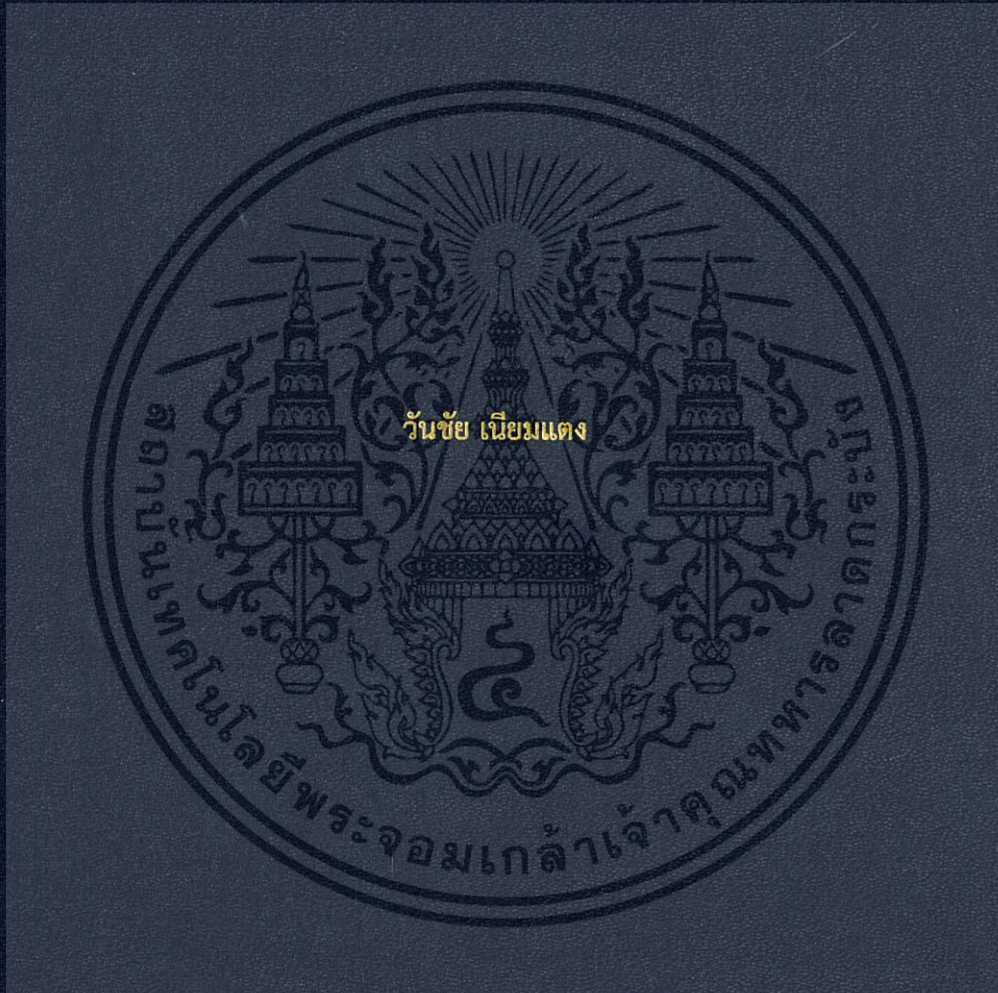


กระบวนการแยกอนุภาคขนาดนาโนเมตรโดยใช้ไฮโดรไซโคลขนาดเล็ก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2560

กระบวนการแยกอนุภาคขนาดนาโนเมตรโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SEPARATION PROCESS OF NANO PARTICLE USING MINI HYDROCYCLONES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง กระบวนการแยกอนุภาคขนาดนาโนเมตรโดยใช้ไฮโดรโซลโคลนขนาดเล็ก
โดย วันชัย เนียมแดง
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. วรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผศ. ดร. วรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์)



..... กรรมการ
(รศ.ดร. ประกอบ กิจไชยา)



..... กรรมการ
(ผศ.ดร. กุลนันทน์ เกียรติกิตติพงษ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	กระบวนการแยกอนุภาคนาโนเมตรโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาดเล็ก
โดย	วันชัย เนียมแดง
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพ็ชร เอวานส์ บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคระดับนาโนเมตรและไมครอนของไฮโดรไซโคลนรัศมีขนาด 10 มิลลิเมตร ซึ่งได้แก่ ไฮโดรไซโคลน MZ และ ไฮโดรไซโคลน SWU โดยใช้ซิงค์ออกไซด์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 50 นาโนเมตร และแคลเซียมคาร์บอเนต ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 730 นาโนเมตร เป็นสารทดสอบ โดยผสมกับน้ำ ความเข้มข้นของของผสมที่ใช้ในการทดลอง 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความดันที่ใช้ในการทดลอง 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 psi

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าไฮโดรไซโคลน MZ สามารถแยกอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ได้ ซึ่งมีประสิทธิภาพดีที่สุด ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในช่วงความดันลด 1 ถึง 20 psi ส่วนไฮโดรไซโคลน SWU ไม่สามารถทำการแยกอนุภาคของซิงค์ออกไซด์ได้ เนื่องจากความยาวของไฮโดรไซโคลน SWU น้อยกว่าของไฮโดรไซโคลน MZ จึงทำให้ระยะเวลาในกระบวนการแยกภายในไฮโดรไซโคลนน้อยกว่า และไม่สามารถแยกอนุภาคได้ การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ โดยการเปรียบเทียบสารทดสอบ 2 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์กับแคลเซียมคาร์บอเนต พบว่าสภาวะที่ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกที่ดีที่สุดในช่วงความดันลด 1 ถึง 20 psi ของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ คือที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แยกอนุภาคได้ 40% ส่วนของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แยกอนุภาคได้ 27% ซึ่งจากผลการทดลองปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน ได้แก่ ขนาดและความหนาแน่นของอนุภาค ความดันลดในการทำงาน และความเข้มข้นของสารป้อน ซึ่งทั้ง 4 ปัจจัยมีส่งผลร่วมกันต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน

Thesis Title	Separation process of nano particle using mini hydrocyclones
By	Mr. Wanchai Niamtang
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2017
Advisor	Assist. Prof. Dr. Wanwilai Kraipech Evans

ABSTRACT

The aim of this research is to investigate the separation performance of nano particle using two types of mini hydrocyclone; MZ and SWU hydrocyclones. The feed slurry were nano zinc oxide and nano calcium carbonate in water solution. The zinc oxide particles were in the average range of 50 nm. The calcium carbonate particle were in the average range of 730 nm. The solid concentrations of feed slurry in this work were 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 percent by volume, and the operating pressure drops were varied from 1 to 20 psi. The results showed that the MZ hydrocyclone demonstrated ability to clarify liquid with up to 40% clarification efficiency. The highest separation efficiency was found at operating pressure drop of 20 psi for 0.5 percent by volume of the feed slurry. An increase in pressure drop leads to increase the separation efficiency. However, SWU hydrocyclone could not provide any classification for all operating and concentration because the length of the SWU hydrocyclone is too short this causes an insufficient residence time in separation. The separation efficiency of MZ hydrocyclone has also been studied by comparing two test substances, zinc oxide and calcium carbonate. In this study, the optimum separation efficiency appears in the cases of feed concentration of 0.5% by volume (40% separation efficiency) and 1.5% by volume (27% separation efficiency), for zinc oxide and calcium carbonate, respectively. It can be concluded that the factors affecting the separation efficiency of hydrocyclone are size and density of the particle, operating pressure drop and feed concentration.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์ ที่มอบความรู้ และคำชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย อีกทั้งยังคอยให้คำปรึกษาตลอดการดำเนินงานจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการการสอบปริญญานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่องานวิจัย อีกทั้งให้คำแนะนำในการปรับปรุงรูปแบบปริญญานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน และประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางวิชาการแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่คอยให้การช่วยเหลือในการติดต่อประสานงานหรืออำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ เป็นอย่างยิ่ง

อนึ่งยังมีพระคุณอีกหลายท่านที่ผู้วิจัยไม่ได้กล่าวนาม หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดในรายงานนี้ ผู้วิจัยขออน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

วันชัย เนียมแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	3
2.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS).....	17
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	20
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน.....	22
3.1 สารเคมี.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	22
3.3 วิธีการดำเนินงาน.....	25
บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	29
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก ก.....	46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ทำการทดลอง.....	24
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านล่าง และประสิทธิภาพของการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ชนิดที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร.....	31
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านล่าง และประสิทธิภาพของการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร.....	35
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านล่าง และประสิทธิภาพของการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร.....	37

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลน.....	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลน.....	4
รูปที่ 2.3 แสดงความเร็วในแนวสัมผัส (V_t) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย.....	8
รูปที่ 2.4 แสดงความเร็วในแนวแกน (V_a) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย.....	9
รูปที่ 2.5 แสดงความเร็วในแนวรัศมี (V_r) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย.....	10
รูปที่ 2.6 แสดงการเกิด short circuit flow และ eddy flows.....	10
รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบการไหลของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลน.....	11
รูปที่ 2.8 แสดงแรงที่กระทำกับอนุภาคในไฮโดรไซโคลน.....	13
รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความจุกับปริมาณอัตราการไหลของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน.....	14
รูปที่ 2.10 กราฟแสดงโค้ง Selectivity Function.....	16
รูปที่ 3.1 ชุดทดลองไฮโดรไซโคลน.....	23
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงสัญลักษณ์บอกลักษณะของไฮโดรไซโคลน.....	24
รูปที่ 3.3 ภาพแสดงไฮโดรไซโคลน ก) ไฮโดรไซโคลน MZ ข) ไฮโดรไซโคลน SWU.....	25
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบ capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด โดยใช้น้ำ RO เป็นสารทดสอบ.....	30
รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของ ไฮโดรไซโคลน SWU	32
รูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของไฮโดรไซโคลน MZ.....	33
รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของไฮโดรไซโคลน MZ	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดย ปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของไฮโดรไซโคลน MZ.....	38
รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการไหลของของแข็งที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ไฮโดรไซโคลน MZ.....	40
รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความ ดันลด 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ไฮโดรไซโคลน MZ.....	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเหมืองแร่ ใช้แยกเศษหิน ดิน ทราย โคลนออกจากน้ำ ปิโตรเลียม ปิโตรเคมี น้ำมัน อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมยา ฯลฯ ซึ่งไฮโดรไซโคลนเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกของผสมระหว่างของแข็ง-ของเหลว หรือ ของเหลว-ของเหลว ในอุตสาหกรรมได้มีการนำไฮโดรไซโคลนมาต่ออนุกรมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกให้เพิ่มขึ้น และการนำไฮโดรไซโคลนมาต่อขนานเป็นการเพิ่มปริมาณในการผลิตให้สูง ส่วนข้อดีของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนมีหลายอย่างได้แก่ เป็นอุปกรณ์ที่มีขนาดกระทัดรัดจึงทำให้งานต่อการประกอบ การทำงาน และการบำรุงรักษา และยังเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีส่วนเคลื่อนที่จึงเป็นการประหยัดพลังงาน กระบวนการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนมีปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ขนาดของไฮโดรไซโคลน ความดันลด และคุณสมบัติของสารป้อนเข้า หลักการทำงานของไฮโดรไซโคลนนี้จะให้หลักการเคลื่อนที่หนีศูนย์กลางด้วยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนของอนุภาคของของแข็งหรือของเหลวจากตัวพาของเหลว ซึ่งเป็นกระบวนการแยกสารที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันมีงานวิจัยมากมายที่ใช้ไฮโดรไซโคลนในการกระบวนการแยกอนุภาคระดับไมครอน อย่างเช่น การแยกยีสต์ในน้ำเบียร์เพื่อนำยีสต์น้ำกลับมาใช้ใหม่ [1] (recovery) โดยที่ยีสต์มีขนาดอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.05 ถึง 300 ไมครอน มีความหนาแน่น 1,204 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งได้ใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 เซนติเมตร จำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรไซโคลน SWU กับ ไฮโดรไซโคลน MZ ในกระบวนการแยกได้ แต่ยังไม่มียางานการวิจัยที่ใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยกอนุภาคระดับนาโน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกของอนุภาคระดับนาโน (สารทดสอบเป็นซิงค์ออกไซด์) และอนุภาคระดับไมครอน (สารทดสอบเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต) โดยใช้ไฮโดรไซโคลนรัศมีขนาด 10 มิลลิเมตร ได้แก่ ไฮโดรไซโคลน SWU กับ ไฮโดรไซโคลน MZ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันลดหรือความเข้มข้นของสารป้อน เพื่อทำการหาสภาวะการทำงานที่เหมาะสมในการแยกอนุภาคระดับนาโนและไมครอน

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษากระบวนการและประสิทธิภาพของการแยกอนุภาคนาโนเมตรและไมครอนโดยใช้ไฮโดรไซโคลนขนาด 10 มิลลิเมตรทั้ง 2 ชนิด

1.2.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารป้อนต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคโดยใช้ไฮโดรไซโคลน

1.3 ขอบเขตของการศึกษา

1.3.1 ใช้ไฮโดรไซโคลนประเภท dewatering รัศมีขนาด 10 มิลลิเมตร จำนวน 2 ตัว ในกระบวนการแยกอนุภาค

1.3.2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคซิงค์ออกไซด์ที่ใช้ทำการทดลอง 50 นาโนเมตร

1.3.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ในการทดลอง 0.73 ไมโครเมตร

1.3.4 ความดันลดที่ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 1 ถึง 20 psi

1.3.5 ความเข้มข้นของสารละลาย 0.5-2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษากระบวนการแยกด้วยไฮโดรไซโคลน

1.4.3 สรุปผลการทดลองและการจัดทำรายงาน

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 ชนิดและขนาดของไฮโดรไซโคลนที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคระดับนาโนและอนุภาคระดับไมครอน

1.5.2 สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการแยกอนุภาคระดับนาโนและไมครอนในอุตสาหกรรมได้

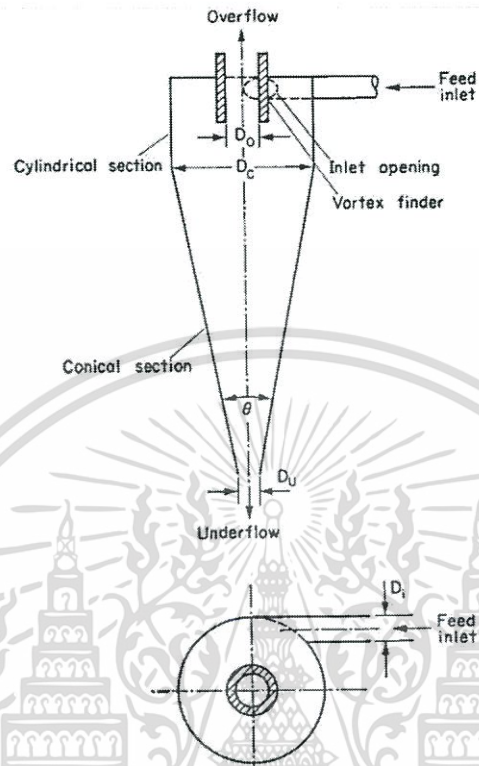
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

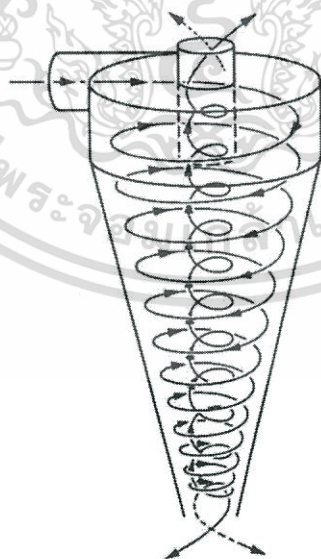
ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเบื้องต้น

หลักการแยกอนุภาคในไฮโดรไซโคลอนไม่สลับซับซ้อนและมีวิธีการแยกที่มีประสิทธิภาพ รูปที่ 2.1 แสดงอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน ประกอบด้วยส่วนด้านบนซึ่งเป็นรูปทรงกระบอกต่อกับทางป้อนเข้าซึ่งอยู่ในทิศทางของเส้นสัมผัส ส่วนด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนเป็นกรวยโดยที่ปลายของกรวยเปิด (ทางออกด้านล่าง) ส่วนทางออกด้านบนจะเป็นท่อไหลวนติดอยู่ภายในของรูปทรงกระบอกด้านบนและอยู่ต่ำกว่าตำแหน่งที่ป้อนของไหล ในสายป้อนเข้าของแข็งที่ใช้อยู่ในรูปของผสมกับของเหลวและถูกป้อนเข้าไปของผสมจะถูกทำให้เกิดการไหลวนลงไป โดยอาศัยแรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของเหลวของแข็งจะเคลื่อนที่ไปตามผนังด้วยแรงหนีศูนย์กลาง และไหลเป็นวงลงสู่ทางไหลออกด้านล่างตรงส่วนปลายของไฮโดรไซโคลอน เมื่อของไหลเข้าใกล้ศูนย์กลาง จะเกิดมีทิศทางทวนกลับและไหลวนขึ้นไปออกผ่านท่อกระแสนทางด้านบนไฮโดรไซโคลอน ผลกระทบดังกล่าวนี้ เกิดขึ้นตามแนวใจกลางของการวนของของไหลภายในจุดศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน ดังนั้น อนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าและหนาแน่นมากกว่าจะออกผ่านทางส่วนปลายด้านล่าง ในขณะที่อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าและหนาแน่นน้อยกว่าจะออกทางด้านบน สำหรับการออกแบบไฮโดรไซโคลอนที่ใช้ในอุตสาหกรรม จะขึ้นอยู่กับประเภทของอนุภาคของของแข็งด้วย เมื่อป้อนสารแขวนลอยด้วยความดันสูงเข้าไปในไฮโดรไซโคลอน ของเหลวจะเกิดการไหลหมุนวน เป็นผลให้เกิดแรงเหวี่ยงกระทำต่ออนุภาคซึ่งมีผลทำให้อนุภาคถูกผลักให้ไหลไปติดผนังด้านข้างของไฮโดรไซโคลอน (primary vortex) อนุภาคที่มีขนาดต่างกันหรือมีค่าความถ่วงจำเพาะต่างกันจะมีค่าแรงสู่ศูนย์กลางต่างกัน ทำให้แยกออกจากกันได้โดยอนุภาคที่มีความหนาแน่นน้อยจะเคลื่อนที่เข้าไปยังศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน (secondary vortex) และหมุนเป็นเกลียวขึ้นข้างบน ออกทางช่องทางออกด้านบน (Vortex finder) เรียกว่าการไหลด้านบน (overflow) ขณะที่อนุภาคที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะเคลื่อนที่เป็นเกลียวลงไปตามผนังของไฮโดรไซโคลอน และไหลออกทางช่องทางออกด้านล่าง (Spigot) เรียกว่าการไหลด้านล่าง (underflow) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และการไหลออกด้านล่างจะถูกปล่อยออกมาด้วยความดันเท่ากับความดันบรรยากาศ



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลน [2]



รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลน [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 การใช้งานและข้อดีข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

2.1.1.1 การใช้งานของไฮโดรไซโคลน

1. ใช้ในการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของเหลวได้ เช่น

1.1 การแยกอนุภาคของแข็งออกจากน้ำมันในกระบวนการผลิตน้ำมัน

1.2 การแยกอนุภาคแป้งออกจากน้ำแป้ง

1.3 การแยกอนุภาคของแข็งออกจากโคลนขุดเจาะ

1.4 การแยกสินแร่จากสารละลายแขวนลอยในกระบวนการแต่งแร่

2. ใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งให้สูงขึ้น และการทำให้ของไหลใสขึ้น ได้แก่

2.1 การทำให้สารละลายแขวนลอยมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นก่อนจะส่งไปเข้า กระบวนการดีดเอาของเหลวออก (deliquoring) อาทิเช่น การผลิตโพลีเมอร์ ถ่านหิน และ ยูเรีย

