

การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน
แบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2552

การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน
แบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
พฤษภาคม 2552
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน
แบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน



บทคัดย่อ
ของ
ปรีชา แก้วศรีพรม

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

พฤษภาคม 2552

ปรีชา แก้วศรีพรหม. (2552). การศึกษาประสิทธิผลในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบใส่
แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมเครื่องกล).
กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพ็ชร เอวานส์,
พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิผลในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนโดย
การกำจัดแกนอากาศ ไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในการทดลองมี 3 แบบ คือ แบบมาตรฐาน, แบบใส่แกน
โลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน และ แบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน สภาวะในการทดลอง ใช้แคลเซียม
คาร์บอเนตเป็นตัวทดสอบ มีขนาดอนุภาค 100 – 1000 ไมครอน ผสมกับน้ำ ความเข้มข้นของของ
ผสม 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความดันลดที่ใช้ในการทดลอง 10, 15, 20, 25, 30,
35, 40, 45, 50 และ 55 psi

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกนมี
ประสิทธิผลในการแยกดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน และ ดีกว่าไฮโดร
ไซโคลนแบบมาตรฐาน เนื่องจากแกนโลหะหมุน สามารถกำจัดแกนอากาศในตำแหน่งแกนกลาง
ของไฮโดรไซโคลนได้ ทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนลดลง ซึ่ง
จากผลการทดลองสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลน ดังนี้

1. ผลอัตราการไหล : การเพิ่มขึ้นของอัตราการไหลจะทำให้ความดันลดเพิ่มขึ้น และ
ส่งผลต่อประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลนให้ดีขึ้น
2. ผลความเข้มข้น : การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารป้อน ส่งผลต่อประสิทธิผลใน
การแยกของไฮโดรไซโคลน เนื่องจากผลของความหนืดที่แตกต่างกัน
3. ผลความเร็วสนามการไหล : เนื่องจากรูปร่างของไฮโดรไซโคลน มีลักษณะเป็น cone
ถ้าหากสนามการไหลวนของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนมีความเร็วสูง ก็จะมีผลต่อประสิทธิผล
ในการแยกของไฮโดรไซโคลนให้ดีขึ้น

A STUDY OF THE SEPARATION PERFORMANCE OF HYDROCYCLONE
WITH FIXED AND ROTATING SOLID CORES



Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Mechanical Engineering
at Srinakharinwirot University

May 2009

Preecha Kaewsriprom. (2009). *A study of the separation performance of Hydrocyclone with fixed and rotating solid cores*. Master Degree thesis M.Eng. (Mechanical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Asst. Prof. Dr.Wanwilai Kraipech Evans, Col. Asst.Prof. Dr.Anotai Suksangpanomrung

The aim of this the research is to enhance the separation performance of a hydrocyclone by eliminating the air core. The experimental works were carried out for three types of hydrocyclone; Conventional, inserted fixed rod and inserted rotating rod. The feed slurry is calcium carbonate in water solution. The calcium carbonate particles are in the range of 100 to 1000 microns. The solid concentrations of feed slurry studied in this work are 1, 3, and 5% by volume, and the operating pressure drops are varied from 10 to 55 psi.

The results showed that the hydrocyclone with the rotating rod gave the best separation performance. Since the rotating rod can eliminated the low pressure core and decreased the energy loss in the hydrocyclone. The effects of some parameters on the separation performance were also investigated.

1. Effect of the feed flowrate: An increase in the feed flowrate leads to an increase in pressure drop and separation performance.
2. Effect of the feed concentration: A change in the feed concentration effects the separation performance due to the difference in the slurry viscosity.
3. Effect of the swirling velocity: High swirling flow yields high separation performance of the hydrocyclone according to high centrifugal force aching on the solid particle.

ปริญญาานิพนธ์
เรื่อง

การศึกษาประสิทธิผลในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน
แบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน

ของ

นาย ปรีชา แก้วศรีพรม

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่ เดือน พ.ศ. 2552

คณะกรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน

.....ประธาน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์) (พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทวีวัชร วีระเกล้า)

.....กรรมการ

.....กรรมการ

(พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑารัตน์ คุรุเจริญ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)

.....กรรมการ

(พันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จได้ด้วยความกรุณาของ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิไล ไกรเพ็ชร์ เอวานส์ ประธานกรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์ และพันเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อโณทัย สุขแสงพนมรุ้ง กรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ให้แนวคิดในการวิเคราะห์ และช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้น ตลอดจนช่วยกรุณาตรวจแก้ปริญญาานิพนธ์จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด ที่กรุณาอนุเคราะห์แคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ให้ความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ข้อมูลการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณเพื่อนร่วมชั้น โครงการความร่วมมือหลักสูตรปริญญาโท มศว. และ รร. จปร. สาขาวิศวกรรมเครื่องกล รุ่น 3 ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นกำลังใจ

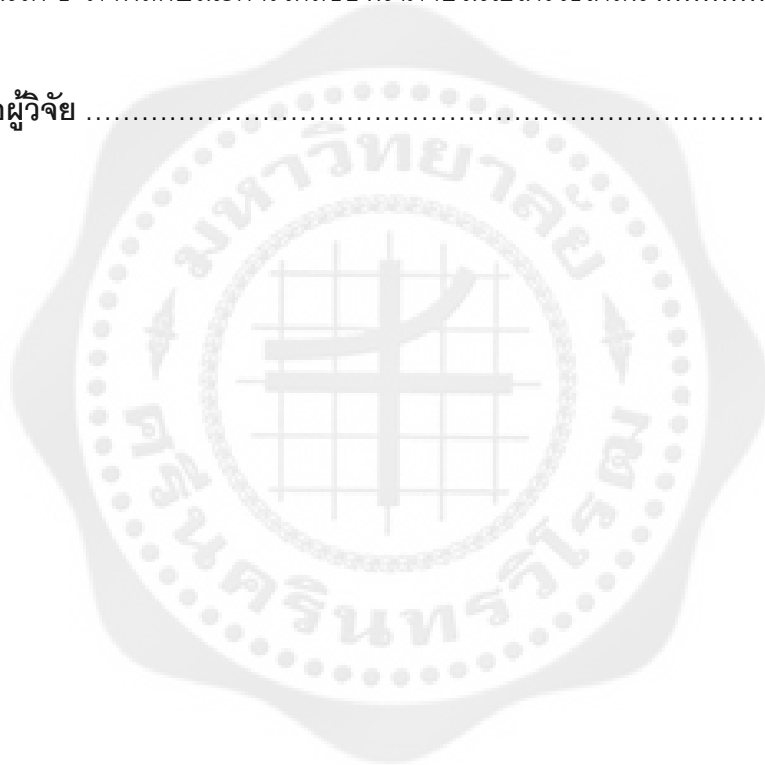
ปรีชา แก้วศรีพรม

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
วิธีดำเนินการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
บทปริทัศน์วรรณกรรม	4
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	6
การใช้งานและข้อดีข้อเสียของไฮโดรไซโคลน	8
รูปแบบการไหลของของเหลวในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบไม่มีแกนโลหะ..	10
ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน	14
3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	19
สารเคมี	19
อุปกรณ์สำหรับการทดลอง	19
วิธีทดลอง การแยกของแข็ง-ของเหลว โดยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน	23
4 ผลและวิเคราะห์ผล	26
ผลการทดสอบ	26
5 สรุปและข้อเสนอแนะ	51
สรุป	51
ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต	52

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บรรณานุกรม	54
ภาคผนวก	56
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณ	57
ภาคผนวก ข ภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน	60
ประวัติย่อผู้วิจัย	92



บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 มุมมองของกรวยทางออกด้านล่างและขนาดของ Air-core	28
2 มุมมองของกรวยทางออกด้านล่างและความสูงของ Air-core	31
3 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนทางเข้า, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านล่างและอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 1 % vol	41
4 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนทางเข้า, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านล่างและอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 3 % vol	44
5 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนทางเข้า, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านล่างและอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 5 % vol	46
6 เปรียบเทียบค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol	48

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลน	7
2 ลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลน	7
3 แสดงความเร็วในแนวสัมผัส (v_t) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย	11
4 แสดงความเร็วในแนวแกน (v_a) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย	12
5 แสดงความเร็วในแนวรัศมี (v_r) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย	13
6 แสดงการเกิด short circuit และ eddy flows	13
7 แสดงรูปแบบการไหลของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลน	14
8 กราฟแสดงความจุกับปริมาณอัตราการไหลของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน	15
9 กราฟแสดงโค้ง Selectivity Function	17
10 แผนภาพแสดงชุดทดลองไฮโดรไซโคลน	20
11 ชุดทดลองไฮโดรไซโคลน	21
12 ขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ทำการทดลอง	22
13 ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (HC) ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่ง (HF) ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน (HR)	23
14 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 30 psi	26
15 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 30 psi	27
16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนอากาศและ องศากรวยทางออกด้านล่าง	28
17 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 20 psi	29
18 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 20 psi	29
19 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 40 psi	30
20 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 40 psi	30
21 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความสูงแกนอากาศ และองศากรวย ทางออกด้านล่าง	31
22 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 35 psi	32
23 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 35 psi	32

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
24 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.00 วินาที	33
25 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.005 วินาที	34
26 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.01 วินาที	34
27 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.015 วินาที	35
28 การเปรียบเทียบ Capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ โดยใช้ น้ำ RO เป็นสารทดสอบ	36
29 แสดงการกระจายตัวของของผสมที่ความเข้มข้น 5%vol ที่ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน	38
30 แสดงอัตราการไหลของของแข็งที่ความเข้มข้น 5%vol ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน	39
31 แสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ความเข้มข้น 5%vol ความดัน 30 psi	40
32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 1 % vol ความดัน 10-55 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ	42
33 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 3 % vol ความดัน 10-55 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ	45
34 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 5 % vol ความดัน 10-55 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ	47
35 ค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน	49
36 ค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol ของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่นิ่ง	49
37 ค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol ของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน	50
38 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 10 psi	61
39 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 10 psi	61

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
92 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 45 psi.....	88
93 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 45 psi.....	88
94 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 50 psi	89
95 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 50 psi	89
96 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 55 psi.....	90
97 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 55 psi.....	90



บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมเหมืองแร่ น้ำมัน ปิโตรเคมี อุตสาหกรรมอาหาร ฯลฯ ซึ่งทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ที่ใช้แยกของผสมระหว่างของแข็ง - ของเหลว ซึ่งรูปแบบการต่อไฮโดรไซโคลนมี 2 แบบ คือ

1. แบบอนุกรม ใช้ในกรณีที่ต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของผสม
2. แบบขนาน ใช้ในกรณีที่ต้องการแยกของผสมในกระบวนการผลิตที่มีปริมาณการผลิตสูง

ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่มีการใช้งานมาตั้งแต่อดีต นิยมใช้แพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมน้ำมัน อาหาร หรืออุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น ข้อดีของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนได้แก่ เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดกะทัดรัดทำให้ง่ายต่อการประกอบ การทำงาน และการบำรุงรักษา อุปกรณ์ไม่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่จึงประหยัดพลังงาน

จากการศึกษากระบวนการทำงานของไฮโดรไซโคลน พบว่ามีปัจจัยสำคัญต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของไฮโดรไซโคลน ซึ่งปัจจัยนี้ได้แก่ ความดันลด ขนาดของไฮโดรไซโคลนและคุณสมบัติของสารป้อน โดยทั่วไปแล้วไฮโดรไซโคลนที่เข้มักเป็นแบบทึบแสง ทำให้เราไม่ทราบถึงลักษณะของการไหลว่ามีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนอย่างไร ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำไฮโดรไซโคลนแบบโปร่งแสง มาทำการศึกษาถึงพฤติกรรมการไหลภายในของไฮโดรไซโคลน ซึ่งหลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนนี้จะใช้หลักการเคลื่อนที่หนีศูนย์กลางของอนุภาคของของแข็งหรือของเหลวจากตัวพาของเหลว ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้อย่างกว้างขวางในกระบวนการแยกสารในอุตสาหกรรม

สำหรับการทำงานของไฮโดรไซโคลนแบบที่ทางออกเปิดสู่อากาศนั้น จะเกิดแกนอากาศขึ้นตรงแกนกลางของไฮโดรไซโคลน Chu et al.(2002) และ (2004) เสนอว่าถ้าสามารถกำจัดแกนอากาศออกไปได้ จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้น

จากที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำไฮโดรไซโคลนมาทำการกำจัดแก๊สอากาศโดยการใส่แกนโลหะเข้าไปแทนแกนอากาศ เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน

2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนโดยการกำจัดแก๊สอากาศ

3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

ทำการศึกษาผลการทดลอง โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาค ด้วยไฮโดรไซโคลน โดยมีขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน กับแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่ง และแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกนแทนแกนอากาศ โดยทำการทดลองจริง
2. ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 50 มิลลิเมตร สร้างจากอะคลิลิคไส
 - 2.1 แบบมาตรฐาน
 - 2.2 แบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน
 - 2.3 แบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน
3. ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100-1000 ไมโครเมตร ผสมกับน้ำเป็นของผสมในการทดสอบ
4. ทดลองที่ความดันลดในไฮโดรไซโคลนในช่วง 10 ถึง 55 psi ความเข้มข้นของของผสม 1, 3, และ 5 %vol

4. วิธีดำเนินการวิจัย

1. รวบรวมข้อมูล ศึกษาและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบไฮโดรไซโคลน
2. สร้างชุดทดลองไฮโดรไซโคลนพร้อมทั้งไฮโดรไซโคลนแบบโปร่งแสงขนาด 50 มิลลิเมตร แบบมาตรฐาน, แบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบมีแกนโลหะหมุนอยู่ในแนวแกน
3. ทำการทดลองหาประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้งสามแบบ
4. นำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์และแสดงผล
5. สรุปผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน เพื่อหาแนวทางในการออกแบบประยุกต์ใช้ให้เหมาะสม
2. ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการออกแบบไฮโดรไซโคลน ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. บทปริทัศน์วรรณกรรม (Literature Review)

การวิจัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรไซโคลอนนั้น ได้มีการทำมาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นการศึกษาพฤติกรรมและลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลอนเพื่อที่จะนำไปสู่การปรับปรุงให้มีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคให้ดียิ่งขึ้น

ผลงานวิจัยของนักวิจัยบางกลุ่ม ที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการออกแบบไฮโดรไซโคลอน ได้แก่ (Lynch. 1968; Rao. 1975; Plitt. 1971; Plitt. 1976 ; Schubert; & NeeBe. 1980; และ Svarovsky. 1980; Svarovsky. 1984) สมการในการออกแบบจากงานวิจัยเหล่านี้ มีพื้นฐานมาจากการทดลอง และสังเกตพฤติกรรมของไฮโดรไซโคลอน และเกิดจากความสัมพันธ์ทางสถิติของข้อมูลจำนวนมาก แต่ก็ยังไม่สามารถอธิบายถึงพื้นฐานกลไกทางกายภาพ ของการไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลอนได้ เพราะสมการมีค่าคงที่ซึ่งเป็นข้อจำกัดและคุณสมบัติจำเพาะในแต่ละระบบดังนั้นสมการและค่าคงที่จำเพาะเหล่านี้จึงไม่สามารถใช้ในการออกแบบกับระบบของผสมอื่นได้

Svarovsky (1994) กล่าวถึงการออกแบบไฮโดรไซโคลอนนั้น ต้องพิจารณาปัจจัยหลายอย่างซึ่งส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการแยกของผสม เช่น การลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอน (Vortex finder) สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแยก แต่จะมีผลทำให้ใช้สารป้อนได้ปริมาณน้อยลง นอกจากนี้ Svarovsky ได้เสนอถึงการนำไฮโดรไซโคลอนหลายๆ ตัว มาต่อเข้าด้วยกันเป็นอนุกรม และระบบที่มีการนำของผสมกลับมาแยกใหม่ (Recycle) พบว่าทั้งสองระบบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของผสมได้ดีขึ้น

Podd; & et al. (2000) ทำการวิจัยเพื่อศึกษาว่าแกนอากาศของไฮโดรไซโคลอนมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางโดยใช้คลื่น Ultrasonic เข้ามาช่วยวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงขนาดของแกนกลางซึ่งก็ได้ผลว่าเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนกลางไฮโดรไซโคลอนเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลอน

จากงานวิจัยของ Kraipech (2002) ซึ่งได้ทำการศึกษาดังกล่าวต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบไฮโดรไซโคลอน สมการการออกแบบจะสามารถนำมาใช้ในการออกแบบได้ ต้องอาศัยข้อมูลจากการทดลอง ได้แก่ ค่าคงที่ต่างๆ ในระบบไฮโดรไซโคลอน ซึ่งปัจจัยหลักที่เกี่ยวข้องใน

กระบวนการนี้ ได้แก่ ความดันลด อัตราการไหล ขนาดของไฮโดรไซโคลน และ คุณสมบัติการไหลของสารป้อนการจำลองการไหลด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลในไฮโดรไซโคลนได้ทำการวิจัยโดยนักวิจัยหลายกลุ่มเช่น Kraipch. (2002), Chine; & Concha. (2000) และ Dai; & et al. (1999) วิธีนี้สามารถอธิบายถึงพื้นฐานกลไกทางกายภาพของการไหลในไฮโดรไซโคลนได้ ผลจากการจำลองการไหลนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการออกแบบอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องมีการเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจริง เพื่อตรวจสอบความแม่นยำในการคำนวณ

