14 ซึ่งเป็นข้อดีของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอดที่ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก ช่วยทำให้ความเข้มข้นของน้ำออกที่ช่องทางออกด้านล่างมีค่าสูงขึ้นมา



รูปที่ 4.14 ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยทุกเส้นทางการไหลของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด

ในการจัดเรียงแบบอนุกรมทั้ง 3 แบบนี้ จะทำให้ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมอยู่ในกริพพอดเข้มข้นมากขึ้นตามระยะเวลาดำเนินการในกริพพอดเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอดจะไม่มีน้ำไหลออกที่ทางออกด้านล่าง ซึ่งตะกอนจะเก็บสะสมตัวอยู่ภายในกริพพอด ทำให้ตะกอนมีความเข้มข้นมากขึ้น

ในการจัดเรียงแบบอนุกรมจากไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ (ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร) ไปสู่ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก (ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) เนื่องจากในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็ก จึงทำการจัดเรียงแบบอนุกรมเช่นนี้เพื่อป้องกันการอุดตันที่อาจจะเกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดใหญ่ สามารถแยกเอาของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ออกได้ โดยจะมีความเข้มข้นไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ส่วนไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร มีความเข้มข้นมากที่สุด เนื่องจากเป็นไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็ก จึงมีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยสูง จากรูปที่ 4.14 จะเห็นได้ว่าไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร มีของแข็งแขวนลอยที่ตกค้างอยู่บนกระดาดทรงกรวยขนาดใหญ่กว่าไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร โดยรายละเอียดเรื่องขนาดอนุภาคจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

4.2.2 ประสิทธิภาพในการการแยกของแข็งแขวนลอย

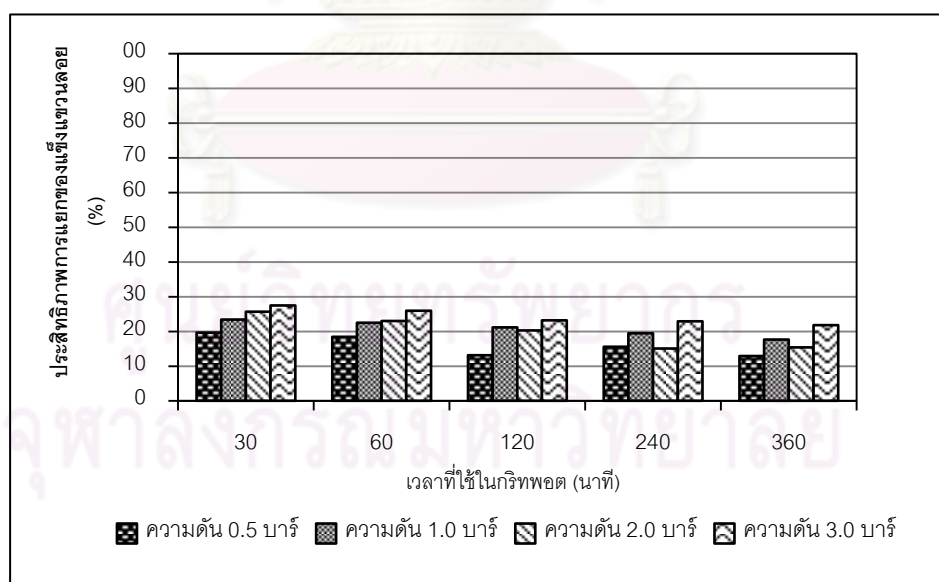
ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริทพอดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.34 ดังสมการต่อไปนี้

$$E_T = \frac{Q_f C_f T - Q_o C_o T}{Q_f C_f T} \times 100 \quad (2.34)$$

โดย T คือ เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด

4.2.2.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

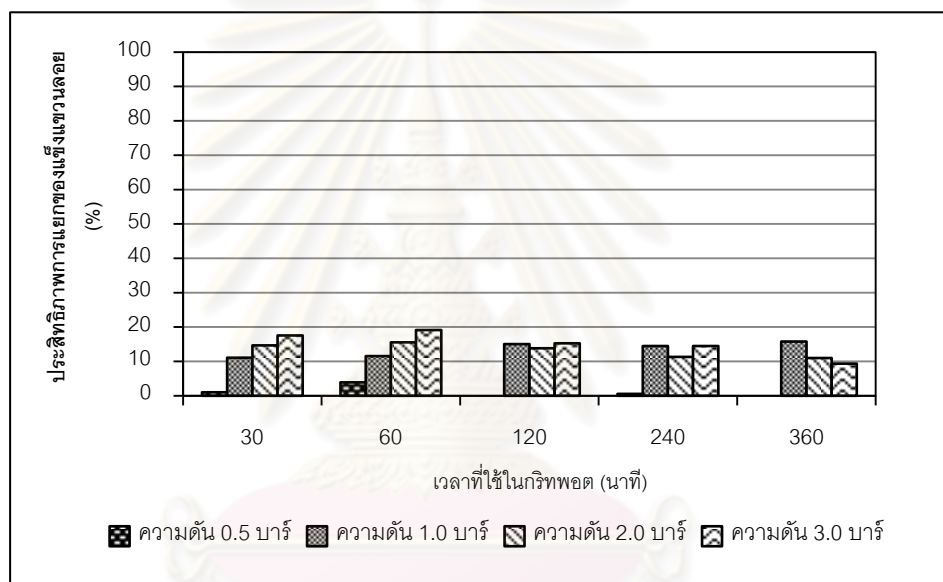
เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ดังสมการที่ 2.34 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด มีค่าอยู่ระหว่าง 12.90 - 27.44 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20.21 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 27.44 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3.0 บาร์ และเวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริทพอด

4.2.2.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ

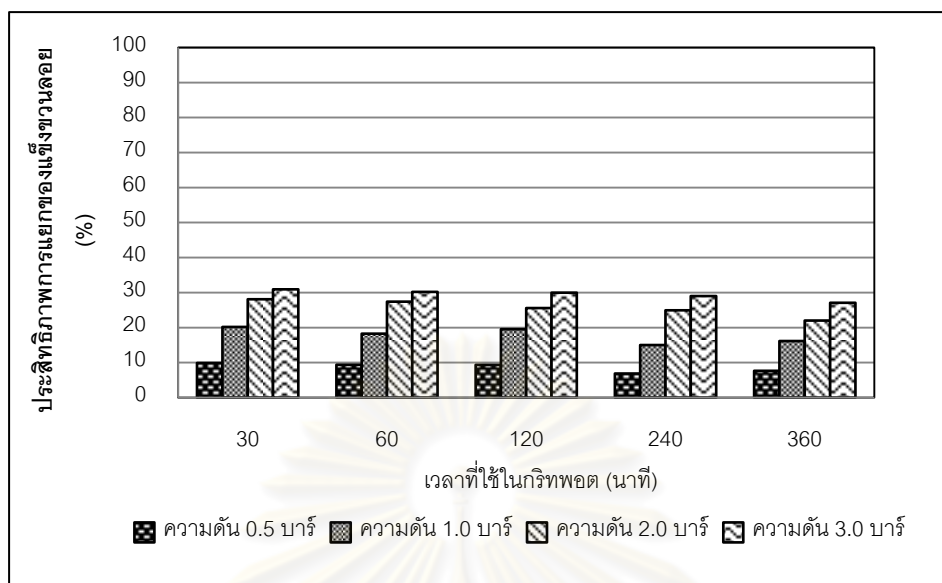
เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ดังสมการที่ 2.34 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด มีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 19.15 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 10.75 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 19.15 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3.0 บาร์ และเวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 60 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4. 16 ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริทพอด

4.2.2.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ

เมื่อคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ดังสมการที่ 2.34 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด มีค่าอยู่ระหว่าง 7.63 - 30.89 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าเฉลี่ยประมาณ 20.86 เปอร์เซ็นต์ โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 30.89 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3.0 บาร์ และเวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 30 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริทพอด

ในงานวิจัยนี้ น้ำดิบที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยต่ำ จึงทำให้มีตะกอนของแข็งแขวนลอยที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอดมีไม่เต็มกริทพอด เมื่อพิจารณาถึงผลของเวลาที่ใช้ในกริทพอดกับประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 สามารถสรุปได้ว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในกริทพอดเพิ่มมากขึ้น ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สะสมอยู่ในกริทพอดก็จะมีมากขึ้น ถึงแม้ว่าตะกอนที่สะสมจะไม่มีเต็มกริทพอด แต่ก็มีอนุภาคของแข็งบางส่วนที่มีโอกาสไหลออกสู่ทางออกด้านบน ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยลดลง ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Puprasert, 2004 ที่กล่าวว่าเมื่อเวลาที่ใช้ในกริทพอดเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยลดลง เนื่องจากอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในกริทพอดจะไปขัดขวางอนุภาคใหม่ๆ ที่เข้ามาในกริทพอด ทำให้อนุภาคของแข็งแขวนลอยมีโอกาสไหลกลับสู่ทางออกด้านบน

สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดจะไม่มีอัตราการไหลที่ทางออกด้านล่าง ทำให้อัตราการไหลเข้ามีค่าเท่ากับอัตราการไหลออกที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในตารางที่ 4.6 โดยจากค่าในตารางที่ 4.6 เห็นได้ชัดว่า ค่าอัตราการไหลเข้ามีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับอัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด ทั้งนี้เนื่องจากอัตราการไหลถูกจำกัดด้วยความสามารถในการรับน้ำของไฮโดรไซโคลนขนาด 10

มิลลิเมตร ดังนั้น หากต้องการบำบัดน้ำที่มีอัตราการไหลสูงๆ จึงอาจจำเป็นต้องติดตั้งไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร หลายตัว โดยต่อแบบขนาน เพื่อรองรับอัตราการไหลจากไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.6 อัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริพพอด โดยใช้เวลาในกริพพอด 240 นาที

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)	
	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน HC 10
0.5	0.23	0.23
1.0	0.30	0.30
2.0	0.42	0.42
3.0	0.55	0.55

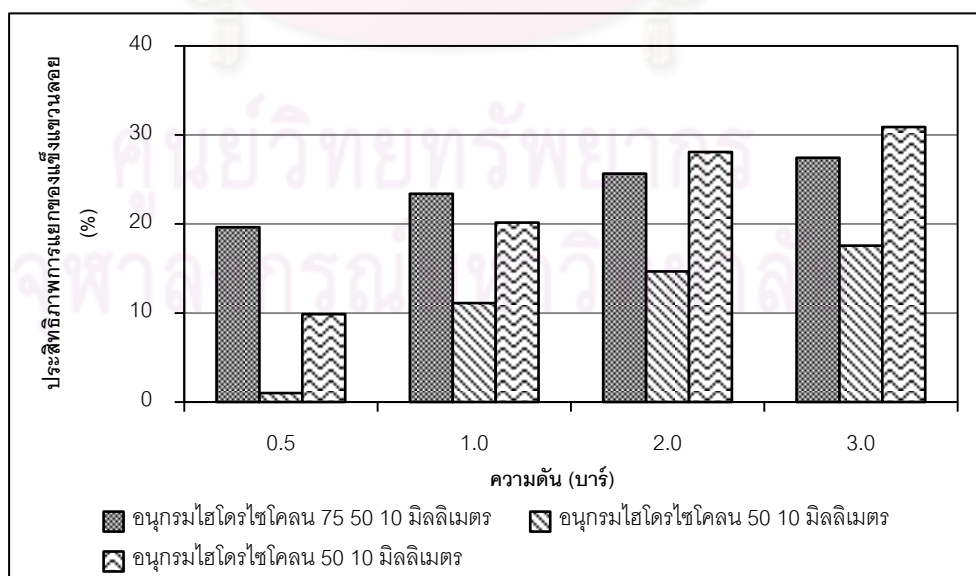
และเมื่อพิจารณาที่ค่าความดันจากตารางที่ 4.7 จะเห็นได้ว่า มีค่าความดันลดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยความดันลดดังกล่าวเกิดจากการไหลในไฮโดรไซโคลนเอง อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าความดันลดที่เกิดขึ้นจะมีค่าต่ำ (ทำให้ความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนมีค่าสูง) ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยก็ยังคงไม่สูงนัก ทั้งนี้เนื่องจากน้ำดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกของแข็งแขวนลอยออกจากน้ำดิบได้

ตารางที่ 4.7 ความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ติดตั้งกริพพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 10 มม. (บาร์)
0.5	0.40
1.0	0.90
2.0	1.90
3.0	2.90

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าน้ำดิบที่นำมาทำการทดลองนั้นมีความเข้มข้นจ่ายเข้าต่ำมาก และประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก ดังนั้นเมื่อผ่านไฮโดรไซโคลน จึงส่งผลให้มีประสิทธิภาพต่ำมาก เนื่องจากไฮโดรไซโคลนไม่สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กจนถึงขนาดคอลลอยด์ได้

เมื่อทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแก๊งแชนวอลอยที่แยกได้ระหว่างการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอดที่จัดเรียงในแบบต่างๆ คือ ชุดแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 50 และ 10 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแก๊งแชนวอลอยในแต่ละชุดการทดลองที่ติดตั้งกริพอด โดยผลของประสิทธิภาพในการแยกของแก๊งแชนวอลอยในแต่ละแบบการจัดเรียงที่ติดตั้งกริพอด ที่ใช้เวลาในกริพอด 30 นาที ที่ความดันต่างๆ มีดังนี้คือ ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาด 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพอด มีประสิทธิภาพในการแยกของแก๊งแชนวอลอยสูง โดยมีค่าสูงสุดอยู่ที่ 27.44 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3 บาร์ ส่วนไฮโดรไซโคลนขนาด 75 และ 50 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพไม่สูงนัก มีค่าสูงสุด 17.57 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3 บาร์ เนื่องจากไฮโดรไซโคลนทั้งสองขนาดนี้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่เกินไปที่จะแยกน้ำดิบที่มีอนุภาคขนาดเล็ก ส่วนไฮโดรไซโคลนขนาด 50 และ 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกของแก๊งแชนวอลอยสูงที่สุด คือ 30.89 เปอร์เซ็นต์ ที่ความดัน 3 บาร์ ซึ่งดีกว่าการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนขนาด 75 50 และ 10 มิลลิเมตร จากผลการทดลองดังกล่าว จะเห็นได้ว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาด 75 50 และ 10 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาด 50 และ 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกของแก๊งแชนวอลอยไม่แตกต่างกันมากนัก แต่ในการนำไปใช้งานจริงการใช้ไฮโดรไซโคลนเพียงสองตัวต่ออนุกรมกัน คือ ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร จะเหมาะสมกว่า เนื่องจากสามารถลดค่าใช้จ่ายและลดขั้นตอนในการติดตั้งได้อีกด้วย



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแก๊งแชนวอลอย
ในทุกการจัดเรียงที่ติดตั้งกริพอด

โดยภาพรวมไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดมีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยต่ำ (ประมาณ 30%) แต่ก็ยังมีข้อดีคือ สามารถแยกของแข็งแขวนลอยออกโดยให้ความเข้มข้นที่สะสมในกริทพอดสูงมาก ดังนั้นสำหรับกระบวนการผลิตน้ำประปา การที่ของแข็งแขวนลอยถูกแยกออกได้ในขั้นต้นจะสามารถลดการใช้สารเคมี (สารส้ม) ลงได้ ทั้งนี้จะแสดงให้เห็นในหัวข้อต่อไป

นอกจากนี้ด้วยสาเหตุที่ขนาดอนุภาคในน้ำดิบมีขนาดเล็ก ดังนั้นจึงทำให้ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยต่ำ แต่หากในบางช่วงเวลาที่น้ำดิบมีความขุ่นสูงขึ้น ซึ่งก็คือน้ำดิบน่าจะมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นด้วย (เช่น ช่วงฝนตก ฤดูน้ำหลาก เป็นต้น) จะทำให้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดมีประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยมากขึ้น นอกจากนี้การดำเนินการของระบบนี้ไม่จำเป็นต้องรองรับการไหลแบบต่อเนื่อง จึงสามารถเลือกเดินระบบบำบัดน้ำขั้นต้นเป็นช่วงเวลาได้ โดยเฉพาะเวลาที่น้ำมีความขุ่นสูงๆ

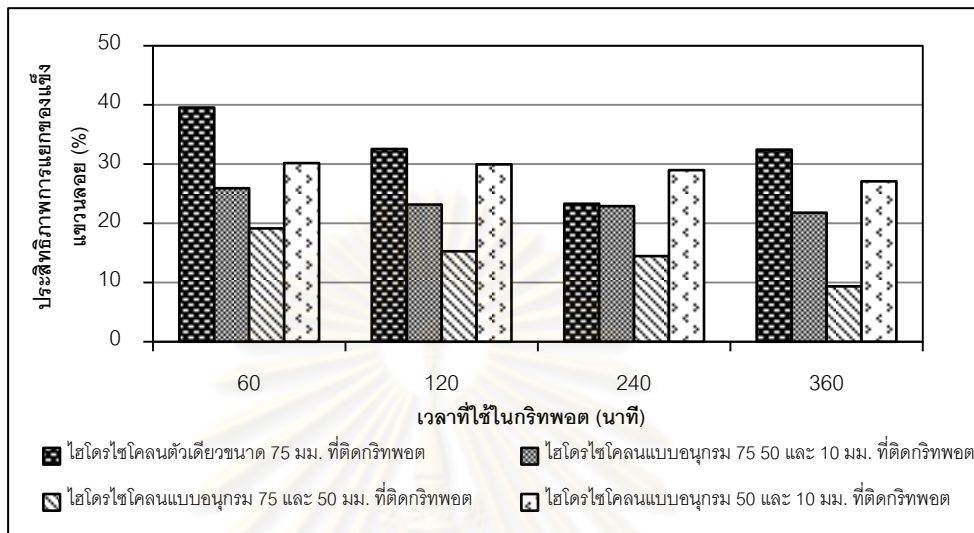
ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1 ในการจัดเรียงแบบอนุกรมจากไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ (ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร) ไปสู่อไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก (ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) เนื่องจากในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร เป็นไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็ก จึงทำการจัดเรียงแบบอนุกรมเช่นนี้เพื่อป้องกันการอุดตันที่อาจจะเกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก ทำให้การทดลองดำเนินไปได้โดยไม่เกิดการอุดตัน ซึ่งจะกล่าวต่อไปในเรื่องของขนาดอนุภาคในหัวข้อต่อไป

4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวที่ติดตั้งกริทพอด

4.3.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด จากข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดลองของอรรถิพย์ จีระพรชัย (2551) สามารถแสดงดังรูปที่ 4.19 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร กับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.7 ที่เกี่ยวกับขนาดอนุภาคพบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ช่วยแยกเอาตะกอนของแข็ง