2.2 การทำให้สารละลายแขวนลอยที่ได้จากการตกผลึก มีความเข้มข้นมากขึ้น อาทิ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตกรดอะดิปิก (adipic acid) และการผลิตแอมโมเนียซัลเฟต

2.3 ใช้ในการคัดจำพวกของอนุภาค ซึ่งการใช้ไฮโดรไซโคลนในงานประเภทนี้ อนุภาคของแข็งที่มีขนาดเล็กจะติดออกไปกับของเหลวทางออกด้านบน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะหลุดออกไปทางออกด้านล่างได้แก่

2.3.1 การแยกอนุภาคที่หนักและหยาบที่ไม่ต้องการออกจากเยื่อกระดาษใน อุตสาหกรรมการผลิตเยื่อ กระดาษและกระดาษ

2.3.2 การแยกขนาดอนุภาคที่ใหญ่เกินไปออกเช่น อุตสาหกรรมผลิตปูนขาว ดินขาวและเซรามิกซ์

2.3.3 การแยกเอาวัตถุที่ละเอียดออกจากสารละลายแขวนลอยในการผลิตแร่ โปแตชและอื่นๆ

2.3.4 การคัดขนาดอนุภาคในกระบวนการตกผลึกสาร โดยปกติไฮโดรไซโคลน จะถูกนำมาใช้แยกอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ 4 - 600 ไมครอน ข้อดีอีกอย่างหนึ่งที่เราเห็นได้ชัดของไฮโดรไซโคลนคือ การที่สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีชิ้นส่วนที่เคลื่อนไหวจึงทำให้ไฮโดรไซโคลนมีราคาถูกติดตั้งได้ง่าย และเสียค่าบำรุงรักษาน้อย

จากการศึกษางานวิจัย [3] ทำให้สามารถสรุปข้อดีและข้อเสียของไฮโดรไซโคลนได้ดังนี้

2.1.1.2 ข้อดีของไฮโดรไซโคลน

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

2.1.1.3 ข้อเสียของไฮโดรไซโคลน

1. มีขีดจำกัดในการแยกเช่น ความดันในการปฏิบัติงาน และ Cut size อันเนื่องมาจาก รูปทรงของไฮโดรไซโคลน
2. มีความไม่ยืดหยุ่นในการติดตั้งและปฏิบัติงานของไฮโดรไซโคลน
3. ง่ายต่อการสึกกร่อน เพราะว่ามีค่าความเร็วของสารปั่นสูง

2.1.4 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน

ประสิทธิภาพการเก็บ (collection efficiency) ของไฮโดรไซโคลนนั้นขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย

ประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเมื่อปัจจัยต่อไปนี้เพิ่มขึ้น

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประสิทธิภาพจะลดลงเมื่อปัจจัยต่อไปนี้เพิ่มขึ้น

1. ความหนืดของของผสม
2. เส้นผ่าศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลอน
3. พื้นที่ทางเข้าของของผสม

2.1.2 รูปแบบการไหลของของเหลวในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน

เมื่ออนุภาคที่ต้องการแยกผ่านเข้าไปในไฮโดรไซโคลอนทางช่องป้อน จะเกิดความเร็วสัมผัสไปจนถึงส่วนทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลอน โดยจะเกิดการไหลแบบการไหลวนซ้อนการไหลวน (spiral within spiral) อนุภาคจะเคลื่อนที่ลงโดยการหมุนวน บางส่วนของอนุภาคที่ไม่สามารถออกจากไฮโดรไซโคลอนทางช่องออกด้านล่างก็จะเคลื่อนที่หมุนวนภายในขึ้นสู่ด้านบนและออกจากไฮโดรไซโคลอนทางช่องออกด้านบน การหมุนวนของของไหลจะมีทิศทางเดียวกันโดยที่การหมุนวนภายนอกจะเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง ส่วนการหมุนวนด้านในจะเคลื่อนที่ขึ้นด้านบน รูปแบบการไหลสามารถอธิบายได้โดยการแบ่งความเร็วออกเป็น 3 ส่วน คือ ความเร็วในแนวสัมผัส (tangential velocity, V_t) ความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity, V_r) และความเร็วในแนวตั้ง (axial velocity, V_a) และมีการไหลในระยะสั้นๆ หรือการหมุนวนปั่นป่วนรวมอยู่ด้วย กสรหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอนจะทำให้เกิดแกนในแนวตั้งที่มีความดันต่ำ ซึ่งเป็นแกนของอากาศ (air core) ซึ่งการเกิดแกนอากาศนี้ เป็นการสูญเสียพลังงาน

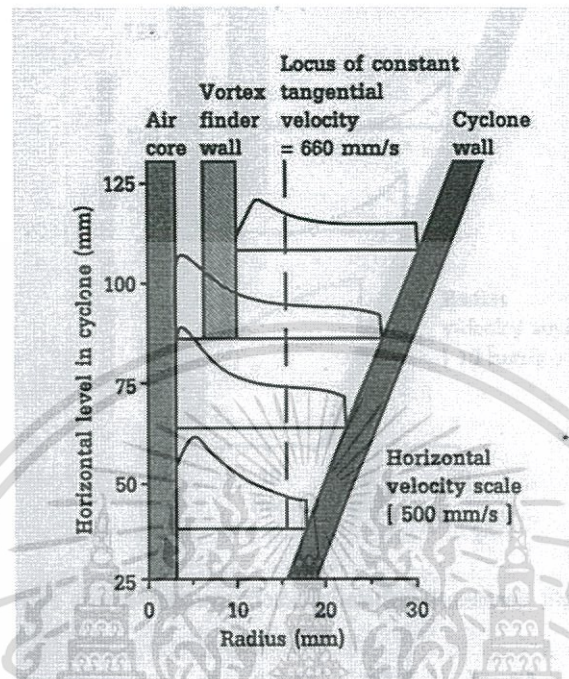
2.1.2.1 ความเร็วในแนวสัมผัส (tangential, V_t)

ที่บริเวณด้านล่างของปลาย vortex finder ความเร็วแนวสัมผัสจะเพิ่มขึ้นเมื่อรัศมีลดลงจนถึงค่าหนึ่งซึ่งมีรัศมีน้อยกว่ารัศมีของ vortex finder ดังรูปที่ 2.3 สามารถอธิบายเป็นความสัมพันธ์ ได้ดังนี้

$$V_t r^n = \text{constant} \quad (2-1)$$

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

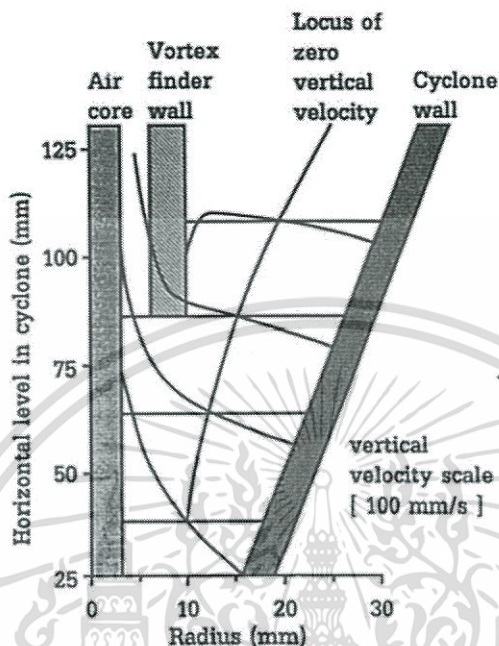
ส่วนบริเวณด้านบนเหนือปลายของ vortex finder ขึ้นไป ความเร็วแนวสัมผัสยังคงมีแนวโน้มเหมือนกับตอนแรกถึงแม้ว่าจะไม่ค่อยถูกต้องนักที่บริเวณใกล้กับผนังของไฮโดรไซโคลอนโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณใกล้ๆ กับผนังด้านนอกของ vortex finder และจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อถึงผนัง นอกจากนี้แล้ว ความเร็วแนวสัมผัสยังไม่ขึ้นกับตำแหน่งในแนวตั้ง



รูปที่ 2.3 แสดงความเร็วในแนวสัมผัส (V_t) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย [4]

2.1.2.2 ความเร็วในแนวแกน (axial velocity, V_a)

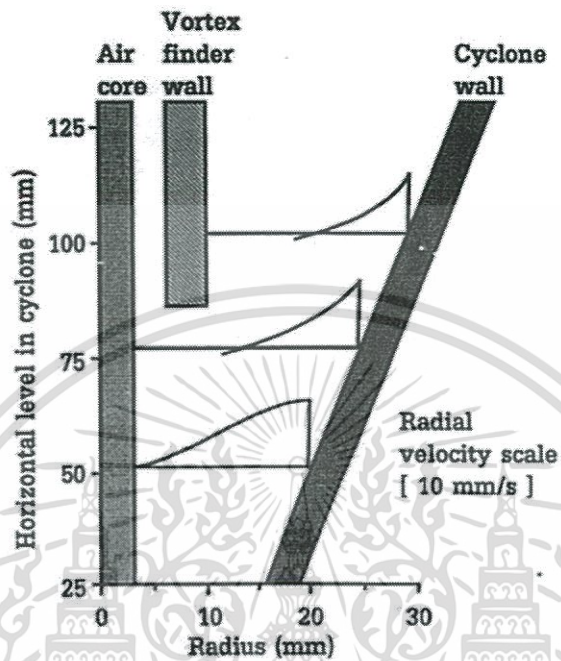
การไหลของของเหลวด้วยความเร็วแนวแกนนั้น มีความจำเป็นอย่างมากในการทำงานของไฮโดรไซโคลน เพราะจะนำเอาอนุภาคไหลออกมา จากรูปที่ 2.4 บริเวณด้านล่างของปลาย vortex finder จากผนังของแกนอากาศ จนถึง locus zero vertical velocity ซึ่งเป็นบริเวณที่ความเร็วแนวแกนเป็นศูนย์ การไหลของของเหลวจะไหลขึ้นข้างบนและออกสู่ทางออกด้านบน(overflow) ส่วนของเหลวที่เหลือตั้งแต่บริเวณ locus zero vertical velocity ถึงผนังของกรวยจะไหลลงมา และออกสู่ทางออกด้านล่าง (underflow) ที่บริเวณ vortex finder นั้น ของเหลวจะมีความเร็วสูงสุดและไหลลงมาที่บริเวณใกล้ๆ กับผนังของไฮโดรไซโคลนช่วงหนึ่งและขณะที่ความเร็วแนวแกนลดลงจนกระทั่งเป็นศูนย์ของเหลวจะเริ่มไหลขึ้นจนมีความเร็วแนวแกนสูงสุดและลดลงจนเป็นศูนย์ในที่สุดอีกครั้ง ของเหลวจะไหลลงจนมีความเร็วแนวแกนที่มีค่าค่อนข้างมากที่บริเวณใกล้ๆ ผนังด้านนอกของ vortex finder



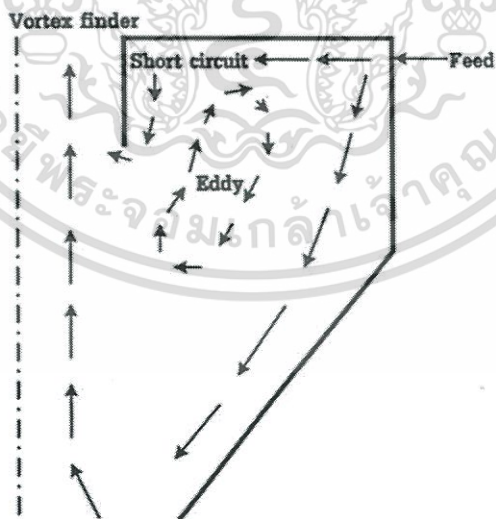
รูปที่ 4 แสดงความเร็วในแนวแกน (V_a) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย [4]

2.1.2.3 ความเร็วในแนวรัศมี (radial velocity, V_r)

ความเร็วของของเหลวในแนวรัศมี จากรูปที่ 2.5 พบว่าความเร็วแนวรัศมีซึ่งเข้ามาด้านในและขนาดของความเร็วแนวรัศมีจะลดลงเมื่อรัศมีลดลง และยังไม่ว่าความเร็วแนวรัศมีจะค่อยๆ ลดลงจนกลายเป็นศูนย์ที่แกนอากาศหรือไม่ เนื่องจากความยากในการวัดความเร็วที่ระดับเหนือปลาย vortex finder ของเหลวอาจจะมีการเคลื่อนที่ออกไปด้านนอกตามแนวแนวรัศมีเพราะว่ามีการไหลแบบหมุนวนและที่บริเวณใกล้ๆ แผ่นปิดด้านบนของไฮโดรไซโคลอนอาจจะมีความเร็วแนวรัศมี ซึ่งมีทิศทางเข้ามาด้านในตามแนวรัศมีอย่างรุนแรง กระทำโดยตรงต่อส่วนที่ยื่นของ vortex finder ซึ่งเป็นส่วนที่สนับสนุนให้เกิดการไหลลัดกระแส(short circuit flow) ที่ผนังด้านนอกของ vortex finder หรือ eddy flows ดังรูปที่ 2.6



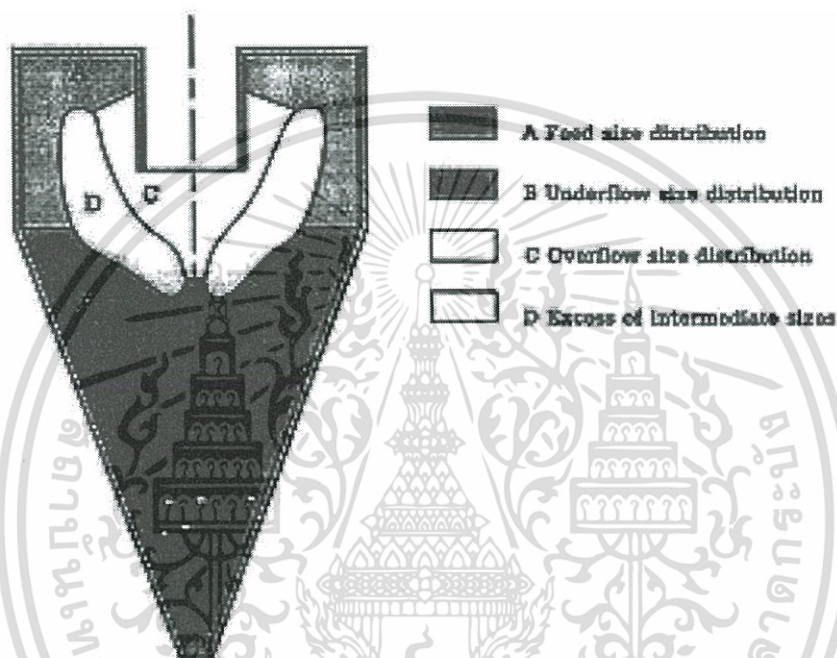
รูปที่ 2.5 แสดงความเร็วในแนวรัศมี (V_r) ที่ตำแหน่งต่างๆ ในส่วนกรวย [4]



รูปที่ 2.6 แสดงการเกิด short circuit flow และ eddy flows [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากองค์ประกอบต่างๆ ของความเร็วของของเหลวสามารถที่จะแสดงเป็นลักษณะของภาพที่เป็นตัวแทนรูปแบบการไหลของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอนได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงรูปแบบการไหลของของเหลวภายในไฮโดรไซโคลอน [4]

2.1.3 การวิเคราะห์ทฤษฎีสำหรับไฮโดรไซโคลอน [5]

พิจารณาการไหลวนในบริเวณทรงกระบอกของไฮโดรไซโคลอนที่มีรัศมีเท่ากับ r อนุภาคไหลเข้าไฮโดรไซโคลอนตามกับกระแสของสายป้อนเข้าและอนุภาคยังถูกบังคับทิศทางให้เคลื่อนที่เป็นวงกลมภายในไฮโดรไซโคลอน อนุภาคจะถูกหมุนวนด้วยแรงที่กระทำตามเส้นทางการไหลของอนุภาค ซึ่งแรงกระทำต่ออนุภาคได้แก่ แรงลากอนุภาค (drag force) มีทิศทางสวนกลับการเคลื่อนที่ของอนุภาค แรงลอยตัว (buoyancy force) แรงเหวี่ยง (centrifugal force) การสมดุลระหว่างแรงเหล่านั้นเป็นตัวกำหนดลักษณะการไหลวนของอนุภาค แรงลากเกิดจากการไหลของตัวพาผ่านอนุภาคและซึ่งแรงลากจะทำให้อนุภาคเข้าสู่แนวแกนกลางของไฮโดรไซโคลอน ซึ่งพิจารณาแรงลากตามกฎของสโตค (Stoke's law) ได้ตามนี้

$$F_D = 3\pi\mu U_r \quad (2-2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

X คือ ขนาดของอนุภาค

μ คือ ความหนืดของของไหล

r คือ รัศมีการไหลของอนุภาค

ρ_f คือ ความหนาแน่นของของไหล

ρ_p คือ ความหนาแน่นของอนุภาค

U_r คือ ความเร็วในแนวรัศมี

แรงเหวี่ยง (Centrifugal force, F_C) และแรงลอย (Buoyancy force, F_B) ตัวที่กระทำกับอนุภาคขึ้นอยู่กับความเร็วตามแนวเส้นสัมผัส (tangential velocity, U_θ) เป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$F_C = \frac{\pi x^3}{6} \rho_p \frac{U_\theta^2}{r} \quad (2-3)$$

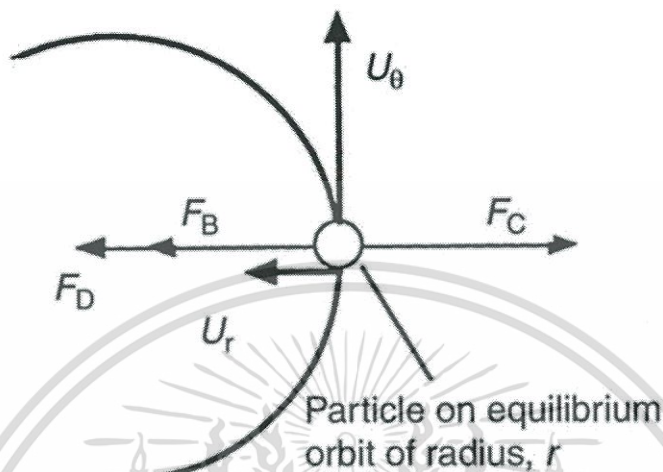
$$F_B = \frac{\pi x^3}{6} \rho_f \frac{U_\theta^2}{r} \quad (2-4)$$

แรงที่กระทำต่ออนุภาคจะส่งผลให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าหรือออกจากผนังของไฮโดรไซโคลนตามรูปที่ 2.8 ถ้าแรงทั้งเกิดสมดุลกันอนุภาคจะสมมติให้เคลื่อนที่หมุนวนอยู่ภายในไฮโดรไซโคลน ณ ตำแหน่งนั้น

$$F_C = F_D + F_B \quad (2-5)$$

และขนาดอนุภาคที่ตำแหน่งนั้น

$$x^2 = \frac{18\mu}{(\rho_p - \rho_f)} \frac{r}{U_\theta^2} U_r \quad (2-6)$$



รูปที่ 2.8 แสดงแรงที่กระทำกับอนุภาคในไฮโดรไซโคลน [5]

2.1.4 ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน

2.1.4.1 การแยกไหลและอัตราส่วนการไหล (Flow split)