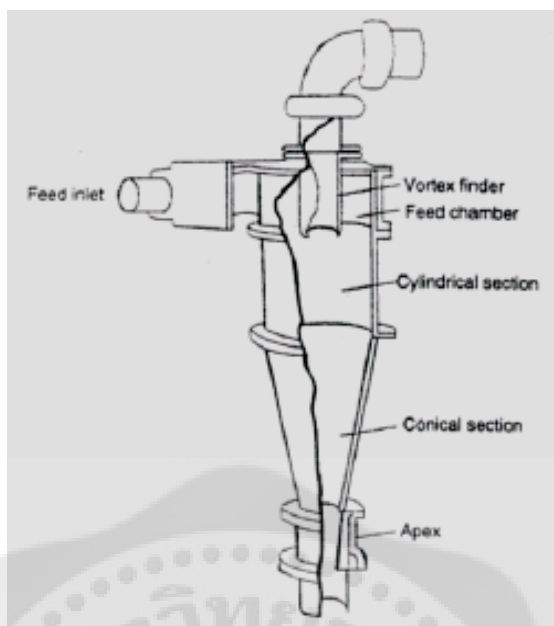
Chu ; & et. al. (2002) ได้นำแท่งสี่แฉก (winged core) มาใส่ไว้ในไฮโดรไซโคลน เพื่อกำจัดแก๊สอากาศภายในไฮโดรไซโคลน โดยการวัดความเร็วเชิงมุมภายในไฮโดรไซโคลน แต่ไม่ได้ทำการทดสอบด้วยของผสม โดยรายงานว่าการทำงานของไฮโดรไซโคลนที่ปรับปรุงแล้วมีประสิทธิภาพผลดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนทั่วไป และ Chu; & et. al. (2004) ได้ศึกษาพลศาสตร์ของการไหลภายในไฮโดรไซโคลนโดยการใช้เทคนิค Laser Doppler Anemometry (LDA) วัดความเร็วในการไหล โดยได้นำแกนโลหะมาใส่ในไฮโดรไซโคลนแทนแกนอากาศและให้แกนโลหะอยู่หนึ่ง เปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา พบว่าไฮโดรไซโคลนที่ใส่แกนโลหะ ให้ประสิทธิภาพในการแยกดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบธรรมดา และเนื่องจากการทำงานของไฮโดรไซโคลนเปิดสู่บรรยากาศ ความเร็วในการหมุนของของเหลวในไฮโดรไซโคลนทำให้เกิดแก๊สอากาศขึ้น Chu.; & et. al. 2002; Chu.; & et. Al. 2004; Podd; & et al. (2000) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับแกนอากาศในไฮโดรไซโคลนและได้ทำการสรุปว่า ถ้าสามารถกำจัดแก๊สอากาศในไฮโดรไซโคลนออกไปได้ จะทำให้ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น

ดังนั้น ผู้วิจัยมีแนวคิดที่ว่า ถ้าแกนโลหะที่ใส่เข้าไปแทนแกนอากาศในไฮโดรไซโคลนเกิดการหมุนในขณะที่ทำงานด้วย ก็จะทำให้ความเร็วในแนวสัมผัสมีค่ามากขึ้น และสามารถทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของไฮโดรไซโคลนดีขึ้น แต่ถ้าหากทำให้แกนหมุนโดยใช้พลังงานจากภายนอก (มอเตอร์) ขับเคลื่อนแกนให้หมุนจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงาน ผู้วิจัยจึงทำการออกแบบโดยการใส่ใบพัดที่ตำแหน่งปลายแกนด้านล่าง นอกตัวไฮโดรไซโคลน โดยให้ของไหลที่ไหลออกทางด้านล่าง (underflow spray) พัดใบพัด ทำให้แกนเกิดการหมุน ซึ่งเมื่อแกนเกิดการหมุน น่าจะช่วยให้สนามการไหลมีความเร็วมากขึ้น และน่าจะส่งผลถึงการแยกได้ดีขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

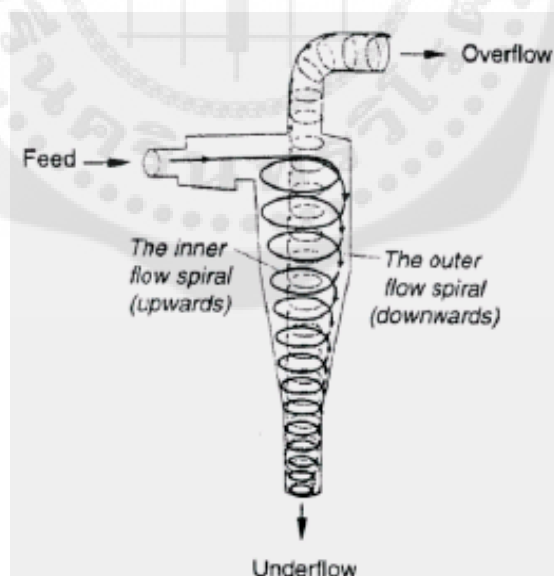
หลักการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลนไม่สลับซับซ้อนและมีวิธีการแยกที่มีประสิทธิภาพ ภาพประกอบ 1 แสดงอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วยส่วนด้านบนซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกต่อกับทางป้อนเข้าซึ่งอยู่ในทิศทางของเส้นสัมผัส เพิ่มต่อด้วยส่วนด้านล่างซึ่งเป็นกรวยโดยที่ปลายของกรวยเปิด (การไหลออกทางด้านล่าง) ท่อกระแสหรือการไหลออกทางด้านบน ติดอยู่ภายในของรูปทรงกระบอกด้านบนและอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งที่ป้อนของไหล การป้อนของแข็งที่อยู่ในรูปของการผสมกับของเหลวและป้อนเข้าไปทางป้อนเข้าซึ่งจะทำให้เกิดการวนลงไป โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ของแข็งจะเคลื่อนที่ไปตามผนังด้วยแรงหนีศูนย์กลาง และหมุนเป็นวงลงสู่ทางไหลออกด้านล่างตรงส่วนปลาย เมื่อของไหลเข้าใกล้ศูนย์กลางจะเกิดมีทิศทางทวนกลับและหมุนเป็นวงขึ้นไปออกจากตัวแยก ผ่านท่อกระแสทางด้านบน ผลกระทบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นตามแนวใจกลางของการวนของของไหลภายในจุดศูนย์กลางของเครื่องแยก ดังนั้น อนุภาคที่ใหญ่กว่าและหนาแน่นกว่าจะออกผ่านทางปลายด้านล่าง ขณะที่อนุภาคที่เล็กกว่าและหนาแน่นน้อยกว่าจะออกทางด้านบน สำหรับการออกแบบไฮโดรไซโคลนที่ใช้ในอุตสาหกรรม จะขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคของแข็งด้วย

เมื่อป้อนสารแขวนลอยด้วยความดันสูงเข้าไปในไฮโดรไซโคลน ของเหลวจะเกิดการไหลหมุนวน เป็นผลให้เกิดแรงเหวี่ยงกระทำต่ออนุภาคซึ่งมีผลทำให้อนุภาคถูกผลักให้ไหลไปติดผนังด้านข้างของไฮโดรไซโคลน (primary vortex) อนุภาคขนาดต่างกัน หรือมีค่าความถ่วงจำเพาะต่างกันจะมีแรงสู่ศูนย์กลางต่างกัน ทำให้แยกออกจากกันได้โดยอนุภาคที่มีความหนาแน่นน้อยจะเคลื่อนที่เข้าไปยังศูนย์กลาง (secondary vortex) และหมุนเป็นเกลียวขึ้นข้างบน ออกทางช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) เรียกว่าการไหลด้านบน (overflow) ขณะที่อนุภาคที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวลงไปตามผนังของไฮโดรไซโคลน และไหลออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) เรียกว่าการไหลด้านล่าง (underflow) ดังแสดงในภาพประกอบ 2 และการไหลด้านล่างจะถูกปล่อยออกมาด้วยความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ



ภาพประกอบ 1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลน

ที่มา : Kraipech. (2002).



ภาพประกอบ 2 ลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลน

ที่มา : Kraipech. (2002).

2.1 การใช้งานและข้อดีข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

2.1.1 การใช้งานของไฮโดรไซโคลน

1. ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้ เช่น
 - 1.1 การแยกอนุภาคของแข็งออกจากร้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมัน
 - 1.2 การแยกอนุภาคแป้งออกจากรูปแป้ง
 - 1.3 การแยกอนุภาคของแข็งออกจากโคลนขุดเจาะ
 - 1.4 การแยกสินแร่จากสารละลายแขวนลอยในกระบวนการแต่งแร่
2. ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งให้สูงขึ้น และการทำให้ของไหลใสขึ้น

ได้แก่

2.1 การทำให้สารละลายแขวนลอยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก่อนจะส่งไปเข้ากระบวนการดีเอชของเหลวออก (deliquoring) อาทิเช่น การผลิตโพลีเมอร์ ถ่านหิน และ ยูเรีย

2.2 การทำให้สารละลายแขวนลอยที่ได้จากการตกผลึก มีความเข้มข้นมากขึ้น อาทิเช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดอะดีปิก (adipic acid) และการผลิตแอมโมเนียซัลเฟต

2.3 ใช้ในการคัดจำพวกของอนุภาค ซึ่งการใช้ไฮโดรไซโคลนในงานประเภทนี้ อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กจะติดออกไปกับของเหลวทางออกด้านบน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะหลุดออกไปทางออกด้านล่างได้แก่

2.3.1 การแยกอนุภาคที่หนักและหยาบที่ไม่ต้องการออกจากเยื่อกระดาษในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ กระดาษและกระดาษ

2.3.2 การแยกขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไปออกเช่น อุตสาหกรรมผลิตปูนขาว ดินขาวและเซรามิกซ์

2.3.3 การแยกเอาวัตถุที่ละเอียดออกจากสารละลายแขวนลอยในการผลิตแร่โปแตชและอื่นๆ

2.3.4 การคัดขนาดอนุภาคในกระบวนการตกผลึกสาร โดยปกติไฮโดรไซโคลนจะถูกนำมาใช้แยกอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 4 - 600 ไมครอน ข้อดีอีกอย่างหนึ่งที่ได้ชัดของไฮโดรไซโคลนคือ การที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวจึงทำให้ไฮโดรไซโคลนมีราคาถูกติดตั้งได้ง่าย และเสียค่าบำรุงรักษาน้อย

จากการศึกษางานวิจัย (Kraipech, 2002) ทำให้สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลนได้ดังนี้

2.1.2 ข้อดีของไฮโดรไซโคลน

1. ไฮโดรไซโคลนสามารถใช้ในการปฏิบัติการแยกสารได้หลายกระบวนการ
2. ไฮโดรไซโคลนสามารถสร้างแรงเฉือนได้สูง เพื่อยุคการรวมตัวกันเป็นกลุ่มของสาร
3. ไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายต่อการใช้งานมีราคาถูกลงและง่ายต่อการติดตั้งและการบำรุงรักษา
4. ขนาดของไฮโดรไซโคลนมีขนาดเล็ก ทำให้ง่ายต่อการติดตั้ง และอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนให้ residence times ในการแยกต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์อื่น เช่น Sedimentation

2.1.3 ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

1. มีขีดจำกัดในการแยกเช่น ความดันในการปฏิบัติงาน และ Cut size อันเนื่องมาจากรูปทรงของไฮโดรไซโคลน
2. มีความไม่ยืดหยุ่นในการติดตั้งและปฏิบัติงานของไฮโดรไซโคลน
3. ง่ายต่อการสึกกร่อน เพราะว่ามีค่าความเร็วของสารป้อนสูง

2.1.4 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน

ประสิทธิภาพการเก็บ (collection efficiency) ของไฮโดรไซโคลนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยต่อไปนี้เพิ่มขึ้น

1. ขนาดของอนุภาค
2. ความหนาแน่นของอนุภาค
3. ความเร็วเข้าของของผสม
4. ความยาวของตัวไฮโดรไซโคลน
5. ความเรียบลื่นของผนังไฮโดรไซโคลน

ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อปัจจัยต่อไปนี้เพิ่มขึ้น

1. ความหนืดของของผสม
2. เส้นผ่าศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน
3. พื้นที่ทางเข้าของของผสม

2.2 รูปแบบการไหลของของเหลวในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลแบบไม่มีแกนโลหะ

เมื่ออนุภาคที่ต้องการแยกผ่านเข้าไปในไฮโดรไซโคลนทางช่องป้อน จะเกิดความเร็วสัมผัสไปจนถึงส่วนทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลน โดยจะเกิดการไหลแบบการไหลวนซ้อนการไหลวน (spiral within spiral) อนุภาคจะเคลื่อนที่ลงโดยการหมุนวน บางส่วนของอนุภาคที่ไม่สามารถออกจากไฮโดรไซโคลนทางช่องทางออกด้านล่างก็จะเคลื่อนที่หมุนวนภายในชั้นสัณฐานบน และออกจากไฮโดรไซโคลนทางช่องทางออกด้านบน การหมุนวนของของไหลจะมีทิศทางเดียวกัน โดยที่การหมุนวนภายนอกจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง ส่วนการหมุนวนด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน รูปแบบการไหลสามารถอธิบายได้โดยการแบ่งความเร็วออกเป็น 3 ส่วน คือ ความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity, v_t) ความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity, v_r) และความเร็วในแนวตั้ง (axial velocity, v_a) และมีการไหลในระยะสั้นๆ หรือการหมุนวนปั่นป่วนรวมอยู่ด้วย การหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลนจะทำให้เกิดแกนในแนวตั้งที่มีความดันต่ำ ซึ่งเป็นแกนของอากาศ (air core) ซึ่งการเกิดแกนอากาศนี้ เป็นการสูญเสียพลังงานจลน์

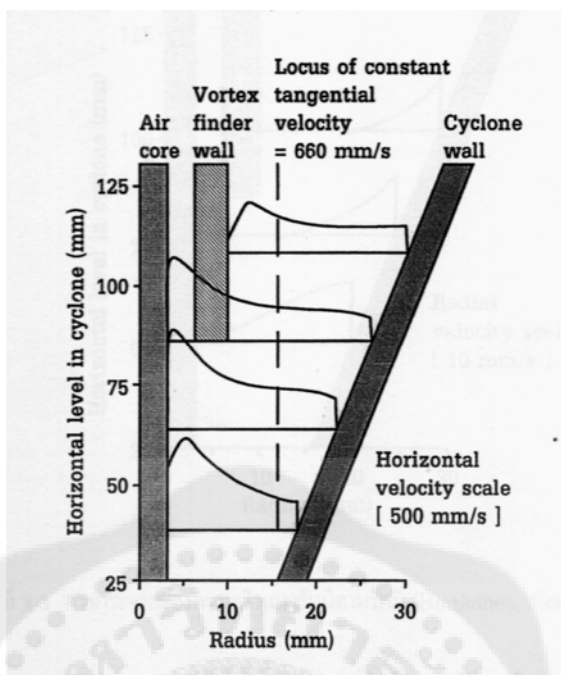
2.2.1 ความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity, v_t)

ที่บริเวณด้านล่างของปลาย vortex finder ความเร็วแนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีลดลง จนถึงค่าหนึ่งซึ่งรัศมีน้อยกว่ารัศมีของ vortex finder ดังภาพประกอบ 3 สามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ ดังนี้

$$V_t^n = \text{constant} \quad (2.1)$$

เมื่อ $0.6 \leq n \leq 0.9$ และขณะที่รัศมีลดลงต่อไปอีก ความเร็วแนวสัมผัสจะลดลงโดยที่ความเร็วแนวสัมผัส แปรผกผันโดยตรงกับรัศมี “r” จนกระทั่งถึงบริเวณแกนอากาศ (air core)

ส่วนบริเวณด้านบนเหนือปลายของ vortex finder ขึ้นไป ความเร็วแนวสัมผัสยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับตอนแรกถึงแม้ว่าจะไม่ค่อยถูกต้องนักที่บริเวณใกล้กับผนังของไฮโดรไซโคลน โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณใกล้ๆ กับผนังด้านบนนอกของ vortex finder และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงผนัง นอกจากนี้แล้วความเร็วแนวสัมผัสยังไม่ขึ้นกับตำแหน่งในแนวตั้ง

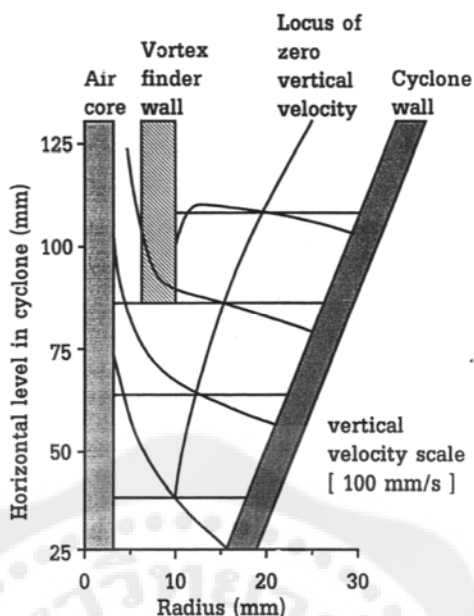


ภาพประกอบ 3 แสดงความเร็วในแนวสัมผัส (v_t) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย

ที่มา : Heiskanen. (1993). p. 64.

2.2.2 ความเร็วในแนวแกน (axial velocity, v_a)

การไหลของของเหลวด้วยความเร็วแนวแกนนั้น มีความจำเป็นอย่างมากในการทำงานของไฮโดรไซโคลน เพราะว่ามันเอาอนุภาคไหลออกมา จากภาพประกอบ 4 บริเวณด้านล่างของปลาย vortex finder จากผนังของแกนอากาศ จนถึง LZVV (locus zero vertical velocity) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วแนวแกนเป็นศูนย์ การไหลของของเหลวจะไหลขึ้นข้างบนและออกสู่ทางออกด้านบน (overflow) ส่วนของเหลวที่เหลือ ตั้งแต่บริเวณ LZVV ถึงผนังของกรวยจะไหลลงมา และออกสู่ทางออกด้านล่าง (underflow) ที่บริเวณ vortex finder นั้น ของเหลวจะมีความเร็วสูงสุดและไหลลงมาที่บริเวณใกล้ๆ กับผนังของไฮโดรไซโคลนช่วงหนึ่งและขณะที่ความเร็วแนวแกนลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ของเหลวจะเริ่มไหลขึ้นจนมีความเร็วแนวแกนสูงสุดและลดลงจนเป็นศูนย์ในที่สุดอีกครั้ง ของเหลวจะไหลลงจนมีความเร็วแนวแกนที่มีค่าค่อนข้างมากที่บริเวณใกล้ๆ ผนังด้านบนของ vortex finder

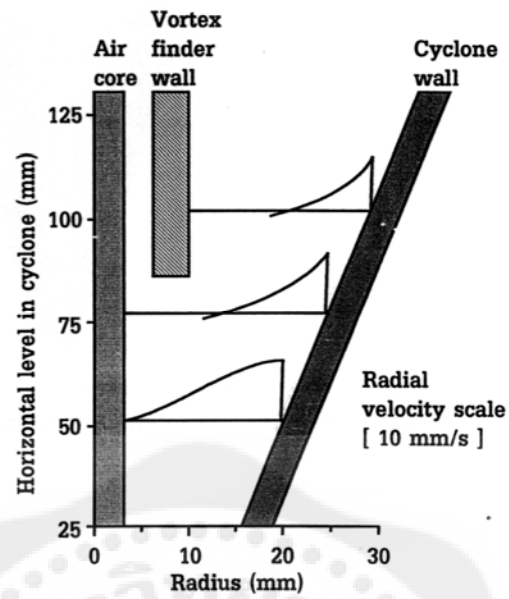


ภาพประกอบ 4 แสดงความเร็วในแนวแกน (v_a) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย

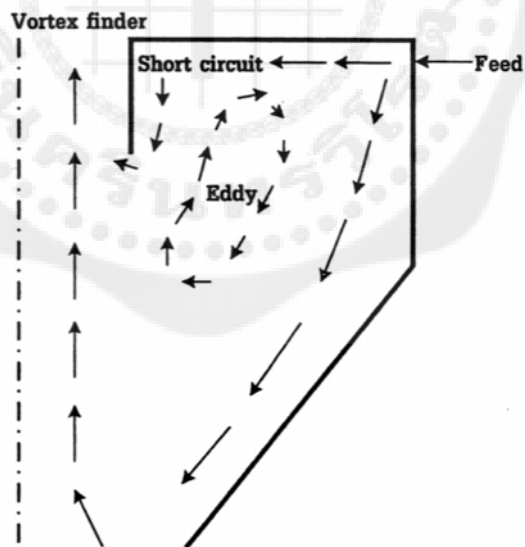
ที่มา : Heiskanen. (1993). p. 168.