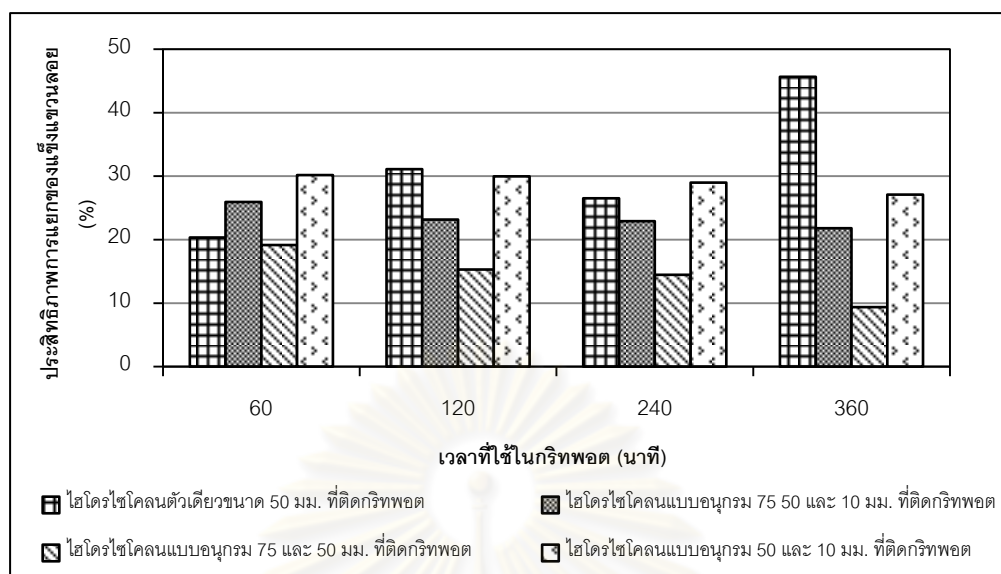
แขวนลอยขนาดใหญ่ออกไปได้หมด ส่งผลให้สามารถป้องกันการเกิดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรได้



รูปที่ 4.19 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกรรพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรรพอด

4.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกรรพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรรพอด

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกรรพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรรพอด จากข้อมูลการวิเคราะห์ผลการทดลองของอ้อทิพย์ จีระพรชัย (2551) สามารถแสดงดังรูปที่ 4.20 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร กับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน โดยจากการทดลองในหัวข้อที่ 4.7 ที่เกี่ยวกับขนาดอนุภาคพบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ช่วยแยกเอาตะกอนของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ออกไปได้หมด ส่งผลให้สามารถป้องกันการเกิดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตรได้



รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

เนื่องจากน้ำดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเข้มข้นต่ำและมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงทำให้สังเกตเห็นประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเมื่อเทียบกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นถ้าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่จ่ายเข้ามีค่าสูงขึ้น เช่น ในฤดูน้ำหลาก น่าจะทำให้มีอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมดีขึ้นและดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบตัวเดียว เนื่องจากไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสามารถทำงานได้มากขึ้น

4.4 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

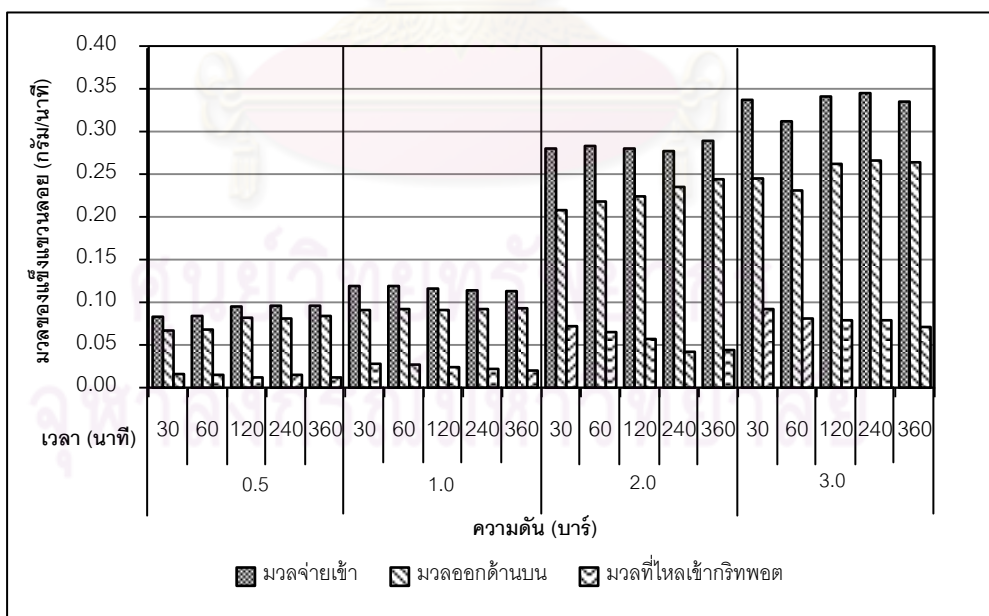
ในหัวข้อการคำนวณมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้นั้น จะไม่ขอก้าวถึงการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด เนื่องจากมีอัตราไหลที่ทางออกด้านบนต่ำและอัตราไหลรวมที่ทางออกด้านล่างสูงมาก จนไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานได้จริง ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.1.2

การคำนวณมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด สามารถหาได้จากการนำผลการทดลองที่วิเคราะห์หาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยมาคำนวณให้อยู่ในรูปของมวล โดยการทำสมดุลมวลของทางเข้าและออกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 เส้นทางการไหลของระบบ ได้แก่ จ่ายเข้า (Feed) ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) มวลที่จ่าย

เข้าและมวลที่แยกออกทางด้านบน สามารถคำนวณได้จากผลคูณของอัตราการไหลกับความเข้มข้น แต่การคำนวณมวลที่สะสมในกริทพอด สามารถคำนวณได้จากมวลที่จ่ายเข้าลบกับมวลที่แยกออกทางด้านบนของไฮโดรไซโคลอนที่ติดตั้งกริทพอด เนื่องจากการเก็บน้ำตัวอย่างจากกริทพอดนั้นอาจมีของแข็งแขวนลอยที่ค้างอยู่ในไฮโดรไซโคลอนผสมมาด้วย จึงทำให้ผลที่ได้ไม่น่าเชื่อถือนัก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การคำนวณมวลจากสมดุลมวลมาคำนวณมวลของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดแทนการคำนวณมวลที่สะสมในกริทพอดจริงๆ ผลการคำนวณที่ได้จะอยู่ในรูปของหน่วยน้ำหนักต่อเวลา (ตัวอย่างรายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค)

4.4.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

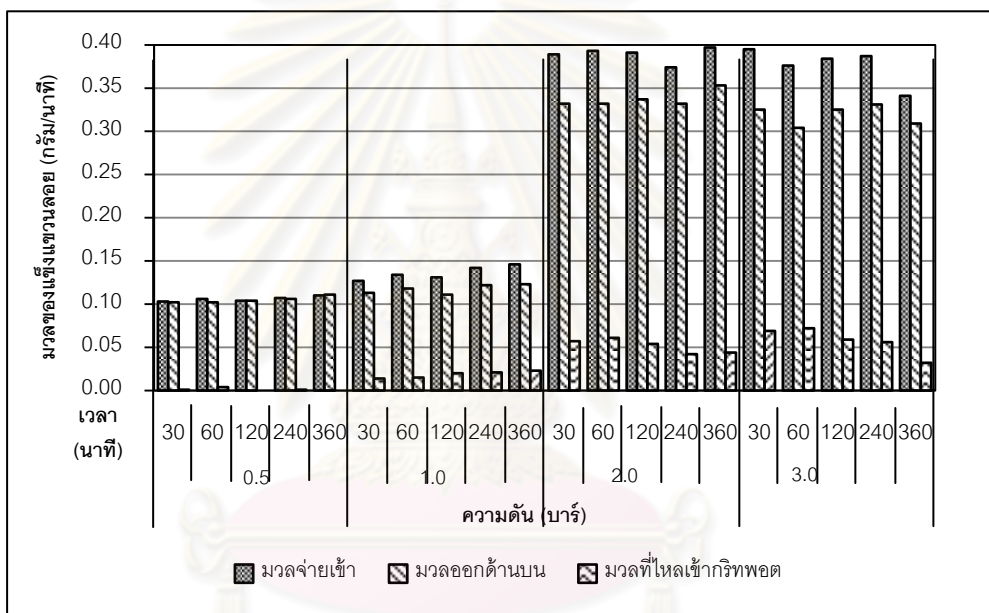
การจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ที่ความดัน 0.5 1 2 และ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในกริทพอด 30 60 120 240 และ 360 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.21 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) พบว่า มวลของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้ามีค่าเฉลี่ย 0.206 กรัมต่อนาที และมวลของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.067 - 0.264 กรัมต่อนาที และมวลของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.012 – 0.092 กรัมต่อนาที



รูปที่ 4.21 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

4.4.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

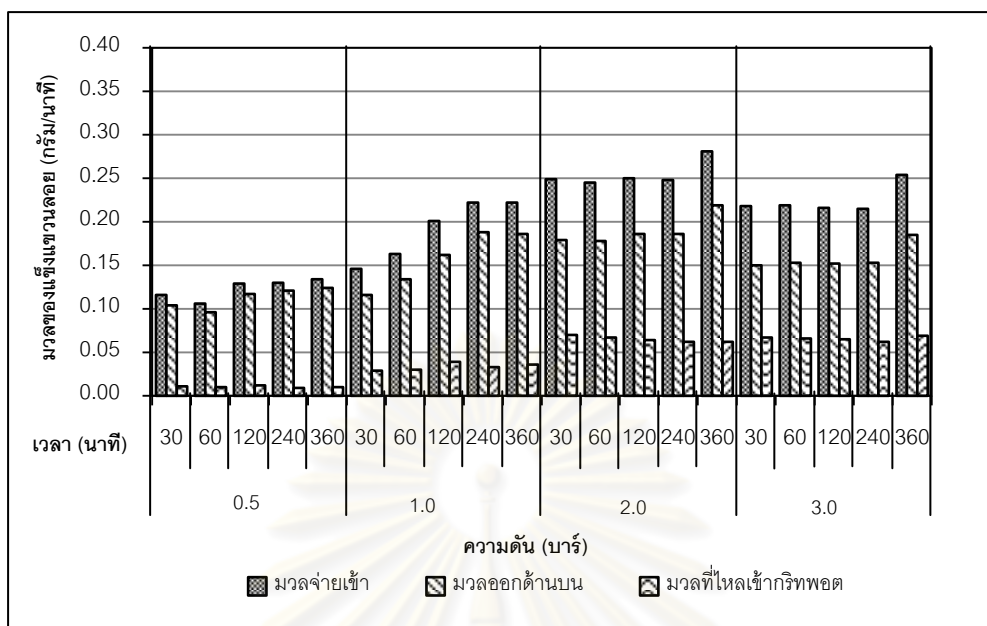
การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ที่ความดัน 0.5 1 2 และ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในกริทพอด 30 60 120 240 และ 360 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.22 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) พบว่า มวลของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้ามีค่าเฉลี่ย 0.252 กรัมต่อนาที และมวลของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.102 - 0.353 กรัมต่อนาที และมวลของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดมีค่าอยู่ระหว่าง 0 - 0.072 กรัมต่อนาที



รูปที่ 4.22 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

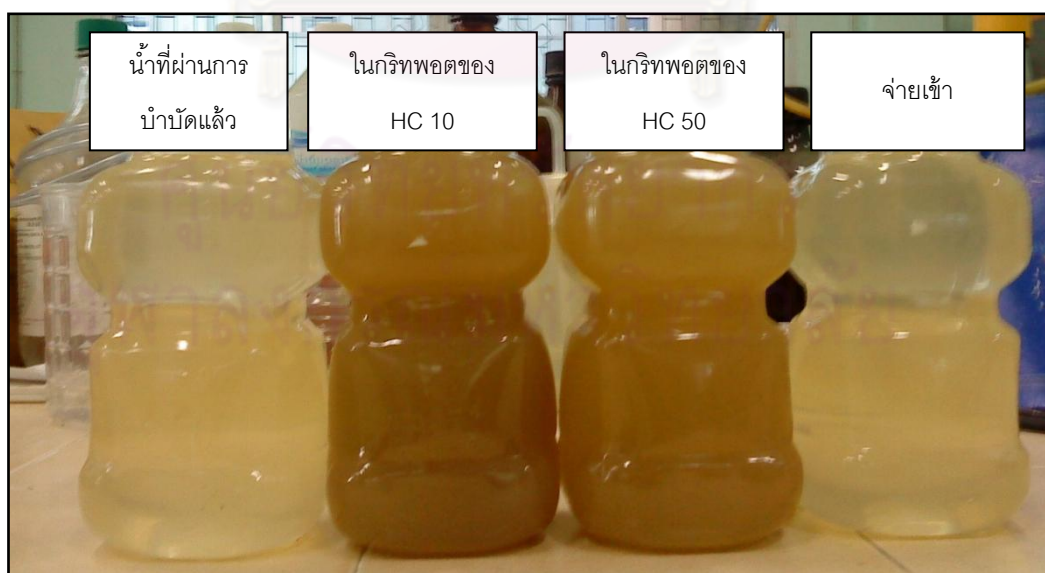
4.4.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ที่ความดัน 0.5 1 2 และ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ในกริทพอด 30 60 120 240 และ 360 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ค) พบว่า มวลของแข็งแขวนลอยจ่ายเข้ามีค่าเฉลี่ย 0.198 กรัมต่อนาที และมวลของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.096 - 0.219 กรัมต่อนาที และมวลของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทพอดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.009 - 0.069 กรัมต่อนาที



รูปที่ 4.23 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่า มวลของแข็งแขวนลอยที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอดมี ปริมาณน้อยกว่ามวลที่แยกออกทางด้านบน แต่จากการทดลองจะสังเกตได้ว่าตัวอย่างน้ำที่ได้จาก การทดลองด้วยไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดทั้ง 3 แบบ มีความเข้มข้นมากกว่าน้ำ กระจายและที่ทางออกด้านบน ดังแสดงในรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ลักษณะของตัวอย่างน้ำทั้ง 3 ช่องการไหลที่ได้จากการทดลองด้วย ไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

เมื่อเปรียบเทียบมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ที่ทางออกด้านบน พบว่ามีค่ามากกว่ามวลที่สะสมในกริฟฟอตในทุกการจัดเรียงแบบอนุกรม เนื่องจากของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็กและมีน้ำหนักเบา จึงไม่สามารถตกตะกอนได้ด้วยแรงโน้มถ่วงและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริฟฟอต ในทุกการจัดเรียงแบบอนุกรม ที่ความดัน 3 บาร์ ที่เวลา 240 นาที

ไฮโดรไซโคลอน แบบอนุกรม (มม.)	มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ (กรัม/นาที)			
	จ่ายเข้า	ออกด้านบน	สะสมในกริฟฟอต	ประสิทธิภาพในการ แยกของแข็ง แขวนลอย
75 50 10	0.345	0.266	0.079	22.90
75 50	0.387	0.331	0.056	14.46
50 10	0.215	0.153	0.062	28.97

4.4.4 เปรียบเทียบมวลของแข็งแขวนลอยที่ถูกแยกออกทางด้านล่างระหว่างการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริฟฟอต

เมื่อเปรียบเทียบมวลของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมทุกการจัดเรียงที่ติดตั้งกริฟฟอต ใช้เวลาในกริฟฟอต 240 นาที ที่ความดัน 3 บาร์ ดังตารางที่ 4.8 พบว่า ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร สามารถแยกมวลของแข็งแขวนลอยได้มากที่สุดเมื่อเทียบกับในแต่ละชุดของการจัดเรียงแบบอนุกรม ส่วนการจัดเรียงอนุกรมแบบ 75 และ 50 มิลลิเมตร และการจัดเรียงอนุกรมแบบ 50 และ 10 มิลลิเมตร จะมีแนวโน้มในการแยกมวลของแข็งแขวนลอยเช่นเดียวกับไฮโดรไซโคลอนเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร คือเมื่อเพิ่มความดันจ่ายเข้า จะทำให้สามารถแยกมวลของแข็งแขวนลอยได้มากขึ้น ซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตค (Stokes's law equation) (Metcalf และ Eddy, 2003)

จากตารางที่ 4.8 จะเห็นว่าไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อคำนึงถึงเรื่องประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยและจำนวนไฮโดรไซโคลอนที่ทำการจัดเรียงแล้ว พบว่าไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร เป็นการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมเพียงสองตัวเท่านั้น ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง ลดขั้นตอนในการติดตั้ง และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย ดังนั้นไฮโดรไซโคลอน

แบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอดสามารถแยกของแข็งแขวนลอยออกได้ในระดับหนึ่ง สามารถนำมาใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาได้ ซึ่งสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้

4.5 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอด

พารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนในงานวิจัยนี้ได้แก่ ความดันจ่ายเข้า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน และเวลาที่ใช้ในกริพพอด

4.5.1 ความดันจ่ายเข้า

จากผลการทดลองที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร 50 มิลลิเมตร และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งทดลองแปรเปลี่ยนความดันเพื่อปรับอัตราการไหล โดยควบคุมความดัน 4 ค่า คือ 0.5 1 2 และ 3 บาร์ สำหรับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมทั้ง 3 ชุดการทดลอง คือ ชุดแรก ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สาม ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งการดำเนินการทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ การทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด และที่ติดตั้งกริพพอดที่ทางออกด้านล่าง พบว่า การเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนทำให้อัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง (V_y) มีค่าสูงขึ้นสามารถอธิบายได้จากสมการที่ 2.4 ($v_y = \alpha \frac{Q}{A_i}$) ซึ่งส่งผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนหรือความเร่งหนีศูนย์กลาง (ζ) มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน ดังอธิบายได้จากสมการที่ 2.10 ($\zeta = \frac{V_y^2}{R \cdot g}$) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนกับความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง และเนื่องจากความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนจะมีค่ามากกว่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกมาก ดังนั้นความเร็วในการตกตะกอนของไฮโดรไซโคลน (V_p) จากสมการกฎของสโตค (Stokes's law equation) (Metcalf และ Eddy, 2003) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_p = \frac{\Delta\rho \cdot d_p^2 \cdot \zeta}{18\mu} \quad (2.11)$$

จะเห็นได้ว่า เมื่อความเร่งหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้โอกาสในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนมีมากขึ้น