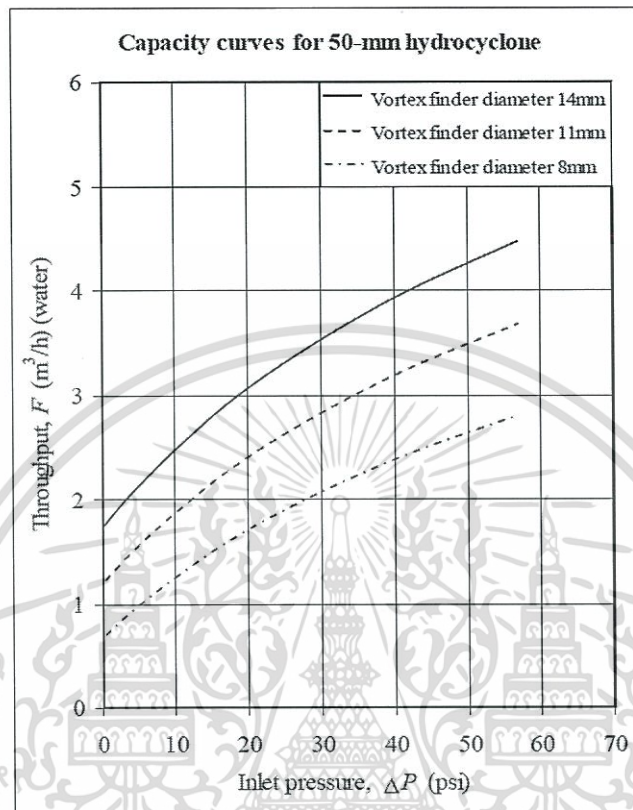
อัตราส่วนการแยกไหลของของไหลในไฮโดรไซโคลน มีความสัมพันธ์กับปริมาณของไหล ทางด้านบนและของไหลทางด้านล่าง แสดงถึงประสิทธิภาพการแยกไหลในเชิงปริมาณ

$$S = \frac{\text{underflow rate}}{\text{overflow rate}} \quad (2-7)$$

$$R_f = \frac{S}{S+1} \quad (2-8)$$

2.1.4.2 ความดันลด (Pressure Drop, ΔP)

ความดันลดเป็นตัวแปรตัวแรกที่สำคัญที่ใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ซึ่ง ความดันจะมีค่าแปรผันตามอัตราการไหลของสารป้อน (Feed flowrate) การหาค่าความดันจะหาได้จากเครื่องมือวัดค่าความดันในส่วนที่มีการไหลของของผสมเข้าสู่อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน จากความสัมพันธ์ระหว่างความดันและอัตราการไหลสามารถนำไปเขียนกราฟความจุได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 กราฟแสดงความจุกับปริมาณอัตราการไหลของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน [4]

การเพิ่มความดันจะทำให้ปริมาณของของผสมที่เข้าสู่ไฮโดรไซโคลน มีปริมาณที่สูงขึ้น ทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนรูปทรงของไฮโดรไซโคลน และอาจจะทำให้เกิดการสึกกร่อนของตัวอุปกรณ์

2.1.4.3 อัตราส่วนการไหลสู่อันเดอร์โฟล (Flow Recovery to Underflow, R_f)

อัตราส่วนการไหลสู่อันเดอร์โฟล (Flow Recovery to Underflow, R_f) หรือ อัตราส่วน การไหลผ่าน (Throughput ratio) สามารถหาได้จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนการไหลในอันเดอร์โฟลของไฮโดรไซโคลนและอัตราการไหลของสารป้อนทางเข้าไฮโดรไซโคลน ซึ่ง เขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_f = \frac{U}{F} \quad (2-9)$$

และจากการสมดุลมวลของไฮโดรไซโคลอน

$$F = O + U \quad (2-10)$$

เมื่อ F คือ อัตราการไหลของของผสมทางเข้าของไฮโดรไซโคลอน

O คือ อัตราการไหลของของผสมที่ทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอน

U คือ อัตราการไหลของของผสมที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน

อัตราส่วนการไหลแยก (Flow split, S) คืออัตราส่วนระหว่างปริมาตรอัตราส่วนการไหลสู่อันเดอร์โฟล ต่อปริมาตรอัตราการไหลของของผสมที่ทางออกด้านบนของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนจึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$S = \frac{U}{O} \quad (2-11)$$

จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ใหม่ของอัตราการไหลสู่อันเดอร์โฟล ได้ดังนี้

$$R_f = \frac{S}{S+1} \quad (2-12)$$

และสามารถคำนวณหาอัตราส่วนของน้ำที่ไหลออกสู่อันเดอร์โฟล (Water recovery to underflow, R_w)

ในเทอมของอัตราการไหลออกสู่ด้านล่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนได้ดังนี้

$$R_w = \frac{R_f - R_s C_f}{(1 - C_f)} \quad (2-13)$$

เมื่อ R_s คือ อัตราส่วนของของแข็งที่แยกได้ทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน

C_f คือ สัดส่วนของของแข็งที่อยู่ในของผสมทางเข้า

2.1.4.4 ประสิทธิภาพของกระบวนการแยก (Clarifier efficiency)

ประสิทธิภาพของกระบวนการแยก คือ อัตราส่วนระหว่างความเข้มข้นของของแข็งที่เปลี่ยนแปลงของ feed กับ overflow ส่วนความเข้มข้นของของแข็งใน feed

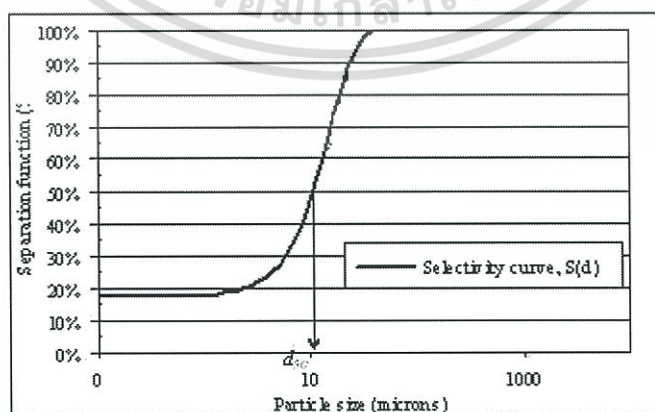
$$\%E_c = \frac{C_f - C_o}{C_f} \times 100 \text{ หรือ } \%E_c = \left[1 - \frac{C_o}{C_f} \right] \times 100 \quad (2-14)$$

เมื่อ C_u คือ อัตราส่วนของของแข็งที่แยกได้ทางด้านบนของไฮโดรไซโคลอน

C_f คือ สัดส่วนของของแข็งที่อยู่ในของผสมทางเข้า

2.1.4.5 Selectivity Function, S(d)

Selectivity Function, S(d) เป็นตัวที่ใช้บ่งบอกถึงสมรรถนะในการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนซึ่ง Selectivity Function ปกติสามารถหาได้จากการทดลอง $S(d) = U(d)/F(d)$ แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งเส้นโค้งของ Selectivity Function นี้จะไม่ผ่านจุดออริจิน (Origin) เนื่องจากว่ามีส่วนหนึ่งของของผสม ไหลลงสู่แอนเดอร์ไพล์โดยไม่ผ่านกระบวนการแยก ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้มีของแข็งไหลติดออกไปกับของไหลส่วนนี้ และอัตราส่วนของแข็งที่ไหลติดออกไปกับของไหลเท่ากับ อัตราส่วนของน้ำที่ไหลออกสู่แอนเดอร์ไพล์ของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงโค้ง Selectivity Function [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4.6 Cut Size Correlation

Cut size, d_{50} เป็นตัวกำหนดอีกตัวหนึ่งเพื่อใช้ในการประสิทธิผลของไฮโดรไซโคลนซึ่งหาได้จากขนาดของอนุภาค แสดงผลของการแยกสารทางออกโอเวอร์โฟล และอันเดอร์โฟลเท่ากัน หาได้จากกราฟเส้นโค้งของ Selectivity Function ซึ่งแสดงดังรูปภาพที่ 9 และค่า cut size มีความสำคัญมากเพราะว่ามันถูกใช้ป็นสิ่งบ่งบอกถึงสมรรถนะในการทำงานของไฮโดรไซโคลน

การลดขนาดของ cut size เป็นการเพิ่มสมรรถนะของไฮโดรไซโคลน โดยสามารถทำได้ดังนี้

1. ลดเส้นผ่านศูนย์กลางของไฮโดรไซโคลน
2. ลดเส้นผ่านศูนย์กลางทางเข้าของไฮโดรไซโคลน
3. ลดเส้นผ่านศูนย์กลางทางออกของไฮโดรไซโคลน

2.2 การวิเคราะห์ขนาดอนุภาคด้วยเทคนิค Dynamic Light Scattering (DLS) [6]

Dynamic light scattering (DLS) เป็นเทคนิควัดการกระเพื่อมของความเข้มแสง หรือ เรียกว่า photo correlation spectroscopy (PCS) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้วัดขนาดของสารตัวอย่างในระดับนาโนเมตรได้ตั้งแต่ 0.005 – 5 ไมโครเมตร สำหรับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 5 ไมโครเมตรจะเกิดการแพร่กระจายอย่างไร้ทิศทาง (randomly diffuse) ไปทั่วตัวกลาง ในขณะที่เดียวกันอนุภาคสามารถก่อให้เกิดการกระเจิงของแสงได้เช่นกัน ความถี่ของการกระเพื่อมขึ้น-ลงสามารถตรวจจับโดยใช้หลอดทวีพลังงาน (photomultiplier) ในขณะที่ขนาดของอนุภาคสามารถคำนวณได้จากความถี่โดยใช้สมการสโตกส์และไอสไตน์ (Stokes-Einstein equation) ด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่ง (translational diffusion coefficient, DT) ของอนุภาค ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาค (เส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ a)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคตลอดเวลาแบบบราวน์เนียน (Brownian) นี้ส่งผลกระทบต่อความเข้มของแสงที่กระเจิงจากอนุภาค อนุภาคขนาดใหญ่ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่ง (translation diffusion coefficient) ต่ำ จะเคลื่อนที่ช้ากว่าอนุภาคขนาดเล็ก หรืออาจกล่าวได้ว่าอนุภาคขนาดใหญ่เคลื่อนที่ช้าทำให้เกิดความถี่ในการกระเพื่อมขึ้น-ลงของแสงที่กระเจิงต่ำ และอนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้เร็วมีความถี่ในการกระเพื่อมของแสงที่กระเจิงสูงกว่า ดังนั้นอัตราการเปลี่ยนแปลงของแสงที่กระเจิงจะช้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าสัญญาณที่ได้จากการวัดความเข้มแสงในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ของขนาดอนุภาคขนาดเล็ก และความถี่ในการกระเพื่อมขึ้น-ลงของความเข้มแสงนี้จะถูกส่งไปยัง correlator เพื่อนำไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เลื่อนตำแหน่งและนำไปหาขนาดอนุภาคต่อไป ข้อจำกัดของเทคนิคนี้คือ สารตัวอย่างต้องผ่านการเตรียมเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่เจือจางอย่างเหมาะสม นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังต้องการความสะอาดสูง เนื่องจากป้องกันการรบกวนจากการกระเจิงของอนุภาคฝุ่นหรือสิ่งสกปรก

ข้อมูลจำเพาะ (Specifications)

1. วัดขนาดอนุภาคในตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นสารแขวนลอย
2. สามารถวัดขนาดอนุภาคได้ในช่วง 0.6 นาโนเมตร- 6 ไมโครเมตร
3. ใช้สารละลายในการวิเคราะห์ปริมาณอย่างน้อยที่สุด 1 มิลลิลิตร
4. วิเคราะห์ความเข้มข้นของไลโซโซมเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรได้ในช่วงร้อยละ 40 ของน้ำหนักต่อปริมาตร
5. มุมที่ใช้ในการวิเคราะห์ 173 องศา
6. แหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ชนิดแก๊สฮีเลียม-นีออน ศักย์ไฟฟ้า 4 มิลลิวัตต์ ที่ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร
7. อุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์อยู่ในช่วง 2 ถึง 90 องศาเซลเซียส
8. ค่าการนำไฟฟ้าสูงสุดของสารละลายตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้ 200 mS/cm
9. วิเคราะห์ตัวอย่างที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 1×10^3 ถึง 2×10^7 ดาลตัน
10. ตัวตรวจจับสัญญาณเป็นชนิด Avalanche Photo-Diode

ความสามารถในการให้บริการวิเคราะห์ทดสอบ

- การวิเคราะห์ขนาดอนุภาค
- การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential)
- การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล
- การวิเคราะห์ความเสถียรของอิมัลชัน
- การวิเคราะห์ความเสถียรของสูตรการเตรียมตัวอย่าง
- การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของฟอกเมนต์
- การวิเคราะห์สิ่งปนเปื้อน

ตัวอย่างของการวิเคราะห์ตัวอย่างชิ้นงานด้วยเครื่อง Zetasizer

- การกระจายตัวของขนาดอนุภาค
- การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การวิเคราะห์ค่าศักย์ซีต้า
- การทดสอบประจุของอนุภาคในของเหลวด้วยเทคนิค electrophoretic mobility

การประยุกต์ใช้งาน

- สารแขวนลอย
- ตัวอย่างพอลิเมอร์
- การเตรียมตัวอย่างยาและเครื่องสำอาง
- การเตรียมอิมัลชัน
- สีและพิกเมนต์
- น้ำหมึกและสารปรับแต่ง
- การบำบัดน้ำเสีย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กฤษณา ศิริเลิศมุกด [7] กล่าวว่า นาโนแคลเซียมคาร์บอเนตเกิดจากการนำแคลเซียมคาร์บอเนตมาแตกผลึกใหม่ ให้เกิดอนุภาคขนาดเล็กระดับนาโนเมตรหรือนาโนอนุภาค ข้อดีของอนุภาคขนาดนาโน คือ จะทำให้พื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยากับสารต่าง ๆ มากขึ้น และมีความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้น แคลเซียมที่ละลายได้ดีขึ้น จะทำให้ร่างกายดูดซึมไปใช้ได้มากขึ้น อุตสาหกรรมการผลิตแคลเซียมคาร์บอเนตของไทยในสมัยก่อนจะใช้วิธีบดแร่หินปูนจากธรรมชาติ ให้มีขนาดเล็กระดับไมครอนจึงนำไปใช้งาน จึงต้องการพัฒนาเทคโนโลยี หรือกระบวนการผลิตอนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตในระดับเล็กกว่า 100 นาโนเมตร

Feridun Boylu และคณะ [8] ได้ทำการพัฒนาวิธีการแยกแบบเปียกของ bentonite ในโซเดียมหรือของผสม ทดสอบโดยใช้ไฮโดรไซโคลนต่ออนุกรมกัน แล้วทำการประเมินประสิทธิภาพการแยก ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาดของดำน overflow ความดันขาเข้า

Wanwilai Kraipech Evans และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนชนิด dewatering และ deoiling สำหรับการแยกยีสต์ในอุตสาหกรรมเบียร์ ศึกษาการประยุกต์ใช้ในการแยกของเหลวและกระบวนการนำยีสต์กลับมาใช้ใหม่ สารแขวนลอยที่ใช้ในการทดลองได้มาจากถังหมักในโรงงานผลิตเบียร์ สำหรับการประยุกต์ใช้ในการแยกของเหลว ไฮโดรไซโคลนทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการแยกของเหลวได้มากถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ประสิทธิภาพในการแยกจะเพิ่มขึ้น เมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น เฉพาะไฮโดรไซโคลนชนิด deoiling เท่านั้นที่สามารถแยกทั้งสองกรณีที่ทำการศึกษาได้

Z.-S Bai และ H.-L.wang [9] ได้ใช้ไฮโดรไซโคลนในการกำจัดเกลือและน้ำออกจากน้ำมันดิบ (crude oil)

Zhi-shan Bai [10] และคณะได้ใช้ไฮโดรไซโคลน ในการกำจัดน้ำมันออกจากน้ำโดยใช้ฟองอากาศช่วยในการแยก สัดส่วนอากาศต่อของเหลวเป็น 1% มีประสิทธิภาพในการกำจัดน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 72% เป็น 85%

Isabele C. Bicalho [11] และคณะได้ทำการศึกษาการแยกยีสต์ออกจากกระบวนการหมักเอทานอลเพื่อนำยีสต์รีไซเคิลกลับไปใช้ใหม่ แยกยีสต์โดยการไฮโดรไซโคลน

Jian-Feng Yu และคณะ [12] ได้ทำการศึกษาการแยกแร่หายาก (CeO_2 และ La_2O_3) โดยการไฮโดรไซโคลนขนาดเล็กขนาด 10 มิลลิเมตร ได้ประสิทธิภาพ 92.5% ที่อัตราการไหล 1406 L/h ความเข้มข้น 1%โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการที่กล่าวมาข้างต้น มีการใช้ไฮโดรไซโคลนในการแยก ยีสต์ น้ำมัน น้ำ แร่ธาตุ และอื่น ๆ ออกจากกระบวนการผลิตเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้มีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น หรือแยกของแข็งออกจากของเหลว แต่ยังไม่มียานวิจัยที่นำไฮโดรไซโคลนมาประยุกต์ใช้ในการแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร ในงานวิจัยนี้จึงจะนำไฮโดรไซโคลนมาทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกของอนุภาคระดับนาโน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

การทดลองนี้ ใช้ชุดทดลองการหาประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรโซโคลน ประกอบด้วย อุปกรณ์ไฮโดรโซโคลน 2 ขนาด คือ 1.ไฮโดรโซโคลน SWU ขนาด 41.0 มิลลิเมตร 2.ไฮโดรโซโคลน ZM ขนาด 91.0 มิลลิเมตร โดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.73 ไมโครเมตร และซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 50 นาโนเมตร ผสมน้ำเป็นสารป้อนที่ใช้ทำการทดลอง และทดลองที่ความดันลดในไฮโดรโซโคลนในช่วง 1 ถึง 20 psi ความเข้มข้นของสารผสมเท่ากับ 0.5%, 1.0%, 1.5% และ 2.0% โดยปริมาตร

3.1 สารเคมี

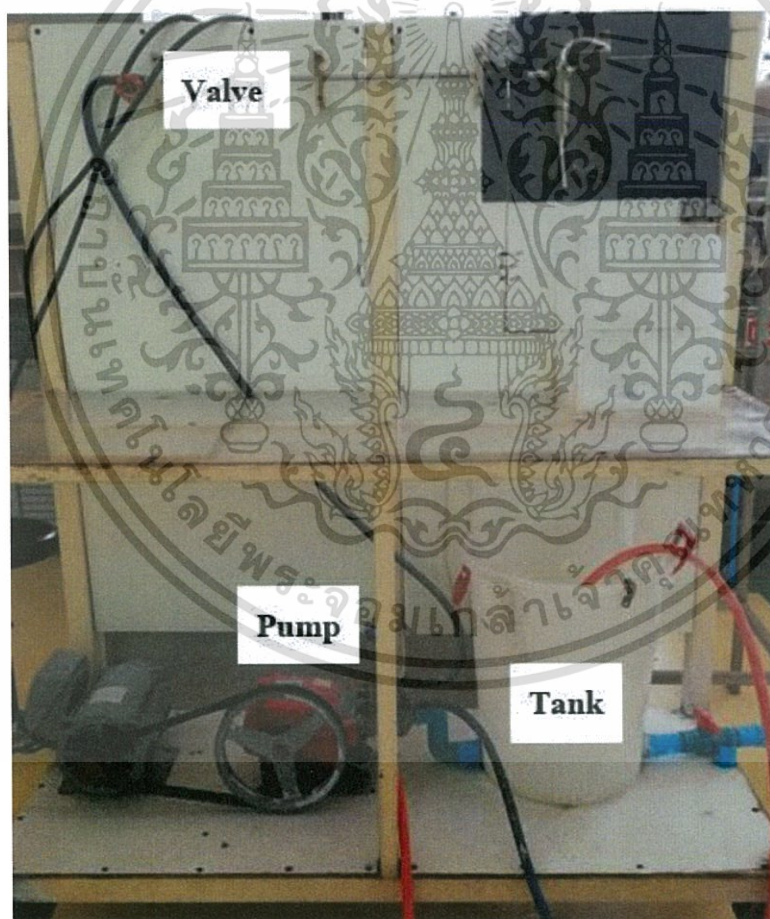
1. แคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.73 ไมโครเมตร
2. ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 50 นาโนเมตร
3. น้ำที่อุณหภูมิห้อง.