2.2.3 ความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity, v_r)

ความเร็วของของเหลวในแนวรัศมี จากภาพประกอบ 5 พบว่าความเร็วแนวรัศมีซึ่งเข้ามาด้านในและขนาดของความเร็วแนวรัศมีจะลดลงเมื่อรัศมีลดลง และยังไม่รู้ว่าคุณสมบัติจะค่อยๆ ลดลงจนกลายเป็นศูนย์ที่แกนอากาศหรือไม่ เนื่องจากความยากในการวัดความเร็วที่ระดับเหนือปลาย vortex finder ของเหลวอาจจะมีการเคลื่อนที่ออกไปด้านนอกตามแนวรัศมี เพราะว่ามี การไหลแบบหมุนวนและที่บริเวณใกล้ๆ แผ่นปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลอนอาจจะมี ความเร็วแนวรัศมี ซึ่งมีทิศทางเข้ามาด้านในตามแนวรัศมีอย่างรุนแรง กระทำโดยตรงต่อส่วนที่ยื่น ของ vortex finder ซึ่งเป็นส่วนที่สนับสนุนให้เกิดการไหลลัดกระแส (short circuit flow) ที่ผนังด้านนอกของ vortex finder หรือ eddy flows ดังภาพประกอบ 6



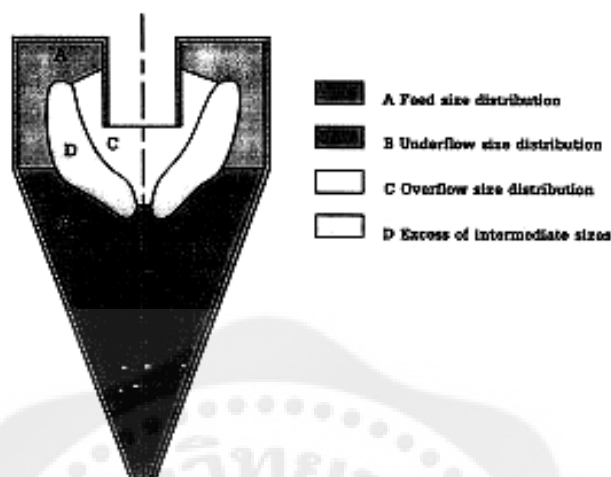
ภาพประกอบ 5 แสดงความเร็วในแนวรัศมี (v_r) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนนกรวย
 ที่มา : Heiskanen. (1993). p. 165.



ภาพประกอบ 6 แสดงการเกิด short circuit และ eddy flows

ที่มา : Heiskanen. (1993). p. 165.

จากองค์ประกอบต่างๆ ของความเร็วของของเหลวสามารถที่จะแสดงเป็นลักษณะของภาพที่เป็นตัวแทนรูปแบบการไหลของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอนได้ดังภาพประกอบ 7



ภาพประกอบ 7 แสดงรูปแบบการไหลของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอน

ที่มา : Heiskanen. (1993). p. 166.

2.3 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอน

2.3.1 การแยกไหลและอัตราส่วนการไหล (Flow split)

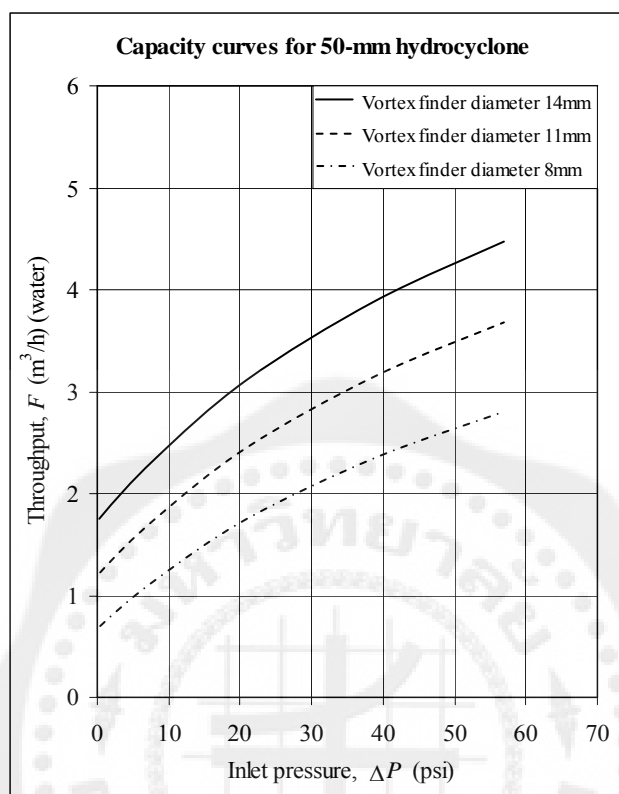
อัตราส่วนการแยกไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลอน มีความสัมพันธ์กับปริมาณของไหลทางด้านบนและของไหลทางด้านล่าง แสดงถึงประสิทธิภาพการแยกไหลในเชิงปริมาณ

$$S = \frac{\text{underflow rate}}{\text{overflow rate}} \quad (2.2)$$

$$R_f = \frac{S}{S+1} \quad (2.3)$$

2.3.2 ความดันลด (Pressure Drop, ΔP)

ความดันลดเป็นตัวแปรตัวแรกที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน ซึ่งความดันจะมีค่าแปรผันตามอัตราการไหลของสารป้อน (Feed flowrate) การหาค่าความดันจะหาได้จากเครื่องมือวัดค่าความดันในส่วนที่มีการไหลของของผสมเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลสามารถนำไปเขียนกราฟความจุได้ดังภาพประกอบ 8



ภาพประกอบ 8 กราฟแสดงความจุกับปริมาณอัตราการไหลของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

ที่มา : Kraipech. (2002).

การเพิ่มความดันจะทำให้ปริมาณของของผสมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน มีปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปทรงของไฮโดรไซโคลน และอาจจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของตัวอุปกรณ์

2.3.3 อัตราส่วนการไหลสู่อันเดอร์โฟล (Flow Recovery to Underflow, R_f)

อัตราส่วนการไหลสู่อันเดอร์โฟล (Flow Recovery to Underflow, R_f) หรือ อัตราส่วนการไหลผ่าน (Throughput ratio) สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลในอันเดอร์โฟลของไฮโดรไซโคลนและอัตราการไหลของสารป้อนทางเข้าไฮโดรไซโคลน ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

$$R_f = \frac{U}{F} \quad (2.4)$$

และจากการสมดุลมวลของไฮโดรไซโคลอนจะได้

$$F = O + U \quad (2.5)$$

- เมื่อ F คือ อัตราการไหลของของผสมทางเข้าของไฮโดรไซโคลอน
 O คือ อัตราการไหลของของผสมที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอน
 U คือ อัตราการไหลของของผสมที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน

อัตราการสั่นไหลแยก (Flow split, S) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรอัตราการไหลสู่อันเดอร์โฟล ต่อปริมาตรอัตราการไหลของของผสมที่ทางออกด้านบนของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์

$$S = \frac{U}{O} \quad (2.6)$$

จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ใหม่ของอัตราส่วนการไหลสู่อันเดอร์โฟล ได้ดังนี้

$$R_f = \frac{S}{S+1} \quad (2.7)$$

และสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำที่ไหลออกสู่อันเดอร์โฟล (Water recovery to underflow, R_w) ในเทอมของอัตราไหลออกสู่ด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนได้ดังนี้

$$R_w = \frac{R_f - R_s \phi_{sf}}{(1 - \phi_{sf})} \quad (2.8)$$

- เมื่อ R_s คือ อัตราส่วนของของแข็งที่แยกได้ทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน
 ϕ_{sf} คือ สัดส่วนของของแข็งที่อยู่ในของผสมทางเข้า

2.3.4 อัตราส่วนของแข็งแยกได้ (Solid Recovery)

อัตราส่วนของแข็งแยกได้ คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของของแข็งใน Underflow ความเข้มข้นของของแข็งใน Feed

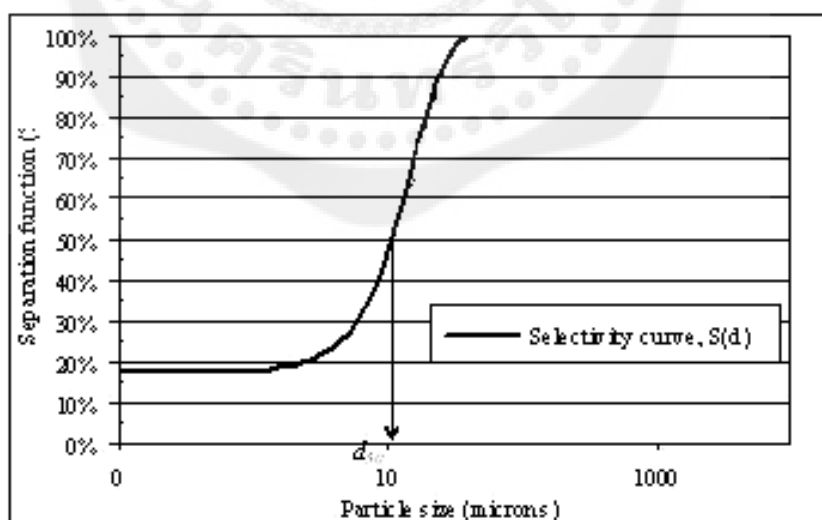
$$\text{Solid Recovery} = \frac{\phi_{su}}{\phi_{sf}} \times 100 \quad (2.9)$$

เมื่อ ϕ_{su} คือ อัตราส่วนของของแข็งที่แยกได้ทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน

ϕ_{sf} คือ สัดส่วนของของแข็งที่อยู่ในของผสมทางเข้า

2.3.5 Selectivity Function, $S(d)$

Selectivity Function, $S(d)$ เป็นตัวที่ใช้บ่งบอกถึงสมรรถนะในการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน ซึ่ง Selectivity Function ปกติสามารถหาได้จากการทดลอง $S(d) = U(d)/F(d)$ แสดงดังภาพประกอบ 9 ซึ่งเส้นโค้งของ Selectivity Function นี้จะไม่ผ่านจุดอริจิน (Origin) เนื่องจากว่ามีส่วนหนึ่งของของผสม ไหลลงสู่อันเดอร์โฟลโดยไม่ผ่านการขบวนการแยก ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้มีของแข็งไหลติดออกไปกับของไหลส่วนนี้ และอัตราส่วนของแข็งที่ไหลติดออกไปกับของไหลเท่ากับ อัตราส่วนของน้ำที่ไหลออกสู่อันเดอร์โฟลของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน



ภาพประกอบ 9 กราฟแสดงโค้ง Selectivity Function

ที่มา : Kraipech. (2002).

2.3.6 Cut Size Correlation

cut size, d_{50} เป็นตัวกำหนดอีกตัวหนึ่งเพื่อใช้ในการหาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ซึ่งหาได้จากขนาดของอนุภาค แสดงผลของการแยกสารทางออกโอเวอร์โฟล และอันเดอร์โฟล เท่ากัน หาได้จากกราฟเส้นโค้งของ Selectivity Function ซึ่งแสดงดังภาพประกอบ 9 และค่า cut size มีความสำคัญมากเพราะว่ามันถูกใช้เป็นที่บ่งบอกถึงสมรรถนะในการทำงานของไฮโดรไซโคลน

การลดขนาด cut size เป็นการเพิ่มสมรรถนะของไฮโดรไซโคลน โดยสามารถทำได้ดังนี้

1. ลดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน
2. ลดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของไฮโดรไซโคลน
3. ลดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของไฮโดรไซโคลน



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลอง ใช้ชุดทดลองการหาประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน ประกอบด้วย อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน 3 แบบ คือ 1. อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน 2. อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน 3. อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนในแนวแกน โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100 – 1000 ไมครอน ผสมน้ำเป็นสารป้อนที่ใช้ทำการทดลอง และทดลองที่ความดันลดในไฮโดรไซโคลนในช่วง 10 ถึง 55 psi ความเข้มข้นของสารผสมเท่ากับ 1%, 3% และ 5% โดยปริมาตร รายละเอียดของชุดทดลองไฮโดรไซโคลนตามภาพประกอบ 10

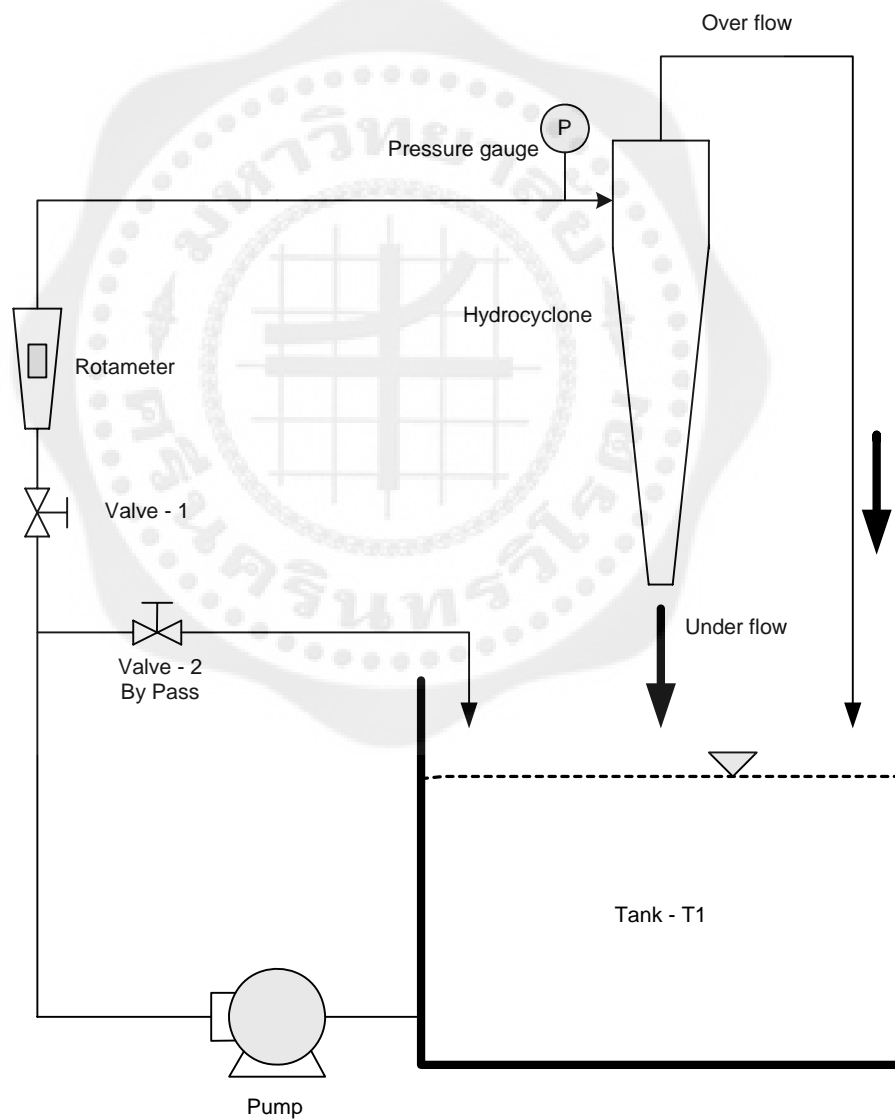
1. สารเคมี

1. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ขนาด 100 – 1000 ไมครอน จาก บริษัท ปูนซิเมนต์ไทย (แก่งคอย) จำกัด
2. น้ำที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

2. อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1. อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน
 - 1.1 แบบมาตรฐาน
 - 1.2 แบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน
 - 1.3 แบบมีแกนโลหะหมุนในแนวแกน
2. ชุดทดลองไฮโดรไซโคลน
 - 2.1 บีม ขนาด 2 แรงม้า
 - 2.2 Rotameter ขนาด 10 – 180 ลิตรต่อนาที
 - 2.3 ท่อเหล็กกล้าปั๊วไนส์ ขนาด 2 นิ้ว, 1.5 นิ้ว, 1 นิ้ว
 - 2.4 เกจวาล์ว ขนาด 1.5 นิ้ว, 1 นิ้ว
 - 2.5 เกจวัดความดันสำหรับน้ำ ขนาด 0 – 70 psi
3. ถังพลาสติก ขนาด 150 ลิตร