ดังนั้น เมื่อความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ทำให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ส่งผลให้ความเร็วและประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน รวมไปถึงความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยที่แยกออกทางด้านล่างสำหรับไฮโดรไซโคลนแบบที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยและมวลที่สะสมอยู่ในกริพพอดสำหรับไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริพพอดจึงเพิ่มตามไปด้วย ดังผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.1 ถึง 4.4

4.5.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน

จากการทดลอง พบว่า ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมจากไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ (ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร) ไปสู่อไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก (ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) สามารถป้องกันการเกิดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กได้ ทำให้การทดลองดำเนินไปได้โดยไม่เกิดการอุดตัน โดยจะเห็นผลชัดเจนเมื่อดูผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.7 ที่เกี่ยวกับขนาดอนุภาค

นอกจากนี้ จากผลการทดลองความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริพพอดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริพพอดของไฮโดรไซโคลนแต่ละตัว พบว่า ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีความเข้มข้นสูงกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร และไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีความเข้มข้นสูงกว่าไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 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 แสดงถึงการหมุนวนภายนอก (Outer Vortex) ในทิศทางลงตามแนวสัมผัสเส้นรอบวง นั่นคือ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลดลง ความเร็วตามแนวสัมผัสเส้นรอบวงเพิ่มขึ้น

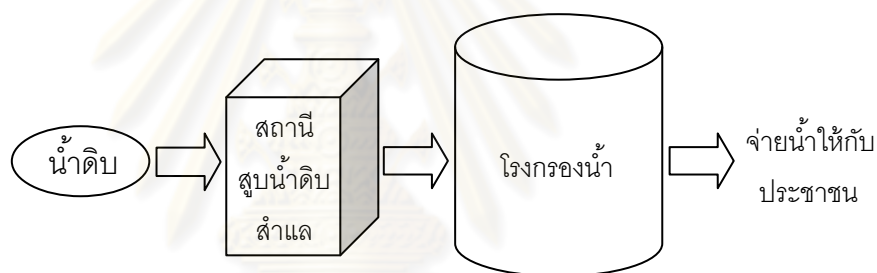
กล่าวคือ เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลนลง ทำให้ความเร็วลัพท์ของอนุภาคในไฮโดรไซโคลนมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลให้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น ทำให้อนุภาคของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไซโคลนถูกเหวี่ยงปะทะกับผนังของไฮโดรไซโคลน ทำให้อนุภาคขนาดใหญ่ไหลออกสู่ทางด้านล่างได้มากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยเพิ่มขึ้นเช่นกัน

4.5.3 เวลาที่ใช้ในกริทพอด

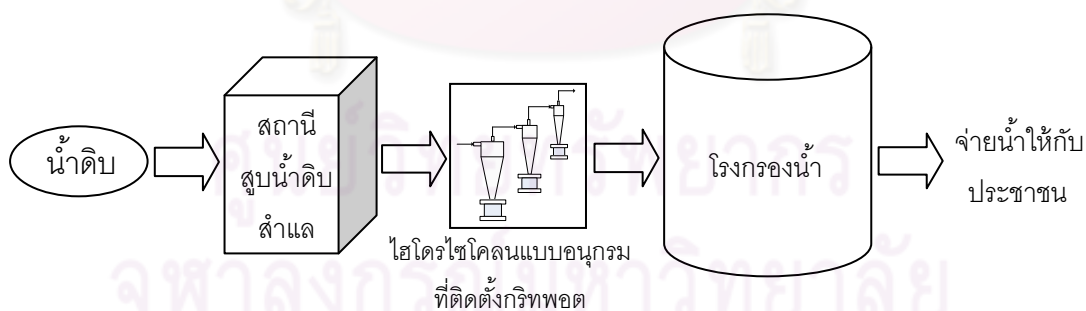
จากผลการทดลองสำหรับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด เมื่อใช้เวลาในการดำเนินการในกริทพอดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 ถึง 4.17 พบว่า เมื่อดำเนินการทดลอง อนุภาคที่มีขนาดใหญ่จะไหลออกสู่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนด้วยการหมุนวนภายนอกและเกิดการสะสมตัวอยู่ภายในกริทพอด โดยที่น้ำใสและอนุภาคขนาดเล็กไหลย้อนกลับผ่านช่องแคบรอบแกนอากาศออกสู่ทางออกด้านบนด้วยการหมุนวนภายใน ซึ่งจากการทดลอง พบว่า ตะกอนที่สะสมตัวอยู่ภายในกริทพอดมีปริมาณน้อย โดยจากการสังเกตเห็นว่ามีตะกอนอยู่ไม่เต็มกริทพอด ดังนั้นของแข็งแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอดจะมีโอกาสไหลย้อนกลับออกไปทางด้านบนเพียงเล็กน้อย จึงอาจกล่าวได้ว่า การเพิ่มเวลาที่ใช้ในกริทพอดในงานวิจัยนี้ ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไซโคลนเพียงเล็กน้อย เนื่องจากตะกอนที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอดนั้นมีไม่เต็มกริทพอด และในส่วนของความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอด เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่อยู่ในกริทพอดจะมีความเข้มข้นเพิ่มมากขึ้น ซึ่งการทดลองในส่วนนี้พบว่ามีผลสอดคล้องกับผลงานวิจัยของ Puprasert, 2004 ที่กล่าวไว้ว่า กริทพอดจะติดอยู่ที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอนขนาดเล็ก และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยจะแปรผันตามเวลาที่ใช้ในกริทพอด เมื่อตะกอนที่สะสมตัวอยู่ในกริทพอดมากเกินไปจนกริทพอดเต็ม ตะกอนจะไหลย้อนกลับออกไปที่ทางออกด้านบน ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยลดลง โดยจากงานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยมีความเห็นว่าควรจะนำไปทดลองใช้กับน้ำที่มีความเข้มข้นมากกว่านี้ เพื่อให้กริทพอดเต็ม จะทำให้เห็นผลที่เกิดขึ้นจากการที่กริทพอดเต็มได้ชัดเจนขึ้น

4.6 ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงเมื่อผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

ในระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน การประปานครหลวงได้มีการสูบน้ำดิบจากแม่น้ำเจ้าพระยามายังสถานีสูบน้ำดิบสำแล และจะส่งน้ำดิบโดยคลองประปาซึ่งมีระยะทางประมาณ 31 กิโลเมตร (การประปานครหลวง, www.mwa.co.th) ไปยังโรงกรองน้ำเพื่อเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา จากนั้นจึงสูบน้ำดิบให้กับประชาชน ดังแสดงในรูปที่ 4.25 (ก) ระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน สำหรับในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการลดปริมาณของแข็งแขวนลอยก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาและลดปริมาณสารเคมีที่ต้องเติมลงไปในระบบผลิตน้ำประปาให้น้อยลง จึงได้ทำการจำลองโดยการนำไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดมาติดตั้งก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาจริง ดังรูปที่ 4.25 (ข) เพื่อที่จะคำนวณว่าเมื่อนำไฮโดรไซโคลนมาติดตั้งก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาแล้ว จะช่วยลดปริมาณของแข็งแขวนลอยและปริมาณของสารเคมีที่ใช้ได้มากน้อยเพียงใด



(ก) ระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน



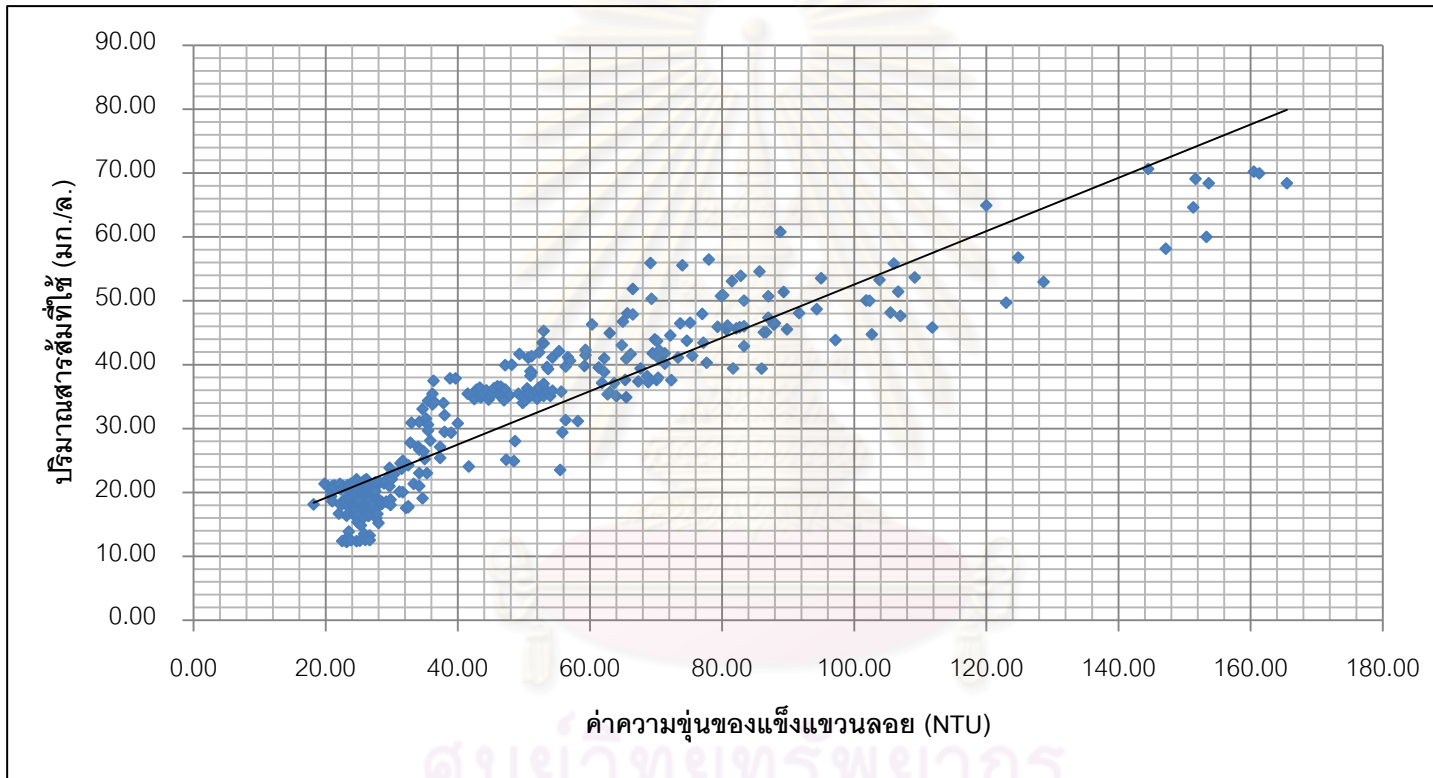
(ข) จำลองระบบผลิตน้ำประปาเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

รูปที่ 4.25 แผนผังแสดงระบบผลิตน้ำประปา (ก) ระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน และ (ข) จำลองระบบผลิตน้ำประปาเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

ในกระบวนการผลิตน้ำประปานั้นจะมีการเติมสารเคมี คือ ปูนขาว คลอรีน และสารส้ม โดยในการเติมสารส้มนั้นก็เพื่อกำจัดของแข็งแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำดิบ ซึ่งงานวิจัยนี้จะสนใจสารส้มเพียงชนิดเดียว ดังนั้นหลังผ่านกระบวนการผลิตน้ำประปาแล้วจะมีสลัดจ์เกิดขึ้น ซึ่งส่วนประกอบของสลัดจ์นั้นก็คือปริมาณของแข็งแขวนลอยและสารส้ม โดยในงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาหาปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงหลังผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ซึ่งการหาปริมาณสลัดจ์ที่ลดลง จะทำการคำนวณปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากทั้งระบบ (ก) และ (ข) หลังผ่านกระบวนการผลิตน้ำประปา แล้วนำมาทำการเปรียบเทียบกัน

สำหรับการคำนวณปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นทั้งระบบ (ก) และ (ข) สามารถคำนวณได้จากปริมาณของแข็งแขวนลอยที่แยกได้และปริมาณสารส้มที่เติมลงไป โดยปริมาณสารส้มที่นำมาใช้ในการคำนวณ ได้มาจากข้อมูลการปฏิบัติงานจริงของกองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ จากการประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2553) โดยที่หน่วยวิเคราะห์คุณภาพน้ำนี้จะทำการทดลองทุกวัน โดยใช้จาร์เทสต์เพื่อหาปริมาณสารส้มที่ต้องเติมลงไป ซึ่งปริมาณสารส้มที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะขึ้นอยู่กับค่าความขุ่นเพียงอย่างเดียว แต่ในการปฏิบัติงานจริงของการประปานครหลวง นอกจากค่าความขุ่นแล้ว ยังมีค่าตัวแปรอื่นๆ คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภาวะความเป็นด่าง (alkalinity) ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) มาใช้เป็นข้อมูลในการเติมสารส้ม โดยจากการทดลองทำจาร์เทสต์ของการประปานครหลวงแล้ว จึงนำค่าต่างๆ มาเขียนเป็นกราฟได้ค่าดังรูปที่ 4.26 จากนั้นนำมาใช้ในการประมาณการหาปริมาณสารส้มที่ใช้จากค่าความขุ่นต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง (การคำนวณดังแสดงในภาคผนวก ง)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

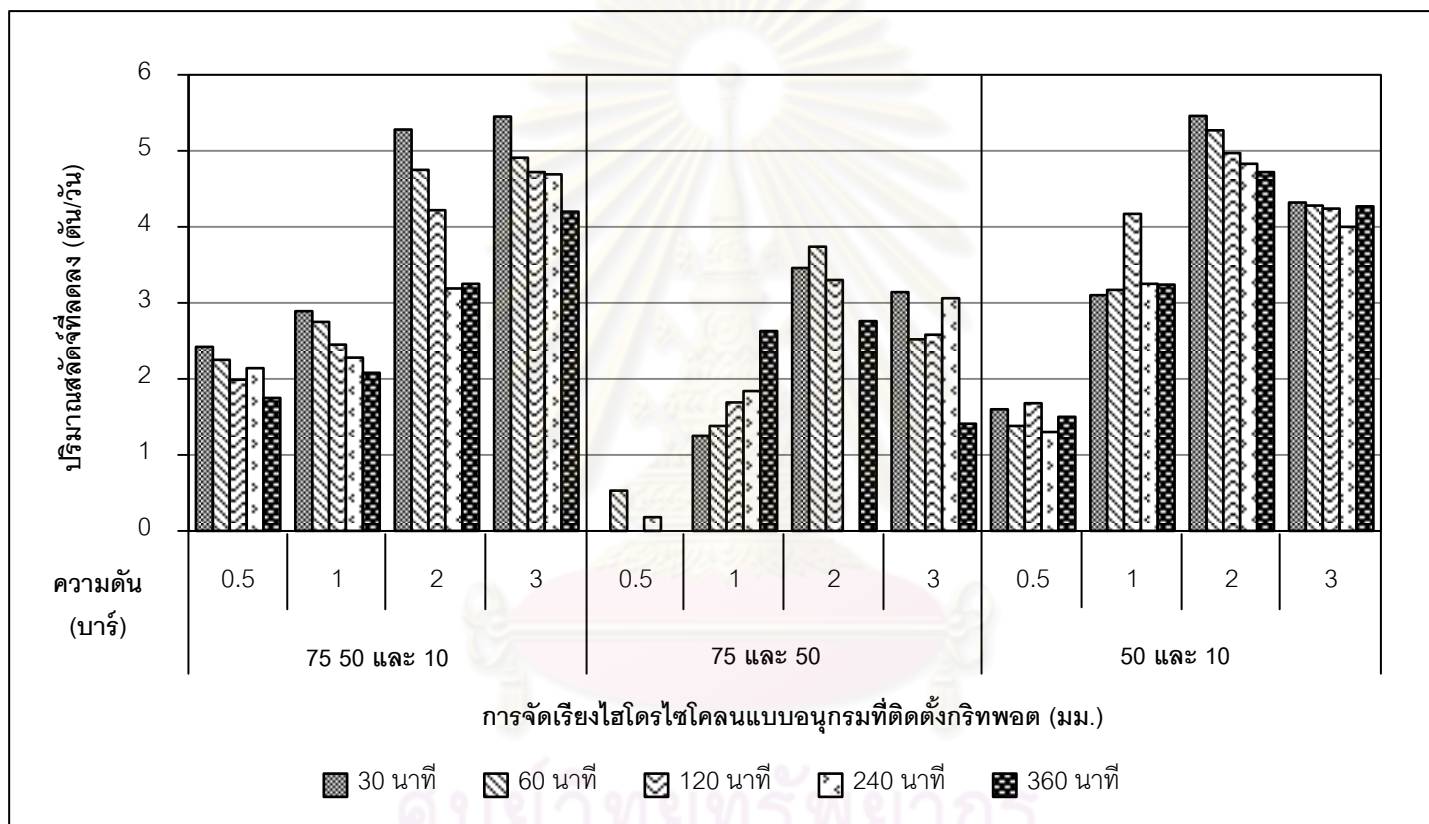


รูปที่ 4.26 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขุ่นของแข็งแขวนลอยและปริมาณสารสั้ที่ใช่เติมลงไปในระบบผลิตน้ำประปา (การประปานครหลวง, 2553)

จากการคำนวณปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงหลังจากการจำลองการติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปาของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมในทุกการจัดเรียงแบบอนุกรม ที่ความดัน 0.5 1 2 และ 3 บาร์ โดยปริมาณน้ำที่ไหลเข้าในระบบจะใช้ข้อมูลของการประปานครหลวง ที่โรงกรองน้ำสามเสนในช่วงตลอดปี 2552 ซึ่งมีอัตราไหลเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาเฉลี่ย 500,348 ลบ.ม./วัน (การคำนวณแสดงในตารางภาคผนวก ง) พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 3 บาร์ เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 30 นาที ให้ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงมากที่สุด คือ 5.54 ตัน/วัน ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ความดัน 2 บาร์ เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 60 นาที ให้ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงมากที่สุด คือ 4.08 ตัน/วัน และไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 2 บาร์ เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 30 นาที ให้ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงมากที่สุด คือ 5.85 ตัน/วัน ดังรูปที่ 4.27



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.27 ปริมาณคลอรีนที่ลดลงเมื่อติดตั้งการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ทุกชุดการจัดเรียงแบบอนุกรม

จากการสอบถามข้อมูลจากบริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน) (บริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน), 2553) ค่ากำจัดสลัดจ์ที่ได้จากการผลิตน้ำประปา คิดเป็นเงิน 9,000-10,000 บาท/ตัน ซึ่งราคาจะคิดตามสภาพความเป็นกรดของสลัดจ์ที่เกิดขึ้น และจากการสอบถามข้อมูลราคาสารส้มจากกองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ การประปานครหลวง (การประปานครหลวง, 2553) พบว่า สารส้มมีราคา 4,432 บาท/ตัน โดยในตารางที่ 4.9 แสดงปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงและค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอตมาติดตั้งเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

ในการติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอตนี้ ทำให้มีค่าไฟฟ้าจากปั๊มสูบน้ำเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนด้วย ดังนั้นจึงต้องนำค่าไฟฟ้ามาคำนวณด้วย โดยในการคำนวณจะคำนวณค่าไฟฟ้าโดยใช้อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of use Rate : TOU) ซึ่งค่าพลังงานไฟฟ้าสูงสุดเท่ากับ 2.695 บาท/กิโลวัตต์-ชั่วโมง อัตราการไหลเข้าของน้ำดิบสูงสุด 30,000 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ดังตารางที่ 4.9 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)

ตารางที่ 4.9 ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงและค่าใช้จ่ายที่ลดลงจากการนำการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอตมาติดตั้งเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ค่าที่ได้จากการคำนวณ		ชุดการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอต (มม.)		
		75 50 10	75 50	50 10
ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลง (ตัน/วัน)	ต่ำสุด*	1.80	0	1.42
	สูงสุด*	5.54	4.08	5.85
ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลง (เปอร์เซ็นต์)	ต่ำสุด*	7.50	0	4.70
	สูงสุด*	16.70	11.50	19.84
ค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ที่ลดลง (บาท/วัน)	ต่ำสุด*	17,064	0	13,452
	สูงสุด*	52,619	38,787	55,614
ปริมาณสารส้มที่ลดลง (ตัน/วัน)	ต่ำสุด*	0	0	0.15
	สูงสุด*	0.55	0.75	1.30
ค่าใช้จ่ายของปริมาณสารส้มที่ลดลง (บาท/วัน)	ต่ำสุด*	0	0	665
	สูงสุด*	2,439	3,326	5,766
ค่าใช้ไฟฟ้าของไฮโดรไซโคลน (บาท/วัน)		3,216	3,216	3,216
รวมค่าใช้จ่ายที่ลดลงทั้งหมด (บาท/วัน)		สูงสุด* 50,290	38,897	56,168

* ค่าต่ำสุดและค่าสูงสุด ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่ควบคุมการทำงาน เช่น ความดันจ่ายเข้า เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริพพอต เป็นต้น

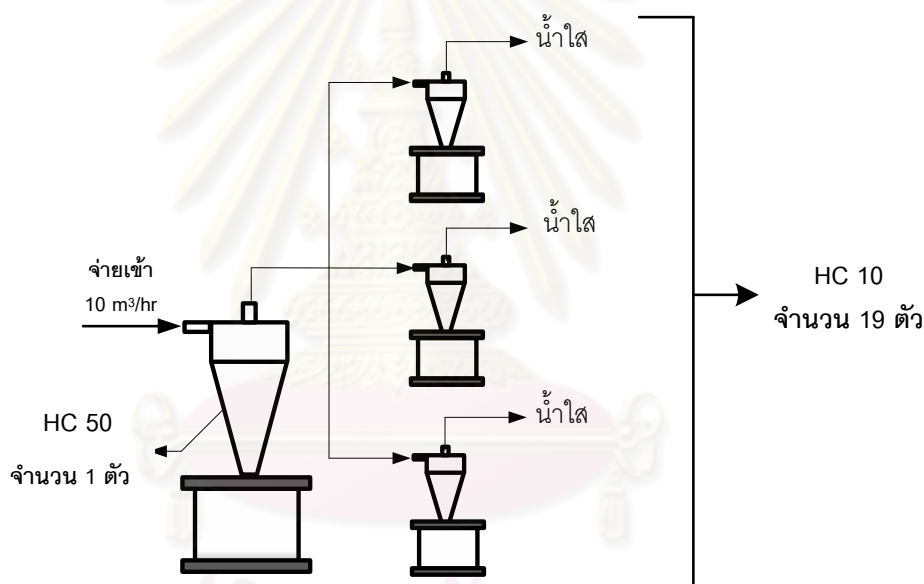
จากตารางที่ 4.9 เมื่อเปรียบเทียบปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ที่ลดลงจากการใช้การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด พบว่า การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร สามารถลดปริมาณสลัดจ์ได้มากที่สุด คือ 5.85 ตัน/วัน และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ได้มากที่สุด คือ 55,614 บาท/วัน ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ผลเรื่องประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยที่กล่าวไว้ว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร มีประสิทธิภาพในการแยกปริมาณของแข็งแขวนลอยมากที่สุด และเมื่อมาดูที่ปริมาณสารส้มที่ลดลงและค่าใช้จ่ายของปริมาณสารส้มที่ลดลงแล้ว พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร อีกเช่นเดียวกันที่สามารถลดปริมาณสารส้มได้มากที่สุด คือ 1.30 ตัน/วัน และลดค่าใช้จ่ายของปริมาณสารส้มได้มากที่สุด คือ 5,766 บาท/วัน แต่เมื่อหักค่าใช้จ่ายของไฮโดรไซโคลน 3,214 บาท/วัน แล้วรวมค่าใช้จ่ายที่ลดลงทั้งหมดจะเท่ากับ 56,168 บาท/วัน

แต่จากตารางที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร สามารถลดปริมาณสลัดจ์ได้ใกล้เคียงกับไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยและจำนวนไฮโดรไซโคลนที่ทำการจัดเรียงแล้ว พบว่าไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร เป็นการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเพียงสองตัวเท่านั้น ทำให้ประหยัดพื้นที่ในการติดตั้ง ลดความยุ่งยากในการติดตั้ง และลดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาอีกด้วย

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดสามารถลดปริมาณสลัดจ์ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาได้ โดยสามารถรวบรวมตะกอนที่สะสมอยู่ภายในกริทพอดไปกำจัดได้ง่าย ในขณะที่น้ำใสและมีของแข็งแขวนลอยบางส่วนที่ไหลออกที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า น้ำใสและของแข็งแขวนลอยบางส่วนที่ไหลเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปานั้นมีค่าลดลง ทำให้สามารถลดปริมาณการเติมสารเคมีในขั้นตอน Coagulation-Flocculation ในระบบผลิตน้ำประปาให้น้อยลง ส่งผลให้สลัดจ์ที่เกิดจากสารส้มซึ่งเป็นสลัดจ์ที่ทำการกำจัดได้ยากมีปริมาณลดลง อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในระบบผลิตน้ำประปาได้อีกด้วย

จากงานวิจัยนี้ สามารถออกแบบไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเพื่อเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปาได้ โดยสามารถใช้กับการผลิตน้ำประปาในชุมชนขนาดเล็ก เช่น การประปาของชุมชน เป็นต้น โดยสมมติอัตราไหลเข้าของน้ำดิบ 100 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง และเลือกไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดที่มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย

ของไฮโดรไซโคลนมากที่สุด นั่นคือ การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด ซึ่งไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตรสามารถรับอัตราการไหลของน้ำดิบได้สูงสุด 10 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ที่ความดัน 3 บาร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด จำนวน 10 ตัว ต่อขนานกัน และสำหรับไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร สามารถรับอัตราการไหลของน้ำดิบได้สูงสุด 0.55 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ที่ความดัน 3 บาร์ ดังนั้นจึงเลือกใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด จำนวน 19 ตัว ต่อขนานกันจากไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด แต่ละตัว รวมใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด จำนวน 190 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 4.28 (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ง)



รูปที่ 4.28 การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด โดยการต่อแบบขนาน

อย่างไรก็ตามการคำนวณหาจำนวนไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอดเป็นเพียงแนวคิดเท่านั้น หากต้องการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอดจริง จะต้องคำนึงถึงการติดตั้งไฮโดรไซโคลน กริพพอด ระบบท่อในการจ่ายน้ำ และอื่นๆ อีกมากมาย

4.7 ขนาดอนุภาคที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

ในงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการทดลองโดยใช้น้ำดิบจริง ซึ่งขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนจะแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อม ณ เวลาที่ดำเนินการทดลอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในแง่ของขนาดอนุภาค (D_{50}) ที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนที่ทางออกด้านบน (Overflow) และทางออกด้านล่าง (Underflow) กับขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้า (Feed) ซึ่งสามารถแสดงได้จาก %GE (Granulometric separation efficiency) (Puprasert, 2004) ดังที่กล่าวในหัวข้อ 2.5.6 ในส่วนการไหลออกทางด้านบนสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.39 ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ GE} = \frac{D_{50}\text{Feed} - D_{50}\text{Overflow}}{D_{50}\text{Feed}} \times 100 \quad (2.39)$$

และในส่วนการไหลออกทางด้านล่าง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.40 ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{ GE} = \frac{D_{50}\text{Underflow} - D_{50}\text{Feed}}{D_{50}\text{Feed}} \times 100 \quad (2.40)$$

4.7.1 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด แสดงในตารางที่ 4.10 และ 4.11

ตารางที่ 4.10 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) (ไมครอน)									
		จ่ายเข้า		ทางออก ด้านบน		ในกริทพอด					
		D_{50}	SD	D_{50}	SD	D_{50}			SD		
						HC 75	HC 50	HC 10	HC 75	HC 50	HC 10
0.5	30 - 360	10.32	0.43	9.40	0.44	21.14	19.79	19.16	5.84	4.21	6.51
1.0		10.20	0.43	9.42	0.29	26.72	23.34	19.69	5.64	6.88	6.76
2.0		9.02	0.76	8.41	0.52	28.94	35.51	22.11	9.80	18.10	5.93
3.0		11.14	0.31	9.37	0.24	31.48	35.12	22.82	12.07	12.09	5.36

* SD หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ตารางที่ 4.11 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)			
		ทางออก ด้านบน	ในกริทพอด		
			HC 75	HC 50	HC 10
0.5	30	10.03	42.10	40.48	7.09
	60	9.14	74.90	77.01	55.11
	120	3.23	108.22	97.01	82.58
	240	10.68	122.90	112.36	131.76
	360	11.27	168.59	126.97	143.34
1.0	30	7.90	74.89	42.35	27.65
	60	10.12	132.95	63.22	40.65
	120	10.38	169.35	148.61	65.68
	240	5.00	190.95	178.10	134.42
	360	4.66	251.59	224.53	208.80
2.0	30	6.34	125.41	86.82	64.03
	60	9.26	128.60	124.06	91.73
	120	5.77	270.10	282.93	188.13
	240	2.06	242.03	508.71	215.21
	360	9.64	323.90	451.49	167.53
3.0	30	17.52	92.86	60.85	41.62
	60	19.98	103.45	157.10	77.73
	120	17.62	112.68	217.16	97.60
	240	10.92	274.76	310.35	140.16
	360	13.24	336.71	334.64	168.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.7.2 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด แสดงในตารางที่ 4.12 และ 4.13 ตารางที่ 4.12 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) (ไมครอน)							
		จ่ายเข้า		ทางออกด้านบน		ในกริทพอด			
		D_{50}	SD [*]	D_{50}	SD [*]	D_{50}		SD [*]	
						HC 75	HC 50	HC 75	HC 50
0.5	30 - 360	9.48	1.19	8.78	1.18	19.75	20.43	7.50	8.65
1.0		8.89	1.45	8.32	1.37	24.67	34.74	15.47	17.28
2.0		8.50	0.70	8.03	0.63	37.76	41.16	23.26	10.60
3.0		10.29	0.19	9.86	0.16	51.09	63.82	23.03	21.38

* SD หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ตารางที่ 4.13 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)		
		ทางออกด้านบน	ในกริทพอด	
			HC 75	HC 50
0.5	30	4.68	26.32	13.30
	60	7.44	39.70	49.31
	120	8.32	54.00	78.08
	240	8.39	203.29	168.26
	360	8.48	273.87	324.86
1.0	30	6.07	21.38	65.99
	60	6.12	36.13	135.09
	120	6.87	46.61	177.29
	240	7.22	452.39	594.04
	360	6.09	486.23	661.63

ตารางที่ 4.13 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด (ต่อ)

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)		
		ทางออกด้านบน	ในกริทพอด	
			HC 75	HC 50
2.0	30	10.56	33.99	223.79
	60	4.16	88.58	262.66
	120	4.27	401.81	480.76
	240	5.65	478.15	402.42
	360	2.54	766.98	580.73
3.0	30	7.17	59.09	205.40
	60	2.48	346.50	447.00
	120	3.48	378.33	545.84
	240	3.91	557.01	641.82
	360	4.05	650.39	768.87

4.7.3 การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ผลการทดลองหาขนาดอนุภาคที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด แสดงในตารางที่ 4.14 และ 4.15 ตารางที่ 4.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของขนาดอนุภาค (SD) ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) (ไมครอน)							
		จ่ายเข้า		ทางออกด้านบน		ในกริทพอด			
		D_{50}	SD [*]	D_{50}	SD [*]	D_{50}		SD [*]	
						HC 50	HC 10	HC 50	HC 10
0.5	30 - 360	7.46	0.21	7.05	0.13	32.09	20.93	24.21	13.57
1.0		7.30	0.73	7.02	0.74	38.88	22.70	24.82	13.92
2.0		8.50	0.36	7.60	0.27	41.98	25.24	22.16	6.94
3.0		7.58	0.40	6.50	0.44	44.42	27.69	15.01	7.55

* SD หมายถึง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation)

ตารางที่ 4.15 % GE ที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพอด

ความดัน (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริพอด (นาที)	Granulometric separation efficiency (%)		
		ทางออกด้านบน	ในกริพอด	
			HC 50	HC 10
0.5	30	5.81	61.69	36.48
	60	3.61	88.24	77.90
	120	5.66	194.75	99.70
	240	5.51	545.95	206.09
	360	7.04	779.52	478.08
1.0	30	5.02	84.63	26.72
	60	2.98	207.96	36.04
	120	2.85	292.50	143.52
	240	4.57	626.95	393.67
	360	3.59	1062.14	521.63
2.0	30	10.68	145.17	78.79
	60	10.00	194.06	184.92
	120	10.44	307.55	190.22
	240	9.42	598.75	259.13
	360	12.22	699.64	264.38
3.0	30	15.65	248.34	126.97
	60	16.14	324.93	208.58
	120	14.88	524.11	311.03
	240	13.84	689.15	331.67
	360	11.69	643.22	345.90

น้ำดิบที่นำมาใช้ในการทดลองนี้เป็นน้ำดิบจริงจากสถานีสูบน้ำดิบสำแล ดังนั้นขนาดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลนจึงมีขนาดที่แตกต่างกันในแต่ละการทดลอง และจากผลการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพอด ดังแสดงในตารางที่ 4.11 4.13 และ 4.15 จะเห็นได้ว่า ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (D_{50}) ที่แยกออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนมีขนาดใหญ่กว่าขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แยกออกทางด้านบนเสมอ ในขณะที่เดียวกันขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แยกออกทางออกด้านบนก็จะมีขนาดเล็กกว่าขนาดอนุภาคที่ง่ายเข้าอีกด้วย ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีการทำงานของไฮโดรไซโคลน ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

4.7.4 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมกับขนาดอนุภาค

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน พบว่า ขนาดที่จ่ายเข้ามีค่าประมาณ 7.22 ไมครอน จะเห็นได้ว่าอนุภาคของแข็งแขวนลอยนั้นมีขนาดเล็ก จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยมีค่าต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของสโตค (สมการที่ 2.11) กล่าวคือ ขนาดอนุภาค (d_p) และความหนาแน่นของอนุภาค ($\Delta\rho$) เป็นอีกตัวแปรที่ส่งผลต่อความเร็วในการตกตะกอน นั่นคือ เมื่ออนุภาคของแข็งแขวนลอยมีขนาดเล็ก ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไซโคลนมีค่าต่ำ ซึ่งจากสมการของสโตคจะเห็นได้ว่าขนาดอนุภาค (d_p) จะอยู่ในรูปของกำลังสอง (d_p^2) โดยที่ d_p^2 จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในไฮโดรไซโคลนมากกว่าความหนาแน่นของอนุภาค

4.7.5 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อขนาดอนุภาคของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

จากการวิเคราะห์หาขนาดอนุภาคของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด 3 ชุดการทดลอง คือ ชุดแรกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ที่ความดัน 0.5 1 2 และ 3 บาร์ เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 30 - 360 นาที พบว่า

1. เมื่อพิจารณาในแต่ละการการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด พบว่า เมื่อเพิ่มความดันที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลน อนุภาคของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งอาจกล่าวได้ว่า ความดันไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในแง่ของขนาดอนุภาคของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมทุกการการจัดเรียงที่ติดตั้งกริทพอด เนื่องจากขนาดอนุภาคที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนมีขนาดค่อนข้างเล็ก และมีขนาดไม่แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด

2. เมื่อเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด พบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในกริทพอดเพิ่มขึ้น ค่า %GE ในกริทพอดมีมากขึ้นตามไปด้วย และ %GE ที่ทางออกด้านบนมีแนวโน้มไม่ชัดเจน อาจเนื่องมาจาก เมื่อเวลาผ่านไป ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สะสมอยู่ในกริทพอดนั้นมีจำนวนมากขึ้นแต่มีไม่เต็มกริทพอด จึงทำให้ภายในกริทพอดนั้นสามารถรับปริมาณของแข็งแขวนลอยได้อีก ส่งผลให้ %GE มีค่าสูงขึ้น แต่ถึงแม้ว่าปริมาณของแข็งแขวนลอยที่สะสมอยู่ใน

กริทธิพอดนั้นไม่เต็มกริทธิพอด ก็ยังมีอนุภาคขนาดใหญ่บางส่วนไหลย้อนกลับไปที่ทางออกด้านบน
ได้

ดังที่ได้กล่าวในหัวข้อที่ 4.1.2 ที่กล่าวว่า เมื่อนำกริทธิพอดไปติดตั้งที่ทางออกด้านล่าง
ของไฮโดรไซโคลอน ทำให้ของแข็งแขวนลอยที่สะสมในกริทธิพอดมีความเข้มข้นสูงมากขึ้น จึง
เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานมากกว่าการจัดเรียงไฮโดรไซโคลอนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทธิพอด

จากการทดลองในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า ไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ (ขนาดเส้น
ผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร) สามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกได้ และเมื่อเข้าสู่
ไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) จะพบว่า มีขนาดอนุภาคที่
เล็กกว่าในไฮโดรไซโคลอนขนาดใหญ่ ดังนั้น จากผลการทดลองที่ได้สามารถพิสูจน์ได้ว่าในขณะที่
ทำการทดลองนั้นสามารถลดโอกาสการเกิดการอุดตันไปได้มาก