3.2 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

1. อุปกรณ์ไฮโดรโซโคลน
 - 1.1 ไฮโดรโซโคลน SWU ขนาด 41 มิลลิเมตร
 - 1.2 ไฮโดรโซโคลน MZ ขนาด 91 มิลลิเมตร
2. ชุดทดลองไฮโดรโซโคลน
 - 2.1 เกจวัดความดันสำหรับน้ำ ขนาด 0 – 60 psi
3. ถังพลาสติก ขนาด 40 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เหยือกพลาสติก ขนาด 5 ลิตร
5. ครอบกบตวง ขนาด 1,000 มิลลิลิตร
6. บิกเกอร์ ขนาด 1,500 มิลลิลิตร
7. ซ้อนตักสาร
8. ขวดเก็บสารตัวอย่าง ขนาด 60 มิลลิลิตร
9. นาฬิกาจับเวลา CASIO
10. เทอร์โมมิเตอร์ ขนาด 0 – 100 องศาเซลเซียส

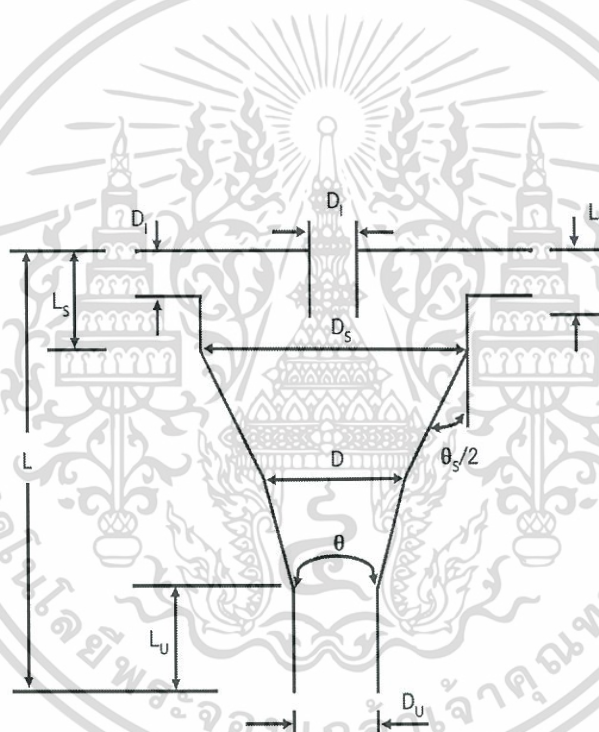


รูปที่ 3.1 ชุดทดลองไฮโครไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

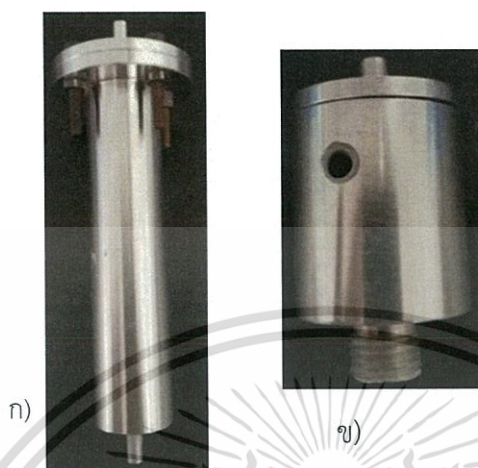
ตารางที่ 3.1 แสดงขนาดของไฮโดรไซโคลนที่ทำการทดลอง

ขนาด(mm)	D	D_s	D_i	D_o	D_u	L	L_s	L_o	L_u
MZ	10.0	10.0	2.2	2.0	2.0	90.0	0.0	4.0	0.0
SWU	10.0	10.0	2.24	2.6	2.0	41.0	-	4.0	-



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงสัญลักษณ์บอกลักษณะของไฮโดรไซโคลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงไฮโดรไซโคลน ก) ไฮโดรไซโคลน MZ ข) ไฮโดรไซโคลน SWU

3.3 วิธีการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve)

วิธีการทดลอง

1.1 การสร้างกราฟมาตรฐาน capacity curve

1.1.1 ทำการติดตั้งไฮโดรไซโคลน SWU ขนาด 41 มิลลิเมตร

1.1.2 เตรียมน้ำจำนวน 20 ลิตร เทลงในถังพลาสติกขนาด 40 ลิตร เพื่อเตรียมทำการ

ทดลอง

1.1.3 เปิดปั๊ม เพื่อสูบน้ำเข้าสู่ระบบ

1.1.4 เปิดวาล์ว 1 อย่างช้า ๆ เพื่อให้น้ำไหลเข้าไฮโดรไซโคลน และปรับวาล์วจนความดันลดได้ 1 psi รอจนสภาวะคงที่

1.1.5 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรน้ำ ที่ไหลออกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน พร้อมกับจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง

1.1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1.4 – 1.1.7 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 3, 5, 10, และ 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1.7 นำอัตราการไหล ที่ได้จากการวัดด้วยกระบอกตวงและที่ได้จากการอ่านค่าด้วยโรตاميเตอร์มา สร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve)

1.1.8 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1.1.1 – 1.1.7 แต่เปลี่ยนไฮโดรไซโคลนเป็นไฮโดรไซโคลน MZ

ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อหาผลของค่าความดันลด อัตราการป้อนสารผสม และความเข้มข้นของสารป้อน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ชนิด ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นสารผสม

วิธีการทดลอง

2.1 การทดลองเพื่อหาผลของค่าความดันลด อัตราการป้อนสารผสมและความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแยกซิงค์ออกไซด์โดยใช้ไฮโดรไซโคลน

2.1.1 ทำการติดตั้งไฮโดรไซโคลน SWU

2.1.2 นำสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทลงในถังขนาด 40 ลิตร และเก็บสารละลายซิงค์ออกไซด์ปริมาตร 60 ml

2.1.3 เปิดปั๊มเพื่อสูบลำสารละลายเข้าสู่ระบบ

2.1.4 เปิดวาล์ว 1 อย่างช้า ๆ เพื่อให้สารละลายไหลเข้าไฮโดรไซโคลนและปรับวาล์วจนความดันลดได้ 1 psi รอจนสภาวะคงที่

2.1.5 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรของสารละลายที่ไหลออกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน พร้อมกับจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง เก็บตัวอย่าง

2.1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1.4 – 2.1.5 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 3, 5, 10, 15, และ 20 psi

2.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1.2 – 2.1.6 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

2.1.8 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 2.1.1 – 2.1.7 แต่เปลี่ยนไฮโดรไซโคลนเป็นไฮโดรไซโคลน MZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอนที่ 3 การทดลองเพื่อหาผลของค่าความดันลด อัตราการการป้อนของสารผสม และความเข้มข้นของสารป้อน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยใช้สารป้อน 2 ชนิดได้แก่ สารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตกับน้ำ และ สารผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ กับน้ำ

วิธีการทดลอง

3.1 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแยกซิงค์ออกไซด์โดยการไฮโดรไซโคลน

3.1.1 ทำการติดตั้งไฮโดรไซโคลน MZ

3.1.2 นำสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทลงในถังขนาด 40 ลิตร และเก็บสารละลายซิงค์ออกไซด์ปริมาตร 60 ml

3.1.3 เปิดปั๊มเพื่อสูบลำสารละลายเข้าสู่ระบบ

3.1.4 เปิดวาล์ว 1 อย่างช้า ๆ เพื่อให้สารละลายไหลเข้าไฮโดรไซโคลนและปรับวาล์วจนความดันลดได้ 1 psi รอจนสภาวะคงที่

3.1.5 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรของสารละลายที่ไหลออกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน พร้อมกับจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง เก็บตัวอย่าง

3.1.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1.4 – 3.1.5 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 3, 5, 10, 15, และ 20 psi

3.1.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1.2 – 3.1.6 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3.2 การทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าอัตราการไหลและความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในกระบวนการแยกแคลเซียมคาร์บอเนตโดยการไฮโดรไซโคลน

3.2.1 ทำการติดตั้งไฮโดรไซโคลน MZ ขนาด

3.2.2 นำสารละลาย แคลเซียมคาร์บอเนต 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เทลงในถังขนาด 40 ลิตร และเก็บสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนตปริมาตร 60 ml

3.2.3 เปิดปั๊มเพื่อสูบลำสารละลายเข้าสู่ระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 เปิดวาล์ว 1 อย่างช้า ๆ เพื่อให้สารละลายไหลเข้าไฮโดรไซโคลนและปรับวาล์วจนความดันลดได้ 1 psi รอจนสภาวะคงที่

3.2.5 นำกระบอกตวงวัดปริมาตรของสารละลายที่ไหลออกทางด้านบนและด้านล่างของไฮโดรไซโคลน พร้อมกับจับเวลาและบันทึกผลการทดลอง เก็บตัวอย่าง

3.2.6 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1.4 – 3.1.5 แต่เปลี่ยนความดันลดเป็น 3, 5, 10, 15, และ 20 psi

3.2.7 ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 3.1.2 – 3.1.6 แต่เปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผลการทดลอง

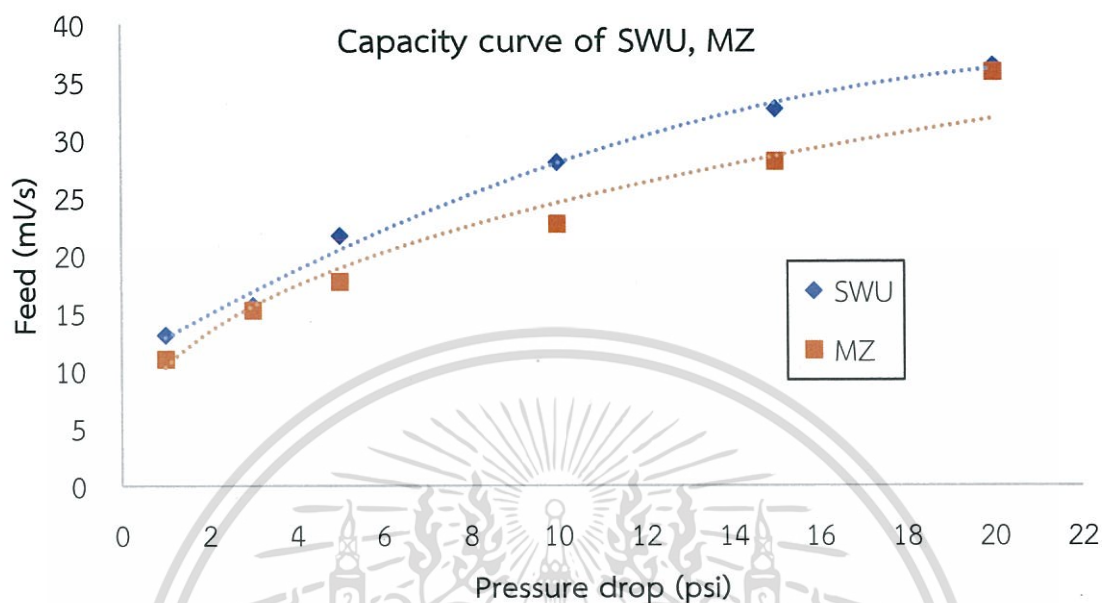
งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน 2 ขนาด ได้แก่ MZ และ SWU ซึ่งได้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ขั้นตอน คือ 1.การทดลองเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve) 2.การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ชนิด โดยใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นของผสม 3.การทดลองเพื่อหาผลของค่าความดันลด อัตราการการป้อนของสารผสม และความเข้มข้นของสารป้อน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน MZ โดยใช้สารป้อน 2 ชนิดได้แก่ สารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตกับน้ำ และ สารผสมนาโนซิงค์ออกไซด์กับน้ำ

ในการทดลอง ใช้นาโนซิงค์ออกไซด์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 50 นาโนเมตร ผสมกับน้ำเป็นสารผสม และใช้แคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.73 ไมครอน ผสมกับน้ำเป็นสารผสม ทำการทดลองที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และความดันลดตั้งแต่ 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 psi

ผลการดำเนินงาน

ตอนที่ 1 การทดลองเพื่อหากราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหล (capacity curve)

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบ capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด โดยใช้ น้ำ RO เป็นสารทดสอบ ทำการทดลองที่ความดันลด 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 psi ดังกราฟที่ 1



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบ capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด โดยใช้ น้ำ RO เป็นสารทดสอบ

จาก รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบ capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด โดยใช้ น้ำ RO เป็นสารทดสอบ แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันลบกับอัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด พบว่า ไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด ให้ผลในทำนองเดียวกัน โดยแตกต่างกันเล็กน้อยดังนี้

ในช่วงความดันเริ่มต้น ที่ความดัน 1 psi อัตราการไหลของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด มี ค่าใกล้เคียงกัน ที่ความดัน 1 psi อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลน MZ เท่ากับ 11.00 มิลลิลิตรต่อวินาที อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลน SWU เท่ากับ 13.00 มิลลิลิตรต่อวินาที เนื่องจากที่ความดันต่ำ ลักษณะการไหลของของผสมภายในไฮโดรไซโคลนยังไม่สมบูรณ์ (fully developed) ในช่วงความดันตั้งแต่ 5 – 15 psi อัตราการไหลทางเข้าเริ่มมีการแตกต่างกันเมื่อความดันลดเข้าสู่ 5 psi โดย อัตราการไหลเข้าของไฮโดรไซโคลน MZ เท่ากับ 17.70 มิลลิลิตรต่อวินาที อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลน SWU เท่ากับ 21.70 มิลลิลิตรต่อวินาที เนื่องจากไฮโดรไซโคลน SWU มีขนาดของทางออกด้านบน (overflow) มากกว่าไฮโดรไซโคลน MZ จึงทำให้อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลน SWU มากกว่า อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลน MZ และอัตราการไหลทางเข้าของของไหลแตกต่างกันมากขึ้น เมื่อความดันเพิ่มขึ้น จนถึง ที่ความดันลด 20 psi อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลน SWU เท่ากับ 36.40 มิลลิลิตรต่อวินาที อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลน MZ เท่ากับ 35.80 มิลลิลิตรต่อวินาที อัตราการไหลทางเข้าของทั้งสองมีค่าเพิ่มขึ้นจากความดันลด 1 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และจากรูปที่ 4.1 สรุปได้ว่า การเพิ่มความดันลดทำให้อัตราการไหลทางเข้าของไฮโดรไซโคลนเพิ่มขึ้นตามด้วย และอัตราการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน SWU ตีกว่าอัตราการไหลของของไหลภายในไฮโดรไซโคลน MZ

ตอนที่ 2 การทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคนาโนของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด โดยใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นของผสม

ตอนที่ 2.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพในการแยก (separation efficiency) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ของสารผสมนาโนซิงค์ออกไซด์

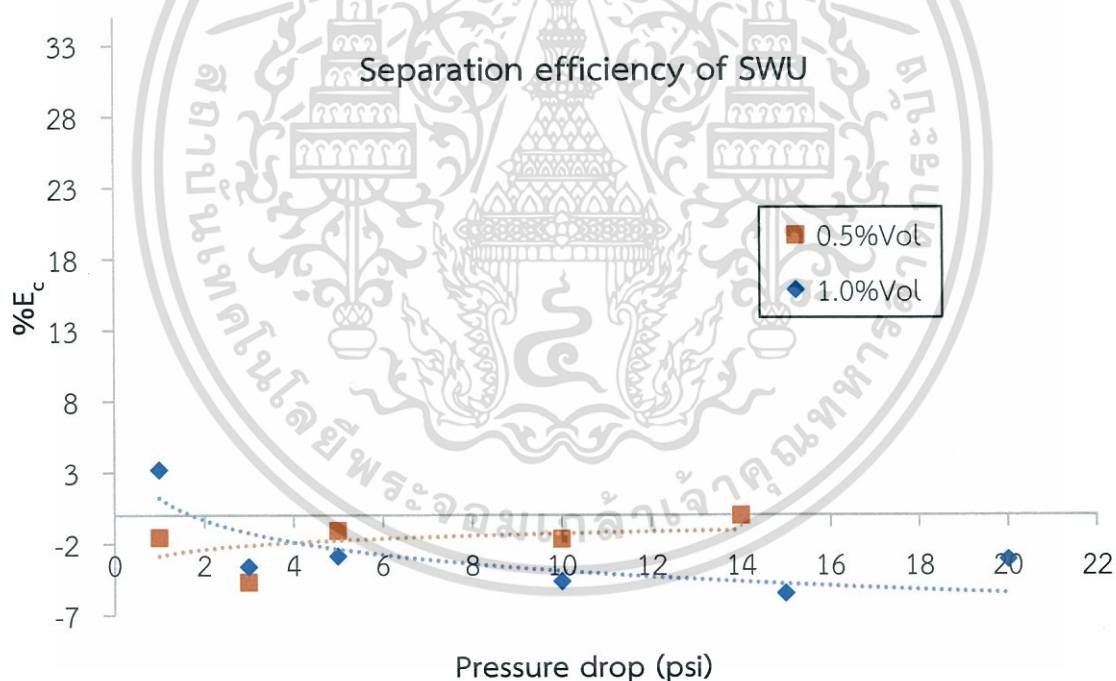
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านล่าง และประสิทธิภาพของการแยก ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ชนิด ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

run	HC	ความเข้มข้น (%Vol)	ΔP (psi)	ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า (%vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านบน(%vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านล่าง (%vol)	%E _c
1	SWU	0.5	1	0.3748	0.3807	0.3767	-1.560
2	SWU	0.5	3	0.3748	0.3924	0.3855	-4.690
3	SWU	0.5	5	0.3748	0.3789	0.3927	-1.098
4	SWU	0.5	10	0.3748	0.3811	0.3978	-1.685
5	SWU	0.5	14	0.3748	0.3749	0.3947	-0.022
6	MZ	0.5	1	0.3097	0.2557	0.3279	17.44
7	MZ	0.5	3	0.3097	0.2016	0.4156	34.90
8	MZ	0.5	5	0.3097	0.2038	0.4460	34.19
9	MZ	0.5	10	0.3097	0.1951	0.4618	37.00
10	MZ	0.5	15	0.3097	0.1862	0.4735	39.86
11	SWU	1.0	1	0.6524	0.6315	0.6935	3.211
12	SWU	1.0	3	0.6524	0.6761	0.7789	-3.63
13	SWU	1.0	5	0.6524	0.6712	0.6940	-2.87
14	SWU	1.0	10	0.6524	0.6827	0.6953	-4.64
15	SWU	1.0	15	0.6524	0.6884	0.7096	-5.51
16	SWU	1.0	20	0.6524	0.6729	0.6901	-3.14
17	MZ	1.0	1	0.5006	0.3757	0.5520	24.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

run	HC	ความเข้มข้น (%Vol)	ΔP (psi)	ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า (%vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านบน(%vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านล่าง (%vol)	%E _c
18	MZ	1.0	3	0.5006	0.3700	0.5557	26.09
19	MZ	1.0	5	0.5006	0.3348	0.5755	33.12
20	MZ	1.0	10	0.6502	0.4500	0.8552	30.78
21	MZ	1.0	15	0.6502	0.4223	0.8756	35.05
22	MZ	1.0	20	0.6502	0.3870	0.8597	40.49

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน SWU ได้ดังรูปที่ 4.2

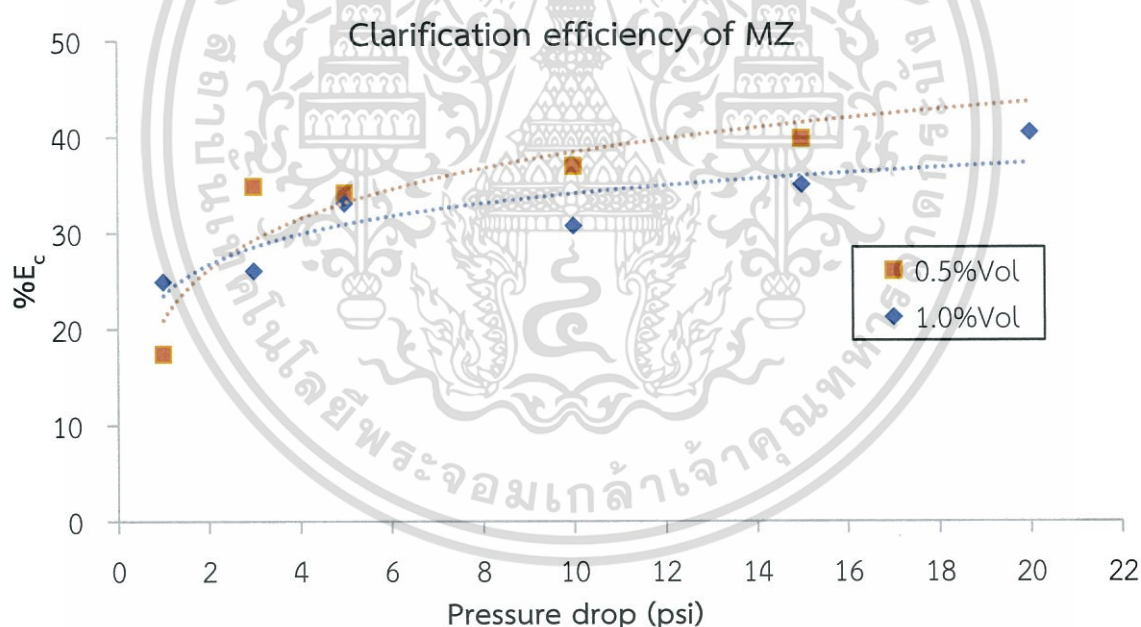


รูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของ ไฮโดรไซโคลอน SWU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอน SWU ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi จากรูปที่ 4.2 พบว่าที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันตั้งแต่ 1-20 psi ไฮโดรไซโคลอน SWU ไม่สามารถแยกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ เนื่องจากไฮโดรไซโคลอน SWU มีระยะเวลาในการเกิดการแยก (residence time) อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์น้อย เพราะว่ายาว (L) ของไฮโดรไซโคลอน SWU เท่ากับ 41.0 มิลลิเมตร จึงทำให้มีระยะเวลาไม่เพียงพอที่จะทำให้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เกิดการหมุนวนภายในไฮโดรไซโคลอนแล้วเกิดการแยก จึงทำให้ความเข้มข้นของผสมสายป้อนกับสายออก (อันเดอร์โฟลและโอเวอร์โฟล) มีค่าเท่ากัน

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลอน MZ ได้ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของไฮโดรไซโคลอน MZ

จากรูปที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi จากรูปที่ 4.3 พบว่าไฮโดรไซโคลน MZ สามารถแยกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์ได้ และเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันลด 3-15 psi มีประสิทธิภาพในการแยกมากกว่าที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ตอนที่ 3 การทดลองเพื่อหาผลของค่าความดันลด อัตราการการป้อนของสารผสม และความเข้มข้นของสารป้อน ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน MZ โดยใช้สารป้อน 2 ชนิดได้แก่ สารผสมแคลเซียมคาร์บอเนต(ความหนาแน่น 2.71 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดเฉลี่ย 0.73 ไมโครเมตร)กับน้ำ และ สารผสมนาโนซิงค์ออกไซด์ไซด์ (ความหนาแน่น 5.61 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ขนาดเฉลี่ย 50 นาโนเมตร)กับน้ำ

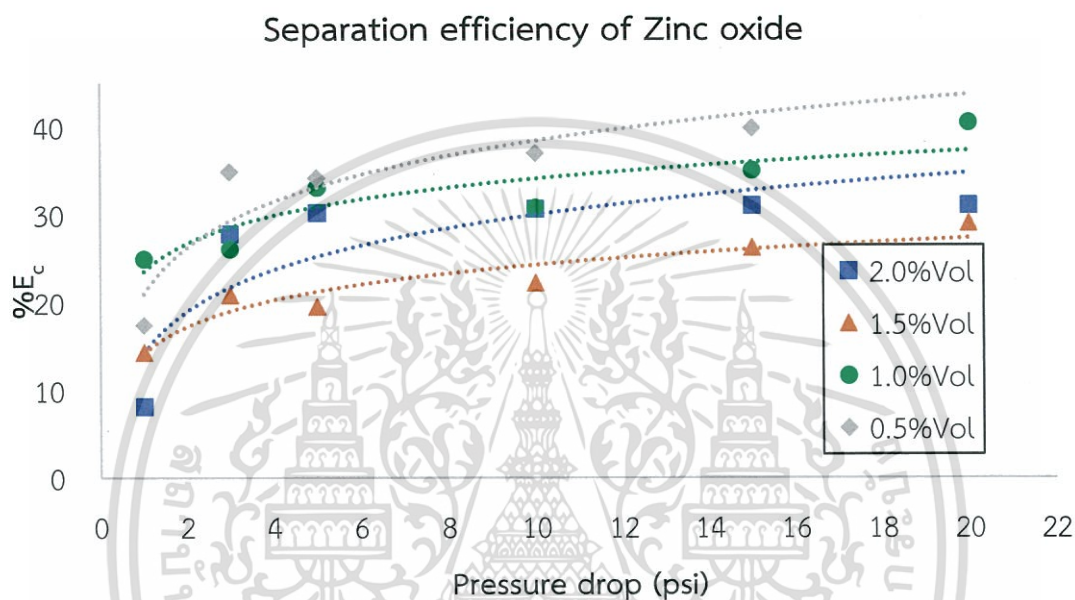
ตอนที่ 3.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพของการแยก (separation efficiency) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ของสารผสมซิงค์ออกไซด์

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านล่าง และประสิทธิภาพของการแยก ของไฮโดรไลโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

run	HC	ความเข้มข้น (%Vol)	ΔP (psi)	ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า (%Vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านบน (%Vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านล่าง (%Vol)	%E _c
1	MZ	0.5	1	0.3097	0.2557	0.3279	17.44
2	MZ	0.5	3	0.3097	0.2016	0.4156	34.89
3	MZ	0.5	5	0.3097	0.2038	0.4460	34.19
4	MZ	0.5	10	0.3097	0.1951	0.4618	36.99
5	MZ	0.5	15	0.3097	0.1862	0.4735	39.86
6	MZ	1.0	1	0.5006	0.3757	0.5520	24.96
7	MZ	1.0	3	0.5006	0.3700	0.5557	26.09
8	MZ	1.0	5	0.5006	0.3348	0.5755	33.12
9	MZ	1.0	10	0.6502	0.4500	0.8552	30.78
10	MZ	1.0	15	0.6502	0.4223	0.8756	35.05
11	MZ	1.0	20	0.6502	0.3870	0.8597	40.49
12	MZ	1.5	1	1.1405	0.9773	1.2754	14.31
13	MZ	1.5	3	1.1405	0.9025	1.3052	20.87
14	MZ	1.5	5	1.1405	0.9177	1.3406	19.54
15	MZ	1.5	10	1.1405	0.8870	1.3500	22.22
16	MZ	1.5	15	1.1405	0.8408	1.3433	26.28
17	MZ	1.5	20	1.1405	0.8092	1.4689	29.05
18	MZ	2.0	1	0.9240	0.8488	0.9654	8.13
19	MZ	2.0	3	0.9240	0.6671	1.0194	27.80
20	MZ	2.0	5	0.9240	0.6449	1.0662	30.20
21	MZ	2.0	10	0.9240	0.6409	1.0484	30.64
22	MZ	2.0	15	0.9240	0.6373	1.0962	31.02
23	MZ	2.0	20	0.9240	0.6372	1.0727	31.03

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของไฮโดรไซโคลน MZ

จากรูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi จากรูปที่ 4.4 พบว่าไฮโดรไซโคลน MZ สามารถแยกสารผสมซึ่งคอลลอยด์ได้ และเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้นของสารป้อนน้อยที่สุดเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร พบว่ามีประสิทธิภาพในการแยกดีที่สุด ในช่วงความดันลดที่ 1-20 psi เนื่องจากเมื่อสารป้อนมีความเข้มข้นสูงขึ้นจะมีปริมาณอนุภาคนาโนซึ่งคอลลอยด์มีมากขึ้น จึงเกิดแรงกระทำระหว่างอนุภาคมากขึ้น (particle interaction) สารผสมมีความหนืดมากขึ้น ทำให้ต้องใช้ความดันลดสูง เพื่อที่จะให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเพื่อแยกสารเพิ่มขึ้น และเนื่องจากซึ่งอนุภาคนาโนซึ่งคอลลอยด์มีความหนาแน่นมากกว่าน้ำประมาณ 5 เท่า การเพิ่มความเข้มข้นจึงมีผลต่อแรงที่เกิดขึ้นในการแยกอนุภาค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.4 พบว่าที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันลด 5 psi จะมีประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เท่ากับ ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันลด 20 psi แสดงว่าถ้าทำการทดลองโดยการเพิ่มความดันลดขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร อาจจะสามารถแยกได้ดีกว่าที่ความดันลด 20 psi จากผลการทดลองในตอนนี้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของสารผสมที่มีความเข้มข้นมากทำได้โดยการเพิ่มความดันลดในการทำงาน

ตอนที่ 3.2 ผลการทดลองประสิทธิภาพของการแยก (separation efficiency) ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนต

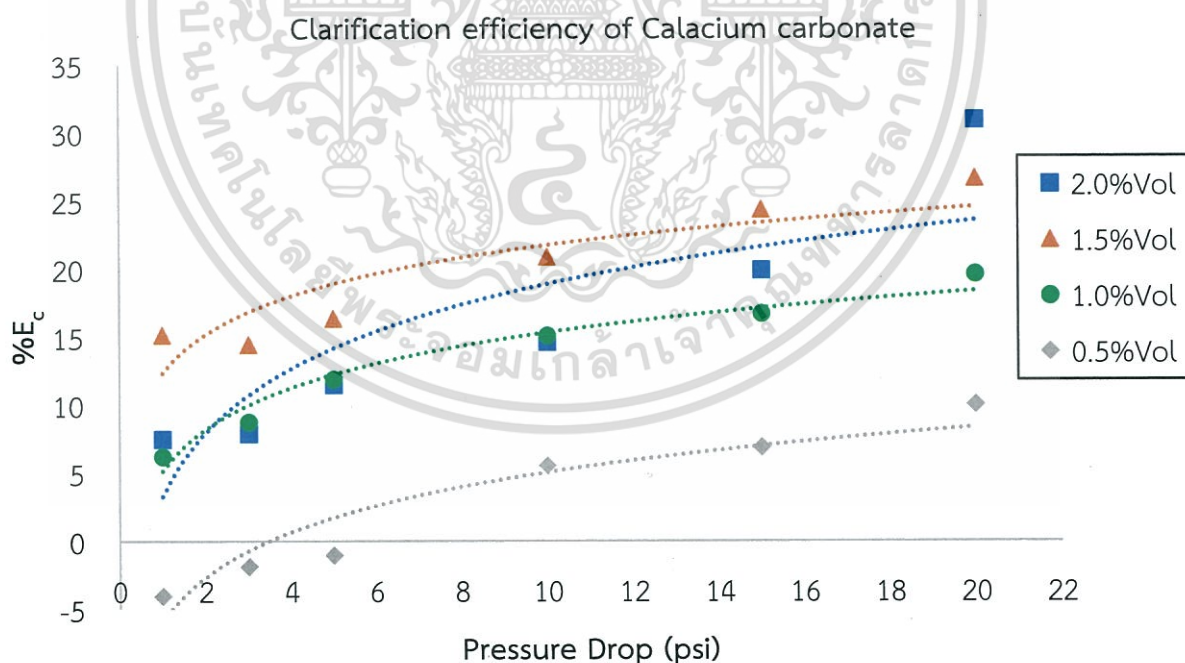
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าความดันลด, ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านบน, ความเข้มข้นของสารผสมทางออกด้านล่าง และประสิทธิภาพของการแยก ของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

run	HC	ความเข้มข้น (%Vol)	ΔP (psi)	ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า (%Vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านบน (%Vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านล่าง (%Vol)	%E _c
1	MZ	0.5	1	0.3753	0.3904	0.4146	-4.03
2	MZ	0.5	3	0.3753	0.3822	0.4361	-1.85
3	MZ	0.5	5	0.3753	0.3792	0.4366	-1.04
4	MZ	0.5	10	0.3753	0.3545	0.4522	5.53
5	MZ	0.5	15	0.3753	0.3495	0.4636	6.88
6	MZ	0.5	20	0.3753	0.3376	0.4670	10.04
7	MZ	1.0	1	0.8906	0.8352	0.9223	6.22
8	MZ	1.0	3	0.8906	0.8126	0.9244	8.76
9	MZ	1.0	5	0.8906	0.7846	0.9460	11.91
10	MZ	1.0	10	0.8906	0.7562	0.9755	15.09
11	MZ	1.0	15	0.8906	0.7416	0.9795	16.73
12	MZ	1.0	20	0.8906	0.7158	1.0233	19.63
13	MZ	1.5	1	1.3694	1.1616	1.4587	15.17
14	MZ	1.5	3	1.3694	1.1713	1.5026	14.46
15	MZ	1.5	5	1.3694	1.1452	1.4678	16.37
16	MZ	1.5	10	1.3694	1.0834	1.5370	20.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

run	HC	ความเข้มข้น (%Vol)	ΔP (psi)	ความเข้มข้นของสารป้อนเข้า (%vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านบน (%vol)	ความเข้มข้นของสารออกด้านล่าง (%vol)	%E _c
17	MZ	1.5	15	1.3694	1.0354	1.5624	24.38
18	MZ	1.5	20	1.3694	1.0042	1.5660	26.66
19	MZ	2.0	1	1.6243	1.5026	1.7304	7.49
20	MZ	2.0	3	1.6243	1.4958	1.7684	7.91
21	MZ	2.0	5	1.6243	1.4375	1.7937	11.50
22	MZ	2.0	10	1.6243	1.3870	1.8714	14.61
23	MZ	2.0	15	1.6243	1.3010	1.9233	19.91
24	MZ	2.0	20	1.6243	1.1211	1.8923	30.98

ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบค่าความดันตก และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ได้ดังรูปที่ 4.5



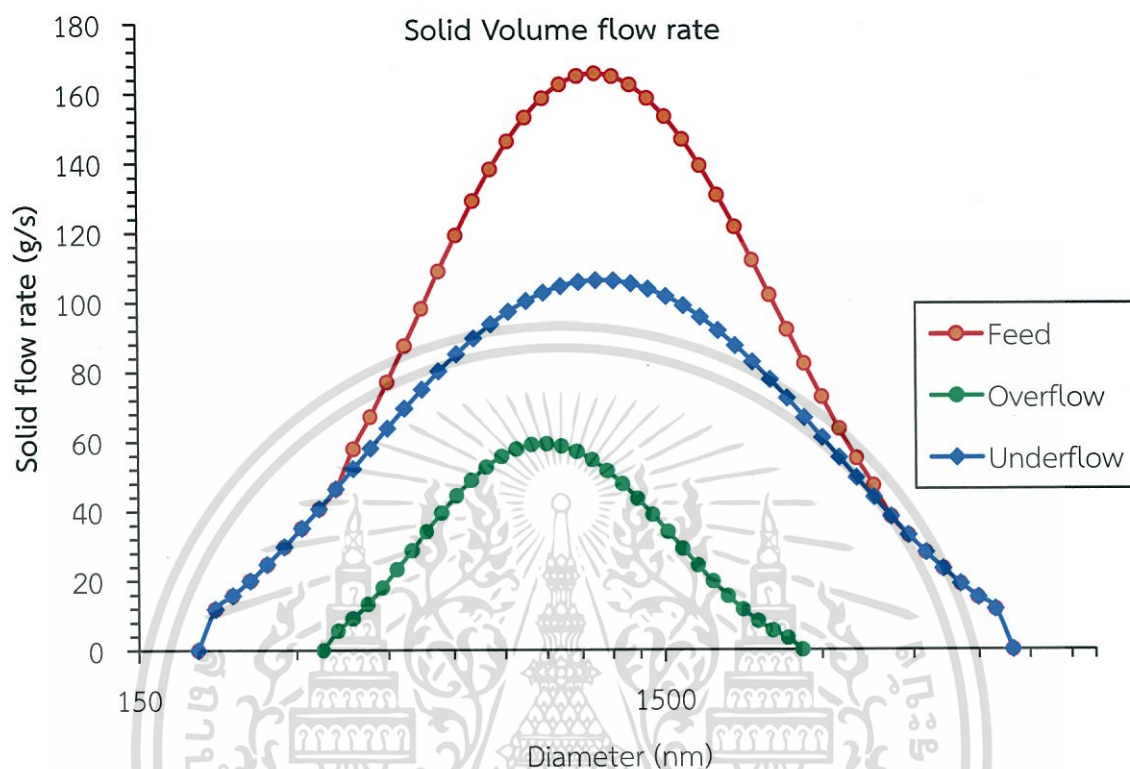
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi ของไฮโดรไซโคลน MZ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบค่าความดันลด และความเข้มข้นของสารป้อนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-20 psi จากรูปที่ 4.5 พบว่าไฮโดรไซโคลอน MZ สามารถแยกสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตได้ และเมื่อความดันลดเพิ่มขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกเพิ่มขึ้น ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 1-5 psi ไฮโดรไซโคลอน MZ ไม่สามารถแยกสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตได้ เนื่องจากความดันลดต่ำเกินไป แต่ที่ความดันลดมากกว่า 3 psi สามารถแยกสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตได้ สังเกตจากรูปที่ 1.5 และที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ในช่วงความดัน 1-20 psi มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีที่สุด

สารป้อนที่ความเข้มข้นต่ำ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร นั้น มีประสิทธิภาพในการแยกต่ำ เนื่องจากขนาดของแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเล็กและเบามาก (ขนาด 0.73 ไมโครเมตร และความหนาแน่นมากกว่าน้ำประมาณ 2.7 เท่า) ทำให้แคลเซียมคาร์บอเนตประพฤติตัวเหมือนน้ำ โดยแรงลาก (Drag force) ที่ทำต่ออนุภาคมีค่าสูงกว่าแรงเหวี่ยงที่ใช้ในการแยกอนุภาค เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเท่ากับ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร สารผสมมีความหนืดขึ้น แรงกระทำระหว่างอนุภาคมีมากขึ้น ทำให้ผลของแรงลาก (Drag force) ที่ทำต่ออนุภาคมีค่าลดลง ในกรณีนี้การเพิ่มความเข้มข้นจึงช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การที่สารผสมความเข้มข้นสูงเกินไปแทนที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการแยกดี กลับส่งผลตรงกันข้ามเนื่องจากจำนวนอนุภาคที่สูงขึ้นส่งผลให้อนุภาคไปรวมตัวกันที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน เรียกว่าเกิดการ Crowded และทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง

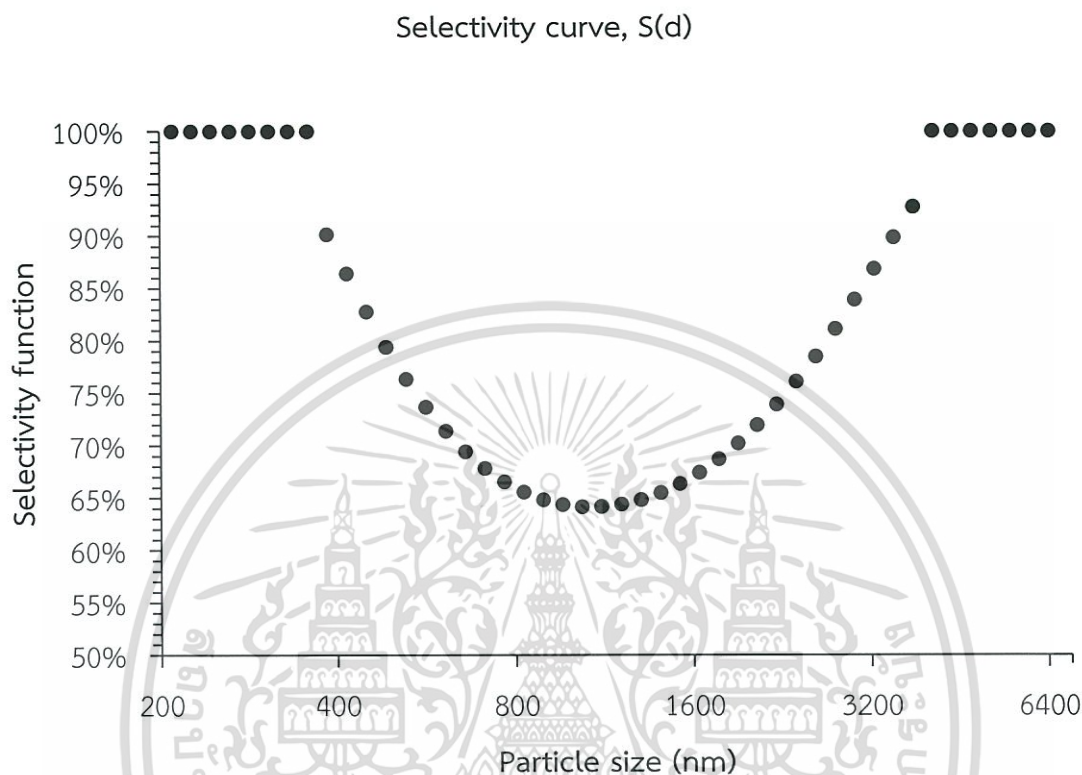
ตอนที่ 3.3 ผลการทดลองแสดงอัตราการไหลของของแข็งใน Feed, Overflow, Underflow ของไฮโดรไซโคลอน MZ ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนต ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการไหลของของแข็งที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตโดยใช้ไฮโดรไซโคลน MZ

จากรูปที่ 4.6 แสดงอัตราการไหลของของแข็งที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดัน 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตโดยใช้ไฮโดรไซโคลน MZ พบว่า อัตราการไหลของของแข็งใน Underflow มีขนาดอนุภาคทุกขนาด ส่วนใน Overflow มีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 300 ถึง 2500 ไมโครเมตร เท่านั้น

ผลการทดลองแสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ไฮโดรไซโคลน MZ



รูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ไฮโดรไซโคลน MZ

จากรูปที่ 4.7 แสดงประสิทธิภาพในการคัดขนาดอนุภาค ที่ ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi ของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ใช้ไฮโดรไซโคลน MZ พบว่าในช่วงที่ขนาดอนุภาค 400 – 800 นาโนเมตร อนุภาคขนาดเล็กแทรกติดไปกับอนุภาคขนาดใหญ่ที่ไหลลงสู่ทางออกด้านล่างจึงทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่กับอนุภาคขนาดใหญ่ติดกันออกมาด้วย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

1. สรุป

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลน 2 ชนิด ได้แก่ ไฮโดรไซโคลน SWU และไฮโดรไซโคลน MZ โดยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนโดยใช้สารผสม 2 ชนิด ได้แก่ ซิงค์ออกไซด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 50 นาโนเมตรและแคลเซียมคาร์บอเนตมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 0.73 ไมโครเมตร ผสมกับน้ำเป็นสารผสม ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และทำการทดลองที่ ความดันลดตั้งแต่ 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 psi

ผลที่ได้นำเสนอในลักษณะกราฟแสดงความสัมพันธ์ของไฮโดรไซโคลนกับความเข้มข้น และวิเคราะห์ผลที่ได้จากกราฟดังเสนอในบทที่ 4 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การเปรียบเทียบ Capacity curve ของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด โดยใช้น้ำ RO เป็นสารทดสอบ พบว่า ไฮโดรไซโคลน SWU ให้อัตราการไหลทางเข้าดีที่สุดในที่ 1 psi เท่ากับ 13.00 มิลลิลิตรต่อวินาที และอัตราการไหลสูงสุดที่ 20 psi เท่ากับ 36.40 มิลลิลิตรต่อวินาที และไฮโดรไซโคลน MZ อัตราการไหลต่ำสุดที่ 1 psi เท่ากับ 11.00 มิลลิลิตรต่อวินาที และอัตราการไหลสูงสุดที่ 20 psi เท่ากับ 35.80 มิลลิลิตรต่อวินาที

2. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลนทั้ง 2 ขนาด ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และ 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์เป็นของสารผสม พบว่า ไฮโดรไซโคลน SWU ไม่สามารถทำการแยกอนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้ แต่ไฮโดรไซโคลน MZ สามารถทำการแยกอนุภาคซิงค์ออกไซด์ได้ ประสิทธิภาพในการแยกต่ำสุดอยู่ที่ 20 % สูงสุดที่ 40 %

3. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลน MZ ที่ความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร โดยใช้อนุภาคนาโนซิงค์ออกไซด์และแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นสารผสม พบว่า ไฮโดรไซโคลน MZ มีประสิทธิภาพในการแยกซิงค์ออกไซด์สูงสุดที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ผลการทดลองในตอนนี้นี้สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มประสิทธิภาพในการแยกของสารผสมที่มีความเข้มข้นมากทำได้โดยการเพิ่มความดันลดในการทำงาน และมีประสิทธิภาพในการแยกแคลเซียมคาร์บอเนตสูงสุดที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เนื่องจากสารผสมมีความหนืดขึ้น แรงกระทำระหว่างต่ออนุภาคมีมากขึ้น ทำให้ผลของแรงลาก (Drag force) ที่ทำต่ออนุภาคมีค่าลดลง ในกรณีนี้การ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพิ่มความเข้มข้นจึงช่วยทำให้ประสิทธิภาพในการแยกดีขึ้น อย่างไรก็ตาม การที่สารผสมความเข้มข้นสูงเกินไปแทนที่จะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการแยกดี กลับส่งผลตรงกันข้ามเนื่องจากจำนวนอนุภาคที่สูงขึ้นส่งผลให้อนุภาคไปรวมตัวกันที่ทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลอน และทำให้ประสิทธิภาพในการแยกลดลง

2. ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการศึกษาประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอนมีดังนี้

1. ทำการเปลี่ยนชนิดของอนุภาคทดสอบเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอน
2. ทำการออกแบบให้ความยาวของไฮโดรไซโคลอนมีหลายๆ ขนาด เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการแยกที่ความยาวต่างๆ
3. ทำการเปลี่ยนความเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของผสมในการทดสอบ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการแยกที่ความเข้มข้นอื่นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wanwilai Kraipech Evans, Pongprawut Onkaew and Boonrit Heunghok, (2015). An Application of Small Hydrocyclones for Separating Yeast in the Brewing Industry.
- [2] D. Bradley, (1965). the hydrocyclone: international series of monographs in chemical engineering. Pergamon. University of Cambridge, UK
- [3] Kraipech, W. (2002). Study of the performance of industrial hydrocyclones. Ph.D. Thesis. UMIST. England
- [4] ปรีชา แก้วศรีพรหม, (2552). การศึกษาประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน. มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- [5] Martin Rhodes, (2008). Introduction to particle technology 2nd. Monash University, Australia
- [6] ค้นข้อมูลจาก <https://www.mtec.or.th/mcu/phcl/files/presentation/Technique>
- [7] จุฬาสัมพันธ์, (2556). นักวิจัยจุฬาฯ พัฒนาเทคโนโลยีผลิตนาโนแคลเซียมคาร์บอเนต เพื่อใช้ในระดับอุตสาหกรรม ลดการนำเข้า. ฉบับที่ 7 (6-7).
- [8] Feridun Boylu, Kenan Cinku, Fahri Esenli, Mehmet Sabri Celik, (2009). The separation efficiency of Na-Bentonite by hydrocyclone and characterization of hydrocyclone products.
- [9] Z.-S. Bai and H.-L. Wang, (2007). CRUDE OIL DESALTING USING HYDROCYCLONES.
- [10] Zhi-shan Bai, Hua-lin Wang and Shan-Tung Tu. Oil-water separation using hydrocyclones enhanced by air bubbles. Chemical engineering research and design 89(2011), (p 55-59).
- [11] Isabele C. Bicalho, Jose L. Mognon, Juliana Shimoyama, Carlos H. Ataide and Clausio R. Duarte, (2011). Separation of yeast from alcoholic fermentation in small hydrocyclones. Separation and Purification Technology 87(2012), (p 62-70).

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] Jian-Feng Yu, Jian Fu , Hao Cheng and Zhengwei Cui, (2016). Recycling of rare earth particle by mini-hydrocyclones. Waste Management(2016).



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพผนวก ก
รูปของสารผสมที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของสารผสมซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองของไฮโดรโซโคลน SWU เรียง overflow feed under flow ตามลำดับ



รูปที่ 1 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi



รูปที่ 2 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

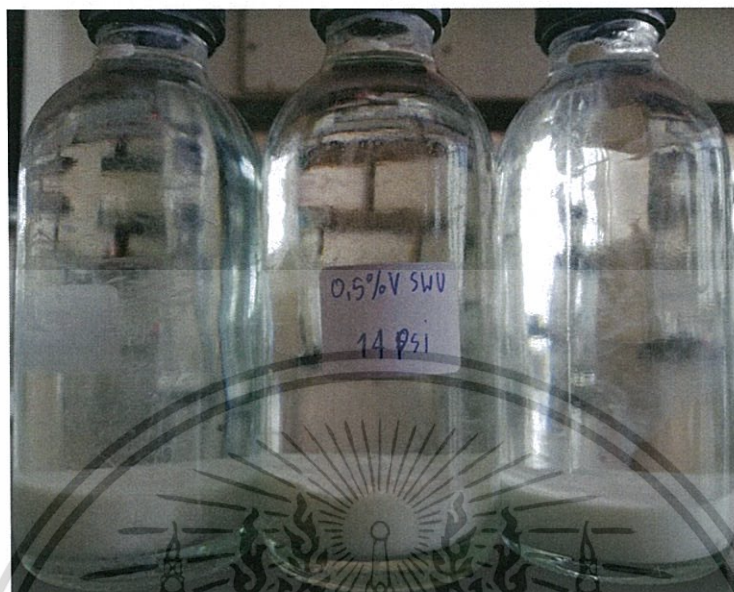


รูปที่ 3 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi



รูปที่ 4 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

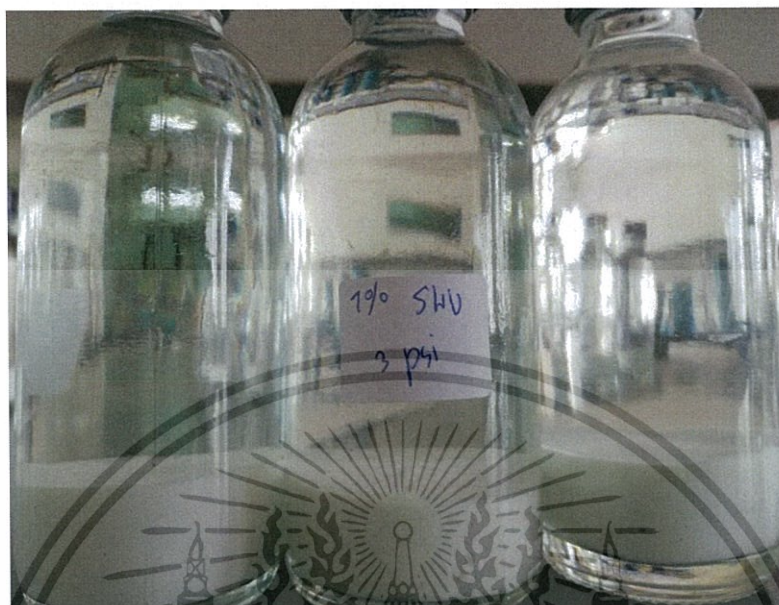


รูปที่ 5 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 14 psi



รูปที่ 6 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

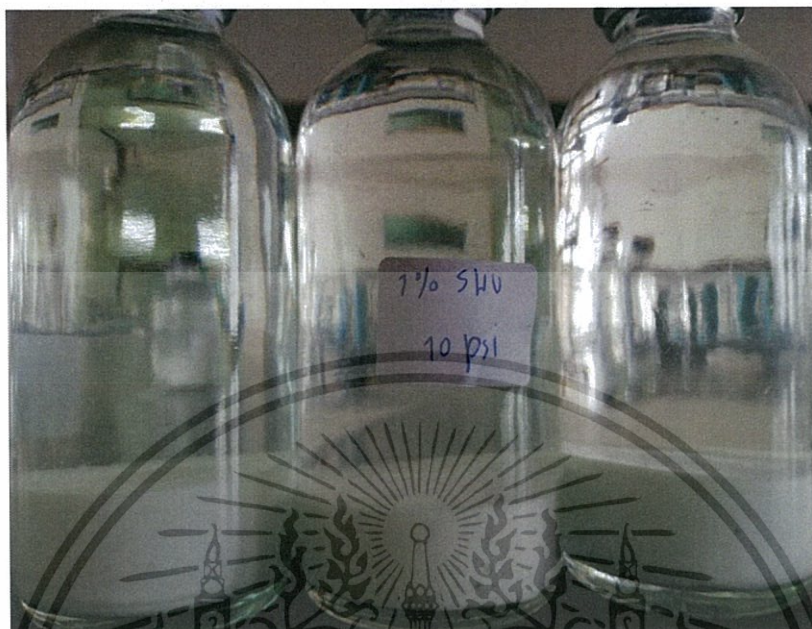


รูปที่ 7 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi



รูปที่ 8 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

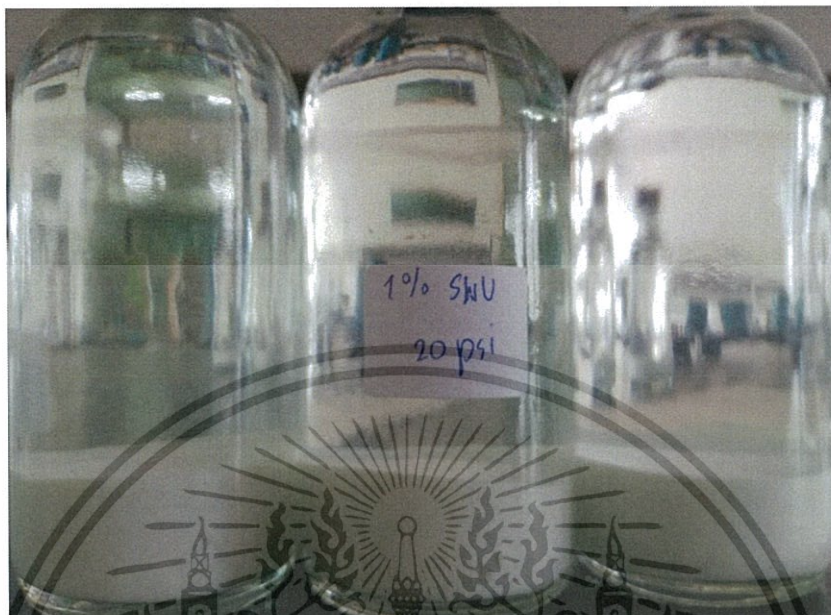


รูปที่ 9 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 10 psi



รูปที่ 10 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 15 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi
รูปของสารผสมซิงค์ออกไซด์ที่ได้จากการทดลองของไฮโดรไซโคลน MZ เรียง overflow feed
under flow ตามลำดับ

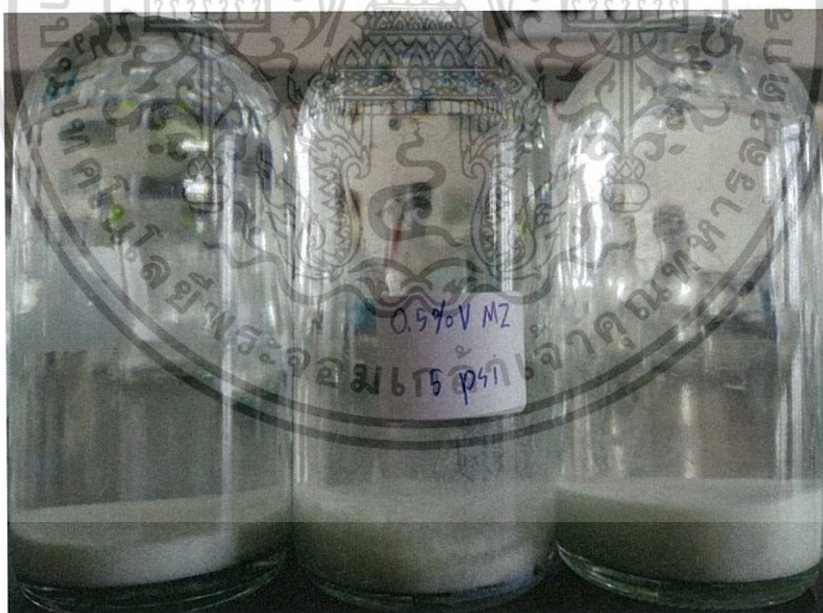


รูปที่ 12 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

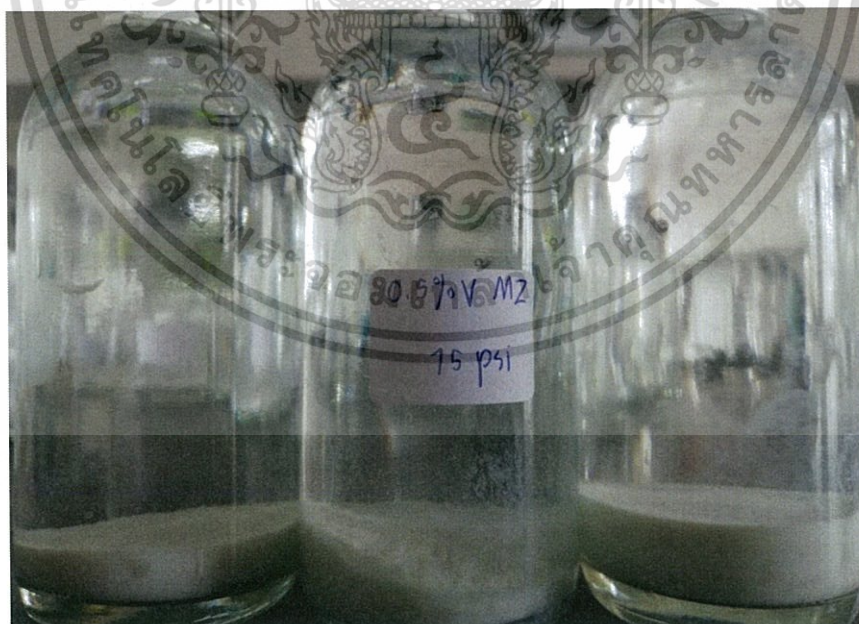


รูปที่ 14 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

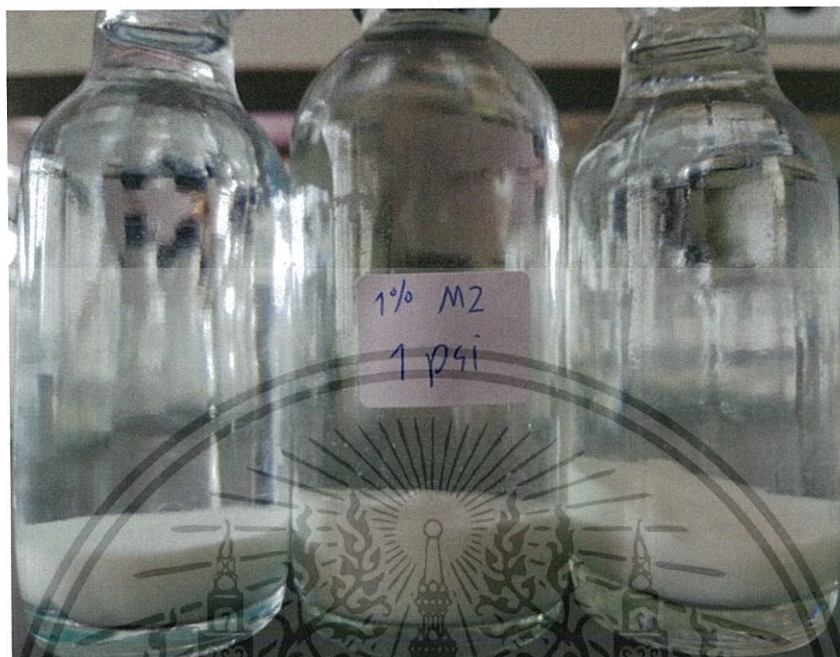


รูปที่ 15 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 10 psi



รูปที่ 16 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 15 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 17 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi



รูปที่ 18 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 19 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi



รูปที่ 20 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 21 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 15 psi



รูปที่ 22 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

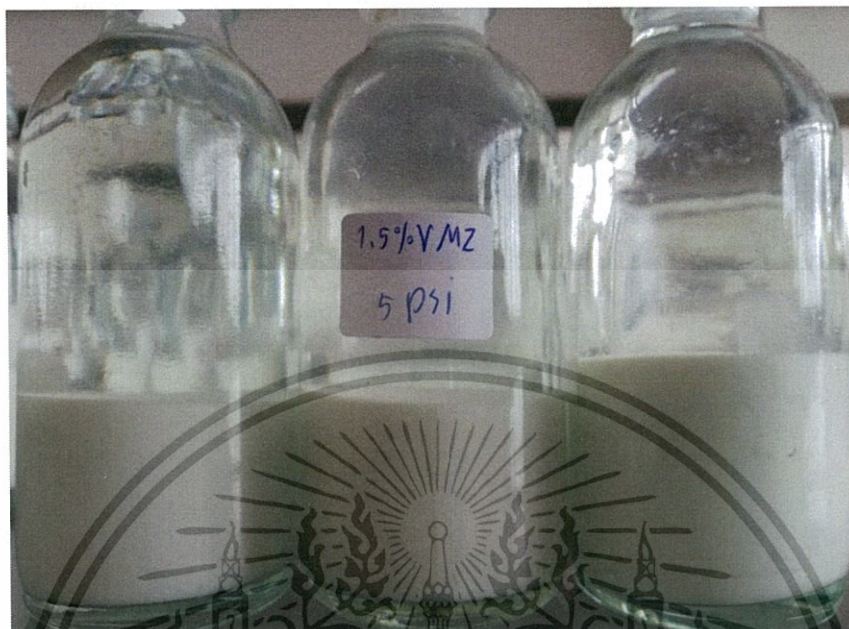


รูปที่ 23 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi



รูปที่ 24 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

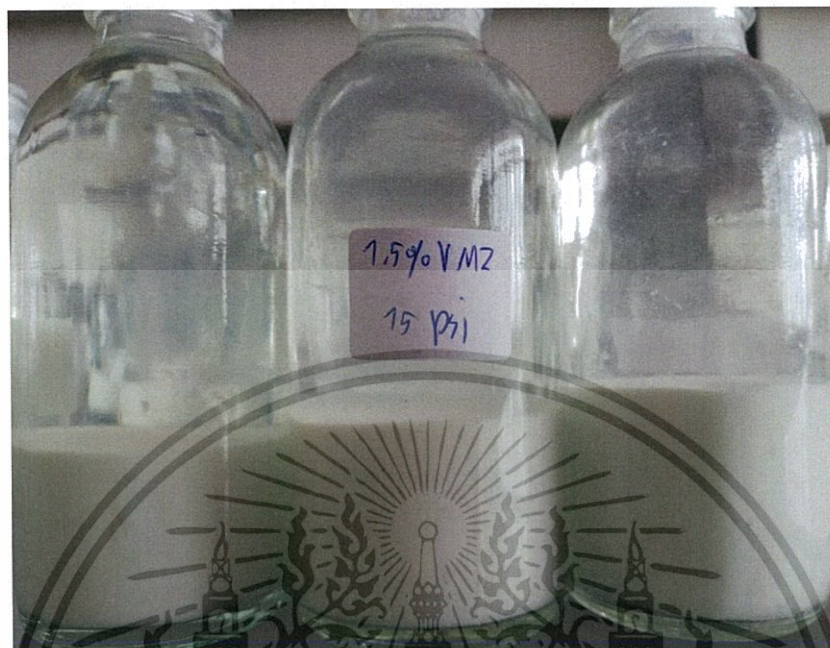


รูปที่ 25 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi



รูปที่ 26 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

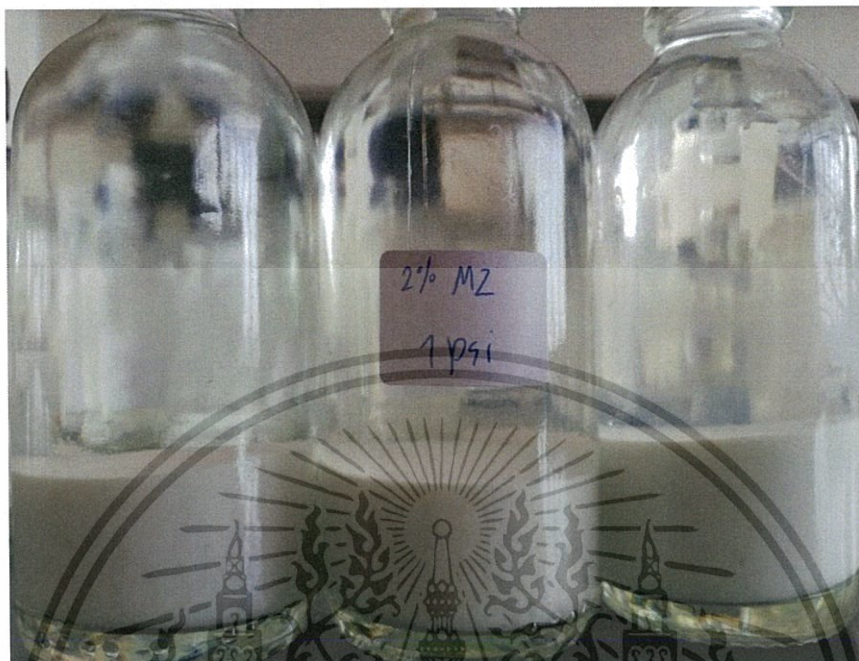


รูปที่ 27 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 15 psi

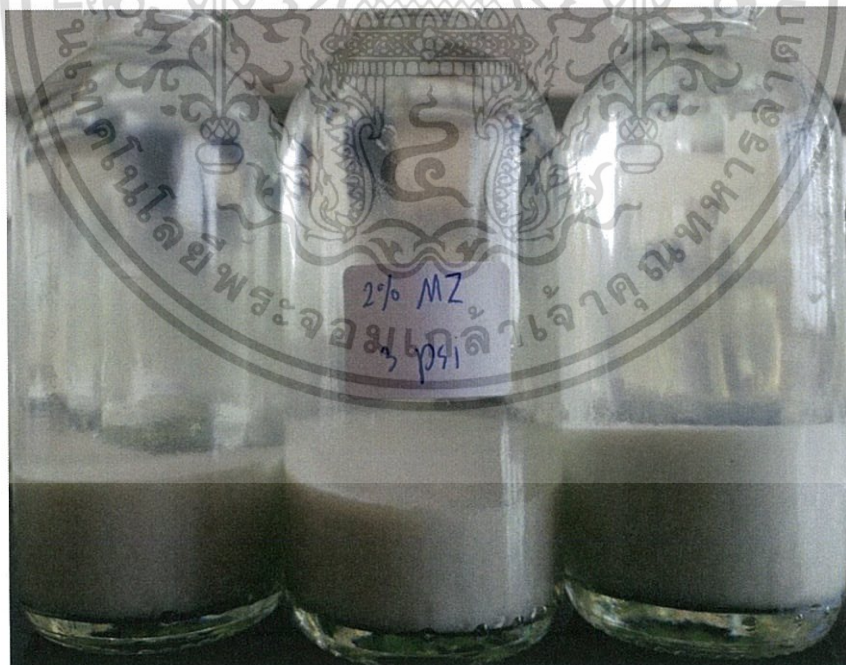


รูปที่ 28 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

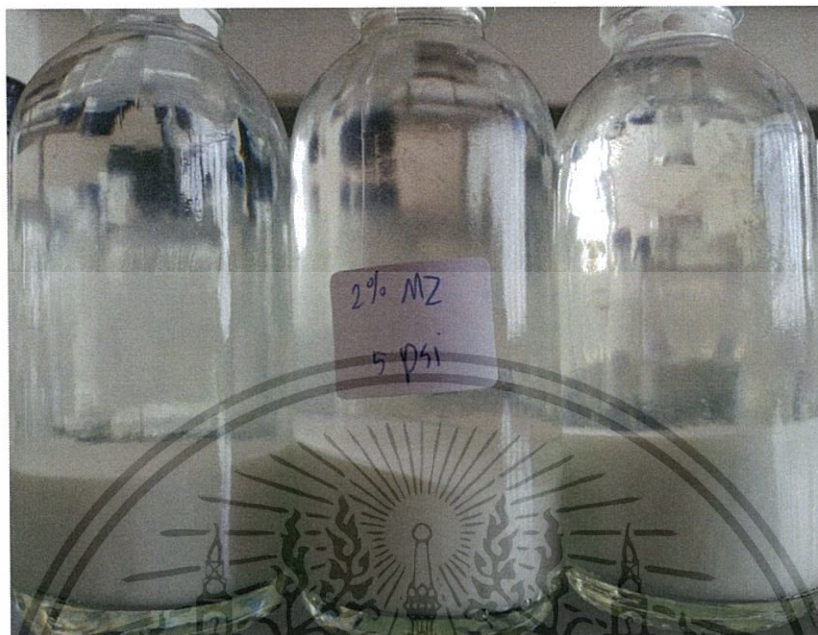


รูปที่ 29 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi



รูปที่ 30 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 31 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi

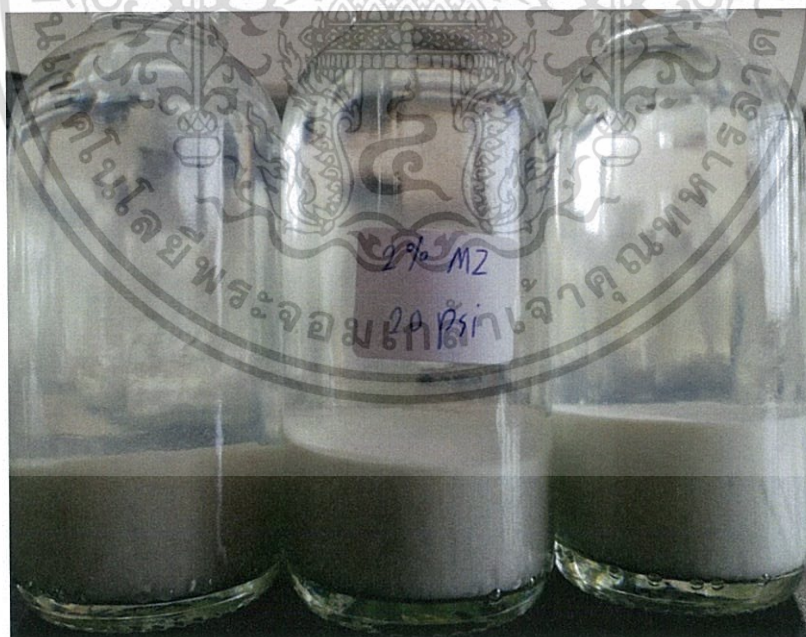


รูปที่ 32 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



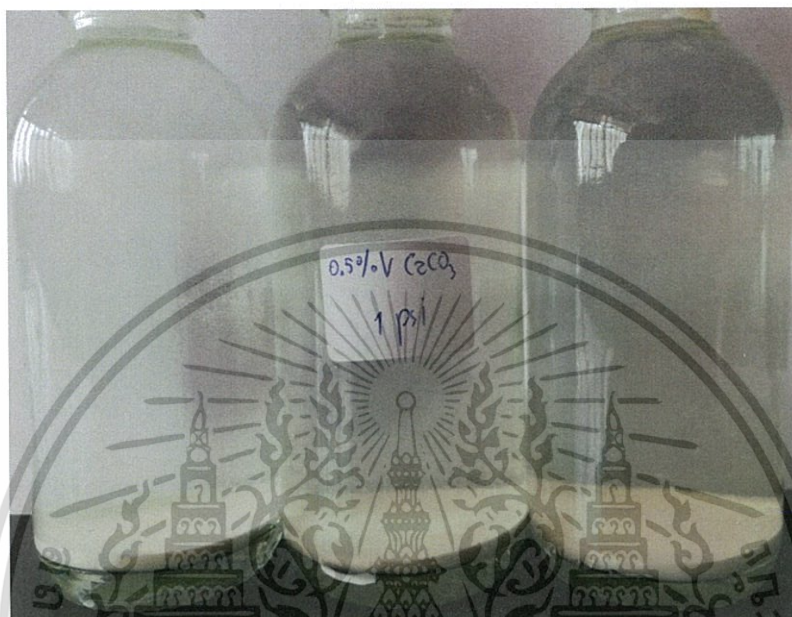
รูปที่ 33 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 15 psi



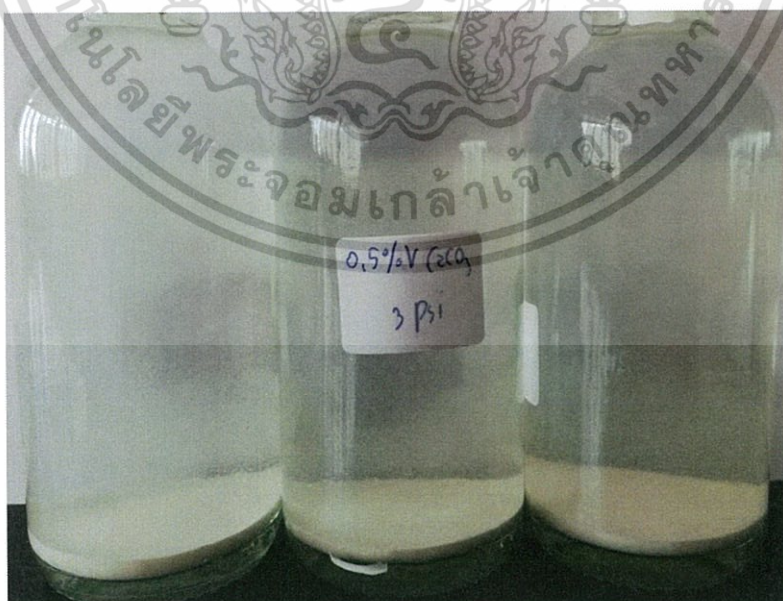
รูปที่ 34 สารผสมของซิงค์ออกไซด์ที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปของสารผสมแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากการทดลองของไฮโดรไซโคลน MZ เรียง overflow feed under flow ตามลำดับ

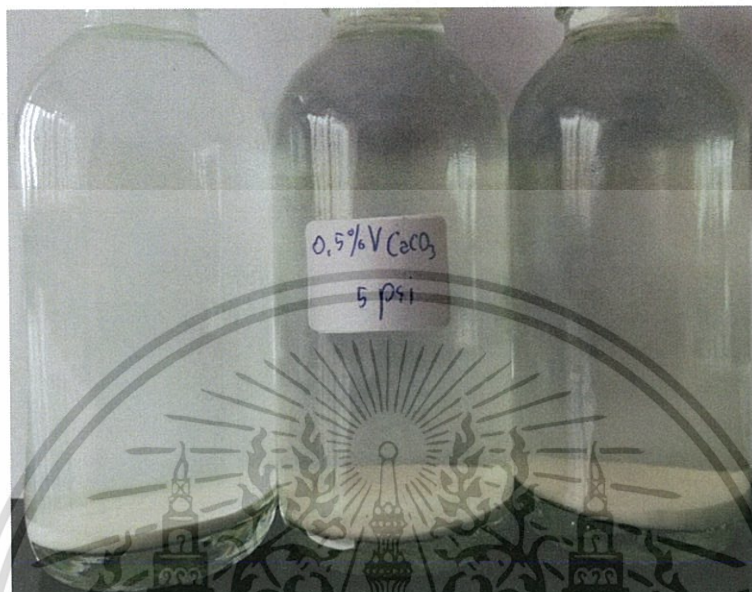


รูปที่ 35 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 36 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

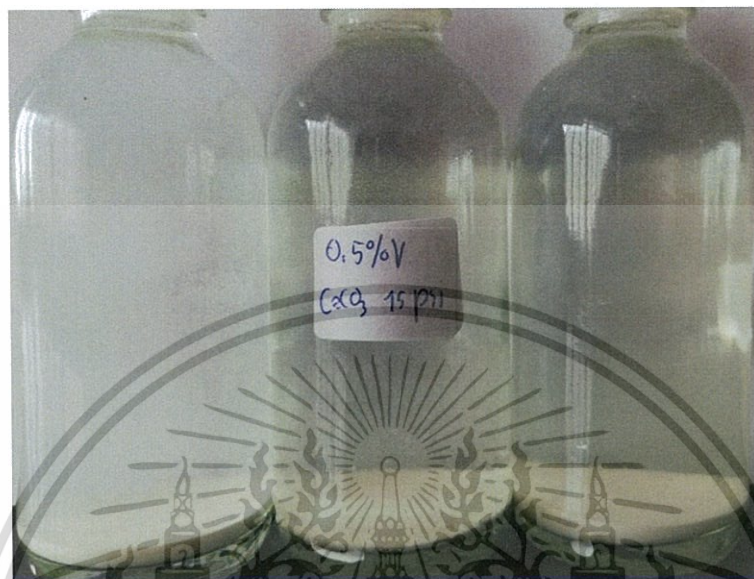


รูปที่ 37 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi



รูปที่ 38 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

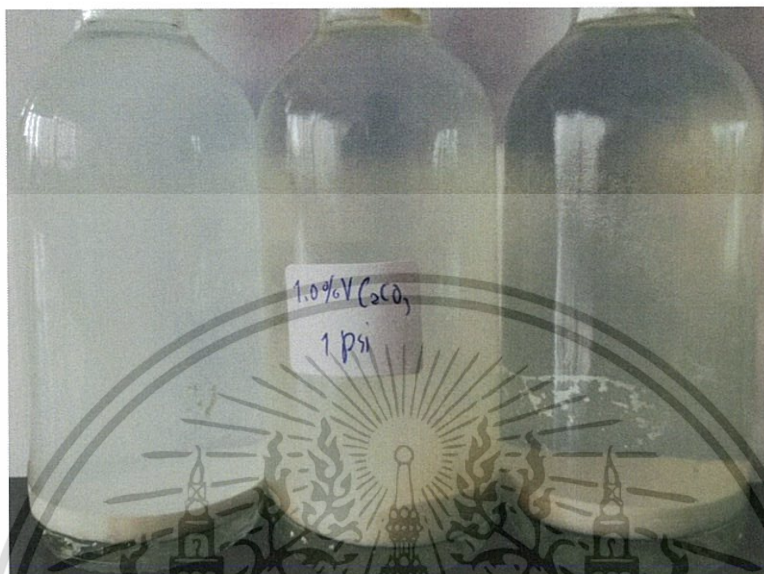


รูปที่ 39 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 15 psi

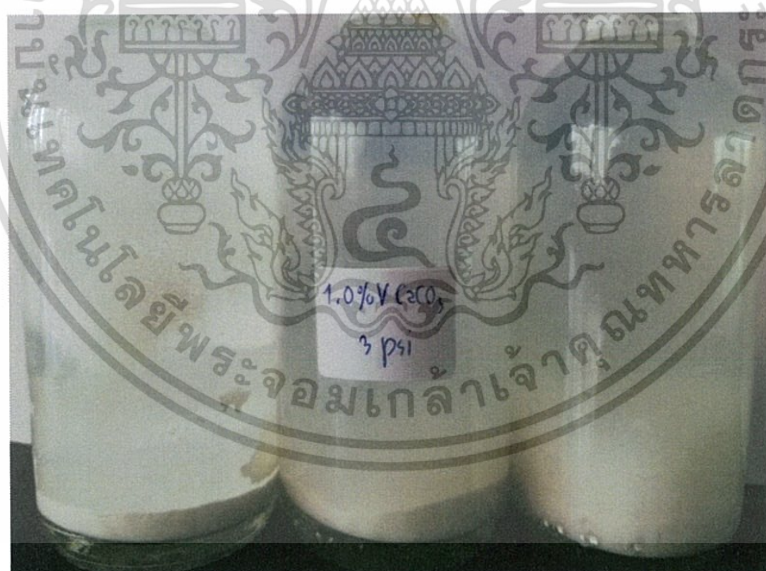


รูปที่ 40 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

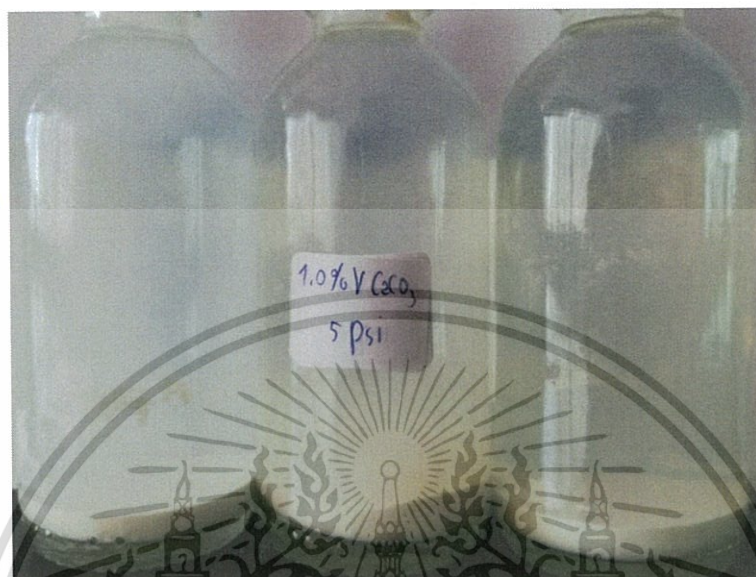


รูปที่ 41 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi

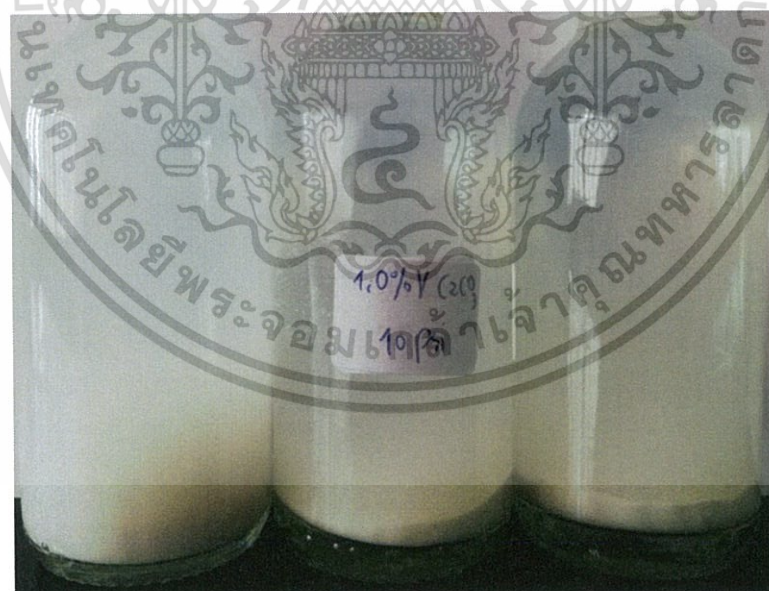


รูปที่ 42 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



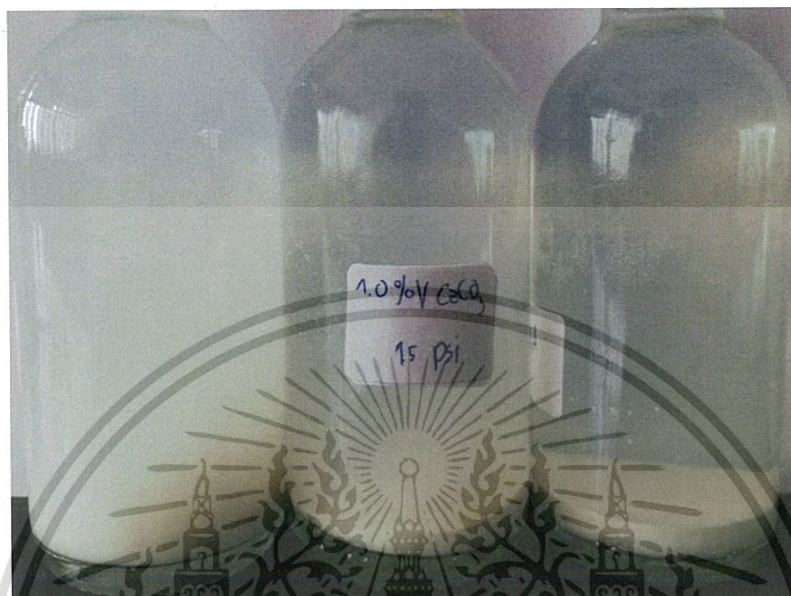
รูปที่ 43 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi



รูปที่ 44 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



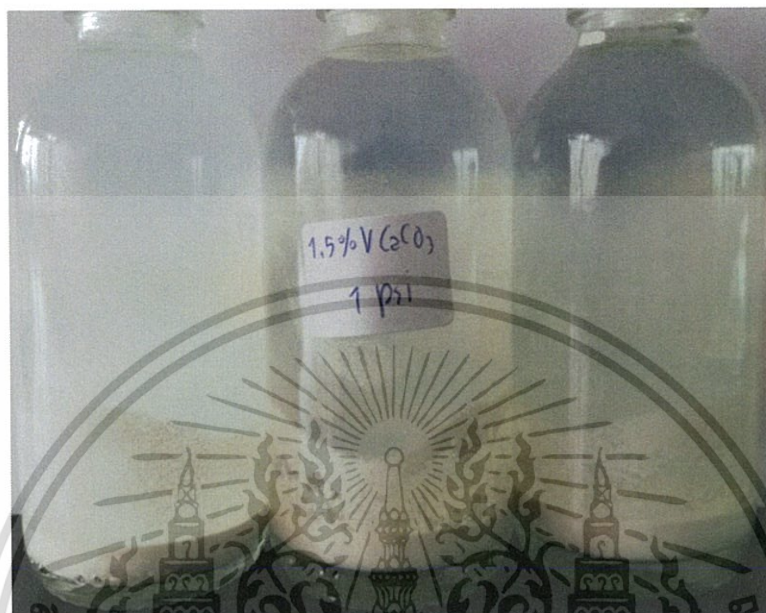
รูปที่ 45 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 15 psi



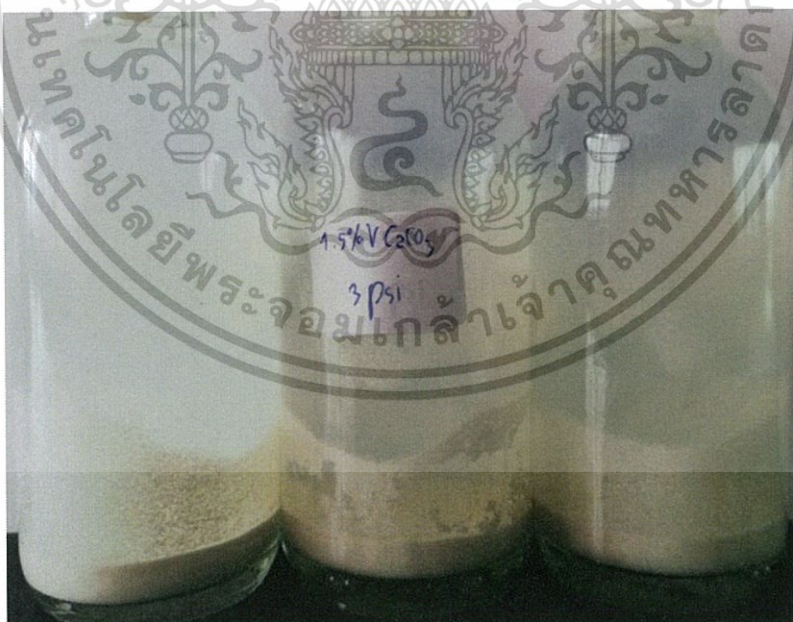
รูปที่ 46 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันลด 20 psi

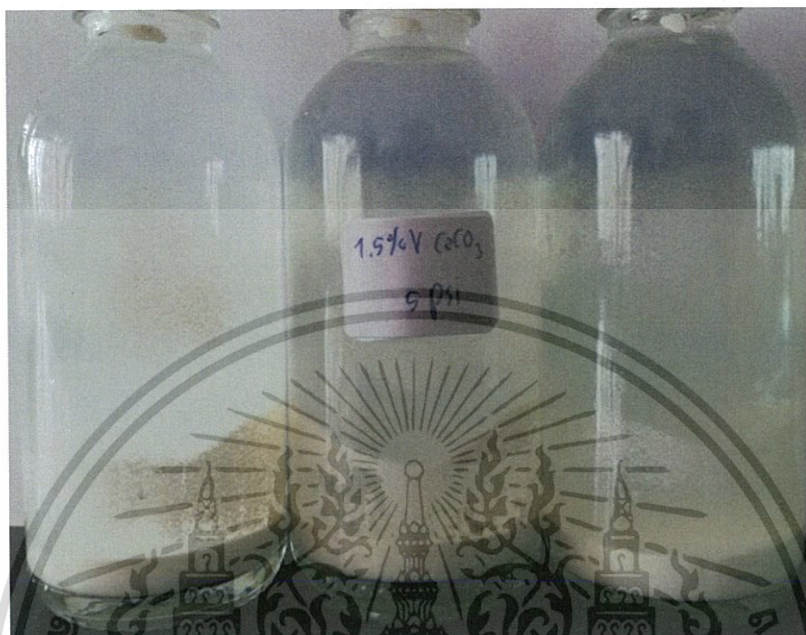


รูปที่ 47 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi

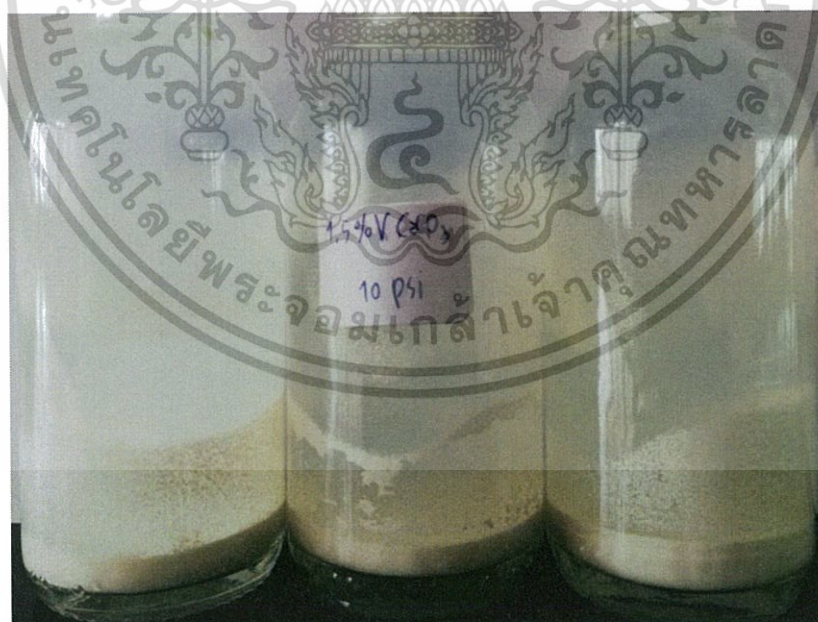


รูปที่ 48 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

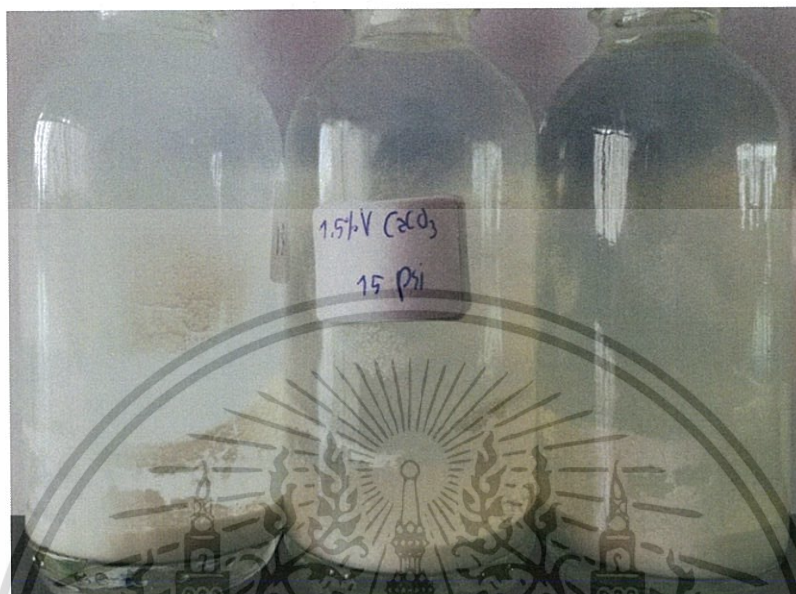


รูปที่ 49 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi

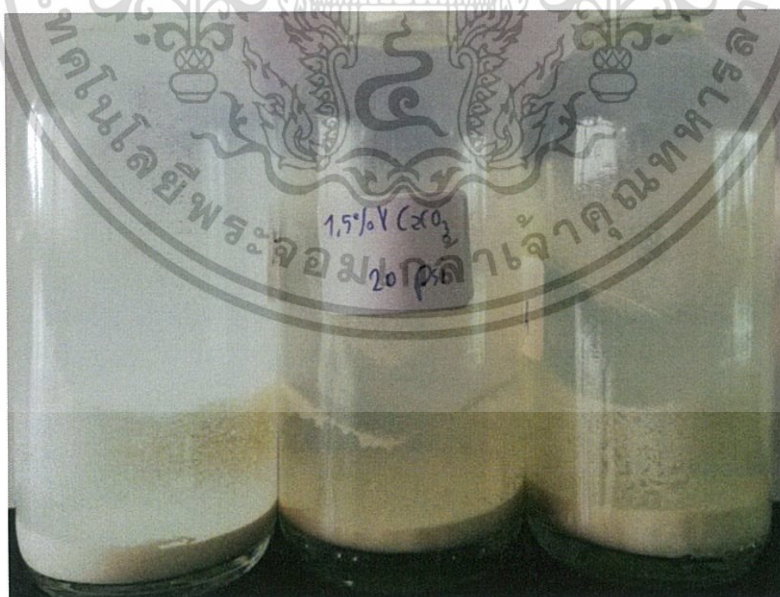


รูปที่ 50 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

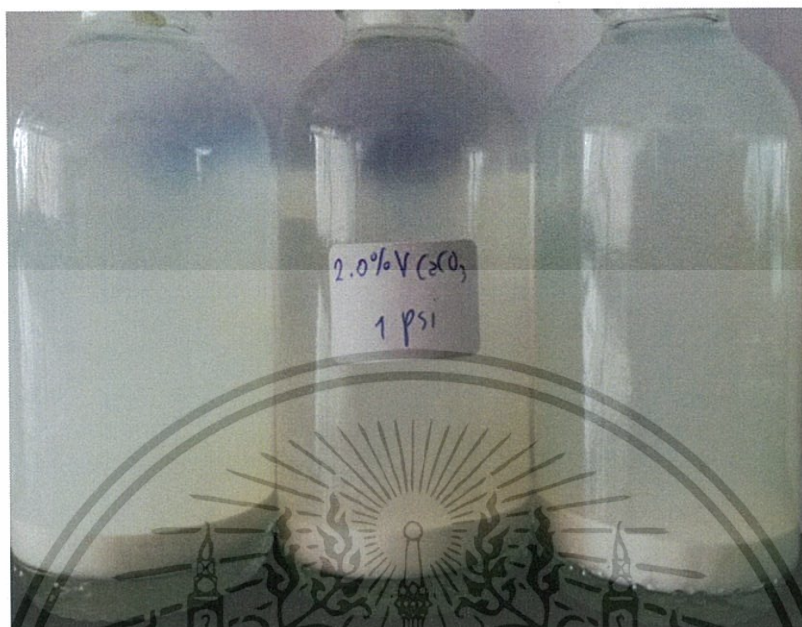


รูปที่ 51 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 15 psi



รูปที่ 52 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

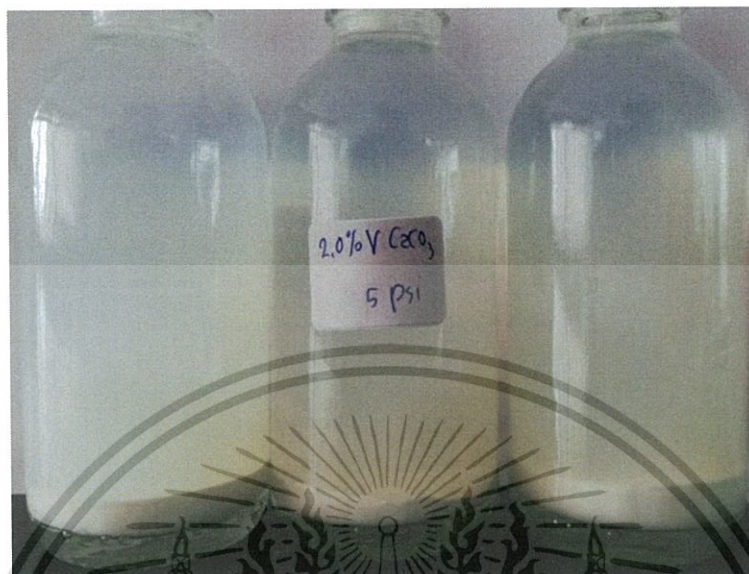


รูปที่ 53 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 1 psi



รูปที่ 54 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 3 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

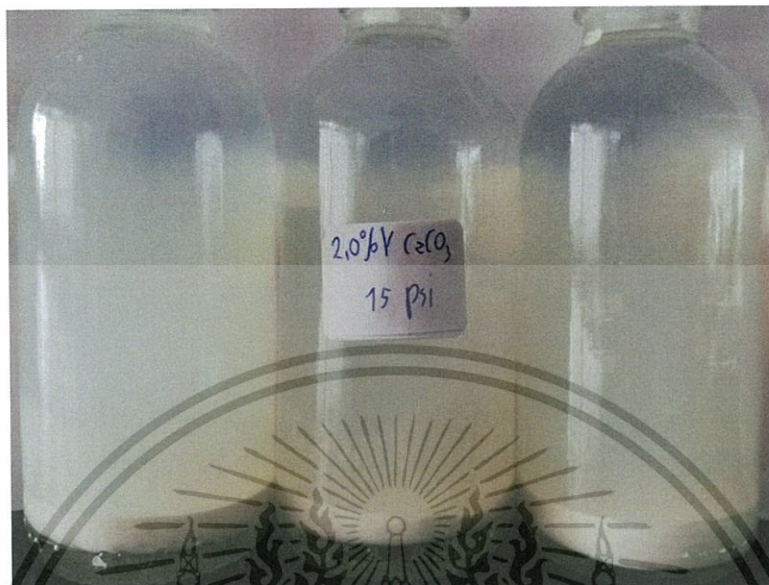


รูปที่ 55 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ความดันลด 5 psi



รูปที่ 56 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 10 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 57 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 15 psi



รูปที่ 58 สารผสมของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร
ความดันลด 20 psi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้