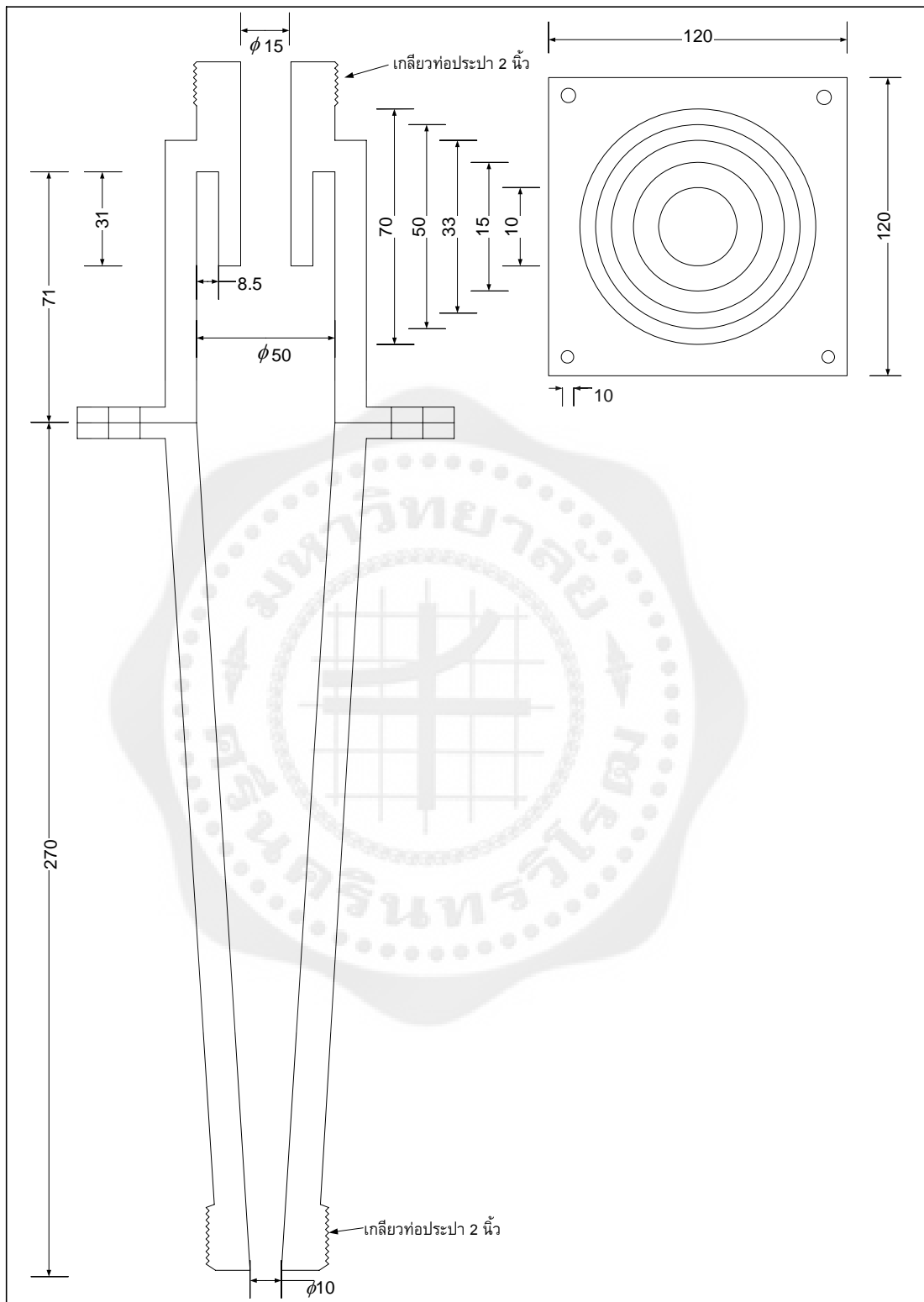
4. เข็บอกพลาสติก ขนาด 5 ลิตร
5. กระบอกตวง ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
6. ปีกเกอร์ ขนาด 1,500 มิลลิลิตร
7. ซ้อนตักสาร
8. ขวดเก็บสารตัวอย่าง ขนาด 50 มิลลิลิตร
9. นาฬิกาจับเวลา CASIO
10. เทอร์โมมิเตอร์ ขนาด 0 – 100 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 10 แผนภาพแสดงชุดทดลองไฮโดรไซโคลน



ภาพประกอบ 11 ชุดทดลองไฮโดรไลคอลน



ภาพประกอบ 12 ขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ทำการทดลอง



ภาพประกอบ 13 ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (HC) ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่ง (HF)
ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน (HR)

3. วิธีทดลอง การแยกของแข็ง – ของเหลว โดยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน

วิธีทดลอง

1. ทำการบันทึกภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน และบริเวณทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ณ ความดันลดที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 psi
2. ทำการบันทึกภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน และบริเวณทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน ณ ความดันลดที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 psi

3. ทำการบันทึกภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน และบริเวณทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน ณ ความดันลดที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 psi

ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน

วิธีทดลอง

ทำการบันทึกภาพลักษณะการไหล ของสารแขวนลอยสีแดง ความเข้มข้น 0.2 %vol ความดันลด 35 psi ภายในไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

ตอนที่ 3 การทดลองเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve)

วิธีทดลอง

1. การสร้างกราฟมาตรฐาน capacity curve
 - 1.1 นำน้ำจำนวน 100 ลิตรเทลงใน tank เพื่อเตรียมทำการทดลอง
 - 1.2 ทำการเปิดวาล์ว Valve2 และเปิดปั๊ม เพื่อสูบน้ำเข้าสู่ระบบ
 - 1.3 ค่อยๆ เปิดวาล์ว Valve1 เพื่อให้ น้ำไหลผ่าน และปรับวาล์วจนความดันลดได้ 10 psi รอจนสภาวะคงที่
 - 1.4 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรน้ำ ที่ไหลออกจากด้านล่างของไฮโดรไซโคลน และไหลออกจากด้านบนของไฮโดรไซโคลน พร้อมทำการจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง
 - 1.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1.3 - 3.1.4 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi
 - 1.6 นำอัตราการไหลที่ได้จากการวัดและที่อ่านค่าได้จากโรตاميเตอร์ทั้งหมดมาสร้างกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve)

ตอนที่ 4 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน

วิธีทดลอง

1. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดและความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

1.1 นำสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต 1 %vol. เเทลงใน tank และเก็บสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาตร 30 ml ไปทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของอนุภาคโดยเครื่อง Mastersizer S

1.2 ทำการเปิดวาล์ว Valve2 และเปิดปั๊มเพื่อสูบสารละลายเข้าสู่ระบบ

1.3 ค่อยๆ เปิดวาล์ว Valve1 เพื่อให้สารละลายไหลผ่านและปรับวาล์วจนความดันลดได้ 10 psi รอจนสภาวะคงที่

1.4 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรของสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนและด้านล่างของ ไฮโดรไซโคลน พร้อมทำการจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง

1.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.1.3 - 4.1.4 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi

1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.1.3 - 4.1.5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 3%vol. และ 5 %vol.

1.7 นำผลการทดลองที่ได้จากการแยกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ไปทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวโดยเครื่อง Mastersizer S

2. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดและความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อ ประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่นิ่ง

2.1 นำสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต 1 %vol. เเทลงใน tank และเก็บสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาตร 30 ml ไปทำการวิเคราะห์หาค่าการกระจายตัวของอนุภาคโดยเครื่อง Mastersizer S

2.2 ทำการเปิดวาล์ว Valve2 และเปิดปั๊มเพื่อสูบสารละลายเข้าสู่ระบบ

2.3 ค่อยๆ เปิดวาล์ว Valve1 เพื่อให้สารละลายไหลผ่านและปรับวาล์วจนความดันลดได้ 10 psi รอจนสภาวะคงที่

2.4 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรของสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนและด้านล่างของ ไฮโดรไซโคลน พร้อมทำการจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง

2.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.2.3 - 4.2.4 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi

2.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.2.3 - 4.2.5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 3%vol และ 5 %vol.

2.7 นำผลการทดลองที่ได้จากการแยก ด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายตัวโดยเครื่อง Mastersizer S

3. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดและความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน

3.1 นำสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต 1 %vol. เทลงใน tank และเก็บสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนตปริมาตร 30 ml ไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายตัวของอนุภาคโดยเครื่อง Mastersizer S

3.2 ทำการเปิดวาล์ว Valve2 และเปิดปั๊มเพื่อสูบสารละลายเข้าสู่ระบบ

3.3 ค่อยๆ เปิดวาล์ว Valve1 เพื่อให้สารละลายไหลผ่านและปรับวาล์วจนความดันลดได้ 10 psi รอจนสภาวะคงที่

3.4 นำกระบอกรวบรวมวัดปริมาตรของสารละลายที่ไหลออกจากด้านบนและด้านล่างของ ไฮโดรไซโคลน พร้อมทำการจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง

3.5 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.3.3 - 4.3.4 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi

3.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 4.3.3 - 4.3.5 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 3%vol. และ 5%vol.

3.7 นำผลการทดลองที่ได้จากการแยก ด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน ไปทำการวิเคราะห์หาการกระจายตัวโดยเครื่อง Mastersizer S

บทที่ 4

ผลและวิเคราะห์ผล

การศึกษานี้ เป็นการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนขนาดเดียวกัน 3 แบบ คือ ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน, ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่ในแนวแกน และไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ 1. การทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน 2. การทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน 3. การทดลองเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve) 4. การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ

ในการทดลอง ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 – 1000 ไมครอน ผสมกับน้ำ เป็นของผสม ความเข้มข้น 1 %vol, 3 %vol และ 5 %vol และทำการทดลองที่ ความดันลดเดียวกัน ตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi

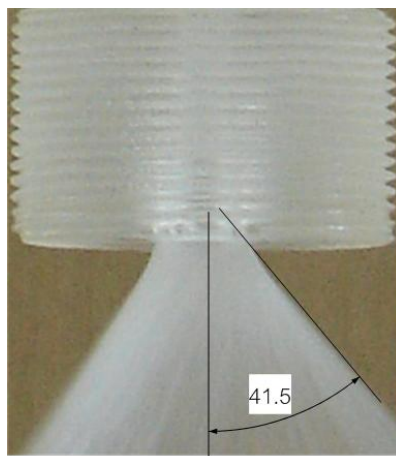
ผลการทดสอบ

ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน

ตอนที่ 1.1 บันทึกภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลนบริเวณแกนอากาศ (Air core) และบริเวณทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ณ ความดันลดที่ 30 psi ส่วนความดันอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ข.



ภาพประกอบ 14 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 30 psi

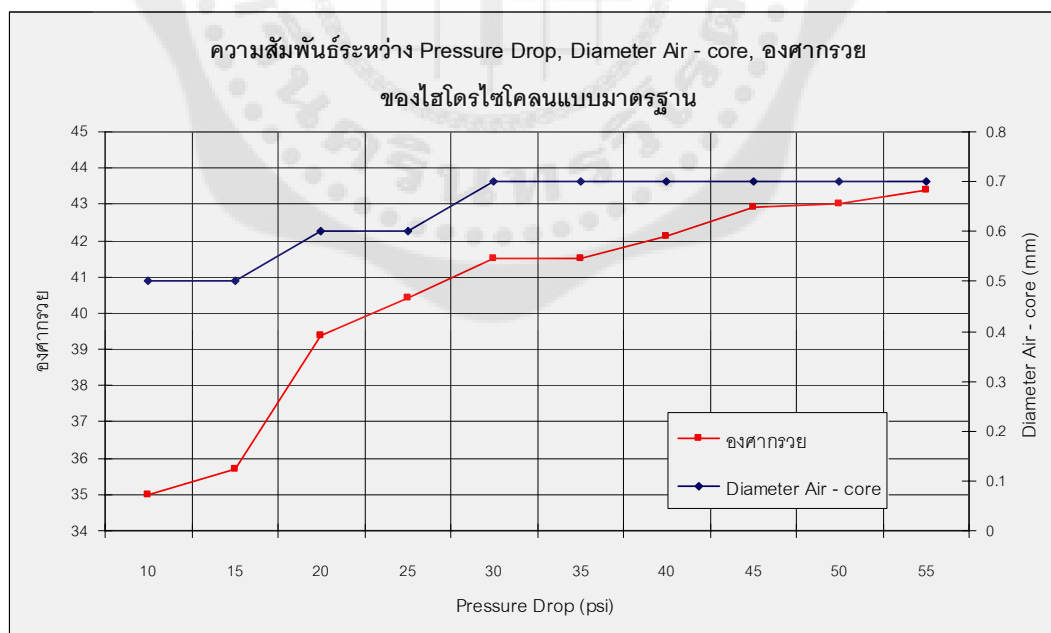


ภาพประกอบ 15 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 30 psi

จากผลการทดลอง การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi กับขนาดของ แกนอากาศ (Air - core) พบว่าเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของ Air - core จะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามลำดับ และรูปร่างของ Air - core ไม่เป็นทอตรง และจากการศึกษาความสัมพันธ์ ระหว่างความดันลดที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi กับขนาดของกรวยทางออกด้านล่าง แสดงให้เห็นว่า เมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น ลักษณะของกรวยทางออกด้านล่าง จะมีมุมองศาที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันลดจะมีผลต่อขนาดของ Air core และองศาของกรวยทางออกด้านล่าง แสดงตามตาราง 1 และภาพประกอบ 16

ตาราง 1 มุมองศาของกรวยทางออกด้านล่างและ ขนาดของ Air – core

Δp (psi)	องศากรวย (θ)	Diameter Air – core (mm)
10	35.0 °	0.5
15	35.7 °	0.5
20	39.4 °	0.6
25	40.4 °	0.6
30	41.5 °	0.7
35	41.5 °	0.7
40	42.1 °	0.7
45	42.9 °	0.7
50	43.0 °	0.7
55	43.4 °	0.7

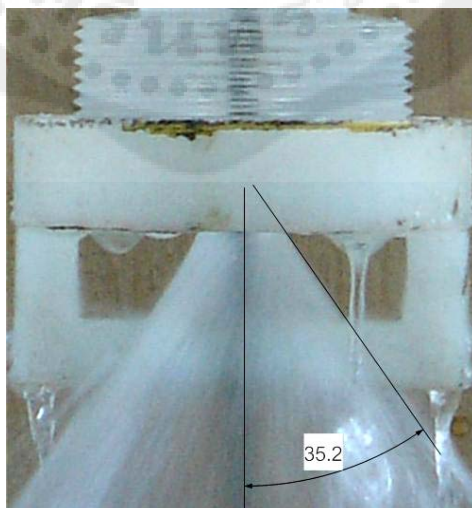


ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแกนอากาศและ องศากรวยทางออกด้านล่าง

ตอนที่ 1.2 บันทึกภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลนบริเวณแกนอากาศ (Air core) และบริเวณทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่ง ณ ความดันลดที่ 20 psi และ 40 psi ส่วนความดันอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ข.



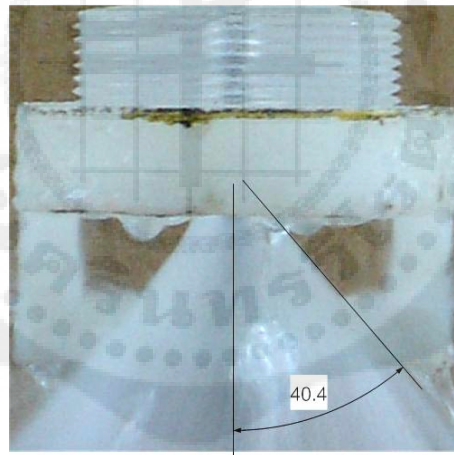
ภาพประกอบ 17 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 20 psi



ภาพประกอบ 18 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 20 psi



ภาพประกอบ 19 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 40 psi

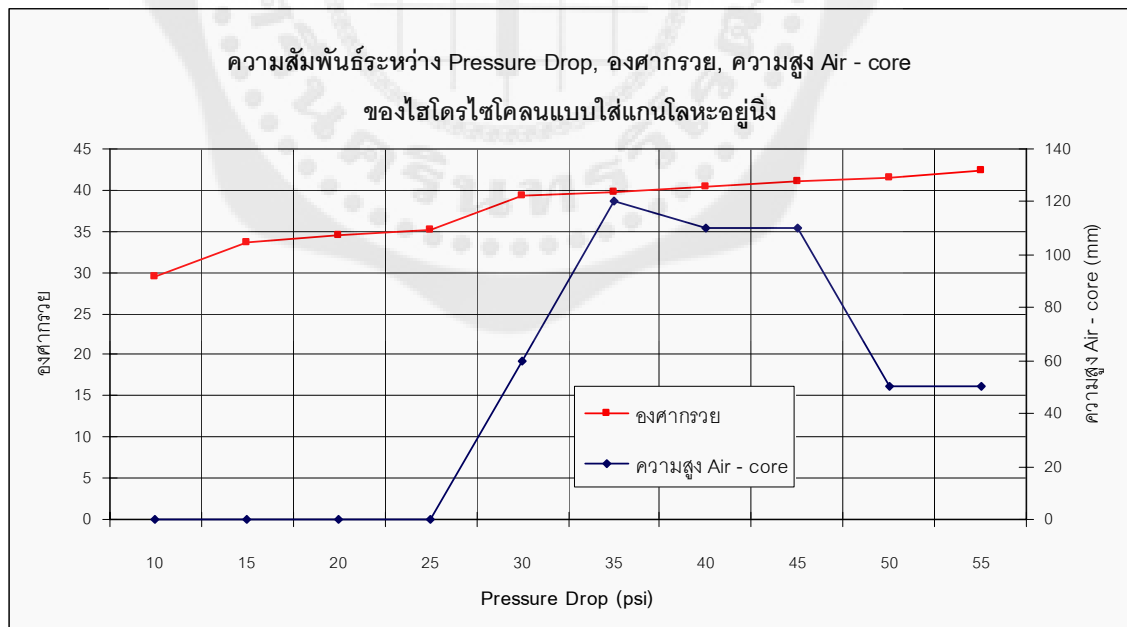


ภาพประกอบ 20 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 40 psi

จากผลการทดลอง การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi กับขนาดของ แกนอากาศ (Air - core) พบว่าเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น จะเกิดแกนอากาศหุ้มรอบแกนโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 6 mm แต่เกิดขึ้นกับบาง ความดันเท่านั้น และความสูงของแกนอากาศที่เกิดขึ้นก็ไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแกนโลหะอยู่ ึ่งสามารถกำจัดแรงเสียดทานได้ที่บางความดันเท่านั้น ส่วนลักษณะของกรวยทางออกด้านล่าง จะมีมุมมองที่เพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงตามตาราง 2 และภาพประกอบ 21

ตาราง 2 มุมองศาของกรวยทางออกด้านล่างและ ความสูงของ Air - core

Δp (psi)	องศากรวย (θ)	Diameter Air - core (mm)
10	29.4 °	-
15	33.7 °	-
20	34.5 °	-
25	35.2 °	-
30	39.3 °	60
35	39.8 °	120
40	40.4 °	110
45	41.0 °	110
50	41.6 °	50
55	42.3 °	50

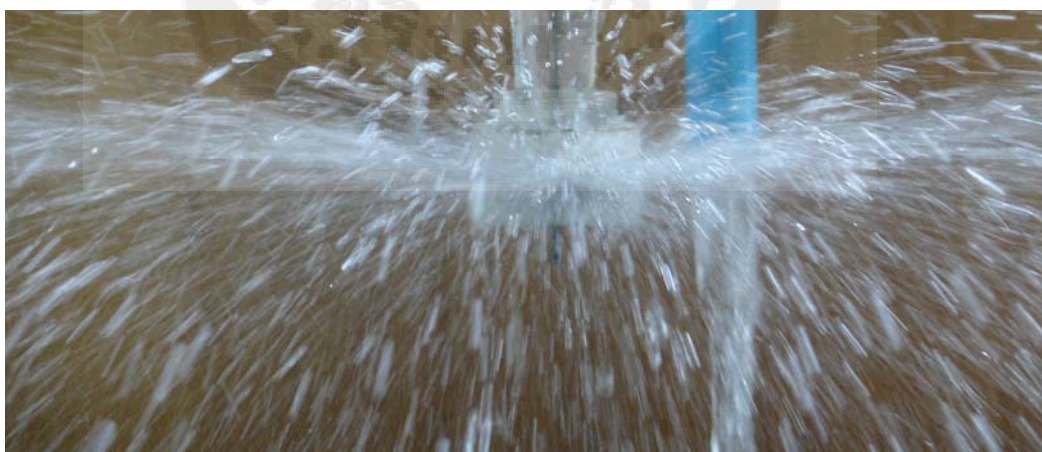


ภาพประกอบ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับความสูงแกนอากาศ และองศากรวยทางออกด้านล่าง

ตอนที่ 1.3 บันทึกภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลนบริเวณแกนอากาศ (Air core) และบริเวณทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน ณ ความดันลดที่ 35 psi ส่วนความดันอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ข.