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดและที่ติดตั้งกริทพอด เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลน ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกทำการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด โดยไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 ขนาด คือ 75 50 และ 10 มิลลิเมตร นำมาจัดเรียงกันแบบอนุกรมแบ่งเป็น 3 ชุด คือ ชุดแรก 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 50 และ 10 มิลลิเมตร ส่วนที่สองทำการทดลองด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด โดยติดตั้งกริทพอดที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนทุกขนาด และจัดเรียงชุดการทดลองเช่นเดียวกับในส่วนแรก ซึ่งทั้งสองส่วนนั้นควบคุมความดันเพื่อปรับอัตราไหลเข้า 4 ค่า คือ 0.5 - 3 บาร์ และ สำหรับส่วนการทดลองที่ติดตั้งกริทพอดนั้นจะใช้เวลาที่ใช้ในกริทพอด คือ 30 - 360 นาที

5.1.1 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด

ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดทุกการจัดเรียงมีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยสูงมากกว่า 100% ซึ่งไม่สะท้อนกับความเป็นจริง ทั้งนี้เนื่องจากในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดมีอัตราการไหลที่ทางออกด้านบนต่ำ อัตราการไหลที่ทางออกด้านล่างโดยรวมสูงมาก ส่งผลให้อัตราการแบ่งไหล (R_p) มีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน ทั้งที่โดยปกติแล้วควรมีค่าต่ำ และส่งผลให้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดให้ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดต่ำ เมื่อเทียบกับน้ำเข้า นอกจากนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านล่างสูงกว่าที่ทางออกด้านบนไม่มากนัก จึงสามารถสรุปได้ว่าการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอดที่นำมาใช้บำบัดน้ำดิบในงานวิจัยนี้ไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในงานจริง

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

เมื่อนำกริทพอดมาติดตั้งที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ทำให้อนุภาคของแข็งแขวนลอยที่ถูกแยกออกจากไฮโดรไซโคลนที่ทางออกด้านล่างไหลลงสู่กริทพอด เกิดการตกตะกอนและสะสมตัวอยู่ภายในกริทพอด ทำให้ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยภายในกริทพอดเพิ่มมากขึ้นโดยประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดของการทดลองชุดแรก 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ชุดที่สอง 75 และ 50 มิลลิเมตร และชุดที่สาม 50 และ 10 มิลลิเมตร มีค่าสูงสุด เท่ากับ 27.44 19.15 และ 30.86 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ พบว่า การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยมากที่สุด และมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำชุดการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนนี้มาใช้งานจริง ทั้งในแง่ประสิทธิภาพและขั้นตอนในการติดตั้งที่มีน้อยกว่าจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบสามตัวต่ออนุกรมกัน

5.1.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวที่ติดตั้งกริทพอด

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวที่ติดตั้งกริทพอด พบว่า มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน แต่เนื่องจากน้ำดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความเข้มข้นต่ำและมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงทำให้สังเกตเห็นประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมเมื่อเทียบกับไฮโดรไซโคลนตัวเดียวได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นถ้าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่จ่ายเข้ามีค่าสูงขึ้น น่าจะทำให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมดีขึ้นและดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบตัวเดียว เนื่องจากไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีประสิทธิภาพสูง สามารถทำงานได้มากขึ้น

สำหรับการนำไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดไปใช้งานนั้น เพื่อลดการอุดตันที่อาจเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ได้ ดังนั้นจึงควรใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดใหญ่ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร) และไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) มาต่ออนุกรมกัน เนื่องจากไฮโดรไซโคลนใหญ่ ช่วยแยกเอาตะกอนของแข็งแขวนลอยขนาดใหญ่ออกไปได้หมด ซึ่งสามารถป้องกันการเกิดการอุดตันในไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กได้ ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคสูง

5.1.3 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้ ปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายที่ลดลง เมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

จากการคำนวณปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายที่ลดลงหลังจากการจำลองการติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา โดยปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้น เกิดจากปริมาณของแข็งแขวนลอยซึ่งก็คือปริมาณมวลของแข็งแขวนลอยที่สามารถแยกได้และปริมาณสารส้มที่เติมลงไป จากการทดลอง พบว่า การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร สามารถลดปริมาณสลัดจ์ได้มากที่สุดคือ 5.85 ตัน/วัน และสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ได้มากที่สุด คือ 55,614 บาท/วัน ทำให้สามารถลดปริมาณการเติมสารเคมีในขั้นตอน Coagulation-Flocculation ในระบบผลิตน้ำประปาให้น้อยลงได้ ส่งผลให้สลัดจ์ที่เกิดจากสารส้มซึ่งเป็นสลัดจ์ที่ทำการกำจัดได้ยากมีปริมาณลดลง อีกทั้งยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ที่เกิดขึ้นในระบบผลิตน้ำประปาได้อีกด้วย

5.1.4 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

พารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยคือ ความดันจ่ายเข้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลน และเวลาที่ใช้ในกริทพอด กล่าวคือ

การเพิ่มความดันจ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน ทำให้แรงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนสูงขึ้น ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มมากขึ้น รวมไปถึงความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ถูกแยกออกทางด้านล่าง มวลของแข็งแขวนลอยที่ถูกแยกออกทางด้านล่างสำหรับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด และมวลของแข็งแขวนลอยที่สะสมอยู่ภายในกริทพอดสำหรับการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่เรียงลำดับจากไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ไปสู่ไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก สามารถป้องกันการเกิดการอุดตันที่จะเกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กได้ ส่วนไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด การลดขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน ทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสภายในไฮโดรไซโคลนและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางภายในไฮโดรไซโคลนเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้น้ำดิบจริงจากสถานีสูบน้ำดิบสำแล ซึ่งจากผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลนมีค่อนข้างต่ำ ทำให้ถึงแม้ว่าเมื่อใช้เวลาในกริพอดเพิ่มขึ้น ความเข้มข้นที่สะสมอยู่ในกริพอดก็ยังมีไม่เต็มกริพอด ดังนั้นเวลาที่ใช้ในกริพอดจึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยภายในไฮโดรไซโคลนเพียงเล็กน้อย

5.2 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

1. จากการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยในงานวิจัยนี้มีค่อนข้างต่ำ ดังนั้น ควรเพิ่มความดันที่จ่ายเข้าไฮโดรไซโคลน เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยมากขึ้น
2. จากการทดลองในงานวิจัยนี้ ผู้ทำการวิจัยมีความเห็นว่าควรจะไปทดลองใช้น้ำที่มีความเข้มข้นมากกว่านี้ เพื่อให้กริพอดเต็ม จะทำให้เห็นผลที่เกิดขึ้นจากการที่กริพอดเต็มได้ชัดเจนขึ้น
2. ในการต่อแบบอนุกรมของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมนี้ อัตราการไหลของน้ำดิบที่ออกจากไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ที่ทางออกด้านบนมีปริมาณน้อย จึงควรศึกษาการเพิ่มจำนวนไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร โดยต่อแบบขนานเพื่อให้มีอัตราการไหลของน้ำที่ทางออกด้านบนเพิ่มมากขึ้น
3. ในการเติมสารส้มลงในกระบวนการผลิตน้ำประปาต้องพิจารณาหลายพารามิเตอร์ คือ ค่าความขุ่น (turbidity) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภาวะความเป็นด่าง (alkalinity) ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity) มาใช้เป็นข้อมูลในการเติมสารส้ม ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองหาปริมาณความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่มีอยู่ในน้ำดิบ ความขุ่น และขนาดอนุภาค ซึ่งเป็นแนวทางขั้นต้นในการเติมสารส้มลงไปในการบวนการผลิตน้ำประปา ดังนั้นผู้ทำวิจัยเห็นว่า หากจะให้ผลการทดลองที่ชัดเจนกว่านี้ ควรทำการทดลองหาพารามิเตอร์อื่นๆ ที่มีผลต่อการเติมสารส้มในระบบด้วย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การประปานครหลวง. การประปานครหลวง [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.mwa.co.th> [20 ธันวาคม 2551]

การประปานครหลวง. กรรมวิธีการผลิตน้ำประปา [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.mwa.co.th/w3c/treat_water.html [20 ธันวาคม 2551]

การประปานครหลวง. ระบบผลิตและสูบน้ำประปา [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.mwa.co.th/produce.html> [20 ธันวาคม 2551]

การประปานครหลวง. สถานีสูบน้ำดิบสำแล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.mwa.co.th/w3c/sam_lae.html [20 ธันวาคม 2551]

การประปาส่วนภูมิภาค. ขั้นตอนการผลิตน้ำประปา [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

<http://www.pwa.co.th/service/treatment.html> [20 ธันวาคม 2551]

การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. วิธีคิดค่าไฟฟ้าอัตรา TOU และ TOD [ออนไลน์]. แหล่งที่มา:

http://www.pea.co.th/th/rates/rates_tou_tod_ft.htm [11 กันยายน 2553]

วรศิริ เสียงสนั่น .2549. กระบวนการไฮบริด: ไฮโดรไซโคลน โคแอกกูเลชัน ฟล็อกกูเลชันและการลอยตะกอนในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สนธิลักษณ์ สุขะสุนนท์. 2552. การประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริตพอก เพื่อใช้ในการกำจัดกรวดทรายในโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนดินแดง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อ้อทิพย์ จีระพรชัย. 2551. การศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ไฮโดรไซโคลนและไฮโดรไซโคลนที่ประกอบด้วยกริตพอตเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในระบบผลิตน้ำประปา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

APHA, A., and WEF. 1998. Standard Method for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition. Washington D.C: American Public Health Association.

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

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

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

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

Pasquier, S. and Cilliers, J. J. 2002. Sub-micron particle dewatering using hydrocyclone. Chemical Engineering Journal. .288-283 :80

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

Rushton A., W. A. S. and Holdich R.G. 2000. Solid-Liquid Filtration and Separation Technology. Second Edition. Cheshire: Federal Republic of Germany.

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

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

Svarovsky, L. 2984 .Hydrocyclone. Pennsylvania: Rinehart and Winston Ltd,1984 .

Svarovsky L. and Flichem E. 2000. Solid-Liquid Separation. Fourth Edition. Woburn: A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd.

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



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ผลการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย

ตารางที่ ก. 1.1 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
				HC 75	HC 50	HC 10
12 10 1	0.5	38.33	38.06	44.48	40.85	41.44
	1.0	38.33	37.43	45.70	42.33	44.88
	2.0	38.33	35.64	46.80	43.87	45.60
	3.0	38.33	36.85	47.77	44.12	51.75
10 9 1	0.5	40.80	40.93	47.61	43.32	47.08
	1.0	40.80	39.38	50.32	43.31	51.48
	2.0	40.80	38.70	51.10	44.27	51.71
	3.0	40.80	38.19	52.76	45.16	53.14
8 6 1	0.5	44.67	43.07	52.71	51.96	60.00
	1.0	44.67	43.67	60.40	59.33	74.00
	2.0	44.67	42.09	63.67	62.94	75.33
	3.0	44.67	41.33	67.99	65.93	79.02

ตารางที่ ก. 1.2 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
				HC 75	HC 50
12 10	0.5	45.67	47.76	50.27	48.91
	1.0	45.67	47.96	51.44	49.15
	2.0	45.67	45.89	52.21	50.00
	3.0	45.67	45.15	53.87	52.52
10 9	0.5	43.69	46.20	49.21	46.79
	1.0	43.69	43.92	49.33	47.39
	2.0	43.69	44.22	50.06	49.09
	3.0	43.69	43.00	52.08	50.37
8 6	0.5	37.56	40.61	42.48	40.12
	1.0	37.56	38.15	44.33	42.30
	2.0	37.56	37.00	45.48	43.67
	3.0	37.56	36.44	50.27	53.50

ตารางที่ ก. 1.3 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
				HC 50	HC 10
10 1	0.5	41.22	40.67	51.86	51.78
	1.0	41.22	40.11	52.08	53.11
	2.0	41.22	39.79	53.18	54.56
	3.0	41.22	38.89	54.56	55.76
9 1	0.5	47.22	43.56	58.86	58.97
	1.0	47.22	43.24	59.08	60.02
	2.0	47.22	42.58	61.18	63.44
	3.0	47.22	40.22	62.56	63.76
6 1	0.5	59.33	56.03	73.78	77.63
	1.0	59.33	54.70	75.26	78.52
	2.0	59.33	53.81	77.41	81.67
	3.0	59.33	52.00	80.85	84.85

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1.4 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)		
				HC 75	HC 50	HC 10
0.5	30	22.67	18.22	85.00	97.00	40.00
	60	22.89	18.67	108.00	251.00	87.00
	120	25.83	22.44	185.00	550.67	120.44
	240	26.06	22.00	1564.67	1048.67	759.33
	360	26.28	22.89	2876.00	1502.67	1125.33
1.0	30	23.78	18.22	233.00	225.00	272.00
	60	23.78	18.44	511.00	565.00	704.00
	120	23.11	18.22	736.00	734.67	901.33
	240	22.89	18.44	1223.33	1447.33	1570.00
	360	22.67	18.67	1548.00	1718.67	1806.67
2.0	30	40.06	29.78	263.50	393.00	299.60
	60	40.39	31.11	456.00	541.50	558.80
	120	40.06	31.94	697.67	845.33	1026.33
	240	39.56	33.61	2308.00	3869.33	4304.67
	360	41.22	34.89	4861.33	5536.00	6818.67
3.0	30	38.89	28.22	218.00	658.00	366.00
	60	36.00	26.67	906.00	1394.00	1118.00
	120	39.33	30.22	1337.33	2492.00	2780.00
	240	39.78	30.67	3800.00	5394.67	6974.67
	360	38.67	30.44	4858.67	6180.00	8330.67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1.5 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)	
				HC 75	HC 50
0.5	30	22.00	22.00	140.00	91.00
	60	22.67	21.78	549.00	522.00
	120	22.22	22.22	948.00	670.67
	240	54.93	54.67	2461.33	2974.67
	360	52.27	52.53	4661.33	4313.33
1.0	30	20.00	17.78	348.00	354.00
	60	21.11	18.67	796.00	598.00
	120	20.67	17.56	1250.67	838.67
	240	22.47	19.22	2596.00	2998.67
	360	23.67	18.89	2820.00	3654.67
2.0	30	42.39	36.17	967.33	1044.67
	60	42.83	36.17	1927.33	2112.67
	120	42.61	36.72	4541.33	5441.33
	240	34.94	31.11	8301.33	9948.00
	360	43.33	38.56	8130.67	11270.67
3.0	30	32.89	27.11	925.33	1036.00
	60	32.22	27.56	2118.67	1585.33
	120	32.00	27.11	4106.67	4586.67
	240	31.33	25.33	6369.33	7493.33
	360	28.44	25.78	8198.67	9384.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1.6 ผลการทดลองหาความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)	
				HC 50	HC 10
0.5	30	30.22	27.24	80.53	154.80
	60	27.61	25.02	89.20	198.18
	120	33.67	30.53	97.24	279.47
	240	34.00	31.67	1018.22	2072.00
	360	35.00	32.33	2002.22	4804.67
1.0	30	29.11	23.24	92.53	163.02
	60	32.67	26.71	128.00	241.07
	120	40.17	32.33	716.44	1076.89
	240	44.33	37.67	2165.33	3106.22
	360	43.33	37.17	5220.00	6917.33
2.0	30	35.60	25.60	101.33	134.83
	60	34.93	25.37	306.00	266.67
	120	35.73	26.60	1358.00	739.33
	240	35.47	26.63	2901.00	1453.67
	360	40.17	31.33	5019.33	3284.00
3.0	30	23.73	16.40	155.50	206.83
	60	23.87	16.67	590.17	555.67
	120	23.60	16.53	1073.17	665.94
	240	23.47	16.67	3528.00	2590.33
	360	27.73	20.22	5520.00	3890.67

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 2 ผลการทดลองหาความชุ่ม

ตารางที่ ก. 2.1 ผลการทดลองหาความชุ่มที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริฟฟอต

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความชุ่มของของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)				
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
				HC 75	HC 50	HC 10
12 10 1	0.5	56.3	55.0	58.5	56.2	58.0
	1.0	56.3	55.0	59.7	57.5	58.5
	2.0	56.3	54.5	60.0	58.0	59.5
	3.0	56.3	54.0	61.0	59.2	63.7
10 9 1	0.5	54.0	54.0	52.0	50.7	55.0
	1.0	54.0	53.5	52.7	51.5	55.5
	2.0	54.0	53.2	54.3	52.7	56.3
	3.0	54.0	53.0	57.0	54.7	58.7
8 6 1	0.5	59.0	58.5	62.0	61.0	66.5
	1.0	59.0	58.5	66.0	65.0	73.0
	2.0	59.0	57.5	67.0	66.7	73.5
	3.0	59.0	57.0	70.5	68.0	75.0

ตารางที่ ก. 2.2 ผลการทดลองหาความชุ่มที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรโซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริฟฟอต

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความชุ่มของของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)			
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
				HC 75	HC 50
12 10	0.5	68.5	69.5	70.2	70.2
	1.0	68.5	69.7	70.5	71.0
	2.0	68.5	68.0	71.5	72.2
	3.0	68.5	68.0	73.0	74.0
10 9	0.5	68.0	69.7	71.0	68.0
	1.0	68.0	68.0	71.0	68.5
	2.0	68.0	68.7	71.5	69.7
	3.0	68.0	68.0	72.7	70.5
8 6	0.5	56.3	57.0	58.5	57.0
	1.0	56.3	56.5	59.3	57.2
	2.0	56.3	56.2	59.3	58.0
	3.0	56.3	55.5	61.0	60.2