ภาพประกอบ 22 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 35 psi

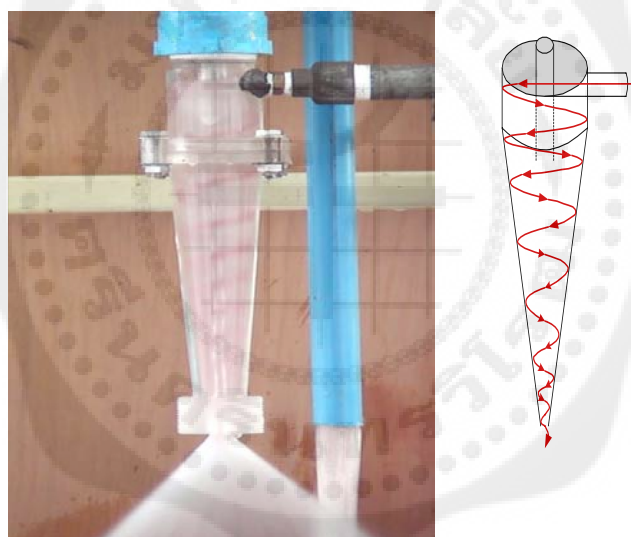


ภาพประกอบ 23 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 35 psi

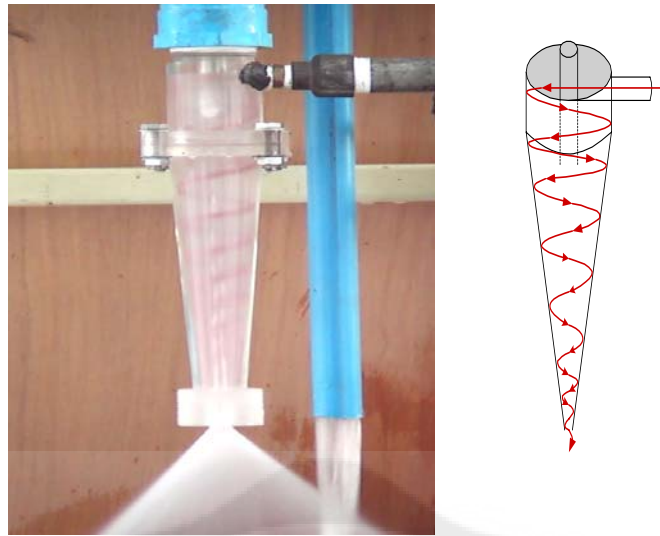
จากผลการทดลอง การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความดันที่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน กับขนาดของแกนอากาศ (Air - core) พบว่าเมื่อแกนโลหะหมุน Air - core ภายในไฮโดรไซโคลนหายไป การเพิ่มความดัน จะทำให้ความเร็วในการหมุนของแกนโลหะเพิ่มขึ้น กรวยทางออกด้านล่างจะพุ่งกระจายตรงบริเวณทางออกด้านล่างมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแกนโลหะหมุนสามารถลดเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนได้จริง

ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อสังเกตลักษณะการไหลของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลน

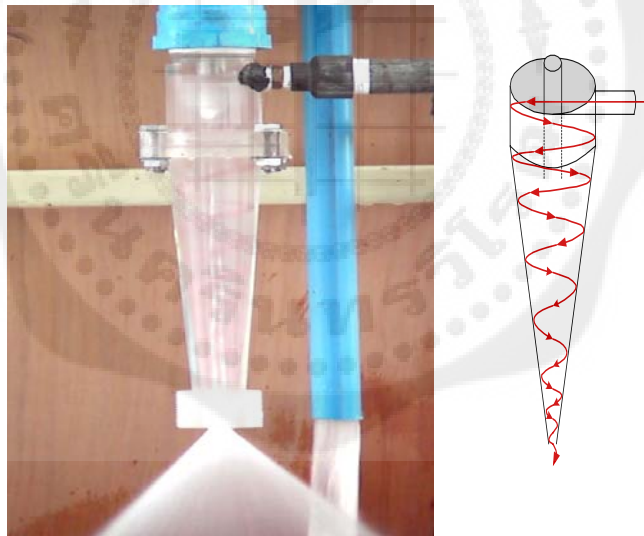
บันทึกภาพลักษณะการไหลของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลนของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ที่ความดัน 35 psi ความเข้มข้น 0.02 %vol



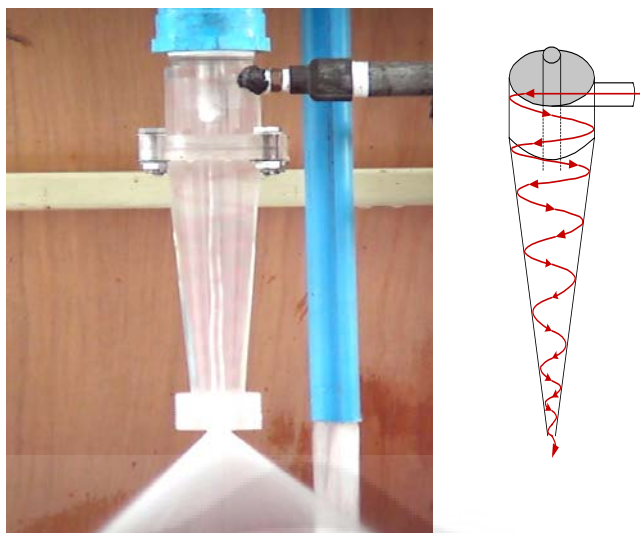
ภาพประกอบ 24 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.00 วินาที



ภาพประกอบ 25 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.005 วินาที



ภาพประกอบ 26 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.01 วินาที

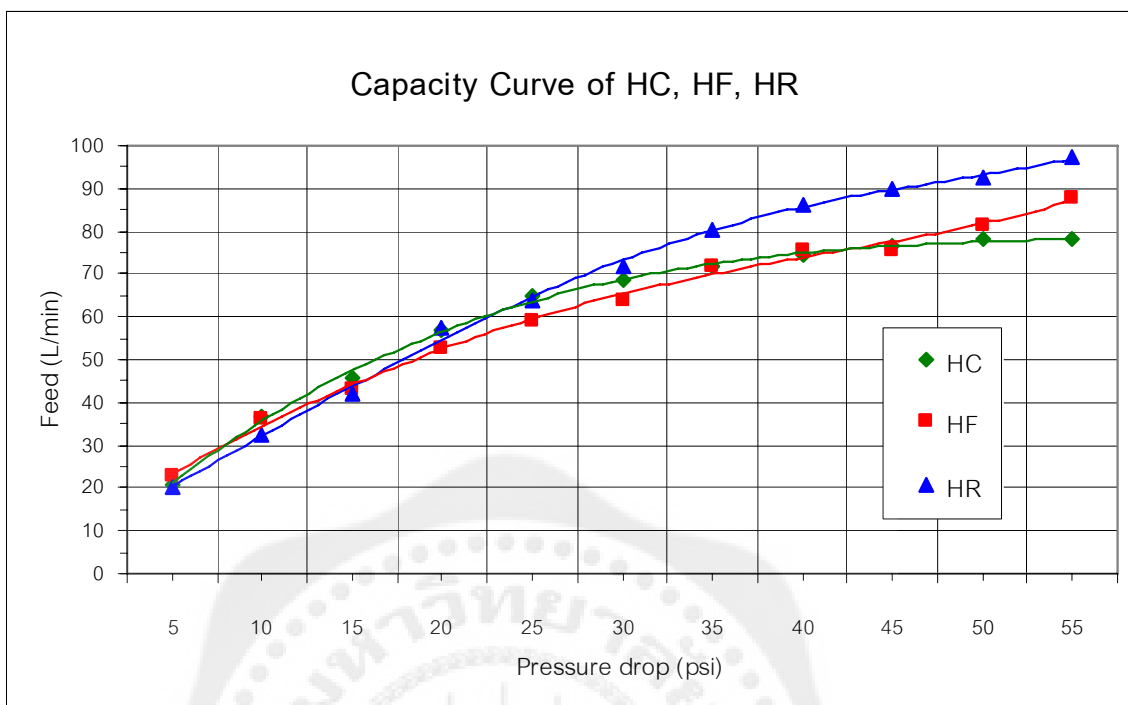


ภาพประกอบ 27 ลักษณะเส้นการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลน ที่ 0.015 วินาที

จากภาพประกอบที่ 25, 26, 27 และ 28 แสดงลักษณะการไหลของอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน แสดงให้เห็นว่า เมื่อป้อนสารแขวนลอยด้วยความดันสูงเข้าไปในไฮโดรไซโคลน ของเหลวจะเกิดการไหลหมุนวน เป็นผลให้เกิดแรงเหวี่ยงกระทำต่ออนุภาคซึ่งมีผลทำให้อนุภาคถูกผลักให้ไหลไปติดผนังด้านข้างของไฮโดรไซโคลน โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลว ของแข็งจะเคลื่อนที่ไปตามผนังด้วยแรงหนีศูนย์กลางและหมุนเป็นวงลงสู่ทางไหลออกด้านล่างตรงส่วนปลาย เมื่อของไหลเข้าใกล้ศูนย์กลางจะเกิดมีทิศทางทวนกลับและหมุนเป็นวงขึ้นไป ผ่านท่อกระแสนอกทางด้านบน

ตอนที่ 3 การทดลองเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับอัตราการไหล (capacity curve)

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ Capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ โดยใช้ น้ำ RO เป็นสารทดสอบ ทำการทดลองที่ความดันเดียวกัน ตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi ดังภาพประกอบ 82



ภาพประกอบ 28 การเปรียบเทียบ Capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ โดยใช้ น้ำ RO เป็นสารทดสอบ

จากภาพประกอบ 29 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ จากกราฟพบว่า ไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ให้ผลทำนองเดียวกัน

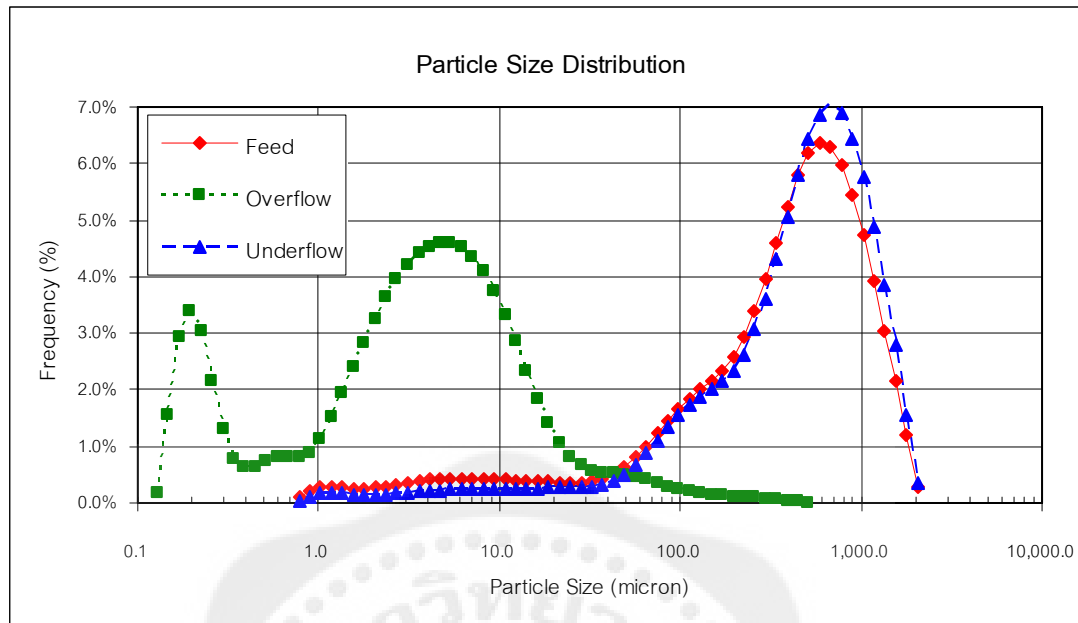
ในช่วงความดันต่ำ ที่ความดัน 5 – 20 psi อัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ มีค่าใกล้เคียงกัน ที่ความดัน 10 psi อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน เท่ากับ 36.6 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่ง เท่ากับ 36.00 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน เท่ากับ 32.40 ลิตรต่อนาที เนื่องจากที่ความดันต่ำ ลักษณะการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลนยังไม่สมบูรณ์ (fully developed)

ในช่วงความดันสูง ที่ความดัน 25 – 55 psi อัตราการไหลเข้าเริ่มแตกต่างกันเมื่อความดันเริ่มเข้าสู่ 30 psi โดย อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน เท่ากับ 68.4 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่ง เท่ากับ 63.6 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน เท่ากับ 72.00 ลิตรต่อนาที เนื่องจากไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่ง มีแรงเสียดทานตรงแกนอากาศเพิ่มขึ้น เพราะแกนโลหะไม่ได้หมุนตามทิศทางการไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลน อัตราการไหลเข้าจึงน้อยกว่าไฮโดรไซโคลน

แบบมาตรฐาน และแบบมีแกนโลหะหมุน แต่ในไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน แกนโลหะหมุนตามทิศทางการไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลน ทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตรงแกนกลางของไฮโดรไซโคลนลดน้อยลง ทำให้อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนมากขึ้นกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน และอัตราการไหลเข้าของของไหลแตกต่างกันมากขึ้นเมื่อความดันเพิ่มขึ้น จนถึงความดันสูงสุดที่ 55 psi อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน เท่ากับ 78.00 ลิตรต่ออนาที อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่ง เท่ากับ 87.60 ลิตรต่ออนาที และอัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน เท่ากับ 97.20 ลิตรต่ออนาที เนื่องจาก แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นตรงแกนกลางของไฮโดรไซโคลนลดลง แต่สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน แรงเสียดทานที่เกิดจากแกนอากาศมีผลทำให้ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานมีอัตราการไหลเข้าที่น้อยที่สุด และในไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่ง เกิดแกนอากาศรอบๆ แกนโลหะ ทำให้มีอัตราการไหลเข้าที่น้อยไปด้วย แต่สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน อัตราการไหลเข้าเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจาก แกนโลหะหมุนตามการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน ทำให้แกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนหายไป ทำให้แรงเสียดทานภายในไฮโดรไซโคลนลดลงไปด้วย อัตราการไหลเข้าไฮโดรไซโคลนจึงสูงสุด และจากกราฟ สรุปได้ว่า อัตราการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่ง และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

ตอนที่ 4 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลดที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน

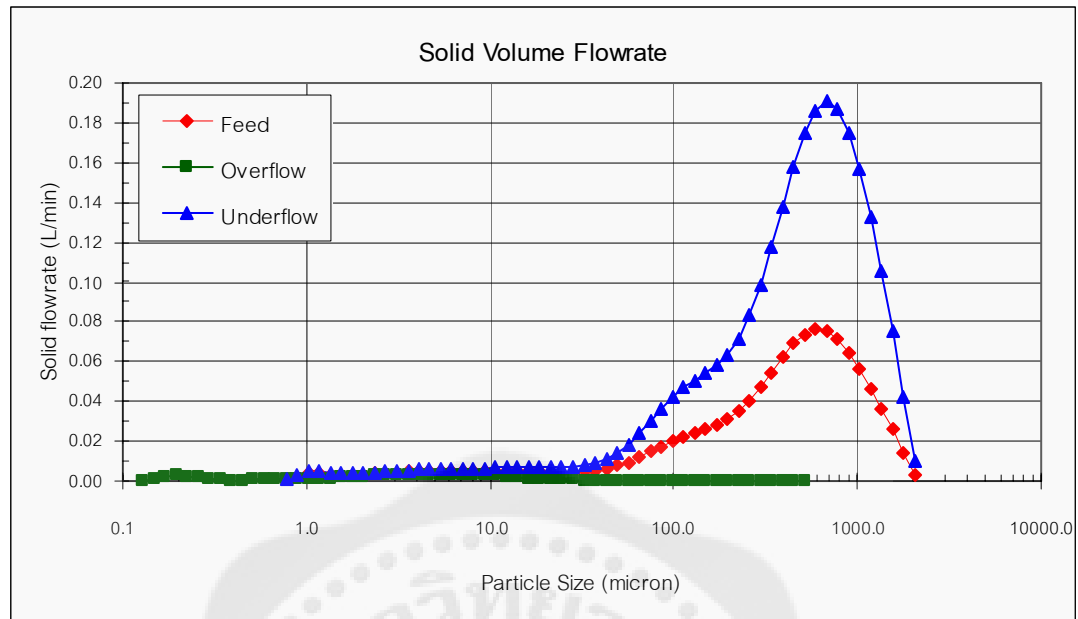
ตอนที่ 4.1 ผลการทดลองแสดงการกระจายตัวของผสมระหว่าง Feed, Overflow, Underflow ที่ ความเข้มข้น 5%vol ความดันลด 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ส่วนความดันอื่นๆ แสดงในภาคผนวก ค.