ตารางที่ ก. 2.3 ผลการทดลองหาความชุ่มที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	ความชุ่มของของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)			
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน	ทางออกด้านล่าง	
				HC 50	HC 10
10 1	0.5	55.8	55.2	60.0	60.0
	1.0	55.8	55.0	60.5	61.8
	2.0	55.8	54.2	61.2	62.5
	3.0	55.8	53.5	62.0	64.2
9 1	0.5	58.0	56.5	57.2	57.0
	1.0	58.0	56.2	57.0	58.0
	2.0	58.0	56.5	58.2	59.3
	3.0	58.0	55.0	58.8	60.0
6 1	0.5	81.5	79.3	88.2	90.0
	1.0	81.5	78.2	89.8	91.3
	2.0	81.5	77.7	90.5	93.2
	3.0	81.5	77.2	92.7	94.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 2.4 ผลการทดลองหาความชุ่มชื้นที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรีทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกรีทพอด (นาที)	ความชุ่มชื้นของของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)				
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกรีทพอด)		
				HC 75	HC 50	HC 10
0.5	30	25.0	23.5	27.5	28.0	27.5
	60	25.0	23.7	28.7	31.5	30.3
	120	26.0	23.5	30.0	35.7	34.0
	240	26.0	25.0	35.3	43.7	41.0
	360	26.0	25.5	40.0	49.3	46.5
1.0	30	25.5	24.5	29.5	30.0	35.0
	60	25.5	24.7	30.0	35.0	39.0
	120	25.0	25.0	31.0	36.3	42.3
	240	24.5	24.2	37.0	40.7	47.2
	360	24.5	23.7	42.0	44.7	49.7
2.0	30	44.3	43.2	46.3	54.7	57.5
	60	44.3	43.3	53.7	57.7	67.7
	120	44.3	43.0	56.7	69.0	75.7
	240	41.7	39.8	52.0	66.0	78.0
	360	45.0	44.0	64.3	84.7	210.0
3.0	30	40.0	38.7	44.0	51.0	57.0
	60	39.7	37.3	51.7	60.7	75.3
	120	42.5	41.0	56.0	70.5	93.5
	240	42.8	41.5	59.0	82.3	200.0
	360	42.8	41.7	63.0	86.0	230.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 2.5 ผลการทดลองหาความชุ่มที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	ความชุ่มของของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)			
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)	
				HC 75	HC 50
0.5	30	25.0	25.0	27.5	29.7
	60	25.5	24.8	30.0	35.7
	120	25.0	25.0	32.0	37.8
	240	26.0	25.5	40.0	42.5
	360	26.0	26.5	50.0	48.2
1.0	30	24.0	22.5	25.0	28.7
	60	24.5	22.7	27.2	32.7
	120	24.0	22.5	29.5	35.7
	240	25.0	23.0	45.5	51.5
	360	25.0	22.7	47.0	52.0
2.0	30	41.0	38.0	45.8	54.0
	60	41.5	38.0	46.7	55.0
	120	41.5	38.5	58.7	75.0
	240	40.0	38.2	64.3	90.3
	360	42.3	39.0	66.7	80.3
3.0	30	38.0	36.0	46.0	53.3
	60	36.7	35.0	53.0	62.7
	120	37.0	36.0	59.0	69.7
	240	37.0	36.5	63.7	86.0
	360	36.0	35.3	72.7	90.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 2.6 ผลการทดลองหาความชุ่มที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	ความชุ่มของของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)			
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)	
				HC 50	HC 10
0.5	30	35.0	34.0	42.7	49.0
	60	33.0	32.3	47.0	52.0
	120	36.3	35.3	50.0	58.0
	240	37.0	36.0	72.2	87.3
	360	39.0	37.3	87.8	98.7
1.0	30	34.0	32.7	52.0	55.7
	60	36.0	34.3	55.0	58.0
	120	56.3	54.0	61.7	69.7
	240	58.0	56.3	75.5	77.7
	360	58.0	56.5	80.3	81.3
2.0	30	37.7	33.5	38.3	47.0
	60	37.5	33.3	41.0	55.0
	120	37.7	34.0	52.0	69.3
	240	37.7	34.0	64.0	92.3
	360	39.0	36.3	78.7	120.0
3.0	30	34.7	29.3	30.7	43.0
	60	35.0	29.3	40.7	51.7
	120	34.7	29.0	48.7	74.7
	240	34.3	29.3	63.3	166.7
	360	36.5	32.0	76.0	200.0

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 3 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาค

ตารางที่ ก. 3.1 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาค (D_{50}) ที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกรีทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกรีทพอด (นาที)	ขนาดอนุภาคของของแข็งแขวนลอย (ไมครอน)				
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกรีทพอด)		
				HC 75	HC 50	HC 10
0.5	30	9.96	8.96	14.15	13.99	10.66
	60	9.87	8.97	17.27	17.48	15.32
	120	10.31	9.98	21.47	20.31	18.83
	240	10.55	9.42	23.51	22.40	24.45
	360	10.91	9.68	29.31	24.77	26.55
1.0	30	10.58	9.75	18.51	15.07	13.51
	60	10.67	9.59	24.86	17.42	15.01
	120	10.13	9.08	27.28	25.18	16.78
	240	10.01	9.51	29.13	27.84	23.47
	360	9.62	9.17	33.82	31.21	29.70
2.0	30	8.77	8.22	19.78	16.39	14.39
	60	8.97	8.14	20.51	20.10	17.20
	120	8.64	8.14	31.96	33.07	24.88
	240	8.39	8.21	28.68	51.04	26.43
	360	10.33	9.33	43.78	56.95	27.63
3.0	30	10.97	9.05	21.16	17.65	15.54
	60	11.51	9.21	23.41	29.58	20.45
	120	11.42	9.41	24.28	36.21	22.56
	240	10.76	9.58	40.32	44.15	25.84
	360	11.05	9.59	48.25	48.02	29.69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 3.2 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาค (D_{50}) ที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ขนาดอนุภาคของของแข็งแขวนลอย (ไมครอน)			
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)	
				HC 75	HC 50
0.5	30	10.21	9.73	12.89	11.56
	60	10.42	9.64	14.55	15.55
	120	10.40	9.53	16.01	18.52
	240	8.30	7.61	25.19	22.28
	360	8.05	7.37	30.11	34.21
1.0	30	9.98	9.37	12.11	16.56
	60	10.01	9.40	13.63	23.54
	120	9.84	9.17	14.43	27.29
	240	7.42	6.89	40.99	51.51
	360	7.20	6.76	42.18	54.80
2.0	30	8.52	7.62	11.42	27.60
	60	8.81	8.45	16.62	31.96
	120	8.29	7.94	41.62	48.17
	240	9.38	8.85	54.25	47.14
	360	7.48	7.29	64.89	50.95
3.0	30	10.51	9.76	16.72	32.10
	60	10.14	9.89	45.26	55.44
	120	10.32	9.96	49.36	66.65
	240	10.45	10.04	68.64	77.51
	360	10.06	9.65	75.49	87.41

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 3.3 ผลการทดลองหาขนาดอนุภาค (D_{50}) ที่ได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ขนาดอนุภาคของของแข็งแขวนลอย (ไมครอน)			
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง (สะสมในกริทพอด)	
				HC 50	HC 10
0.5	30	7.57	7.13	12.24	10.33
	60	7.14	6.88	13.44	12.70
	120	7.65	7.21	22.53	15.27
	240	7.37	6.97	47.63	22.57
	360	7.57	7.04	66.61	43.78
1.0	30	7.44	7.06	13.73	9.42
	60	7.59	7.36	23.36	10.32
	120	8.29	8.06	32.55	20.19
	240	6.52	6.23	47.43	32.21
	360	6.65	6.42	77.33	41.36
2.0	30	8.13	7.26	19.93	14.53
	60	8.28	7.46	24.36	23.60
	120	8.83	7.91	36.00	25.64
	240	8.31	7.53	58.06	29.84
	360	8.95	7.85	71.53	32.59
3.0	30	7.46	6.29	25.97	16.92
	60	7.68	6.52	32.65	23.71
	120	7.38	6.28	46.05	30.33
	240	7.15	6.16	56.45	30.88
	360	8.21	7.25	61.00	36.60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 4 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

ตารางที่ ก. 4.1 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจำเข้า (บาร์)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลนตัวต่อไป (บาร์)	
		ก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 50 มม.	ก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 10 มม.
12 10 1	0.5	0.30	0.00
	1.0	0.65	0.02
	2.0	1.30	0.50
	3.0	2.00	0.80
10 9 1	0.5	0.35	0.00
	1.0	0.70	0.30
	2.0	1.50	0.90
	3.0	2.30	1.40
8 6 1	0.5	0.40	0.10
	1.0	0.80	0.50
	2.0	1.60	1.00
	3.0	2.50	1.60

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 4.2 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจำเข้า (บาร์)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 50 มม. (บาร์)
12 10	0.5	0.30
	1.0	0.70
	2.0	1.40
	3.0	2.10
10 9	0.5	0.35
	1.0	0.75
	2.0	1.50
	3.0	2.30
8 6	0.5	0.35
	1.0	0.80
	2.0	1.60
	3.0	2.55

ตารางที่ ก. 4.3 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง (มม.)	ความดันจำเข้า (บาร์)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 10 มม. (บาร์)
10 1	0.5	0.00
	1.0	0.30
	2.0	0.80
	3.0	1.30
9 1	0.5	0.20
	1.0	0.60
	2.0	1.30
	3.0	1.80
6 1	0.5	0.20
	1.0	0.60
	2.0	1.40
	3.0	2.00

ตารางที่ ก. 4.4 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจำเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ใน กริทพอด (นาที)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลนตัวต่อไป (บาร์)	
		ก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 50 มม.	ก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 10 มม.
0.5	30 - 360	0.50	0.40
1.0	30 - 360	1.00	0.90
2.0	30 - 360	2.00	1.90
3.0	30 - 360	3.00	2.90

ตารางที่ ก. 4.5 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจำเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 50 มม. (บาร์)
0.5	30 - 360	0.50
1.0	30 - 360	1.00
2.0	30 - 360	2.00
3.0	30 - 360	3.00

ตารางที่ ก. 4.6 ผลการทดลองความดันลดของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจำเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	ความดันก่อนเข้าไฮโดรไซโคลน 10 มม. (บาร์)
0.5	30 - 360	0.40
1.0	30 - 360	0.90
2.0	30 - 360	1.90
3.0	30 - 360	2.90



ภาคผนวก ข

การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของ
การจัดเรียงไฮโดรไลโคลนแบบอนุกรม

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย ของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

1. อัตราการไหล

อัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลน (Feed flowrate), Q_f : วัดและประมวลผลโดยเครื่องวัด
อัตราการไหล (Flow meter)

อัตราการไหลออกทางด้านล่าง (Underflow flowrate), Q_u : หาอัตราการไหลโดยวิธีวัด
ปริมาตรเทียบกับเวลา (Time volume method)

อัตราการไหลออกทางด้านบน (Overflow flowrate), Q_o : หาอัตราการไหลโดยวิธีวัด
ปริมาตรเทียบกับเวลา (Time volume method)

2. ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ ติดตั้งกริทพอด

$$E_T = \frac{Q_{u(total)}(C_{u(avg)} - C_f)}{Q_o C_f} \times 100 \quad (1)$$

3. ประสิทธิภาพการแยกของแข็งแขวนลอยของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้ง กริทพอด

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

ตัวอย่างการคำนวณประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอย ของไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

1. การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร มี
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านล่าง 12 10 และ 1 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ไม่ได้ติดตั้ง
กริทพอด ความดัน 3 บาร์

จากสมการที่ (1) ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดร
ไซโคลนแบบอนุกรมที่ไม่ได้ติดตั้งกริทพอด

$$E_T = \frac{Q_{u(total)}(C_{u(avg)} - C_f)}{Q_o C_f} \times 100$$

$Q_{u(\text{total})}$ = อัตราไหลที่ทางออกด้านล่างรวม

: ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 มิลลิเมตร มีอัตราไหล $3.34 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}}$

: ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร มีอัตราไหล $2.42 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}}$

: ไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร มีอัตราไหล $0.14 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}}$

$$\text{ดังนั้น } Q_{u(\text{total})} = 5.90 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}}$$

$$C_{u(\text{avg})} = \frac{(C_{u(\text{HC75})} Q_{u(\text{HC75})}) + (C_{u(\text{HC50})} Q_{u(\text{HC50})}) + (C_{u(\text{HC10})} Q_{u(\text{HC10})})}{Q_{u(\text{total})}}$$

$$= \frac{(47.77 \times 3.34) + (44.12 \times 2.42) + (51.75 \times 0.14)}{5.90}$$

$$= 46.37 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}}$$

$$Q_o = 0.19 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}}$$

$$C_f = 38.33 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}}$$

$$E_T = \frac{5.90(46.37 - 38.33)}{0.19 \times 38.33} \times 100$$

$$= 651.13 \text{เปอร์เซ็นต์}$$

2. การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพพอด ความดัน 3 บาร์ ใช้เวลาในการดำเนินการในกริพพอด 30 นาที

จากสมการที่ (2) ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริพพอด

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

$$= \frac{(0.52 \times 38.89 \times 30) - (0.52 \times 28.22 \times 22.30)}{(0.52 \times 38.89 \times 30)} \times 100$$

$$= 27.44 \text{เปอร์เซ็นต์}$$

ตารางที่ ข. 1 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

ตารางที่ ข. 1.1 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร
ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)					ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)					ประสิทธิภาพในการ แยกของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง			จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง			
				HC 75	HC 50	HC 10			HC 75	HC 50	HC 10	
12 10 1	0.5	3.37	0.11	2.17	1.05	0.02	38.33	38.06	44.48	40.85	41.44	380.75 *
	1.0	4.48	0.15	2.51	1.69	0.06	38.33	37.43	45.70	42.33	44.88	446.16 *
	2.0	5.64	0.17	3.09	2.00	0.09	38.33	35.64	46.80	43.87	45.60	581.74 *
	3.0	6.09	0.19	3.34	2.42	0.14	38.33	36.85	47.77	44.12	51.75	651.13 *
10 9 1	0.5	2.61	0.15	1.60	0.83	0.03	40.80	40.93	47.61	43.32	47.08	215.29 *
	1.0	3.37	0.16	1.90	1.21	0.10	40.80	39.38	50.32	43.31	51.48	339.97 *
	2.0	4.21	0.18	2.33	1.50	0.18	40.80	38.70	51.10	44.27	51.71	424.40 *
	3.0	5.32	0.20	2.97	1.89	0.20	40.80	38.19	52.76	45.16	53.14	566.54 *
8 6 1	0.5	2.34	0.15	1.57	0.57	0.05	44.67	43.07	52.71	51.96	60.07	261.89 *
	1.0	3.20	0.17	1.91	0.97	0.13	44.67	43.67	60.44	59.33	74.00	634.11 *
	2.0	4.10	0.20	2.45	1.20	0.24	44.67	42.09	63.67	62.94	75.33	848.81 *
	3.0	4.89	0.24	2.75	1.57	0.32	44.67	41.33	67.64	65.93	79.02	1003.08 *

* ค่าที่ได้ไม่สะท้อนกับความเป็นจริง เนื่องจากมีค่า R_s สูงมาก จึงไม่นำค่าที่ได้นี้มาใช้งานจริง

ตารางที่ ข. 1.2 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)				ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพในการ แยกของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
				HC 75	HC 50			HC 75	HC 50	
12 10	0.5	3.20	0.16	2.05	1.00	45.67	47.76	50.27	48.91	173.39 *
	1.0	4.03	0.19	2.35	1.47	45.67	47.96	51.44	49.15	215.22 *
	2.0	5.24	0.21	2.88	2.09	45.67	45.89	52.21	50.00	290.75 *
	3.0	5.90	0.24	3.19	2.45	45.67	45.15	53.87	52.52	391.76 *
10 9	0.5	2.51	0.21	1.52	0.77	43.69	46.20	49.21	46.79	117.47 *
	1.0	3.38	0.27	1.92	1.17	43.69	43.92	49.33	47.39	128.50 *
	2.0	4.39	0.36	2.41	1.62	43.69	44.22	50.06	49.09	153.22 *
	3.0	5.65	0.43	3.30	1.91	43.69	43.00	52.08	50.37	215.29 *
8 6	0.5	2.52	0.22	1.65	0.62	37.56	40.61	42.48	40.12	117.45 *
	1.0	3.09	0.28	1.83	0.96	37.56	38.15	44.33	42.30	161.07 *
	2.0	3.97	0.40	2.21	1.36	37.56	37.00	45.48	43.67	171.81 *
	3.0	5.01	0.53	2.73	1.72	37.56	36.44	50.27	53.50	312.03 *

* ค่าที่ได้ไม่สะท้อนกับความเป็นจริง เนื่องจากมีค่า R_s สูงมาก จึงไม่นำค่าที่ได้นี้มาใช้งานจริง

ตารางที่ ข. 1.3 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ไม่ได้ติดตั้งกริพอด

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางทางออก ด้านล่าง (มม.)	ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)				ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)				ประสิทธิภาพในการ แยกของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง		จ่ายเข้า	ทางออก ด้านบน	ทางออกด้านล่าง		
				HC 50	HC 10			HC 50	HC 10	
10 1	0.5	1.68	0.15	1.52	0.08	41.22	40.67	51.86	51.78	275.23 *
	1.0	2.27	0.16	2.00	0.16	41.22	40.11	52.08	53.11	358.18 *
	2.0	2.89	0.18	2.54	0.17	41.22	39.79	53.18	54.56	440.00 *
	3.0	3.52	0.19	3.08	0.24	41.22	38.89	54.56	55.76	569.18 *
9 1	0.5	1.23	0.16	1.00	0.07	47.22	43.56	58.86	58.97	164.95 *
	1.0	2.05	0.17	1.71	0.16	47.22	43.24	59.08	60.02	278.15 *
	2.0	2.86	0.19	2.41	0.24	47.22	42.58	61.18	63.44	418.38 *
	3.0	3.57	0.22	3.00	0.32	47.22	40.22	62.56	63.76	493.94 *
6 1	0.5	1.14	0.16	0.91	0.07	59.33	56.03	73.78	77.63	152.02 *
	1.0	1.33	0.17	1.00	0.15	59.33	54.70	75.26	78.52	186.48 *
	2.0	1.89	0.20	1.43	0.25	59.33	53.81	77.41	81.67	264.95 *
	3.0	2.47	0.22	1.95	0.32	59.33	52.00	80.85	84.85	384.06 *

* ค่าที่ได้ไม่สะท้อนกับความเป็นจริง เนื่องจากมีค่า R_s สูงมาก จึงไม่นำค่าที่ได้นี้มาใช้งานจริง

ตารางที่ ข. 1.4 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริพอด (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการแยก ของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	
0.5	30	0.22	0.22	22.67	18.22	19.63
	60	0.22	0.22	22.89	18.67	18.44
	120	0.22	0.22	25.83	22.44	13.12
	240	0.22	0.22	26.06	22.00	15.58
	360	0.22	0.22	26.28	22.89	12.90
1.0	30	0.30	0.30	23.78	18.22	23.38
	60	0.30	0.30	23.78	18.44	22.46
	120	0.30	0.30	23.11	18.22	21.16
	240	0.30	0.30	22.89	18.44	19.44
	360	0.30	0.30	22.67	18.67	17.64

ตารางที่ ข. 1.4 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด (ต่อ)

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการแยก ของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	
2.0	30	0.42	0.42	40.06	29.78	25.66
	60	0.42	0.42	40.39	31.11	22.98
	120	0.42	0.42	40.06	31.94	20.27
	240	0.42	0.42	39.56	33.61	15.04
	360	0.42	0.42	41.22	34.89	15.36
3.0	30	0.52	0.52	38.89	28.22	27.44
	60	0.52	0.52	36.00	26.67	25.92
	120	0.52	0.52	39.33	30.22	23.16
	240	0.52	0.52	39.78	30.67	22.90
	360	0.52	0.52	38.67	30.44	21.80

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 1.5 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการแยก ของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 50	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 50	
0.5	30	0.28	0.28	22.00	22.00	1.00
	60	0.28	0.28	22.67	21.78	3.93
	120	0.28	0.28	22.22	22.22	0.00
	240	0.28	0.28	54.93	54.67	0.57
	360	0.28	0.28	52.27	52.53	0.00
1.0	30	0.38	0.38	20.00	17.78	11.10
	60	0.38	0.38	21.11	18.67	11.56
	120	0.38	0.38	20.67	17.56	15.05
	240	0.38	0.38	22.47	19.22	14.46
	360	0.38	0.38	23.67	18.89	15.78

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 1.5 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด (ต่อ)

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็ง แขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการแยก ของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 50	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 50	
2.0	30	0.55	0.55	42.39	36.17	14.67
	60	0.55	0.55	42.83	36.17	15.55
	120	0.55	0.55	42.61	36.72	13.82
	240	0.55	0.55	34.94	31.11	11.29
	360	0.55	0.55	43.33	38.56	11.01
3.0	30	0.72	0.72	32.89	27.11	17.57
	60	0.72	0.72	32.22	27.56	19.15
	120	0.72	0.72	32.00	27.11	15.28
	240	0.72	0.72	31.33	25.33	14.46
	360	0.72	0.72	28.44	25.78	9.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 1.6 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็ง แขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการแยก ของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	
0.5	30	0.23	0.23	30.22	27.24	9.86
	60	0.23	0.23	27.61	25.02	9.38
	120	0.23	0.23	33.67	30.53	9.33
	240	0.23	0.23	34.00	31.67	6.85
	360	0.23	0.23	35.00	32.33	7.63
1.0	30	0.30	0.30	29.11	23.24	20.16
	60	0.30	0.30	32.67	26.71	18.24
	120	0.30	0.30	40.17	32.33	19.52
	240	0.30	0.30	44.33	37.67	15.02
	360	0.30	0.30	43.33	37.17	16.15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข. 1.6 ประสิทธิภาพในการแยกของแข็งแขวนลอยของการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด (ต่อ)

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ในกริทพอด (นาที)	อัตราการไหล (ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง)		ความเข้มข้นของของแข็ง แขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ประสิทธิภาพในการแยก ของแข็งแขวนลอย (%)
		จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	จ่ายเข้า	ทางออกด้านบน ของ HC 10	
2.0	30	0.42	0.42	35.60	25.60	28.09
	60	0.42	0.42	34.93	25.37	27.37
	120	0.42	0.42	35.73	26.60	25.55
	240	0.42	0.42	35.47	26.63	24.92
	360	0.42	0.42	40.17	31.33	22.01
3.0	30	0.55	0.55	23.73	16.40	30.89
	60	0.55	0.55	23.87	16.67	30.16
	120	0.55	0.55	23.60	16.53	29.96
	240	0.55	0.55	23.47	16.67	28.97
	360	0.55	0.55	27.73	20.22	27.08

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

การคำนวณมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้
จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณมวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม

ดุลมวล (Mass balance) ของมวลที่แยกได้จากไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด

$$\begin{aligned} \text{มวลที่เข้าไฮโดรไซโคลน} &= \text{มวลที่ออกทางด้านบน} + \text{มวลที่สะสมอยู่ในกริทพอด} \\ Q_f C_f T &= Q_o C_o T + (V_{GP1} C_{GP1} + V_{GP2} C_{GP2} + V_{GP3} C_{GP3}) \end{aligned} \quad (3)$$

$$(V_{GP1} C_{GP1} + V_{GP2} C_{GP2} + V_{GP3} C_{GP3}) = Q_f C_f T - Q_o C_o T \quad (4)$$

ตัวอย่างการคำนวณมวลที่แยกได้ในไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ความดัน 3 บาร์ เวลาที่ใช้ดำเนินการในกริทพอด 30 นาที

1.1 ดุลมวล (Mass balance)

1.1.1 มวลเข้า (Feed mass)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (3) มวลเข้า (Feed mass)} &= Q_f C_f T \\ &= 0.52 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 38.89 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 30 \text{ นาที} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ล.}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}} \\ &\text{เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที มีมวลจ่ายเข้า 10.111 กรัม} \\ &\text{ดังนั้น ใน 1 นาที มีมวลจ่ายเข้า} \\ &= \frac{10.111 \text{ กรัม}}{30 \text{ นาที}} \\ &= 0.337 \text{ กรัม/นาที} \end{aligned}$$

1.1.2 มวลทางออกด้านบน (Overflow mass)

$$\begin{aligned} \text{จากสมการที่ (3) มวลทางออกด้านบน (Overflow mass)} &= Q_o C_o T \\ &= 0.52 \frac{\text{ลบ.ม.}}{\text{ชม.}} \times 28.22 \frac{\text{มก.}}{\text{ล.}} \times 30 \text{ นาที} \times \frac{1 \text{ ชม.}}{60 \text{ นาที}} \times \frac{1000 \text{ ล.}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กรัม}}{1000 \text{ มก.}} \\ &\text{เมื่อเวลาผ่านไป 30 นาที มีมวลจ่ายเข้า 7.337 กรัม} \\ &\text{ดังนั้น ใน 1 นาที มีมวลจ่ายเข้า} \\ &= \frac{7.337 \text{ กรัม}}{30 \text{ นาที}} \\ &= 0.245 \text{ กรัม/นาที} \end{aligned}$$

1.1.3 มวลทางออกด้านล่าง (Underflow mass)

$$\begin{aligned}
 \text{จากสมการที่ (4) มวลที่สะสมในกริทพอด} &= \text{มวลที่จ่ายเข้า} - \text{มวลที่ออกด้านบน} \\
 &= 0.337 - 0.245 \\
 &= 0.092 \text{ กรัม/นาที่}
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ค. 1 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

ตารางที่ ค. 1.1 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลา (นาที่)	มวลจ่ายเข้า (กรัม/นาที่)	มวล (ทางออกด้านบน) (กรัม/นาที่)	มวล (ที่สะสมในกริทพอด) (กรัม/นาที่)
0.5	30	0.083	0.067	0.016
	60	0.084	0.068	0.015
	120	0.095	0.082	0.012
	240	0.096	0.081	0.015
	360	0.096	0.084	0.012
1.0	30	0.119	0.091	0.028
	60	0.119	0.092	0.027
	120	0.116	0.091	0.024
	240	0.114	0.092	0.022
	360	0.113	0.093	0.020
2.0	30	0.280	0.208	0.072
	60	0.283	0.218	0.065
	120	0.280	0.224	0.057
	240	0.277	0.235	0.042
	360	0.289	0.244	0.044
3.0	30	0.337	0.245	0.092
	60	0.312	0.231	0.081
	120	0.341	0.262	0.079
	240	0.345	0.266	0.079
	360	0.335	0.264	0.071

ตารางที่ ค. 1.2 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลา (นาที)	มวลจ่ายเข้า (กรัม/นาที)	มวล (ทางออกด้านบน) (กรัม/นาที)	มวล (ที่สะสมในกริทพอด) (กรัม/นาที)
0.5	30	0.103	0.102	0.001
	60	0.106	0.102	0.004
	120	0.104	0.104	0.000
	240	0.107	0.106	0.001
	360	0.110	0.111	0.000
1.0	30	0.127	0.113	0.014
	60	0.134	0.118	0.015
	120	0.131	0.111	0.020
	240	0.142	0.122	0.021
	360	0.146	0.123	0.023
2.0	30	0.389	0.332	0.057
	60	0.393	0.332	0.061
	120	0.391	0.337	0.054
	240	0.374	0.332	0.042
	360	0.397	0.353	0.044
3.0	30	0.395	0.325	0.069
	60	0.376	0.304	0.072
	120	0.384	0.325	0.059
	240	0.387	0.331	0.056
	360	0.341	0.309	0.032

ตารางที่ ค. 1.3 มวลของแข็งแขวนลอยที่แยกได้จากการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดันจ่ายเข้า (บาร์)	เวลา (นาที)	มวลจ่ายเข้า (กรัม/นาที)	มวล (ทางออกด้านบน) (กรัม/นาที)	มวล (ที่สะสมในกริทพอด) (กรัม/นาที)
0.5	30	0.116	0.104	0.011
	60	0.106	0.096	0.010
	120	0.129	0.117	0.012
	240	0.130	0.121	0.009
	360	0.134	0.124	0.010
1.0	30	0.146	0.116	0.029
	60	0.163	0.134	0.030
	120	0.201	0.162	0.039
	240	0.222	0.188	0.033
	360	0.222	0.186	0.036
2.0	30	0.249	0.179	0.070
	60	0.245	0.178	0.067
	120	0.250	0.186	0.064
	240	0.248	0.186	0.062
	360	0.281	0.219	0.062
3.0	30	0.218	0.150	0.067
	60	0.219	0.153	0.066
	120	0.216	0.152	0.065
	240	0.215	0.153	0.062
	360	0.254	0.185	0.069



ภาคผนวก ง

การคำนวณปริมาณสัลดั้ที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้ง
กริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

และ

การคำนวณค่าไฟฟ้าของการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด
เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้ง กริทพอดเป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

ในงานวิจัยนี้ต้องการหาปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงเมื่อนำการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดมาติดตั้งก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา โดยเทียบกับระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน ดังนั้นจึงให้น้ำดิบที่จ่ายเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบันและที่จ่ายเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมมีค่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยเท่ากัน และจากการสอบถามข้อมูลจากการประปานครหลวง พบว่าที่โรงกรองน้ำสามเสนในช่วงตลอดปี 2552 มีอัตราไหลเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปาเฉลี่ย 500,348 ลบ.ม./วัน โดยตัวอย่างการคำนวณในหัวข้อนี้ จะใช้ตัวเลขนี้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ

การจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ความดัน 2 บาร์ ใช้เวลาในการดำเนินการในกริทพอด 30 นาที จากผลการทดลอง พบว่าความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน 35.60 มก./ล. มีค่าความขุ่น 37.7 NTU และความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางออกด้านบน 25.60 มก./ล. มีค่าความขุ่น 33.5 NTU

1. เปรียบเทียบปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงได้ระหว่างระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบันกับระบบที่เมื่อมีการติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมก่อนเข้าสู่ระบบผลิตประปา

1.1 ระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน

ปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ถูกกำจัดโดยการทำความสะอาดน้ำแบบธรรมดา (สมมติประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งแขวนลอย 100%)

$$\begin{aligned}
 &= 35.60 \text{ มก./ล.} \times 500,348 \text{ ลบ.ม./วัน} \times \frac{1000 \text{ ล.}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กก.}}{10^6 \text{ มก.}} \\
 &= 17,812.4 \text{ กก./วัน} \\
 &= 17.81 \text{ ตัน/วัน}
 \end{aligned}$$

ในการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบผลิตน้ำประปาจะมีการเติมสารเคมี คือ สารส้ม ซึ่งในการเติมสารส้มนั้นจะนำค่าความขุ่นไปเปรียบเทียบ โดยในการทดลองนี้มีค่าความขุ่น 37.7 NTU และเมื่อนำค่าความขุ่นไปอ่านค่าจากกราฟในรูปที่ 4.26 พบว่า ต้องเติมสารส้มในปริมาณ 26.5 มก./ล. ซึ่งในการกำจัดของแข็งแขวนลอยนี้จะใช้สารส้ม 13.26 ตัน/วัน ดังนั้น ปริมาณสลัดจ์ที่ถูกกำจัดหลังผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

$$= 17.81 + 13.26 = 31.07 \text{ ตัน/วัน}$$

1.2 จากการทดลองเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรม ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตประปา

หลังผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด มีปริมาณของแข็งแขวนลอยที่ออกทางด้านบน 25.60 มก./ล. และมีค่าความขุ่น 33.5 NTU

$$= 25.60 \text{ มก./ล.} \times 500,348 \text{ ลบ.ม./วัน} \times \frac{1000 \text{ ล.}}{1 \text{ ลบ.ม.}} \times \frac{1 \text{ กก.}}{10^6 \text{ มก.}}$$

$$= 12,808.9 \text{ กก./วัน}$$

$$= 12.81 \text{ ตัน/วัน}$$

ในการกำจัดของแข็งแขวนลอยในระบบผลิตน้ำประปาจะมีการเติมสารเคมี คือ สารส้ม ซึ่งในการเติมสารส้มนั้นจะนำค่าความขุ่นไปเปรียบเทียบ โดยในการทดลองนี้มีค่าความขุ่น 33.5 NTU และเมื่อนำค่าความขุ่นไปอ่านค่าจากกราฟในรูปที่ 4.26 พบว่าต้องเติมสารส้มในปริมาณ 24.8 มก./ล. ซึ่งในการกำจัดของแข็งแขวนลอยนี้จะใช้สารส้ม 12.41 ตัน/วัน ดังนั้น ปริมาณสลัดจ์ที่ถูกกำจัดหลังผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด

$$= 12.81 + 12.41 = 25.22 \text{ ตัน/วัน}$$

1.3 เปรียบเทียบปริมาณสลัดจ์ที่ลดลงได้ระหว่างระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบันกับระบบที่เมื่อมีการติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมก่อนเข้าสู่ระบบผลิตประปา

- ปริมาณสลัดจ์ที่ถูกกำจัดโดยในระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน 31.07 ตัน/วัน
- ปริมาณสลัดจ์ที่ถูกกำจัดหลังผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด 25.22 ตัน/วัน

ดังนั้น สามารถลดปริมาณสลัดจ์ที่เกิดจากสารส้มได้ $31.07 - 25.22 = 5.85$ ตัน/วัน

$$\text{สามารถคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้} = \frac{31.07 - 25.22}{31.07} \times 100$$

$$= 18.84 \text{ เปอร์เซ็นต์ต่อวัน}$$

2. ค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ที่ลดลง

จากการสอบถามข้อมูลราคาค่ากำจัดสลัดจ์จากบริษัท เบตเตอร์ เวิลด์ กรีน จำกัด (มหาชน) พบว่า การกำจัดสลัดจ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำประปา เสียค่ากำจัดสลัดจ์ประมาณ 9,000 - 10,000 บาท/ตัน โดยในการคำนวณจะใช้ค่าเฉลี่ย คือ 9,500 บาท/ตัน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สามารถลดค่ากำจัดสลัดจ์ได้} &= 9,500 \times 5.85 \\ &= 55,614 \text{ บาท/วัน} \end{aligned}$$

3. ปริมาณสารส้มที่ลดลงและค่าใช้จ่ายของสารส้มที่ลดลง

- ปริมาณสารส้มที่เติมลงไปในระบบผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน 13.26 ตัน/วัน
- ปริมาณสารส้มที่เติมลงไปหลังผ่านไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริฟพอด 12.41 ตัน/วัน

$$\text{ดังนั้น สามารถลดปริมาณสารส้มที่เติมลงไปได้ } 13.26 - 12.41 = 0.85 \text{ ตัน/วัน}$$

จากการสอบถามข้อมูลราคาสารส้มจากกองวิเคราะห์คุณภาพน้ำ การประปานครหลวง พบว่า สารส้มมีราคา 4,432 บาท/ตัน

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น สามารถลดค่าใช้จ่ายของสารส้มที่ลดลงได้} &= 4,432 \times 0.85 \\ &= 3,770 \text{ บาท/วัน} \end{aligned}$$

4. ค่าใช้จ่ายที่ลดลงได้ทั้งหมด

- ค่าใช้จ่ายในการกำจัดสลัดจ์ที่ลดลง 55,614 บาท/วัน
- ค่าใช้จ่ายของสารส้มที่ลดลง 3,770 บาท/วัน

$$\text{ดังนั้น ค่าใช้จ่ายที่สามารถลดลงไปทั้งหมด} = 55,614 + 3,770 = 59,384 \text{ ตัน/วัน}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าของการใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด
เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

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

เมื่อ Q = อัตราการไหล (ลิตรต่อวินาที)

H = แรงดันสุทธิ (เมตร)

η = ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำ

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

อัตราการไหลสูงสุด = 30,000 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง (84 ลิตรต่อวินาที)

แรงดันสุทธิของไฮโดรไซโคลนประมาณ 30 เมตร

ประสิทธิภาพของเครื่องสูบน้ำประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์

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

$$\text{ดังนั้น กำลังไฟของเครื่องสูบน้ำ} = \frac{84 \times 30}{102 \times 0.5} = 49.41 \text{ กิโลวัตต์}$$

$$\text{ดังนั้น ค่าไฟฟ้า} = 49.41 \text{ กิโลวัตต์} \times 2.695 \frac{\text{บาท}}{\text{กิโลวัตต์} \cdot \text{ชั่วโมง}} = 134 \text{ บาท/ชั่วโมง}$$

คิดเงินระบบวันละ 24 ชั่วโมง \therefore ใช้ไฟฟ้า 3,216 บาท/วัน (ต่อ 30,000 ลูกบาศก์เมตร)

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น อัตราการไหล 1 ลูกบาศก์เมตร/วัน จ่ายค่าไฟฟ้า} &= \frac{3,216 \text{ บาทต่อวัน}}{30,000 \text{ ลูกบาศก์เมตร/วัน}} \\ &= 0.107 \text{ บาท/ลูกบาศก์เมตร} \end{aligned}$$

เมื่อทำการคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้ในทุกๆ กรณี สามารถสรุปค่าต่างๆ ได้ดังตาราง
ต่อไปนี่

ปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ตารางที่ จ. 1.1 ค่าความขุ่นและความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางเข้าและทางออกด้านบน ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ความขุ่นของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)		ความเข้มข้นของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
		ทางเข้า	ทางออกด้านบน	ทางเข้า	ทางออกด้านบน
0.5	30	25.0	23.5	22.67	18.22
	60	25.0	23.7	22.89	18.67
	120	26.0	23.5	25.83	22.44
	240	26.0	25.0	26.06	22.00
	360	26.0	25.5	26.28	22.89
1.0	30	25.5	24.5	23.78	18.22
	60	25.5	24.7	23.78	18.44
	120	25.0	25.0	23.11	18.22
	240	24.5	24.2	22.89	18.44
	360	24.5	23.7	22.67	18.67
2.0	30	44.3	43.2	40.06	29.78
	60	44.3	43.3	40.39	31.11
	120	44.3	43.0	40.06	31.94
	240	41.7	39.8	39.56	33.61
	360	45.0	44.0	41.22	34.89
3.0	30	40.0	38.7	38.89	28.22
	60	39.7	37.3	36.00	26.67
	120	42.5	41.0	39.33	30.22
	240	42.8	41.5	39.78	30.67
	360	42.8	41.7	38.67	30.44