ภาพประกอบ 29 แสดงการกระจายตัวของของผสมที่ความเข้มข้น 5%vol ที่ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

จากภาพประกอบ 30 แสดงการกระจายตัวของของผสมที่ความเข้มข้น 5 %vol ที่ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน พบว่า การกระจายตัวของขนาดอนุภาคใน Underflow และใน Feed มีขนาดใกล้เคียงกัน ส่วนการกระจายตัวของขนาดอนุภาคใน Overflow จะมีเฉพาะอนุภาคขนาดเล็กเท่านั้น เนื่องจากในขณะที่ ทำการสูบของผสมป้อนเข้าไฮโดรไซโคลนนั้น อนุภาคเกิดการเสียดสีกับใบพัดบีม ทำให้มีอนุภาคบางส่วนมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน ซึ่งก็กระจายตัวออกสู่ทาง Overflow ด้วย

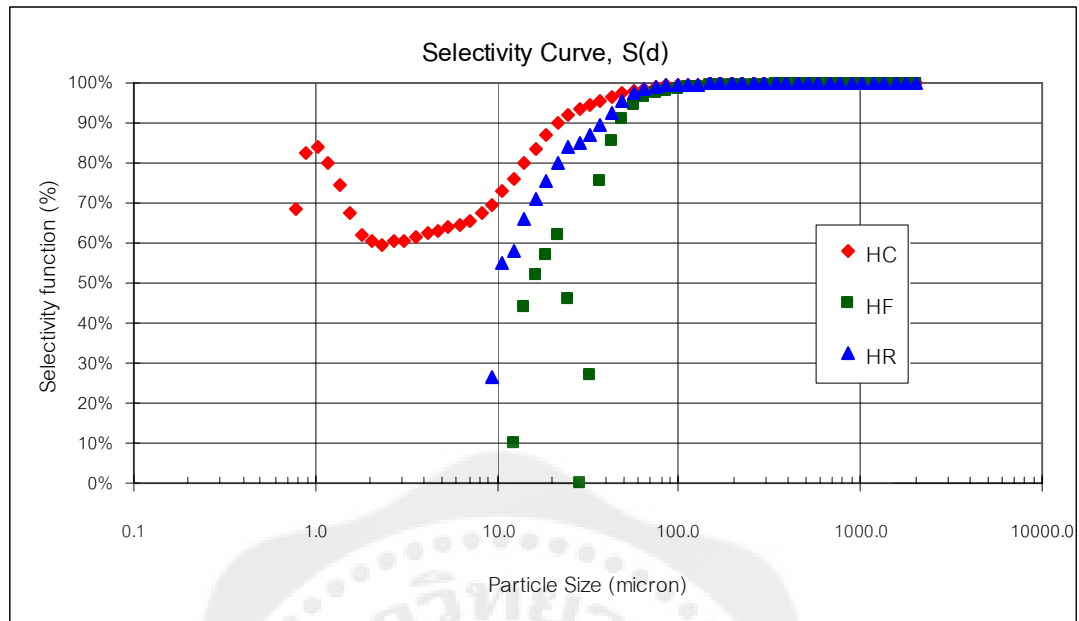
ผลการทดลองอัตราการไหลของของแข็งใน Feed, Overflow, Underflow ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ที่ความเข้มข้น 5%vol ความดันลด 30 psi ดังภาพประกอบ 30



ภาพประกอบ 30 แสดงอัตราการไหลของของแข็งที่ความเข้มข้น 5%vol ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

จากภาพประกอบ 31 แสดงอัตราการไหลของของแข็งที่ความเข้มข้น 5 %vol ที่ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน พบว่า อัตราการไหลของของแข็งใน Underflow มากกว่าใน Feed ประมาณ 2.5 เท่า และขนาดของอนุภาคก็มีเฉพาะขนาดใหญ่เท่านั้น ส่วนใน Overflow อัตราการไหลของอนุภาคมีน้อยมาก และขนาดของอนุภาคก็มีเฉพาะขนาดเล็กเท่านั้น

กราฟแสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ความเข้มข้น 5%vol ความดันลด 30 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ดังภาพประกอบ 31



ภาพประกอบ 31 แสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ความเข้มข้น 5%vol ความดัน 30 psi

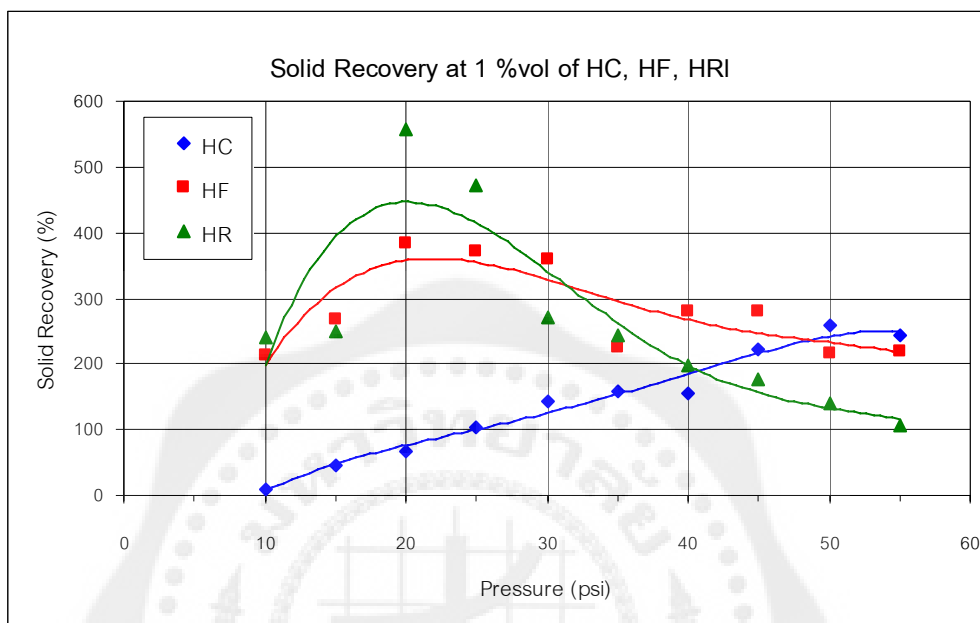
จากภาพประกอบ 32 แสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ความเข้มข้น 5 %vol ความดัน 30 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ พบว่า ประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนให้ประสิทธิภาพในการคัดขนาดดีที่สุด เนื่องจาก ค่าความชันของกราฟมีค่าสูงสุด ส่วนในกรณีของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ในช่วงแรกที่ขนาดอนุภาคประมาณ 1 – 2 ไมครอน เกิดการลดลงของกราฟการคัดขนาดอนุภาคนั้นเนื่องจากเกิดปรากฏการณ์ Fish - hook effect กล่าวคือ ในกลุ่มก้อนของอนุภาคขนาดใหญ่ขณะไหลภายในไฮโดรไซโคลนจะมีอนุภาคขนาดเล็กแทรกอยู่ภายในด้วย เมื่ออนุภาคขนาดใหญ่ ไหลวนลงสู่ทางออกด้านล่างก็ทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ด้วยกันติดออกมาด้วย

ตอนที่ 4.2 อัตราส่วนของแข็งแยกได้ (Solid Recovery) ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 %vol

ตาราง 3 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนทางเข้า, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านล่าง และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 1 % vol

1% vol													
Run	ΔP	ความเข้มข้นทางเข้า (%wt)			ความเข้มข้นทางออกด้านบน (%wt)			ความเข้มข้นทางออกด้านล่าง (%wt)			อัตราส่วนของแข็งแยกได้ (Solid Recovery (x100%))		
(No.)	(psi)	HC	HF	HR	HC	HF	HR	HC	HF	HR	HC	HF	HR
1	10	708.280	708.280	627.002	2.827	18.568	7.955	65.386	1512.652	1516.904	9.232	213.567	241.930
2	15	882.447	882.447	812.780	5.735	24.296	9.600	392.107	2372.126	2028.135	44.434	268.812	249.531
3	20	1103.058	1103.058	1114.670	8.684	32.892	15.898	735.641	4226.088	6218.533	66.691	383.125	557.881
4	25	1254.003	1254.003	1230.781	18.434	35.564	15.727	2285.346	3990.937	5811.342	104.695	370.846	472.167
5	30	1323.670	1323.670	1393.337	15.792	38.367	21.049	1888.872	4746.243	3768.885	142.700	358.567	270.493
6	35	1393.337	1393.337	1555.893	14.213	42.554	23.545	2196.908	3122.655	3801.755	157.672	224.113	244.346
7	40	1439.782	1439.782	1672.004	15.563	41.357	20.244	2235.721	4024.176	3291.724	155.282	279.499	196.873
8	45	1486.226	1486.226	1741.671	18.721	49.442	19.030	3285.704	4178.860	3068.440	221.077	281.173	176.178
9	50	1509.448	1509.448	1788.116	24.926	43.270	19.565	3906.278	3258.639	2514.793	258.788	215.883	140.639
10	55	1509.448	1509.448	1881.005	10.444	36.859	21.815	3673.395	3298.924	2010.984	243.360	218.552	106.910

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน ที่ความเข้มข้น 1 % vol ดังภาพประกอบ 32



ภาพประกอบ 32 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 1 % vol ความดัน 10-55 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ

จากภาพประกอบ 33 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ที่ความเข้มข้น 1 %vol ความดัน 10 – 55 psi จากกราฟพบว่า ที่ความดันต่ำบริเวณ 10 – 35 psi ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกดีที่สุด อยู่ที่ช่วง 200 – 550 % ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่นิ่ง มีประสิทธิภาพในการแยกอยู่ที่ช่วง 200 – 400 % และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานมีประสิทธิผลในการแยกต่ำที่สุด อยู่ที่ช่วง 0 – 150 % เนื่องจากที่ความดันต่ำ ของผสมที่ไหลออกทางด้าน Underflow ไม่เกิดการอันของของผสม แต่หลังจากความดันสูงขึ้น บริเวณ 35 – 55 psi ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกอยู่ที่ช่วง 250 – 100 % และในไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่นิ่ง มีประสิทธิภาพในการแยกอยู่ที่ช่วง 300 – 200 % ประสิทธิภาพในการแยกลดลงเนื่องจากของผสมเกิดการอันที่ทางออก Underflow เพราะความเร็วในการไหลของของไหลมีสูง ส่วนผสมของของผสมมีความเข้มข้นน้อย ของแข็งที่อยู่ในของผสมจึงหมุนวนไปออกทางด้าน Overflow มากกว่า ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง แต่สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานมีประสิทธิผลในการแยกเพิ่มขึ้น อยู่ที่ช่วง 150 – 250 %

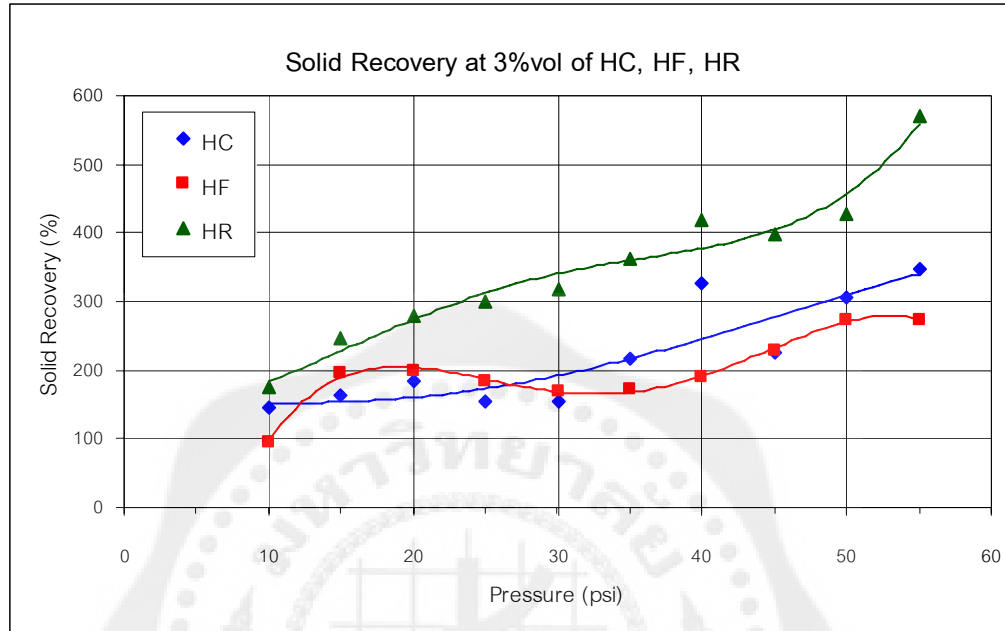
เนื่องจากไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ไม่มีแกนโลหะอยู่ตรงแกนกลางของไฮโดรไซโคลน ของผสมที่ไหลเข้าไฮโดรไซโคลนจึงไม่เกิดการอันที่บริเวณทางออก Underflow ทำให้ของผสมไหลออกได้สะดวก แต่จากลักษณะโดยรวมทั้งหมด ที่ความเข้มข้น 1 %vol ความดัน 10 – 50 psi สรุปได้ว่าไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่นิ่งและไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน



ตาราง 4 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนทางเข้า, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านล่าง และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 3 % vol

3% vol													
Run (No.)	ΔP (psi)	ความเข้มข้นทางเข้า (%wt)			ความเข้มข้นทางออกด้านบน (%wt)			ความเข้มข้นทางออกด้านล่าง (%wt)			อัตราส่วนของแข็งแยกได้(Solid Recovery (x100%))		
		HC	HF	HR	HC	HF	HR	HC	HF	HR	HC	HF	HR
1	10	915.544	900.535	810.481	36.215	31.259	22.673	1319.340	856.200	1412.717	144.105	95.077	174.306
2	15	1140.677	1080.642	1050.624	45.333	41.418	33.556	1851.019	2129.098	2593.656	162.274	197.022	246.868
3	20	1425.847	1320.784	1440.856	56.096	52.521	47.250	2619.960	2631.282	4022.150	183.748	199.221	279.150
4	25	1620.962	1470.873	1590.945	62.811	65.307	46.606	2484.940	4096.454	2586.126	153.300	184.166	298.527
5	30	1711.016	1590.945	1801.069	69.977	67.084	54.052	2660.070	2690.473	5725.682	155.467	169.112	317.905
6	35	1801.069	1801.069	2011.194	73.798	74.686	56.049	3921.797	3121.188	7296.383	217.748	173.296	362.789
7	40	1861.105	1891.123	2161.283	77.344	85.005	59.612	6068.840	3599.485	9073.041	326.088	190.336	419.799
8	45	1921.141	1891.123	2251.337	76.321	92.723	58.083	4348.542	4340.031	8946.172	226.352	229.495	397.372
9	50	1951.159	2041.212	2311.372	76.693	104.635	58.547	5942.210	5548.463	9918.833	304.548	271.822	429.132
10	55	1951.159	2191.301	2431.444	79.777	97.334	63.300	6798.536	6006.864	13871.102	348.436	274.123	570.488

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน ที่ความเข้มข้น 3 % vol ดังภาพประกอบ 33



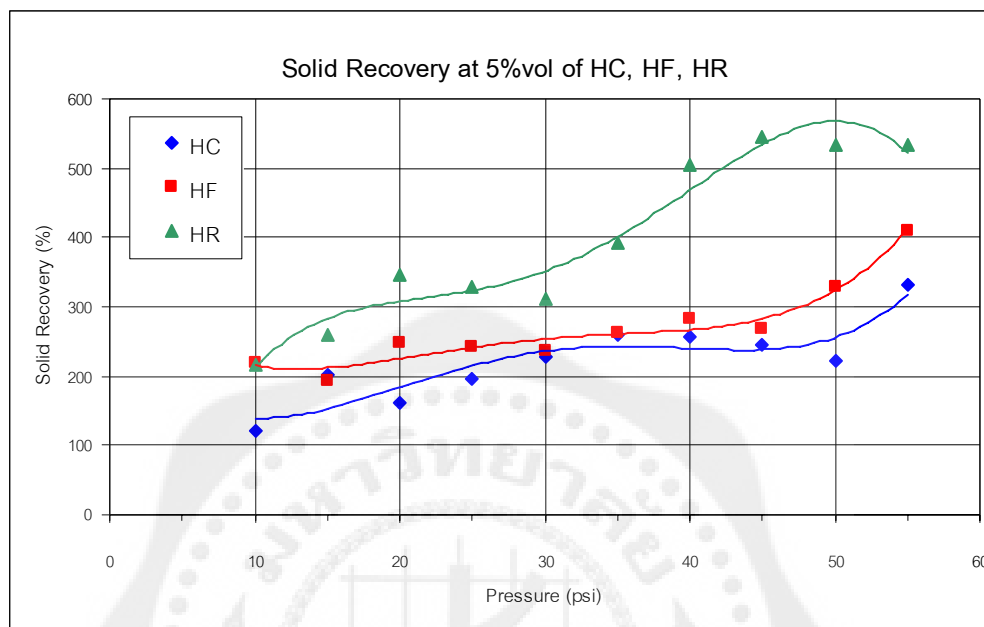
ภาพประกอบ 33 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 3 % vol ความดัน 10-55 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ

จากภาพประกอบ 34 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ที่ความเข้มข้น 3 %vol ความดัน 10 – 55 psi จากกราฟพบว่า ที่ทุกๆ ช่วงความดันไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีที่สุด อยู่ที่ช่วง 200 – 600 % เนื่องจาก ความเข้มข้นของของผสมสูงขึ้น ความหนืดสูงขึ้น อิทธิพลของความเร็วมรวมของๆ ไหล ยังไม่มีผลที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงในช่วงความดัน 10 – 55 psi และเมื่อเกิดการไหลวนภายในไฮโดรไซโคลน แรงเสียดทานภายในไฮโดรไซโคลนก็หายไป เนื่องจากแกนโลหะหมุนทำให้แกนอากาศหายไป ของแข็งที่อยู่ในของผสมสามารถแยกออกจากน้ำได้ดี และไหลออกทางด้าน Underflow สะดวก ทำให้ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนมีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีที่สุด ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่นิ่ง มีประสิทธิภาพในการแยกอยู่ที่ช่วง 150 – 350 % และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานมีประสิทธิภาพในการแยกต่ำที่สุด อยู่ที่ช่วง 100 – 300 % และจากลักษณะโดยรวมทั้งหมด ที่ความเข้มข้น 3 %vol ความดัน 10 – 50 psi สรุปได้ว่าไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่นิ่ง และไฮโดรแบบมาตรฐาน

ตาราง 5 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนทางเข้า, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของของผสมทางออกด้านล่าง และ อัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 5 % vol

5% vol													
Run	ΔP	ความเข้มข้นทางเข้า (%wt)			ความเข้มข้นทางออกด้านบน (%wt)			ความเข้มข้นทางออกด้านล่าง (%wt)			อัตราส่วนของแข็งแยกได้(Solid Recovery (x100%))		
(No.)	(psi)	HC	HF	HR	HC	HF	HR	HC	HF	HR	HC	HF	HR
1	10	883.688	696.668	627.002	60.011	54.961	30.113	1078.411	1532.466	1351.799	122.035	219.971	215.597
2	15	1100.989	836.002	812.780	70.109	66.197	44.849	2207.519	1613.571	2108.012	200.503	193.010	259.358
3	20	1376.236	1021.780	1114.670	92.367	84.202	53.653	2217.023	2535.166	3843.363	161.093	248.113	344.798
4	25	1564.563	1137.892	1230.781	99.425	74.042	70.339	3051.359	3597.969	2709.143	195.030	241.751	327.851
5	30	1651.483	1230.781	1393.337	105.512	92.166	59.954	3764.393	2897.120	4331.927	227.940	235.389	310.903
6	35	1738.403	1393.337	1555.893	103.421	112.322	63.939	4511.766	3660.893	6116.527	259.535	262.743	393.120
7	40	1796.350	1463.004	1672.004	111.748	139.293	68.015	4611.882	4152.713	8457.904	256.736	283.848	505.854
8	45	1854.297	1463.004	1741.671	115.760	144.236	72.581	4531.542	3927.434	9518.470	244.381	268.450	546.514
9	50	1883.270	1579.115	1788.116	85.703	125.914	72.674	4209.239	5181.899	9524.819	223.507	328.152	532.673
10	55	1883.270	1695.227	1881.005	124.560	118.813	81.636	6233.214	6960.367	10042.286	330.978	410.586	533.879

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน ที่ความเข้มข้น 5 % vol ดังภาพประกอบ 34

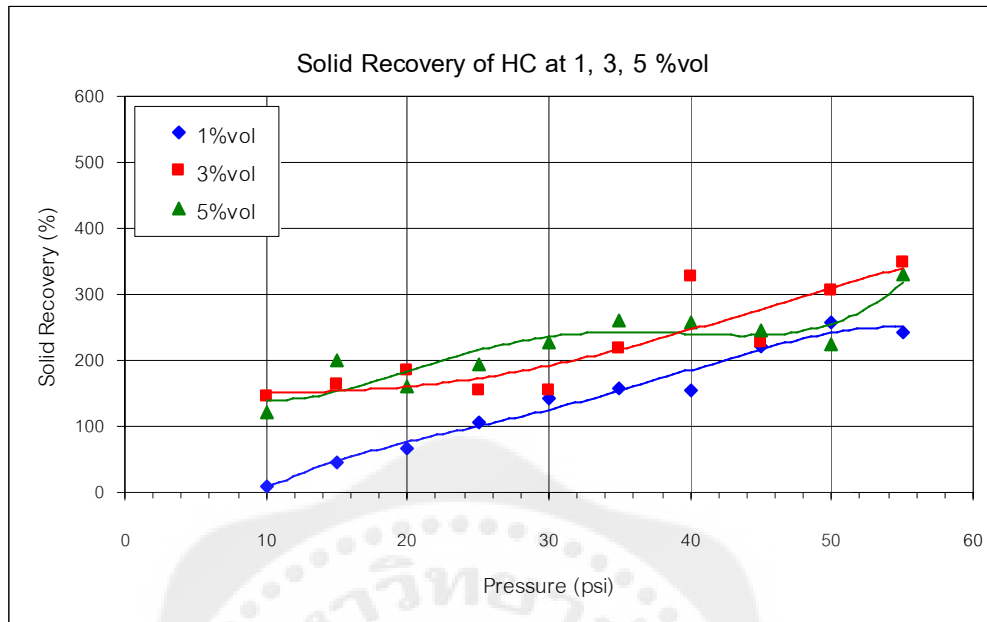


ภาพประกอบ 34 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 5 % vol ความดัน 10-55 psi ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ

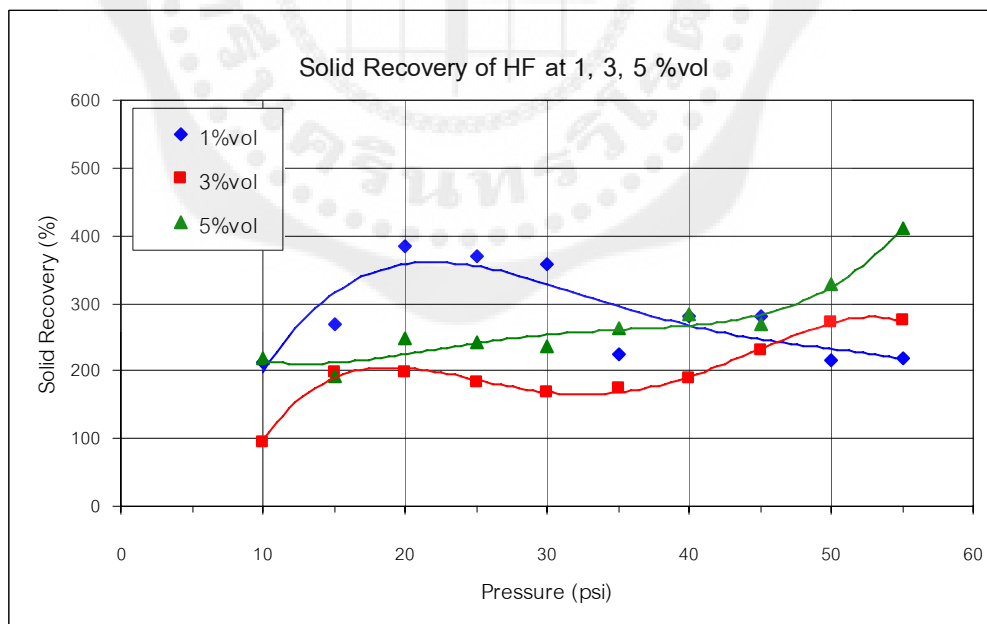
จากภาพประกอบ 35 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ที่ความเข้มข้น 5 % vol ความดัน 10 – 55 psi จากกราฟพบว่า ที่ทุกๆ ช่วงความดันไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกดีที่สุด อยู่ที่ช่วง 200 – 550 % เนื่องจาก ความเข้มข้นของของผสมสูงขึ้น ความหนืดสูงขึ้น อิทธิพลของความเร็วรวมของๆ ไหล ยังไม่มีผลที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลงในช่วงความดัน 10 – 55 psi และเมื่อเกิดการไหลวนภายในไฮโดรไซโคลน แรงเสียดทานภายในไฮโดรไซโคลนก็หายไป เนื่องจากแกนโลหะหมุนทำให้แกนอากาศหายไป ของแข็งที่อยู่ในของผสมสามารถแยกออกจากน้ำได้ดี และไหลออกทางด้าน Underflow สะดวก ทำให้ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนมีประสิทธิภาพในการแยกดีที่สุด ในขณะที่ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่นิ่ง มีประสิทธิภาพในการแยกอยู่ที่ช่วง 200 – 400 % และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานมีประสิทธิภาพในการแยกต่ำที่สุด อยู่ที่ช่วง 100 – 350 % และจากลักษณะโดยรวมทั้งหมด ที่ความเข้มข้น 5 % vol ความดัน 10 – 50 psi สรุปได้ว่าไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุน มีประสิทธิภาพในการแยกดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่นิ่ง และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

ตาราง 6 เปรียบเทียบค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol

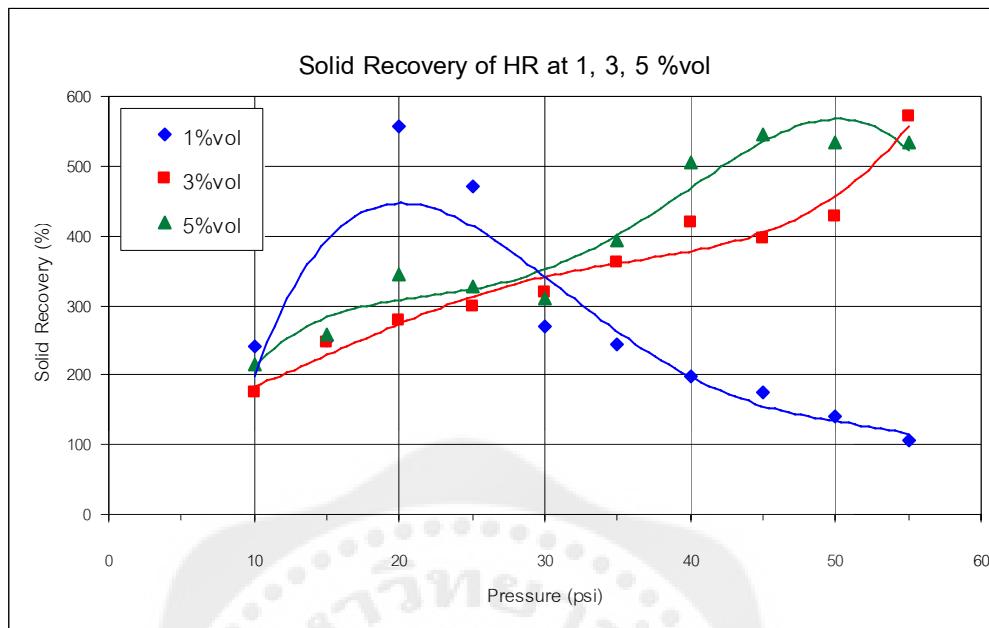
ΔP %vol		10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
1%	HC	9.2317	44.4341	66.6911	104.6953	142.6996	157.6724	155.2820	221.0770	258.7884	243.3601
3%	HC	144.1045	162.2737	183.7477	153.3003	155.4673	217.7482	326.0880	226.3521	304.5478	348.4359
5%	HC	122.0352	200.5034	161.0933	195.0295	227.9402	259.5351	256.7363	244.3807	223.5070	330.9782
1%	HF	213.5671	268.8124	383.1246	370.8457	358.5669	224.1134	279.4990	281.1726	215.8827	218.5516
3%	HF	95.0768	197.0216	199.2212	184.1664	169.1116	173.2964	190.3359	229.4949	271.8220	274.1231
5%	HF	219.9706	193.0104	248.1126	241.7507	235.3887	262.7428	283.8484	268.4500	328.1521	410.5862
1%	HR	241.9299	249.5307	557.8813	472.1670	270.4935	244.3455	196.8729	176.1779	140.6393	106.9101
3%	HR	174.3060	246.8682	279.1501	298.5274	317.9046	362.7886	419.7988	397.3715	429.1318	570.4883
5%	HR	215.5974	259.3583	344.7984	327.8507	310.9030	393.1200	505.8542	546.5136	532.6735	533.8787



ภาพประกอบ 35 ค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน



ภาพประกอบ 36 ค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol ของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่ง



ภาพประกอบ 37 ค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 % vol ของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน

จากภาพประกอบ 36 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ของของผสมของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 %vol ความดันลด 10 - 55 psi จากกราฟพบว่า ที่ความเข้มข้น 3 %vol และ 5 %vol อัตราส่วนของแข็งแยกได้ใกล้เคียงกัน ส่วนที่ความเข้มข้น 1 %vol อัตราส่วนของแข็งแยกได้น้อยที่สุด และจากภาพประกอบ 37 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ของของผสมของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่ง ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 %vol ความดันลด 10 - 55 psi จากกราฟพบว่า ที่ความเข้มข้น 3 %vol และ 5 %vol อัตราส่วนของแข็งแยกได้ใกล้เคียงกัน ส่วนที่ความเข้มข้น 1 %vol อัตราส่วนของแข็งแยกได้น้อยที่สุด และจากภาพประกอบ 38 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และอัตราส่วนของแข็งแยกได้ของของผสมของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุน ที่ความเข้มข้น 1, 3, 5 %vol ความดันลด 10 - 55 psi จากกราฟพบว่า ที่ความเข้มข้น 3 %vol และ 5 %vol อัตราส่วนของแข็งแยกได้ใกล้เคียงกัน ส่วนที่ความเข้มข้น 1 %vol อัตราส่วนของแข็งแยกได้น้อยที่สุด

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุป

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิผลในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนโดยการกำจัดแก๊สอากาศ โดยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิผลของไฮโดรไซโคลนขนาดเดียวกัน 3 แบบ คือ ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน, ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน และ ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน ในการทดลอง ใช้แคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 100 – 1000 ไมครอน ผสมกับน้ำเป็นของผสม ความเข้มข้น 1 %vol, 3 %vol และ 5 %vol และทำการทดลองที่ ความดันลดเดียวกัน ตั้งแต่ 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 และ 55 psi

ผลที่ได้นำเสนอในลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ และวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟดังเสนอในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ Capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ โดยใช้น้ำ RO เป็นสารทดสอบ พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนในแนวแกนให้อัตราการไหลเข้าดีที่สุด ซึ่งอัตราการไหลต่ำสุดที่ 10 psi เท่ากับ 32.40 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลสูงสุดที่ 55 psi เท่ากับ 97.20 ลิตรต่อนาที ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกนให้อัตราการไหลรองลงมา ซึ่งอัตราการไหลเข้าต่ำสุดที่ 10 psi เท่ากับ 36.00 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลสูงสุดที่ 55 psi เท่ากับ 87.60 ลิตรต่อนาที และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานให้อัตราการไหลต่ำสุด ซึ่งอัตราการไหลเข้าต่ำสุดที่ 10 psi เท่ากับ 36.60 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลสูงสุดที่ 55 psi เท่ากับ 78.00 ลิตรต่อนาที

2. การเปรียบเทียบประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ที่ความเข้มข้น 1%vol พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนในแนวแกน มีประสิทธิผลในการแยกดีที่สุด ประสิทธิภาพในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 100 % สูงสุดที่ 550 % ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน มีประสิทธิผลในการแยกรองลงมา ประสิทธิภาพในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 200 % สูงสุดที่ 400 % และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน มีประสิทธิผลในการแยกต่ำสุด ประสิทธิภาพในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 10 % สูงสุดที่ 250 %

3. การเปรียบเทียบประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ที่ความเข้มข้น 3%vol พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนในแนวแกน มีประสิทธิผลในการแยกดีที่สุด

ประสิทธิผลในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 180 % สูงสุดที่ 580 % ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน มีประสิทธิผลในการแยกของลงมา ประสิทธิผลในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 150 % สูงสุดที่ 350 % และไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน มีประสิทธิผลในการแยกต่ำสุด ประสิทธิผลในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 100 % สูงสุดที่ 280 %

4. การเปรียบเทียบประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 3 แบบ ที่ความเข้มข้น 5%vol พบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะหมุนในแนวแกน มีประสิทธิผลในการแยกดีที่สุด ประสิทธิผลในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 220 % สูงสุดที่ 550 % ไฮโดรไซโคลนแบบมีแกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน มีประสิทธิผลในการแยกของลงมา ประสิทธิผลในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 200 % สูงสุดที่ 420 % และไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน มีประสิทธิผลในการแยกต่ำสุด ประสิทธิผลในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 120 % สูงสุดที่ 340 %

จากการทดลองพบว่า ไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกนมีประสิทธิผลในการแยกดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน และ ดีกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน เนื่องจากไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน สามารถกำจัดแก๊สอากาศภายในไฮโดรไซโคลนได้ ทำให้แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจากแก๊สอากาศภายในไฮโดรไซโคลนลดลง ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่ทำให้ไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิผลในการแยกได้ดีขึ้นดังนี้

1. อัตราการไหลของของผสมที่ไหลเข้าไฮโดรไซโคลน ถ้าหากอัตราการไหลเข้าสูง ความดันลดลง ก็จะส่งผลต่อประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลน
2. ความเข้มข้นของของผสม ถ้าหากความเข้มข้นของของผสมเปลี่ยนไป ก็จะส่งผลต่อประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลน
3. ความเร็วในการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน เนื่องจากรูปร่างของไฮโดรไซโคลน มีลักษณะเป็น cone ถ้าหากสนามการไหลวนของของไหลภายในไฮโดรไซโคลนมีความเร็วสูง ก็จะส่งผลต่อประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลน

2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการศึกษาประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลนมีดังนี้

1. ทำการเปลี่ยนชนิดของอนุภาคทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิผลในการแยกของไฮโดรไซโคลน

2. ทำการออกแบบให้ทางเข้าของไฮโดรไซโคลนมีขนาดหลายๆ ขนาด เพื่อได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกที่ทางเข้าขนาดต่างๆ ได้
3. ทำการเปลี่ยนความเข้มข้นของของผสมในการทดสอบ เพื่อได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้นอื่นๆ
4. ทำการทดลองเพื่อหาขนาดของแกนให้พอดีกับขนาดของไฮโดรไซโคลน
5. ทำการออกแบบให้พื้นที่ทางออกด้านล่างมีพื้นที่ในการไหลออกเท่าเดิมหลังจากใส่แกนโลหะแล้ว





บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- Chine, B. & F.Concha, (2000, July). Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones. *Chemical Engineering Journal*. 80: 267-273.
- Collantes, J., Concha, F.; & B.Chine. (2000, February). Axial symmetric flow model for a flat bottom hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal*. 80: 257-265.
- Dai, G.Q., Chen, W.M., Li, J.M.; & L.Y. Chu. (1999, July). Experimental study of solid-liquid two-phase flow in a hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal*. 74: 211-216.
- Dai, G.Q., Li, J.M., Chu, L.Y.; & W.M. Chen. (1999, June). Numerical prediction of the liquid flow within a hydrocyclone. *Chemical Engineering Journal*. 74: 217-223.
- Jonas Bergstrom. (2004, July). Hannes Vomhoff. Velocity measurements in a cylindrical hydrocyclone operated with an opaque fiber suspension. *Minerals Engineering*. 17: 599-604.
- Kelsall, D.F. (1952, May). A study of the motion of solid particles in a hydraulic cyclone, Transactions of the Institution of Chemical Engineers. *Chemical Engineers Journal*. 30: 87-108.
- Kraipech, W. (2002). *Study of the performance of industrial hydrocyclones*. Ph.D. Thesis. UMIST. England.
- Liang-Yin Chu, Wen-Mei Chen: & Xiao-Zhong Lee. (2002, May). Effects of geometric and operating parameters and feed characters on the motion of solid particles in hydrocyclones. *Separation and purification Technology*. 26: 237-246.
- Liang-Yin Chu, Wei Yu; & Guang-Jin. (2004, August). Enhancement of hydrocyclone separation performance by eliminating the air core. *Chemical Engineering and Processing*, 43: 1441-1448.
- Van, J.S., Deventer, D.; & K.R.P. Feng. (2003, July). Petersen and C.aldrich. Modelling of hydrocyclone based on spray profile analysis. *Int.J.Miner.Process*. 70: 183-203.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณของการหาค่าน้ำหนักของของแข็งในของผสม

กรณีตัวอย่าง ความเข้มข้น 1%vol ความดัน 50 psi ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

ตัวอย่างการคำนวณที่ 1 การหาค่าน้ำหนักของของแข็งในของผสมทางเข้า

$$\begin{aligned} \text{Solid concentration in Feed} &= \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักของผสม}} * 100 \\ &= \frac{1.1450}{30.3600} * 100 \\ &= 3.7714 \quad \%wt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Solid in Feed} &= \text{Slurry} \times \text{Solid concentration} / 100 \\ \text{Slurry} &= \text{Flow rate} \times \text{Slurry density} \times 1000 \times 2.205 \\ &= 17.71 \times 1.025 \times 1000 \times 2.205 \\ &= 40026.81375 \\ \text{ดังนั้น Solid in Feed} &= 40026.81375 \times 3.7714 / 100 \\ &= 1509.5712 \text{ lb/hr} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ 2 การหาค่าน้ำหนักของของแข็งในของผสมทางออกด้านล่าง

$$\begin{aligned} \text{Solid concentration in Underflow} &= \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักของผสม}} * 100 \\ &= \frac{5.8050}{32.2850} * 100 \\ &= 17.5129 \quad \%wt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Solid in Underflow} &= \text{Slurry} \times \text{Solid concentration} / 100 \\ \text{Slurry} &= \text{Flow rate} \times \text{Slurry density} \times 1000 \times 2.205 \\ &= 8.72 \times 1.130 \times 1000 \times 2.205 \\ &= 21727.188 \\ \text{ดังนั้น Solid in Feed} &= 21727.188 \times 17.5129 / 100 \\ &= 3805.0607 \text{ lb/hr} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ 3 การหาค่าน้ำหนักของของแข็งในของผสมทางออกด้านบน

$$\begin{aligned} \text{Solid concentration in Overflow} &= \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนักของผสม}} * 100 \\ &= \frac{0.0800}{31.8750} * 100 \\ &= 0.2510 \quad \%wt \end{aligned}$$

$$\text{Solid in Overflow} = \text{Slurry} \times \text{Solid concentration} / 100$$

$$\begin{aligned} \text{Slurry} &= \text{Flow rate} \times \text{Slurry density} \times 1000 \times 2.205 \\ &= 8.99 \times 1.001 \times 1000 \times 2.205 \\ &= 19842.77295 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น Solid in Feed} &= 19842.77295 \times 0.2510 / 100 \\ &= 49.8054 \text{ lb/hr} \end{aligned}$$

ตัวอย่างการคำนวณที่ 4 การหาค่าอัตราส่วนของแข็งแยกได้ (Solid Recovery)

$$\begin{aligned} \text{Solid Recovery} &= \frac{\text{น้ำหนักของแข็งทางออกด้านล่าง}}{\text{น้ำหนักของแข็งทางเข้า}} * 100 \\ &= \frac{3805.0607}{1509.5712} * 100 \\ &= 252.0623 \quad \% \end{aligned}$$



ภาคผนวก ข

ภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน

ภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน
แบบมาตรฐานที่ความดัน 10–55 psi



ภาพประกอบ 38 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 10 psi



ภาพประกอบ 39 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 10 psi



ภาพประกอบ 40 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 15 psi



ภาพประกอบ 41 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 15 psi



ภาพประกอบ 42 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 20 psi



ภาพประกอบ 43 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 20 psi



ภาพประกอบ 44 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 25 psi



ภาพประกอบ 45 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 25 psi



ภาพประกอบ 46 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 30 psi



ภาพประกอบ 47 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 30 psi



ภาพประกอบ 48 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 35 psi



ภาพประกอบ 49 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 35 psi



ภาพประกอบ 50 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 40 psi



ภาพประกอบ 51 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 40 psi



ภาพประกอบ 52 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 45 psi



ภาพประกอบ 53 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 45 psi



ภาพประกอบ 54 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 50 psi



ภาพประกอบ 55 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 50 psi



ภาพประกอบ 56 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 55 psi



ภาพประกอบ 57 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 55 psi

ภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน
แบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกนที่ความดัน 10–55 psi



ภาพประกอบ 58 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 10 psi



ภาพประกอบ 59 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 10 psi



ภาพประกอบ 60 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 15 psi



ภาพประกอบ 61 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 15 psi



ภาพประกอบ 62 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 20 psi



ภาพประกอบ 63 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 20 psi



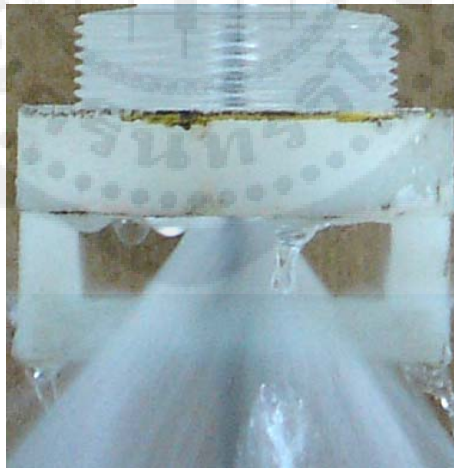
ภาพประกอบ 64 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 25 psi



ภาพประกอบ 65 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 25 psi



ภาพประกอบ 66 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 30 psi



ภาพประกอบ 67 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 30 psi



ภาพประกอบ 68 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรโปนิกส์ที่ความดันลด 35 psi



ภาพประกอบ 69 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 35 psi



ภาพประกอบ 70 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 40 psi



ภาพประกอบ 71 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 40 psi



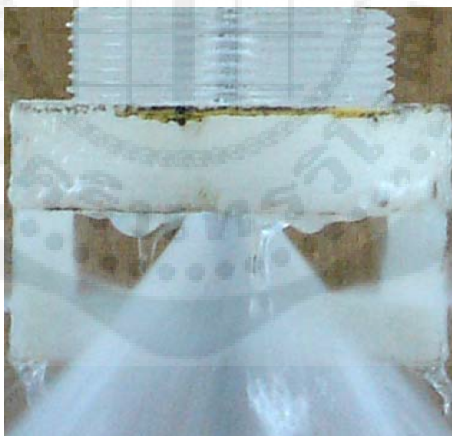
ภาพประกอบ 72 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 45 psi



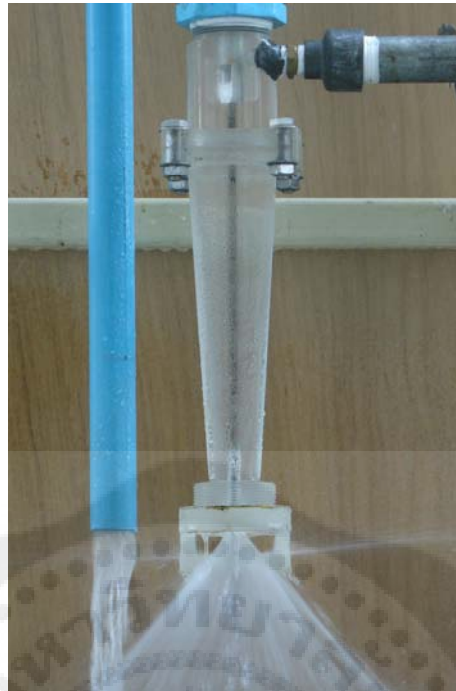
ภาพประกอบ 73 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 45 psi



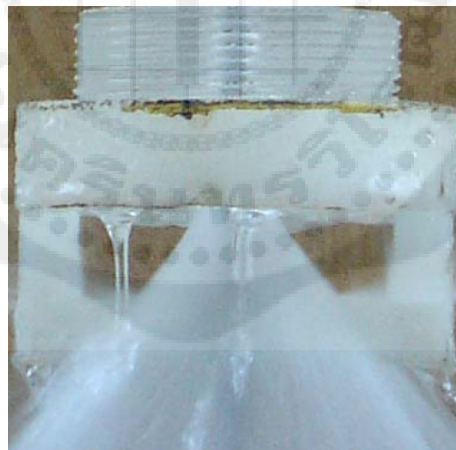
ภาพประกอบ 74 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรโปนิกส์ที่ความดันลด 50 psi



ภาพประกอบ 75 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 50 psi



ภาพประกอบ 76 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 55 psi



ภาพประกอบ 77 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 55 psi

ภาพลักษณะการไหลของน้ำภายในไฮโดรไซโคลน
แบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกนที่ความดัน 10–55 psi



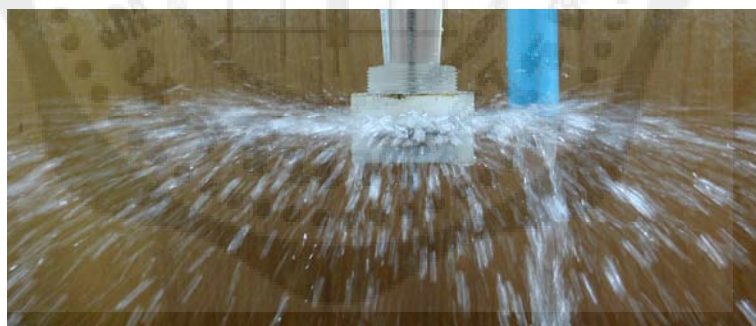
ภาพประกอบ 78 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 10 psi



ภาพประกอบ 79 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 10 psi



ภาพประกอบ 80 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 15 psi



ภาพประกอบ 81 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 15 psi



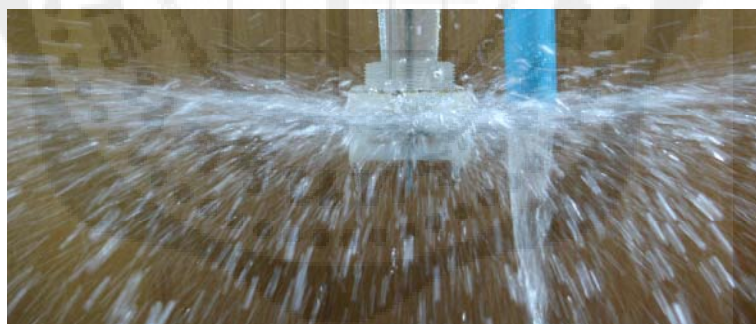
ภาพประกอบ 82 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 20 psi



ภาพประกอบ 83 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 20 psi



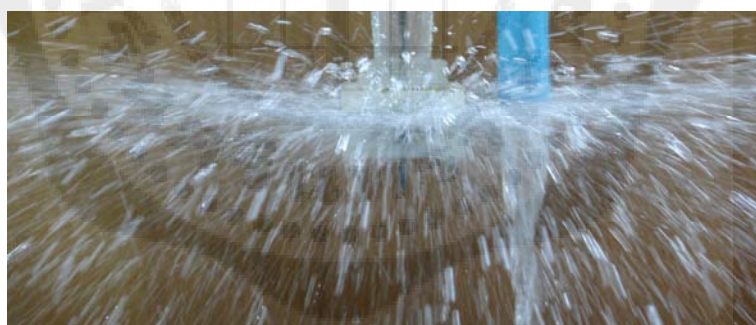
ภาพประกอบ 84 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 25 psi



ภาพประกอบ 85 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 25 psi



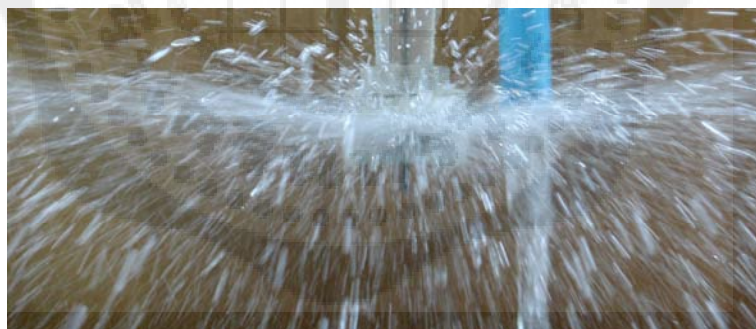
ภาพประกอบ 86 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 30 psi



ภาพประกอบ 87 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 30 psi



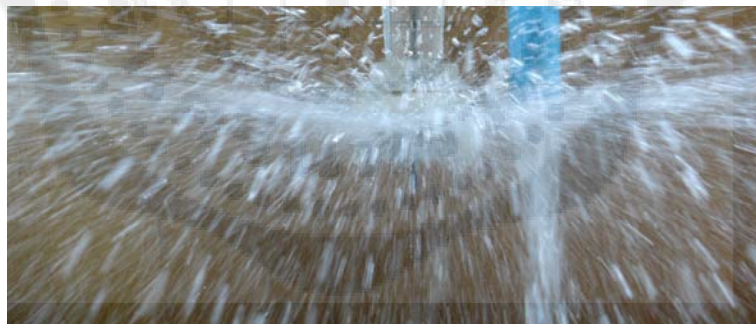
ภาพประกอบ 88 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 35 psi



ภาพประกอบ 89 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 35 psi



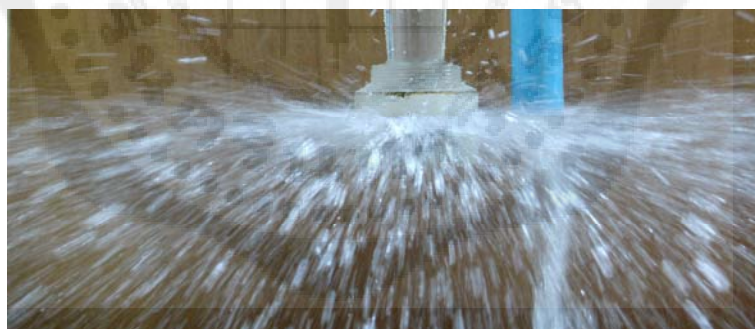
ภาพประกอบ 90 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 40 psi



ภาพประกอบ 91 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 40 psi



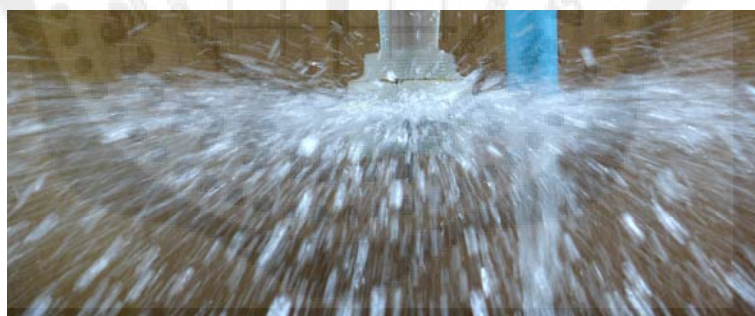
ภาพประกอบ 92 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 45 psi



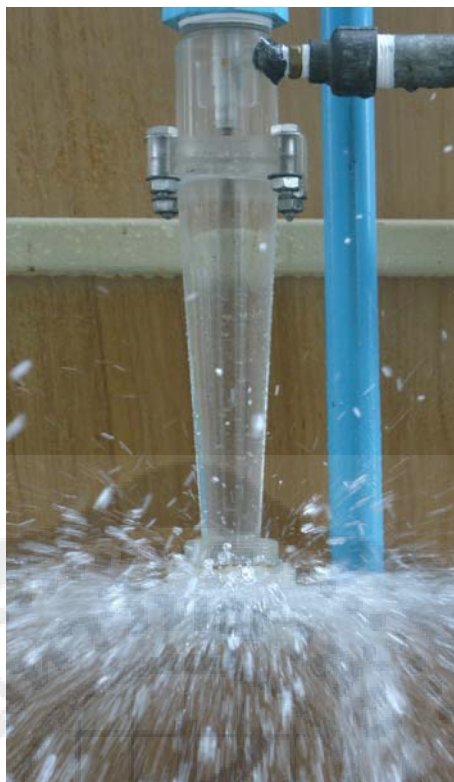
ภาพประกอบ 93 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 45 psi



ภาพประกอบ 94 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 50 psi



ภาพประกอบ 95 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 50 psi



ภาพประกอบ 96 ลักษณะของแกนอากาศภายในไฮโดรไซโคลนที่ความดันลด 55 psi



ภาพประกอบ 97 ลักษณะการไหลบริเวณทางออกด้านล่างที่ความดันลด 55 psi

อภิธานศัพท์

ประมวลศัพท์และคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
F	ทางไหลเข้า	L/min
U	ทางไหลออกด้านล่าง	L/min
O	ทางไหลออกด้านบน	L/min
T	อุณหภูมิ	°C
wt	น้ำหนัก	kg
vol	ปริมาตร	m ³
ρ	ความหนาแน่น	kg/m ³
S	อัตราส่วนการไหลแยก	
R _f	อัตราส่วนการไหล	
HC	ไฮโดรไฮโคลอนแบบมาตรฐาน	
HF	ไฮโดรไฮโคลอนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งในแนวแกน	
HR	ไฮโดรไฮโคลอนแบบใส่แกนโลหะหมุนในแนวแกน	



ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	นายปรีชา แก้วศรีพรม
วัน เดือน ปีเกิด	21 กุมภาพันธ์ 2517
สถานที่เกิด	สงขลา
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	9/1 หมู่ 4 ตำบลคลองเปี้ยะ อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา 90130

ประวัติการศึกษา

พ.ศ.2532	มัธยมศึกษาตอนต้น จาก โรงเรียนจะนะวิทยา
พ.ศ. 2535	ประกาศนียบัตรวิชาชีพ จาก วิทยาลัยเทคนิคหาดใหญ่
พ.ศ. 2537	ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง จาก สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตภาคใต้ สงขลา
พ.ศ. 2540	อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2552	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล) จาก มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