ตารางที่ ง. 1.2 ค่ากำจัดสลัดจ์ที่ลดลงได้ด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ปริมาณสลัดจ์ (ตัน/วัน)		ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลง		จำนวนเงิน (บาท/วัน)
		ระบบผลิต น้ำใน ปัจจุบัน	ระบบผลิตน้ำที่ติดตั้ง การจัดเรียงไฮโดร ไซโคลนแบบอนุกรม	ตัน/วัน	เปอร์เซ็นต์	
0.5	30	21.95	19.37	2.58	11.74	24,480
	60	22.06	19.70	2.36	10.71	22,436
	120	23.73	21.48	2.25	9.47	21,342
	240	23.85	21.62	2.23	9.36	21,200
	360	23.96	22.16	1.80	7.50	17,064
1.0	30	22.61	19.62	2.98	13.19	28,330
	60	22.61	19.78	2.82	12.48	26,809
	120	22.17	19.72	2.45	11.04	23,244
	240	21.96	19.63	2.33	10.59	22,103
	360	21.85	19.70	2.15	9.85	20,439
2.0	30	34.70	29.31	5.39	15.54	51,241
	60	34.87	30.03	4.84	13.89	46,012
	120	34.70	30.34	4.36	12.57	41,449
	240	33.90	30.53	3.38	9.96	32,085
	360	35.38	32.07	3.32	9.37	31,514
3.0	30	33.17	27.63	5.54	16.70	52,619
	60	31.67	26.55	5.12	16.16	48,626
	120	33.94	29.08	4.86	14.32	46,155
	240	34.16	29.36	4.81	14.07	45,679
	360	33.61	29.34	4.27	12.70	40,546

ตารางที่ ง. 1.3 ปริมาณสารส้มที่ลดลงได้ด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาทิต)	ปริมาณสารส้มที่เดิมลงไป (ตัน/วัน)		ปริมาณ สารส้มที่ลดลง (ตัน/วัน)	จำนวน เงิน (บาท/วัน)
		ระบบผลิตน้ำ ในปัจจุบัน	ระบบผลิตน้ำที่ติดตั้ง การจัดเรียงไฮโดร ไซโคลนแบบอนุกรม		
0.5	30	10.61	10.26	0.35	1,552
	60	10.61	10.36	0.25	1,109
	120	10.81	10.26	0.55	2,439
	240	10.81	10.61	0.20	887
	360	10.81	10.71	0.10	444
1.0	30	10.71	10.51	0.20	887
	60	10.71	10.56	0.15	665
	120	10.61	10.61	0.00	0
	240	10.51	10.41	0.10	444
	360	10.51	10.36	0.15	665
2.0	30	14.66	14.41	0.25	1,109
	60	14.66	14.46	0.20	887
	120	14.66	14.36	0.30	1,331
	240	14.11	13.71	0.40	1,774
	360	14.76	14.61	0.15	665
3.0	30	13.710	13.509	0.20	887
	60	13.66	13.21	0.45	1,996
	120	14.26	13.96	0.30	1,331
	240	14.26	14.01	0.25	1,109
	360	14.26	14.11	0.15	665

ตารางที่ ง. 1.4 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงทั้งหมดหลังผ่านการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด เมื่อหักค่าไฟฟ้าของไฮโดรไซโคลน 3,216 บาท/วัน

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ใน กริทพอด (นาที)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง (บาท/วัน)		ค่าไฟฟ้าของ ไฮโดรไซโคลน (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง ทั้งหมด (บาท/วัน)
		ปริมาณสลัดจ์ ที่ลดลง	ปริมาณสารส้ม ที่ลดลง		
0.5	30	24,480	1,552	3,216	22,816
	60	22,436	1,109	3,216	20,328
	120	21,342	2,439	3,216	20,566
	240	21,200	887	3,216	18,871
	360	17,064	444	3,216	14,292
1.0	30	28,330	887	3,216	26,001
	60	26,809	665	3,216	24,258
	120	23,244	0	3,216	20,028
	240	22,103	444	3,216	19,330
	360	20,439	665	3,216	17,888
2.0	30	51,241	1,109	3,216	49,133
	60	46,012	887	3,216	43,683
	120	41,449	1,331	3,216	39,563
	240	32,085	1,774	3,216	30,643
	360	31,514	665	3,216	28,964
3.0	30	52,619	887	3,216	50,290
	60	48,626	1,996	3,216	47,406
	120	46,155	1,331	3,216	44,269
	240	45,679	1,109	3,216	43,572
	360	40,546	665	3,216	37,995

ปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริฟฟอต ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ง. 1.5 ค่าความขุ่นและความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางเข้าและทางออกด้านบน ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริฟฟอต ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริฟฟอต (นาที)	ความขุ่นของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)		ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
		ทางเข้า	ทางออกด้านบน	ทางเข้า	ทางออกด้านบน
0.5	30	25.0	25.0	22.00	22.00
	60	25.5	24.8	22.67	21.78
	120	25.0	25.0	22.22	22.22
	240	26.0	25.5	54.93	54.67
	360	26.0	26.5	52.27	52.53
1.0	30	24.0	22.5	20.00	17.78
	60	24.5	22.7	21.11	18.67
	120	24.0	22.5	20.67	17.56
	240	25.0	23.0	22.47	19.22
	360	25.0	22.7	23.67	18.89
2.0	30	41.0	38.0	42.39	36.17
	60	41.5	38.0	42.83	36.17
	120	41.5	38.5	42.61	36.72
	240	40.0	38.2	34.94	31.11
	360	42.3	39.0	43.33	38.56
3.0	30	38.0	36.0	32.89	27.11
	60	36.7	35.0	32.22	27.56
	120	37.0	36.0	32.00	27.11
	240	37.0	36.5	31.33	25.33
	360	36.0	35.3	28.44	25.78

ตารางที่ ง. 1.6 ค่ากำจัดสลัดจ์ที่ลดลงได้ด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ปริมาณสลัดจ์ (ตัน/วัน)		ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลง		จำนวนเงิน (บาท/วัน)
		ระบบผลิต น้ำใน ปัจจุบัน	ระบบผลิตน้ำที่ติดตั้ง การจัดเรียงไฮโดร ไซโคลนแบบอนุกรม	ตัน/วัน	เปอร์เซ็นต์	
0.5	30	21.62	21.62	0.00	0.00	0
	60	22.05	21.45	0.60	2.70	5,656
	120	21.73	21.73	0.00	0.00	0
	240	38.29	38.06	0.23	0.60	2,187
	360	36.96	37.19	-0.23	-0.62	0
1.0	30	20.36	19.00	1.36	6.68	12,929
	60	21.02	19.50	1.52	7.24	14,450
	120	20.70	18.89	1.81	8.73	17,159
	240	21.85	19.82	2.03	9.27	19,251
	360	22.45	19.61	2.84	12.66	26,999
2.0	30	35.17	31.41	3.76	10.70	35,745
	60	35.49	31.41	4.08	11.50	38,787
	120	35.38	31.78	3.60	10.17	34,176
	240	26.19	28.93	-2.74	-10.45	0
	360	35.89	32.80	3.09	8.60	29,328
3.0	30	29.77	26.42	3.34	11.23	31,752
	60	29.18	26.50	2.68	9.19	25,478
	120	29.12	26.42	2.70	9.26	25,620
	240	28.79	25.68	3.10	10.78	29,470
	360	27.14	25.66	1.48	5.46	14,070

ตารางที่ ง. 1.7 ปริมาณสารส้มที่ลดลงได้ด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ปริมาณสารส้มที่เดิมลงไป (ตัน/วัน)		ปริมาณ สารส้มที่ลดลง (ตัน/วัน)	จำนวน เงิน (บาท/วัน)
		ระบบผลิตน้ำ ในปัจจุบัน	ระบบผลิตน้ำที่ติดตั้ง การจัดเรียงไฮโดร ไซโคลนแบบอนุกรม		
0.5	30	10.61	10.61	0.00	0
	60	10.71	10.56	0.15	665
	120	10.61	10.61	0.00	0
	240	10.81	10.71	0.10	444
	360	10.81	10.91	-0.10	0
1.0	30	10.36	10.11	0.25	1,109
	60	10.46	10.16	0.30	1,331
	120	10.36	10.11	0.25	1,109
	240	10.61	10.21	0.40	1,774
	360	10.61	10.16	0.45	1,996
2.0	30	13.96	13.31	0.65	2,883
	60	14.06	13.31	0.75	3,326
	120	14.06	13.41	0.65	2,883
	240	13.71	13.36	0.35	1,552
	360	14.21	13.51	0.70	3,105
3.0	30	13.31	12.86	0.45	1,996
	60	13.06	12.71	0.35	1,552
	120	13.11	12.86	0.25	1,109
	240	13.11	13.01	0.10	444
	360	12.91	12.76	0.15	665

ตารางที่ ง. 1.8 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงทั้งหมดหลังผ่านการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 75 และ 50 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด เมื่อหักค่าไฟฟ้าของไฮโดรไซโคลน 3,216 บาท/วัน

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ใน กริทพอด (นาทีก)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง (บาท/วัน)		ค่าไฟฟ้าของ ไฮโดรไซโคลน (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายที่ ลดลงทั้งหมด (บาท/วัน)
		ปริมาณสลัดจ์ ที่ลดลง	ปริมาณสารส้ม ที่ลดลง		
0.5	30	0	0	3,216	0
	60	5,656	665	3,216	3,106
	120	0	0	3,216	0
	240	2,187	444	3,216	0
	360	0	0	3,216	0
1.0	30	12,929	1,109	3,216	10,822
	60	14,450	1,331	3,216	12,565
	120	17,159	1,109	3,216	15,052
	240	19,251	1,774	3,216	17,809
	360	26,999	1,996	3,216	25,779
2.0	30	35,745	2,883	3,216	35,412
	60	38,787	3,326	3,216	38,897
	120	34,176	2,883	3,216	33,843
	240	0	1,552	3,216	0
	360	29,328	3,105	3,216	29,216
3.0	30	31,752	1,996	3,216	30,532
	60	25,478	1,552	3,216	23,814
	120	25,620	1,109	3,216	23,513
	240	29,470	444	3,216	26,698
	360	14,070	665	3,216	11,519

ปริมาณสลัดจ์และค่าใช้จ่ายที่ลดลงเมื่อติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ตารางที่ ง. 1.9 ค่าความขุ่นและความเข้มข้นของแข็งแขวนลอยที่ทางเข้าและทางออกด้านบน ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกิริทพอด ก่อนเข้าสู่ระบบผลิตน้ำประปา

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกิริทพอด (นาที)	ความขุ่นของแข็งแขวนลอย (เอ็นทียู)		ความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอย (มก./ล.)	
		ทางเข้า	ทางออกด้านบน	ทางเข้า	ทางออกด้านบน
0.5	30	35.0	34.0	30.22	27.24
	60	33.0	32.3	27.61	25.02
	120	36.3	35.3	33.67	30.53
	240	37.0	36.0	34.00	31.67
	360	39.0	37.3	35.00	32.33
1.0	30	34.0	32.7	29.11	23.24
	60	36.0	34.3	32.67	26.71
	120	56.3	54.0	40.17	32.33
	240	58.0	56.3	44.33	37.67
	360	58.0	56.5	43.33	37.17
2.0	30	37.7	33.5	35.60	25.60
	60	37.5	33.3	34.93	25.37
	120	37.7	34.0	35.73	26.6
	240	37.7	34.0	35.47	26.63
	360	39.0	36.3	40.17	31.33
3.0	30	34.7	29.3	23.73	16.40
	60	35.0	29.3	23.87	16.67
	120	34.7	29.0	23.60	16.53
	240	34.3	29.3	23.47	16.67
	360	36.5	32.0	27.73	20.22

ตารางที่ ง. 1.10 ค่ากำจัดสลัดจ์ที่ลดลงได้ด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาที)	ปริมาณสลัดจ์ (ตัน/วัน)		ปริมาณสลัดจ์ที่ลดลง		จำนวนเงิน (บาท/วัน)
		ระบบผลิต น้ำใน ปัจจุบัน	ระบบผลิตน้ำที่ติดตั้ง การจัดเรียงไฮโดร ไซโคลนแบบอนุกรม	ตัน/วัน	เปอร์เซ็นต์	
0.5	30	27.83	26.14	1.69	6.08	16,066
	60	26.07	24.63	1.45	5.55	13,737
	120	29.81	28.03	1.77	5.94	16,827
	240	30.12	28.70	1.42	4.70	13,452
	360	31.02	29.39	1.64	5.27	15,543
1.0	30	27.07	23.84	3.24	11.96	30,754
	60	29.26	25.92	3.33	11.39	31,657
	120	37.26	32.89	4.37	11.74	41,544
	240	39.69	36.01	3.68	9.28	34,984
	360	39.19	35.81	3.38	8.63	32,132
2.0	30	31.07	25.22	5.85	18.84	55,614
	60	30.69	25.00	5.68	18.52	53,998
	120	31.14	25.82	5.32	17.08	50,528
	240	31.01	25.83	5.17	16.69	49,149
	360	33.61	28.63	4.97	14.80	47,248
3.0	30	24.53	19.66	4.87	19.84	46,250
	60	24.65	19.80	4.85	19.69	46,107
	120	24.47	19.63	4.84	19.78	45,964
	240	24.30	19.80	4.50	18.53	42,780
	360	26.88	22.18	4.71	17.51	44,729

ตารางที่ ง. 1.11 ปริมาณสารส้มที่ลดลงได้ด้วยการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ ในกริทพอด (นาทิต)	ปริมาณสารส้มที่เดิมลงไป (ตัน/วัน)		ปริมาณ สารส้มที่ลดลง (ตัน/วัน)	จำนวน เงิน (บาท/วัน)
		ระบบผลิตน้ำ ในปัจจุบัน	ระบบผลิตน้ำที่ติดตั้ง การจัดเรียงไฮโดร ไซโคลนแบบอนุกรม		
0.5	30	12.71	12.51	0.20	887
	60	12.26	12.11	0.15	665
	120	12.96	12.76	0.20	887
	240	13.11	12.86	0.25	1,109
	360	13.51	13.21	0.30	1,331
1.0	30	12.51	12.21	0.30	1,331
	60	12.91	12.56	0.35	1,552
	120	17.16	16.71	0.45	1,996
	240	17.51	17.16	0.35	1,552
	360	17.51	17.21	0.30	1,331
2.0	30	13.26	12.41	0.85	3,770
	60	13.21	12.31	0.90	3,992
	120	13.26	12.51	0.75	3,326
	240	13.26	12.51	0.75	3,326
	360	13.51	12.96	0.55	2,439
3.0	30	12.66	11.46	1.20	5,322
	60	12.71	11.46	1.25	5,544
	120	12.66	11.36	1.30	5,766
	240	12.56	11.46	1.10	4,879
	360	13.01	12.06	0.95	4,213

ตารางที่ ง. 1.12 ค่าใช้จ่ายที่ลดลงทั้งหมดหลังผ่านการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด เมื่อหักค่าไฟฟ้าของไฮโดรไซโคลน 3,216 บาท/วัน

ความดัน จ่ายเข้า (บาร์)	เวลาที่ใช้ใน กริทพอด (นาที)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง (บาท/วัน)		ค่าไฟฟ้าของ ไฮโดรไซโคลน (บาท/วัน)	ค่าใช้จ่ายที่ลดลง ทั้งหมด (บาท/วัน)
		ปริมาณสลัดจ์ ที่ลดลง	ปริมาณสารส้ม ที่ลดลง		
0.5	30	16,066	887	3,216	13,737
	60	13,737	665	3,216	11,186
	120	16,827	887	3,216	14,498
	240	13,452	1,109	3,216	11,345
	360	15,543	1,331	3,216	13,658
1.0	30	30,754	1,331	3,216	28,868
	60	31,657	1,552	3,216	29,993
	120	41,544	1,996	3,216	40,324
	240	34,984	1,552	3,216	33,321
	360	32,132	1,331	3,216	30,247
2.0	30	55,614	3,770	3,216	56,168
	60	53,998	3,992	3,216	54,773
	120	50,528	3,326	3,216	50,638
	240	49,149	3,326	3,216	49,259
	360	47,248	2,439	3,216	46,471
3.0	30	46,250	5,322	3,216	48,356
	60	46,107	5,544	3,216	48,435
	120	45,964	5,766	3,216	48,514
	240	42,780	4,879	3,216	44,442
	360	44,729	4,213	3,216	45,726

ตัวอย่างการคำนวณการออกแบบไฮโดรไซโคลนที่ติดตั้งกริทพอด เพื่อใช้เป็นหน่วยบำบัดขั้นต้นในการผลิตน้ำประปา

ในการจัดเรียงไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอด ที่มีการจัดเรียงโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร เป็นตัวสุดท้ายของการต่ออนุกรมนั้น เนื่องจากเป็นไฮโดรไซโคลนที่มีขนาดเล็ก จึงทำให้สามารถรองรับปริมาณน้ำจากไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ได้น้อย ดังนั้นจึงควรต่อไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตรนี้แบบขนาน เพื่อรองรับปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดจากไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ได้มากขึ้น

การใช้ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมที่ติดตั้งกริทพอดนี้ เหมาะสมที่จะใช้กับการผลิตน้ำประปาในชุมชนขนาดเล็ก เช่น การประปาของชุมชน เป็นต้น โดยตัวอย่างการคำนวณในหัวข้อนี้จะสมมติอัตราไหลเข้าของน้ำดิบในชุมชน 100 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง ซึ่งจะใช้ตัวเลขนี้เป็นตัวอย่างในการคำนวณ

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

อัตราไหลเข้าของน้ำดิบ = 100 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

อัตราไหลเข้าสูงสุดของไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร ที่ความดัน 3 บาร์
= 10 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

อัตราไหลเข้าสูงสุดของไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร ที่ความดัน 3 บาร์
= 0.55 ลูกบาศก์เมตร/ชั่วโมง

เลือกใช้

ไฮโดรไซโคลนแบบอนุกรมขนาด 50 และ 10 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งกริทพอด

ดังนั้น ไฮโดรไซโคลนที่ต่ออนุกรมกัน จะใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร 10 ตัว ต่อขนานกัน

โดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร 19 ตัว ต่อขนานกันจากไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร แต่ละตัว รวมใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 190 ตัว

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวธัญยพรรณ สวัสดิวงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 29 ตุลาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยมหิดล ปีการศึกษา 2549 ต่อมาได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย