

การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลน  
แบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลน

แบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PERFORMANCE EVALUATION OF THREE PRODUCT HYDROCYCLONE  
BY COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIRMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACEDOMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรโซโคลน  
แบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ  
โดย นายปกรณ์ ปลัดจี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์  
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ
โดย	นายปกรณ์ ปลัดจี
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์

### บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ศึกษาการพัฒนาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) จากไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานหรือแบบที่มีส่วนทางออกสองทาง (Conventional Hydrocyclone) เพื่อเพิ่มสายผลิตภัณฑ์จากเดิมที่ได้ช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองช่วงขนาดเป็นสามช่วงขนาด โดยใช้แบบจำลองปรากฏการณ์การไหลจากเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) ได้แก่ แบบจำลองปรากฏการณ์การไหลและแบบจำลองการติดตามอนุภาค การศึกษาในตอนต้นที่ 1 เพื่อศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคเคลเซียมคาร์บอเนตของผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและยอมรับได้ การศึกษาในตอนต้นที่ 2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยใช้แบบจำลองในการศึกษาตอนต้นที่ 1 จากการศึกษาพบว่าผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการคัดขนาดอนุภาคในอุตสาหกรรม

Report Title	Performance Evaluation of Three Product Hydrocyclone by Computational Fluid Dynamic
By	Mr.Pakorn Paladji
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2018
Advisor	Asst.Prof.Dr.Wanwilai Kraipech Evans
Co-advisor	Asst.Prof.Dr.Santi Wattananusorn

### Abstract

The aim of this project is to improve the separation performance of the conventional hydrocyclone by modify the overflow outlet. The third product outlet was added to the conventional hydrocyclone and the flow behaviors were simulated by using the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique. The flow characteristic model and particle tracking were predicted. This work was divided into two chapters, which were the investigation of the model precision and performance of modified hydrocyclone. Firstly, the simulation results were evaluated by comparing with the reference experiment data. It was found that this CFD simulation method was acceptable and reliable. Then, the CFD method was used to simulate the flow within the modified hydrocyclone, which was called three products hydrocyclone. The result showed the separation of three particle size ranges which provides an advantage particle classifications for industries.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากการได้รับคำแนะนำ คำปรึกษาและความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา กรรมการ บุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมีและเพื่อนร่วมรุ่นของผู้จัดทำ ทั้งนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

ผศ.ดร.วรรณวิไล ไกรเพชร เอวานส์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาเกี่ยวกับหลักการไฮโดรไซโคลน กระบวนการอุตสาหกรรม การออกแบบการทดลองและความรู้ด้านอื่นๆ ตลอดจนแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาที่ประสพระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์

ผศ.ดร.สันติ วัฒนานุสรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ร่วมและกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ และอ.บุญชัย โชติวิริยวานิชย์ กรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ที่คอยช่วยเสนอความคิดเห็นเพิ่มเติมและทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

นายเอกราช บำรุงไทยไชยชาญ นายทัพไทย สีเทา และนายศาดปัญญา ปภาธารินทร์ ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาเกี่ยวกับเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การใช้งานโปรแกรม ตลอดจนเอื้อเพื่อโปรแกรมสำหรับการจัดทำปริญญานิพนธ์

นายชัช ปลัดจี ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาเกี่ยวกับการใช้งานโปรแกรม ตลอดจนเอื้อเพื่อโปรแกรมสำหรับการจัดทำปริญญานิพนธ์

มารดาและครอบครัว ที่เปิดโอกาสให้ศึกษาเล่าเรียนในสาขาวิชาวิศวกรรมเคมีและคอยให้กำลังใจด้วยดีเสมอระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์

เพื่อนร่วมรุ่น พี่และน้องสาขาวิศวกรรมเคมี ที่คอยให้กำลังใจและความช่วยเหลือระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนายดิณณภพ ล้ำวัฒนพร ที่คอยช่วยกันแนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาที่ประสพระหว่างการจัดทำปริญญานิพนธ์

คุณงามความดีและประโยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้จัดทำขอมอบแต่ผู้ให้พระคุณทุกท่านที่ได้กล่าวมาข้างต้น หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้จัดทำขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

นายปรกรณ์ ปลัดจี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 กระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนแบบทั่วไปหรือแบบที่มีส่วนทางออกสองทาง (Conventional Hydrocyclone Separator).....	4
2.2 การพัฒนาไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone).....	6
2.3 ประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลน.....	7
2.4 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic; CFD).....	10
2.5 แบบจำลองปรากฏการณ์การไหล.....	12
2.6 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	14
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงาน.....	16
3.1 การศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation).....	16
3.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone).....	21
บทที่ 4 ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง.....	26
4.1 ผลการจำลองความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation).....	26
4.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone).....	28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการจำลอง.....	36
5.1 สรุปผลการจำลอง.....	36
5.2 วิเคราะห์ผลการจำลอง.....	38
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	38
ภาคผนวก.....	40
ภาคผนวก ก ข้อมูลผลการจำลองและผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง.....	41
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณตัวแปรการไหลของของไหล.....	53
ภาคผนวก ค ตัวอย่างขั้นตอนการจำลองภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0.....	57
เอกสารอ้างอิง.....	60



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลน.....	8
ตารางที่ 3.1 ขนาดของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone).....	17
ตารางที่ 3.2 การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) การศึกษาในตอนที่ 1.....	20
ตารางที่ 3.3 การกำหนดแบบจำลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Schemes) การศึกษาในตอนที่ 1.....	20
ตารางที่ 3.4 การกำหนดคุณสมบัติของไหลการศึกษาในตอนที่ 1.....	20
ตารางที่ 3.5 ขนาดของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone).....	22
ตารางที่ 3.6 การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) การศึกษาในตอนที่ 2.....	25
ตารางที่ 3.7 การกำหนดแบบจำลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Schemes) การศึกษาในตอนที่ 2.....	25
ตารางที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติของไหลการศึกษาในตอนที่ 2.....	25
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง (Validation).....	28
ตารางที่ 4.2 ขนาดตัด (Cut Size Diameter: $D_{50}$ ) ของส่วนทางออก.....	30
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยกร้อยละ 80 ( $D_{80}$ ) ของส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow).....	31
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความดันลด (Pressure Drop) ของไฮโดรไซโคลน.....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างไฮโดรไซโคลน.....	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดกระแสม่วนวน (Vortex).....	5
รูปที่ 2.3 ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)...	7
รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระบวนการแยกและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค.....	10
รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการทำงานของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic: CFD).....	12
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone).....	16
รูปที่ 3.2 วิธีการดำเนินการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation).....	18
รูปที่ 3.3 รูปทรง (Geometry) และการสร้างเซลล์คำนวณ (Meshing).....	19
รูปที่ 3.4 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone).....	22
รูปที่ 3.5 วิธีการดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)...	24
รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง.....	27
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคเคลือบคาร์บอนของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)...	29
รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแยกของทางออกส่วนด้านล่าง (Underflow).....	31
รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity) บริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow).....	32
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบความดันสถิต (Static Pressure) บริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow).....	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คำอธิบายสัญลักษณ์

### สัญลักษณ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

A	พื้นที่หน้าตัด
$C_D$	สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน
$D_{50}$	ขนาดตัด
$D_{80}$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ถูกแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยก ร้อยละ 80
$D_h$	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก
$D_{L,ij}$	พจน์การแพร่ของโมเลกุล
$D_{T,ij}$	พจน์การแพร่ของความปั่นป่วน
$E_{E,i}$	ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$ จาก ผลการทดลอง
$E_{S,i}$	ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$ จาก ผลการจำลอง
$E_i$	ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$
$E_{ij}$	อัตราความเครียดเฉื่อย
$F_D$	แรงเสียดทานต่อมวลอนุภาค
$F_{ij}$	พจน์ความเครียดเนื่องจากความดัน
P	เส้นรอบพื้นที่การไหลของของไหล
$P_{ij}$	พจน์ความเค้น
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตร
$Q_f$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น
$Q_o$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางออกด้านบน
$Q_u$	อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางออกด้านล่าง
$R_f$	อัตราการไหลผ่าน
Re	ตัวเลขเรย์โนลด์
$Re_p$	ตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์
S	อัตราการแยกไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ VIII ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญลักษณ์ตัวอักษรภาษาอังกฤษ (ต่อ)

$Tl$	ความเข้มข้นความปั่นป่วน
$d_p$	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค
$e_{ijk}$	ตัวแปรสลับเครื่องหมาย
$g_i$	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
$k$	พลังงานการเคลื่อนที่
$m$	อัตราการไหลเชิงมวล
$m_{F,i}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$ ส่วนทางเข้าสารตั้งต้น
$m_{U,i}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$ ส่วนทางออกของสารด้านล่าง
$u_i$	เวกเตอร์ความเร็วของของไหล
$v$	ความเร็วขาเข้า
$v_i$	เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค

สัญลักษณ์ตัวอักษรกรีก

$\rho$	ความหนาแน่นของของไหล
$\rho_p$	ความหนาแน่นของอนุภาค
$\mu$	ความหนืดของของไหล
$\varepsilon_{ij}$	พจน์การหมุน
$\Omega_k$	เวกเตอร์แสดงทิศทางการหมุน
$\varphi_{i,f}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$ จากส่วนทางออกด้านล่าง
$\varphi_{i,u}$	อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง $i$ จากส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น
$\varphi_{ij}$	พจน์ความเครียดเนื่องจากความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

กระบวนการแยกสารโดยไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclone) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระบวนการผลิต ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมปิโตรเคมี อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอาหารหรืออุตสาหกรรมเหมืองแร่เพื่อใช้ในกระบวนการแยกสาร ตัวอย่างเช่น กระบวนการทำให้ข้น (Thickening) กระบวนการกำจัดน้ำ (Dewatering) หรือกระบวนการคัดขนาดอนุภาค (Classification) เนื่องจากไฮโดรไซโคลอนมีลักษณะการแยกเฉพาะตัว โครงสร้างของไฮโดรไซโคลอนไม่ซับซ้อน รวมถึงพื้นที่ในการติดตั้งต่ำและออกแบบง่าย ส่งผลให้ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ ค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงและค่าใช้จ่ายในการดำเนินการมีราคาต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์หรือหน่วยกระบวนการแยกสารอื่นๆ เนื่องจากส่วนประกอบของไฮโดรไซโคลอนไม่มีส่วนที่เคลื่อนที่ (Moving Part) ด้วยเหตุนี้ไฮโดรไซโคลอนจึงเป็นที่นิยมใช้งานในอุตสาหกรรม

การใช้ไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานหรือแบบที่มีส่วนทางออกสองทาง (Conventional Hydrocyclone) ในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคในอุตสาหกรรม (Classification) มีจุดประสงค์เพื่อคัดแยกอนุภาคตามช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง สารตั้งต้นในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคโดยไฮโดรไซโคลอนมักประกอบด้วยน้ำและอนุภาคที่มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน ผลผลิตจากกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลอนได้แก่ อนุภาคที่มีช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ และอนุภาคที่มีช่วงเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็ก ไฮโดรไซโคลอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการใช้กับกระบวนการดังกล่าว หากพิจารณากระบวนการที่ต้องการคัดขนาดอนุภาคมากกว่าสองผลผลิตก็พบว่าไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานจำนวนเครื่องเดียวไม่สามารถแยกสารได้ภายในกระบวนการเดียว มีความจำเป็นต้องเพิ่มจำนวนไฮโดรไซโคลอนโดยการต่ออนุกรมกัน ในอีกความหมายหนึ่งคือหากต้องการผลผลิตจากกระบวนการคัดขนาดอนุภาคมากกว่าสองผลผลิต สามารถทำได้โดยการนำผลผลิตจากกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลอนอุปกรณ์แรกผ่านกระบวนการแยกต่อโดยไฮโดรไซโคลอนอุปกรณ์ถัดมาและดำเนินการเช่นเดิมตามจำนวนผลผลิตที่ต้องการ ผลผลิตจากกระบวนการแยกจึงมากกว่าสองผลผลิต

จากข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานในกระบวนการคัดขนาดอนุภาค ส่งผลให้เกิดการพัฒนาไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรไซโคลนที่สามารถแยกสารได้จำนวนสามผลิตภัณฑ์ภายในอุปกรณ์เดียว [1] พื้นฐานแนวคิดของไฮโดรไซโคลนลักษณะดังกล่าวเกิดจากความต้องการในการลดจำนวนการใช้อุปกรณ์ ลดค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์และลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเนื่องจากสามารถแยกสารได้จำนวนสามผลิตภัณฑ์ภายในอุปกรณ์เดียว ไฮโดรไซโคลนลักษณะดังกล่าวถูกนำมาใช้ในกระบวนการแยกวัฏภาคสารและกระบวนการคัดขนาดอนุภาค [2, 3]

การพัฒนาไฮโดรไซโคลนแบบรูปแบบใหม่ที่มีส่วนทางออกสามทางและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุปกรณ์ 50 มิลลิเมตร (50 mm Three Product Hydrocyclone) จากไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุปกรณ์ 50 มิลลิเมตร (50 mm Hydrocyclone) ในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต [4] มีแนวคิดการพัฒนาจากข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ปริมาณนิพจน์ฉบับนี้จึงนำเสนอแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตของไฮโดรไซโคลนโดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic: CFD) เนื่องจากการศึกษาในลักษณะการทดลองมีค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับการดำเนินการราคาสูง รวมถึงไม่สามารถศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในไฮโดรไซโคลน ซึ่งเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณดังกล่าวเป็นทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษาลักษณะกระบวนการแยกภายในไฮโดรไซโคลนโดยใช้แบบจำลองปรากฏการณ์การไหลเชิงคณิตศาสตร์ [5] และมีประโยชน์ในการศึกษาการไหลแยกของสารที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนเพื่อประเมินประสิทธิภาพหรือพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน ไม่ว่าจะเป็นในระยะเวลาการออกแบบอุปกรณ์ก่อนการสร้างหรือระยะการดำเนินการทดลอง

## 1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

- (1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง
- (2) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.3 ขอบเขตการศึกษา

#### ตอนที่ 1 การศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation)

- (1) ศึกษากระบวนการตัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุปกรณ์ 50 มิลลิเมตร ความสูงสุทธิ 341 มิลลิเมตร ประกอบด้วย ส่วนทรงกระบอกความสูง 71 มิลลิเมตร และส่วนทรงกรวยความสูง 270 มิลลิเมตร
- (2) ศึกษากระบวนการตัดขนาดอนุภาคของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตความหนาแน่น 2,710 กิโลกรัมกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 4 - 80 ไมโครเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรมีค่าเท่ากับ 68.4 ลิตรต่อนาที
- (3) ศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองปรากฏการณ์การไหลเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง
- (4) ศึกษาการสร้างแบบจำลองไฮโดรไซโคลนจากโปรแกรม Gambit 2.4.6
- (5) ศึกษาปรากฏการณ์การไหลรูปแบบสามมิติโดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจากโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0

#### ตอนที่ 2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

- (1) ศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางหรือเกิดจากการเพิ่มทางออกที่สามในส่วนทางออกด้านบน
- (2) ศึกษาปรากฏการณ์การไหลของอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 4 - 80 ไมโครเมตร ภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- (1) ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะกระบวนการตัดขนาดอนุภาคสามผลิตภัณฑ์และปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง
- (2) หลักการและแนวคิดเกี่ยวกับการพัฒนาไฮโดรไซโคลนในเชิงการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแยกสามผลิตภัณฑ์
- (3) ความรู้เกี่ยวกับการสร้างแบบจำลองไฮโดรไซโคลนและแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ปรากฏการณ์การไหลจากการทำงานผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนแบบทั่วไปหรือแบบที่มีส่วนทางออกสองทาง (Conventional Hydrocyclone Separator)

โครงสร้างโดยทั่วไปของไฮโดรไซโคลนประกอบด้วย ส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น (Feed) ส่วนทางออกของสาร ส่วนทรงกระบอกและส่วนทรงกรวย โดยส่วนทางออกของผลิตภัณฑ์ถูกแบ่งออกเป็น 2 ทาง ได้แก่ ส่วนทางออกด้านบน (Overflow) และส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow) แสดงดังรูปที่ 2.1 ทำให้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกประกอบด้วยสองผลิตภัณฑ์

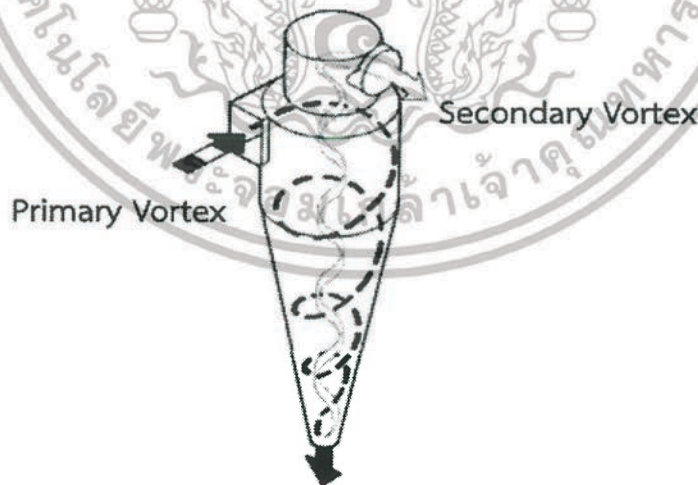


รูปที่ 2.1 โครงสร้างไฮโดรไซโคลน [6]

สารตั้งต้นที่ต้องการผ่านกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนถูกป้อนเข้าทางส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น จากนั้นสารเคลื่อนที่เข้าสู่ส่วนที่สร้างกระแสหมุนวน (Vortex Finder) กระแสหมุนวนดังกล่าวผ่านส่วนทรงกระบอกและเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่างของอุปกรณ์หรือส่วนทรงกรวย ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแยกออกทางส่วนทางออกด้านบนและส่วนทางออกด้านล่าง

กระบวนการแยกสารโดยไฮโดรไซโคลอนเกิดจากความแตกต่างความหนาแน่นของสารที่ถูกนำมาแยกในกระบวนการ สารตั้งต้นในกระบวนการดังกล่าวมักเป็นสารผสมที่มีวัฏภาคของเหลว ไฮโดรไซโคลอนถูกนำมาใช้ในกระบวนการแยกของเหลวและของเหลว (Liquid-liquid) ของเหลวและของแข็ง (Liquid-solid) ของเหลวและแก๊ส (Liquid-gas) หรือไม่ว่าจะเป็นการคัดขนาดอนุภาคในสารผสม (Classification)

การดำเนินการเริ่มต้นโดยการนำสารเข้าสู่ไฮโดรไซโคลอนด้วยความเร็ว จากนั้นสารดังกล่าวไหลไปตามส่วนโค้งของผนังภายในอุปกรณ์ ส่งผลให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) และเคลื่อนที่ลงสู่ด้านล่าง เนื่องจากความหนาแน่นของสารต่างกันส่งผลให้แรงหนีศูนย์กลางที่เกิดขึ้นต่างกัน สารที่มีความหนาแน่นสูงเกิดขึ้นสะสมภายใต้แรงเหวี่ยงด้านนอกภายในตัวอุปกรณ์ (Primary Vortex) และในขณะเดียวกันสารที่มีความหนาแน่นต่ำเกิดขึ้นสะสมภายใต้แรงเหวี่ยงด้านในภายในตัวอุปกรณ์ ในอีกความหมายหนึ่งคือเกิดขึ้นสะสมถัดเข้ามาด้านในอุปกรณ์จากชั้นสะสมของสารที่มีความหนาแน่นสูง [7] เมื่อสารดังกล่าวเคลื่อนที่ลงมาถึงบริเวณส่วนด้านล่างของอุปกรณ์หรือบริเวณที่เกิดการไหลแยก (Separation Region) เกิดกระแสหมุนวนด้านในของอุปกรณ์ที่มีทิศสวนทางหรือเคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบน (Secondary Vortex) แสดงดังรูปที่ 2.2 จากนั้นชั้นสะสมด้านนอกหรือสารที่มีความหนาแน่นสูงไหลลงสู่ทางออกด้านล่างและชั้นสะสมด้านในหรือสารที่มีความหนาแน่นต่ำไหลขึ้นสู่ทางออกด้านบน หากส่วนทางออกของผลิตภัณฑ์ทั้งสองส่วนเชื่อมต่อกับบรรยากาศ ส่งผลให้เกิดแกนอากาศ (Air Core) บริเวณภายในสุดของอุปกรณ์



รูปที่ 2.2 ลักษณะการเกิดกระแสหมุนวน (Vortex) [8]

กระบวนการคัดขนาดอนุภาคโดยไฮโดรไซโคลอนเกิดจากความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค ส่งผลให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางเนื่องจากแรงเหวี่ยงต่างกัน อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศูนย์กลางใหญ่เกิดขึ้นสะสมภายใต้แรงเหวี่ยงด้านนอกภายในตัวอุปกรณ์และอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเกิดขึ้นสะสมภายใต้แรงเหวี่ยงด้านในภายในตัวอุปกรณ์ กระบวนการคัดขนาดที่เกิดขึ้นเกิดจากลักษณะการไหลของอนุภาคภายใต้กระแสหมุนวนทั้งสองแบบ [3, 9]

ลักษณะการไหลภายในไฮโดรไซโคลอนมีความซับซ้อน ส่งผลให้การพัฒนาอุปกรณ์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในกระบวนการแยกจึงเป็นไปในแนวทางการศึกษาลักษณะการไหลที่มีผลมาจากตัวแปร 2 ประเภท ได้แก่ ตัวแปรทางด้านโครงสร้าง ตัวอย่างเช่น ความสูงและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของส่วนประกอบต่างๆ และตัวแปรอีกกลุ่มหนึ่งได้แก่ ตัวแปรทางด้านกราดำเนินการ ตัวอย่างเช่น อัตราการไหล ความดันและความเข้มข้นของสารตั้งต้น [9]

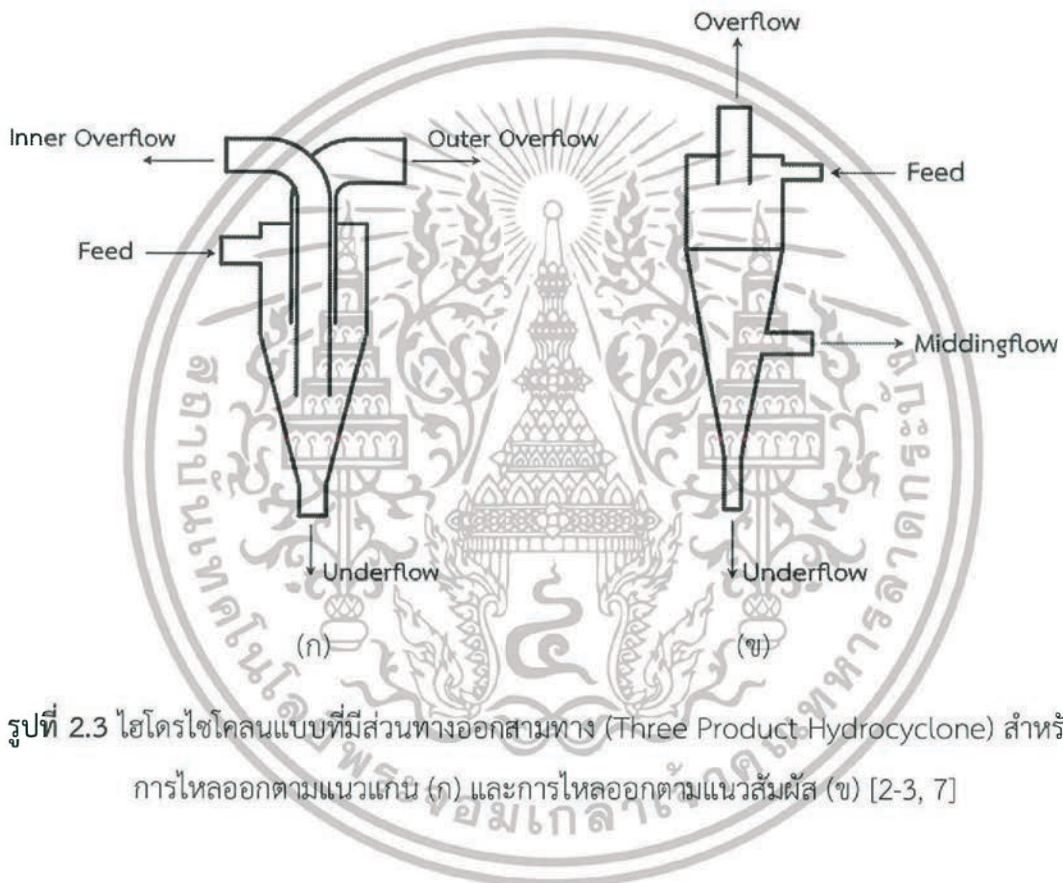
## 2.2 การพัฒนาไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

การศึกษาลักษณะกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง เริ่มต้นโดยการนำไฮโดรไซโคลอนจำนวนสองอุปกรณ์มาประยุกต์ต่อแบบอนุกรมกัน (Hybridization Hydrocyclone) นำส่วนทางออกของไฮโดรไซโคลอนอุปกรณ์แรก ไม่ว่าจะเป็นส่วนทางออกด้านบนหรือส่วนทางออกด้านล่างต่อเข้ากับส่วนทางเข้าของสารตั้งต้นของไฮโดรไซโคลอนอุปกรณ์ที่สอง [1] ทำให้มีส่วนทางออกจำนวนสามทางออก การใช้งานของไฮโดรไซโคลอนลักษณะดังกล่าวถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันเป็นอุตสาหกรรมแรกกับกระบวนการกำจัดน้ำมัน (Deoiling) โดยการแยกวัฏภาค น้ำ น้ำมันและทรายออกจากกัน ในปัจจุบันการพัฒนาไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางถูกนำมาใช้ในกระบวนการแยกแก๊ส ของเหลวและของแข็ง (Gas-liquid-solid) ของเหลว ของเหลวและของแข็ง (Liquid-liquid-solid) แก๊ส ของเหลวและของแข็ง (Gas-liquid-liquid) และการคัดขนาดอนุภาคที่ต้องการสามผลิตภัณฑ์ (Classification) [7] การศึกษาในระยะเวลาต่อมาเกิดการพัฒนาไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางจนมีประสิทธิภาพกระบวนการแยกที่เพิ่มขึ้น แต่ยังคงพบข้อจำกัดของไฮโดรไซโคลอนแบบดังกล่าว โดยประเด็นที่สำคัญคือลักษณะการไหลในช่วงรอยต่อของไฮโดรไซโคลอนตัวแรกไปยังตัวที่สองไม่เสถียรและมีลักษณะการไหลซึ่งยากต่อการควบคุม

แนวความคิดการพัฒนาไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางถูกแบ่งออกเป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การเพิ่มส่วนทางออกอีกหนึ่งทางในส่วนทางออกด้านบน (Double Overflow) และการเพิ่มส่วนทางออกอีกหนึ่งทางในส่วนทางออกด้านล่าง (Double Underflow) [7, 10] ซึ่งการเพิ่มส่วนทางออกอีกหนึ่งทางในส่วนทางออกด้านบนส่งผลให้ในกระบวนการแยกเกิดกระแสไหลลัด (Short Circuit Flow) ลดลง เนื่องจากมีโครงสร้างส่วนการสร้างกระแสหมุนวนป้องกันการเกิดกระแสไหลลัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถือเป็นจุดเด่นของแนวทางดังกล่าว ส่วนการเพิ่มส่วนทางออกอีกหนึ่งทางในส่วนทางออกด้านล่างมีลักษณะโครงสร้างที่ง่ายต่อการสร้างอุปกรณ์เมื่อเปรียบเทียบกับแนวทางแรก แนวคิดต่อมาเกิดจากการศึกษาปรากฏการณ์การไหลตามแนวแกนของทางออกที่สามหรือทางออกของผลิตภัณฑ์ที่สาม ส่งผลให้การศึกษาแบ่งถูกออกเป็น 2 แนวทางเช่นกัน ได้แก่ การไหลออกตามแนวแกน (Axial Flow) [3, 7] และการไหลออกตามแนวสัมผัส (Tangential Flow) [2, 7] แสดงดังรูปที่ 2.3 ซึ่งลักษณะการไหลออกตามแนวแกนมีความเสถียรและไม่ซับซ้อนหากเปรียบเทียบกับการไหลออกตามแนวสัมผัส ส่วนการไหลออกตามแนวสัมผัสมีข้อดีคือค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ การไหลออกตามแนวแกน



รูปที่ 2.3 ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) สำหรับการไหลออกตามแนวแกน (ก) และการไหลออกตามแนวสัมผัส (ข) [2-3, 7]

### 2.3 ประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลน (Collection Efficiency)

ประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนมีผลจากหลายตัวแปร ไม่ว่าจะเป็นตัวแปรทางด้านโครงสร้างหรือตัวแปรทางการดำเนินการ การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรดังกล่าวส่งผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการในลักษณะต่างกัน สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

การประเมินประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนสามารถพิจารณาได้จากหลายตัวแปร ทั้งที่เป็นการพิจารณาโดยรวมกระบวนการแยกหรือพิจารณาเฉพาะกระบวนการคัดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาค หากพิจารณาโดยรวมของกระบวนการแยกมักพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างปริมาณการไหลเชิงปริมาตรของสารที่ส่วนทางออกด้านบนและปริมาณการไหลของส่วนทางออกด้านล่าง [4, 9] ตัวแปรดังกล่าวเรียกว่าอัตราการแยกไหล (Flow Split Ratio: S) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.1

$$S = \frac{Q_u}{Q_o} \quad (2.1)$$

เมื่อ S หมายถึง อัตราการแยกไหล  $Q_u$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางออกด้านล่างและ  $Q_o$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางออกด้านบน

ตารางที่ 2.1 ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลอน [4, 10]

ตัวแปร	แนวโน้มประสิทธิภาพกระบวนการแยก
ตัวแปรทางด้านโครงสร้าง	
การเพิ่มความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความยาวส่วนทรงกระบอก	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความยาวส่วนทรงกรวย	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความราบเรียบส่วนผนัง	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดส่วนทางเข้าของสาร	ลดลง
ตัวแปรทางด้านกำเนินการ	
การเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความหนาแน่นของอนุภาค	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความเร็วของสารตั้งต้น	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น	เพิ่มขึ้น
การเพิ่มความหนืดของสารตั้งต้น	ลดลง

นอกจากอัตราการแยกไหล สามารถประเมินประสิทธิภาพโดยรวมของกระบวนการได้จาก อัตราการไหลผ่าน (Throughput Ratio:  $R_f$ ) หรือเป็นการพิจารณาปริมาณการไหลลงสู่ส่วนทางออกด้านล่างจากปริมาณการไหลของสารตั้งต้น [4, 9] สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.2

$$R_f = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $R_f$  หมายถึง อัตราการไหลผ่าน  $Q_u$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางออกด้านล่างและ  $Q_f$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตรส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินการใช้พลังงานของกระบวนการแยกถือเป็นตัวแปรสำคัญอีกตัวแปรหนึ่งในการประเมินประสิทธิภาพโดยรวม หากความดันลด (Pressure Drop) ที่เกิดจากอุปกรณ์มีค่าสูง หมายความว่า การใช้พลังงานในกระบวนการแยกสูงและส่งผลต่อค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง [4, 9]

การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแยกในบางตัวแปรมีผลในทิศทางตรงกันข้ามกับความดันลดที่เกิดขึ้น [10] ตัวอย่างเช่น การเพิ่มพื้นที่หน้าตัดส่วนทางเข้าของสารส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการแยกลดลง แต่ส่งผลให้ความดันลดเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการแยกเพิ่มขึ้น แต่ส่งผลให้ความดันลดลดลง ทั้งนี้การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแยกควรพิจารณาจากหลายตัวแปรร่วมกัน

หากพิจารณากระบวนการคัดขนาดอนุภาค อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงหมายถึงอุปกรณ์ที่สามารถแยกอนุภาคออกจากของไหลได้สูง ในอีกความหมายหนึ่งคือปริมาณอนุภาคที่เป็นผลิตภัณฑ์ของทางออกส่วนด้านล่างสูง [10] ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคได้แก่ ประสิทธิภาพกักเก็บรวม (Solid Recovery) ขนาดตัด (Cut Size Diameter:  $D_{50}$ ) และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ถูกแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยกร้อยละ 80 ( $D_{80}$ )

ประสิทธิภาพกักเก็บรวมเป็นตัวแปรบ่งบอกความสามารถของอุปกรณ์ในการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางต่างๆ จากของไหลหรือสารตั้งต้น ตัวแปรดังกล่าวสามารถคำนวณได้จาก อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่ทางออกส่วนด้านล่างต่ออัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคสารตั้งต้น [4, 9] หรือสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.3

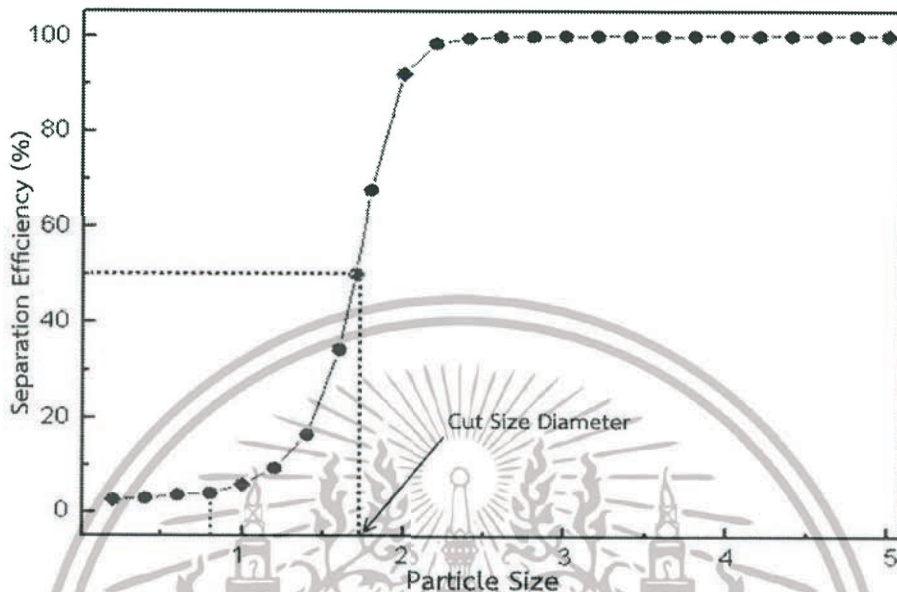
$$\text{Solid Recovery} = \frac{\varphi_{i,u}}{\varphi_{i,f}} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\varphi_{i,u}$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$  จากส่วนทางออกด้านล่างและ  $\varphi_{i,f}$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$  จากส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น

ขนาดตัดเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ถูกแยกโดยประสิทธิภาพของอุปกรณ์ร้อยละ 50 หรือหมายถึงอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าขนาดตัดจะถูกแยกโดยอุปกรณ์โดยประสิทธิภาพอุปกรณ์มากกว่าร้อยละ 50 [4, 9] การลดลงของขนาดตัดเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนเนื่องจากสามารถแยกอนุภาคออกจากของผสมสูงขึ้น เมื่อลดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตัวอุปกรณ์ ลดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนทางเข้าของสารตั้งต้นและลดความยาวเส้นผ่านศูนย์กลางส่วนทางออกของผลิตภัณฑ์ ส่งผลให้ขนาดตัดมีค่าลดลงและส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการแยกมีค่าเพิ่มขึ้น [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดตัดสามารถพิจารณาได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพและเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค โดยการอ่านค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ประสิทธิภาพกระบวนการแยก ร้อยละ 50 แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกระบวนการแยก และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค [11]

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ถูกแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยก ร้อยละ 80 หรือ หมายถึงอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าจะถูกแยกโดยอุปกรณ์โดยประสิทธิภาพอุปกรณ์ มากกว่าร้อยละ 80 เป็นตัวแปรที่มีลักษณะการคำนวณเช่นเดียวกับกับขนาดตัด

## 2.4 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic: CFD)

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นสาขาวิชาที่ศึกษาการแก้ปัญหาการถ่ายเทโมเมนตัม การถ่ายเทพลังงานหรือปฏิกิริยาเคมี โดยใช้วิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) และระเบียบวิธี (Algorithm) บนพื้นฐานกฎจำนวนสามข้อได้แก่ กฎอนุรักษ์มวล กฎข้อที่สองของนิวตันและกฎอนุรักษ์พลังงาน พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาประยุกต์ใช้กับการหาผลเฉลยสมการอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation: PDE) เนื่องจากการหาผลเฉลยแม่นยำตรงของสมการอนุพันธ์ย่อยมีความยุ่งยากและซับซ้อน เทคนิคดังกล่าวจึงแปลงสมการอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิตเพื่อลดความซับซ้อนของสมการอนุพันธ์ย่อย การนำวิธีเชิงตัวเลขหรือสมการพีชคณิตมาประยุกต์ใช้กับการหาผลเฉลยจึงเป็นการลดข้อจำกัดของปัญหาการหาผลเฉลยสมการอนุพันธ์ย่อย [10, 12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณถูกนำมาประยุกต์ใช้งานกับสาขาวิชาต่างๆ อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน เนื่องจากมีต้นทุนการดำเนินการต่ำและแสดงผลการวิเคราะห์ในรูปแบบที่เพียงพอต่อการนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ตัวอย่างการนำพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาประยุกต์ใช้ได้แก่ ศึกษาลักษณะการไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์และหน่วยกระบวนการแยกสำหรับสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ศึกษาลักษณะการไหลภายในท่อและการถ่ายเทความร้อนสำหรับสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และการพยากรณ์สภาพอากาศสำหรับสาขาวิชาอุตุนิยมวิทยา [12] ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มความแม่นยำของผลเฉลย มีความจำเป็นในการใช้ทรัพยากรในการคำนวณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดของเทคนิคการคำนวณโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

วิธีการแบ่งช่วงโดเมนปริภูมิ (Spatial Domain) ให้เป็นปริมาตรส่วนเล็กลงหรือเรียกว่าเซลล์คำนวณ การแบ่งปริมาตรดังกล่าวสามารถทำได้โดยการสร้างโครงตาข่ายปริมาตร (Volume Mask) หรือเรียกว่ากริด (Grid) วิธีการดังกล่าวเป็นที่นิยมสำหรับเทคนิควิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ เมื่อแบ่งช่วงโดเมนปริภูมิอย่างเหมาะสมแก่การคำนวณ ขั้นตอนถัดมาเป็นการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขเพื่อแก้ปัญหาสมการ สำหรับการไหลแบบไม่หนืด (Inviscid Flow) สมการออยเลอร์ (Euler Equation) มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหา และสำหรับการไหลแบบหนืด (Viscid Flow) สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation) มีความเหมาะสมในการแก้ปัญหามากกว่าสมการออยเลอร์

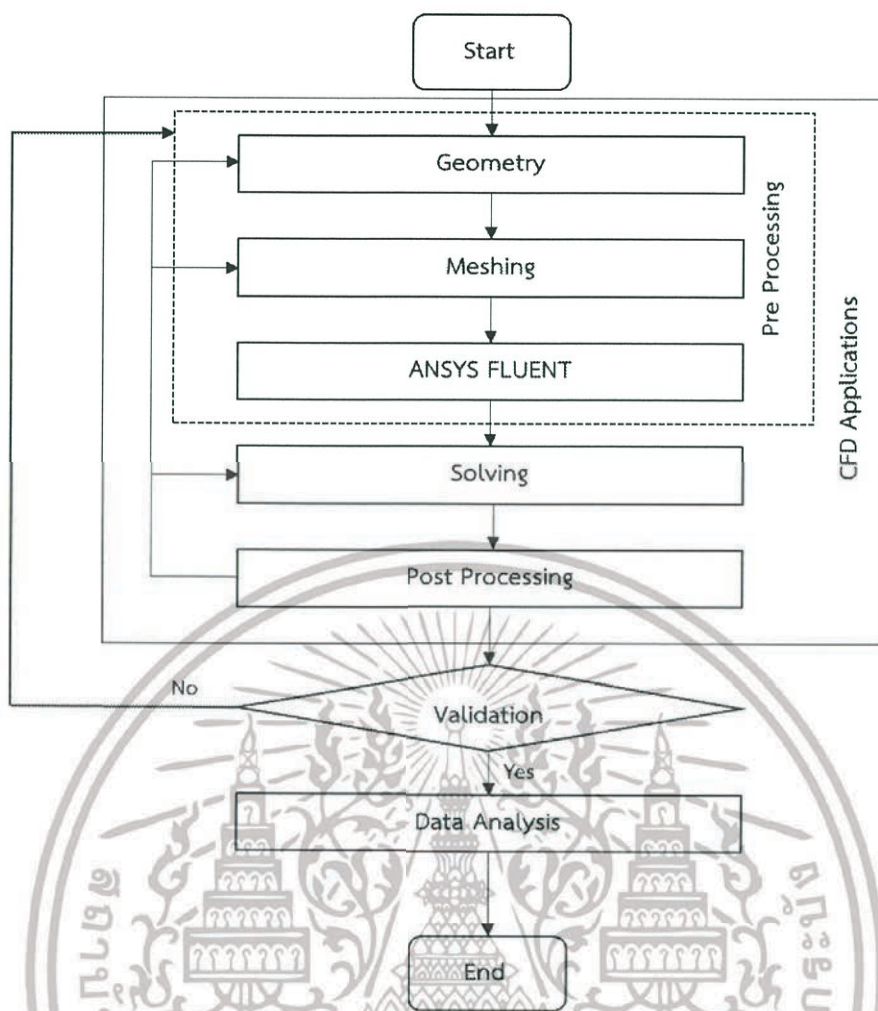
กระบวนการทำงานของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแสดงดังรูปที่ 2.5 กระบวนการทำงานดังกล่าวแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre Processing) กระบวนการคำนวณ (Solve Processing) และกระบวนการหลังการคำนวณ (Post Processing)

กระบวนการก่อนการคำนวณเริ่มต้นด้วยการสร้างโครงสร้าง (Geometry) ของระบบและกำหนดตารางย่อยการคำนวณ (Mesh) โดยเส้นตารางดังกล่าวตัดกันที่จุด (Node) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณหาผลลัพธ์ ขั้นตอนถัดมาที่มีความจำเป็นในการกำหนดคุณสมบัติของไหล คุณสมบัติเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition) และคุณสมบัติเงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Condition)

กระบวนการคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขมีจำนวน 4 รูปแบบ ได้แก่ วิธีผลต่างสืบเนื่อง (Finite Difference Method: FDM) วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method: FEM) วิธีปริมาตรสืบเนื่อง (Finite Volume Element: FVE) และวิธีสเปกตรัล (Spectral Method) โดยวิธีเชิงตัวเลขทุกรูปแบบเริ่มต้นโดยการประมาณค่าที่ไม่ทราบค่า เปลี่ยนสมการอนุพันธ์เชิงย่อยเป็นสมการพีชคณิตและหาผลเฉลย [12]

กระบวนการหลังการคำนวณเป็นการแสดงผลลัพธ์จากวิธีเชิงตัวเลขในรูปแบบของตัวเลขและแผนภูมิสามมิติ (Contour) การแสดงผลในรูปแบบของตัวเลขมีข้อจำกัดเนื่องจากมีความยุ่งยากในการอธิบายพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นมากกว่าการแสดงผลในรูปแบบแผนภูมิสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แผนผังกระบวนการทำงานของเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic; CFD)

## 2.5 แบบจำลองปรากฏการณ์การไหล

พฤติกรรมหรือแบบจำลองปรากฏการณ์การไหลไม่สามารถอธิบายได้โดยสมการนาเวียร์-สโตกส์เพียงสมการเดียว จึงมีความจำเป็นในการเพิ่มแบบจำลองเสริมเพื่อให้ผลการคำนวณจากเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความแม่นยำมากขึ้น แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model: RSM ถือเป็นแบบจำลองเสริมแบบจำลองหนึ่งที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์จากชุดสมการจำนวน 6 สมการในพิกัดสามมิติ [13, 14] แสดงดังสมการที่ 2.4

$$\frac{D(\rho \overline{u'_i u'_j})}{Dt} = P_{ij} + D_{T,ij} + D_{L,ij} + \varphi_{ij} + F_{ij} - \varepsilon_{ij} \quad (2.4)$$

เมื่อพจน์ทางด้านขวาของสมการที่ 2.4 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.5 – 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{ij} = -\rho \left( \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (2.5)$$

$$D_{T,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left( p(\delta_{ik} u'_j + \delta_{kj} u'_i) + \rho \overline{u'_i u'_j u'_k} \right) \quad (2.6)$$

$$D_{L,ij} = -\frac{\partial}{\partial x_k} \left( \mu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (2.7)$$

$$\varphi_{ij} = p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x'_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x'_i} \right) \quad (2.8)$$

$$F_{ij} = -\rho \Omega_k (\overline{u'_i u'_m} e_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} e_{jkm}) \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_{ij} = 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \quad (2.10)$$

เมื่อ  $P_{ij}$  หมายถึง พจน์ความเค้น (Stress Production)  $D_{T,ij}$  หมายถึง พจน์การแพร่ของความปั่นป่วน (Turbulent Diffusion Term)  $D_{L,ij}$  หมายถึง พจน์การแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion Term)  $\varphi_{ij}$  และ  $F_{ij}$  หมายถึง พจน์ความเครียดเนื่องจากความดัน (Pressure Strain Term) และ  $\varepsilon_{ij}$  หมายถึง พจน์การหมุน (Rotation Term) [13]

เมื่อ  $\Omega_k$  หมายถึง เวกเตอร์แสดงทิศทางการหมุน (Rotation Vector) และ  $e_{ijk}$  เป็นตัวแปรสลับเครื่องหมาย หากค่าของ  $i, j$  และ  $k$  มีค่าไม่เท่ากันและมีลักษณะเป็น Cyclic Order ตัวแปรดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1 และหากค่าของ  $i, j$  และ  $k$  มีค่าไม่เท่ากันและมีลักษณะเป็น Anticyclic Order ตัวแปรดังกล่าวมีค่าเท่ากับ -1 [10]

พจน์ความเครียดเนื่องจากความดัน (สมการที่ 2.9) ไม่สามารถคำนวณได้โดยตรง เนื่องจากปัญหาบริเวณผนังที่ส่งผลต่อตัวแปรการแพร่กระจายทุกทิศทาง [10] พจน์ดังกล่าวสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.11 [13]

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij,1} + \varphi_{ij,2} \quad (2.11)$$

เมื่อพจน์ทางด้านฝั่งขวาของสมการที่ 2.11 สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.12 และ 2.13

$$\varphi_{ij,1} = -\rho C_1 \frac{\varepsilon}{k} \left( \overline{u'_i u'_j} - \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} \right) \quad (2.12)$$

$$\varphi_{ij,2} = -\rho C_2 \left( P_{ij} - \frac{1}{3} P_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าคงที่  $C_1$  และ  $C_2$  ซึ่งมีค่ามาตรฐานเท่ากับ 1.80 และ 0.60 ตามลำดับ [13] ตัวแปรพลังงานการเคลื่อนที่ (Kinetics Energy:  $k$ ) ของสมการที่ 2.12 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.14

$$k = \frac{1}{2} \rho u_i' u_i' \quad (2.14)$$

สมการแสดงการเคลื่อนย้ายดังสมการที่ 2.15 เป็นสมการชุดเดียวกับแบบจำลอง  $k - \epsilon$  (แบบจำลองความปั่นป่วนเสริมแบบจำลองหนึ่ง) เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณ [10]

$$\epsilon_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left( C_\mu \frac{k^2}{\epsilon \sigma_\epsilon} \cdot \frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_m} \right) + C_{1\epsilon} C_\mu E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.15)$$

ค่าคงที่  $C_\mu$   $C_{1\epsilon}$   $C_{2\epsilon}$   $\sigma_k$  และ  $\sigma_\epsilon$  ซึ่งมีค่ามาตรฐานเท่ากับ 0.09 1.44 1.92 1.00 และ 1.30 ตามลำดับ [13] ตัวแปรอัตราความเครียดเฉลี่ย (Mean Strain Rate:  $E_{ij}$ ) ของสมการที่ 2.15 สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.16

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.16)$$

## 2.6 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาค [13]

การเคลื่อนที่ของอนุภาคภายใต้ความปั่นป่วนสามารถทำนายได้จากวิธีการโคจรของอนุภาค (Particle Trajectory Method) วิธีการดังกล่าวติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคในแต่ละอนุภาค ซึ่งแบบจำลอง Discrete Phase Particle Model: DPM เป็นแบบจำลองที่ใช้ในเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยมีพื้นฐานการคำนวณมาจากการสร้างสมดุลแรงบนอนุภาค สมมติฐานของแบบจำลองได้แก่ ผลจากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่ส่งผลต่อของไหลมีค่าต่ำจนสามารถละทิ้ง ในอีกความหมายหนึ่งคืออนุภาคไม่รับกวนสนามการไหลของของไหล สมการแบบจำลองปรากฏการณ์การไหลจึงคำนวณจากสนามการไหลที่คงที่ (Fixed Field) ความเร็วในการเคลื่อนที่ชั่วขณะของของไหล จึงถูกนำมาทำนายการเคลื่อนที่ของอนุภาค สมการโมเมนตัมของอนุภาคในสนามแลกรางเรียน (Lagrangian) มีพื้นฐานการคำนวณมาจากแรงต้าน (Drag Force) แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) และแรงโน้มถ่วง (Gravity Force) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.17

$$\frac{dv_i}{dt} = F_D(u_i - v_i) + \frac{\rho_p - \rho}{\rho} g_i \quad (2.17)$$

เมื่อ  $F_D(u_i - v_i)$  หมายถึง แรงต้านต่อมวลของอนุภาคและแรงต้านดังกล่าวสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ 2.18

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} C_D \frac{Re_p}{24} \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $v_i$  หมายถึง เวกเตอร์ความเร็วของอนุภาค  $u_i$  หมายถึง เวกเตอร์ความเร็วของของไหล  $g_i$  หมายถึง ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง  $C_D$  หมายถึง สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Drag Coefficient)  $\rho_p$  หมายถึง ความหนาแน่นของอนุภาค  $d_p$  หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคและ  $Re_p$  หมายถึง ตัวเลขเรย์โนลด์สัมพัทธ์ (Relative Reynold Number) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 2.19

$$Re_p = \frac{\rho_d |v_i - u_i|}{\mu} \quad (2.19)$$

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปรีชา แก้วศรีพรหม ศึกษาประสิทธิภาพในกระบวนการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุปกรณ์ 50 มิลลิเมตร (50 mm Hydrocyclone) โดยการนำอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตขนาด 100 – 1,000 ไมโครเมตร ผสมน้ำเพื่อเป็นสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 3 และ 5 โดยปริมาตร และใช้ความดันลดต่างกันในช่วง 10 – 55 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว จากนั้นนำสารตั้งต้นดังกล่าวมาผ่านกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานแบบใส่แกนโลหะหนึ่งบริเวณกลางอุปกรณ์และแบบใส่แกนโลหะหมุนบริเวณกลางอุปกรณ์

การทดลองแสดงให้เห็นว่าไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะหมุนบริเวณกลางอุปกรณ์มีประสิทธิภาพกระบวนการแยกสูงกว่าแบบใส่แกนโลหะหนึ่งบริเวณกลางอุปกรณ์และสูงกว่าแบบมาตรฐาน เนื่องจากแกนโลหะหมุนบริเวณกลางสามารถกำจัดแก๊สที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินการ ส่งผลต่อแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นภายในอุปกรณ์เนื่องจากแก๊สไหลลดลง

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนของการทดลองดังกล่าวประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ อัตราการไหล ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและความเร็ว เมื่อเพิ่มอัตราการไหลส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการแยกเพิ่มขึ้น แต่ในขณะเดียวกันยังส่งผลให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น ในอีกความหมายหนึ่งคือส่งผลให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วของสารตั้งต้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการแยกเพิ่มขึ้นเช่นกัน และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้น ส่งผลต่อความหนืดของสารตั้งต้นและส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการแยกลดลง [4]

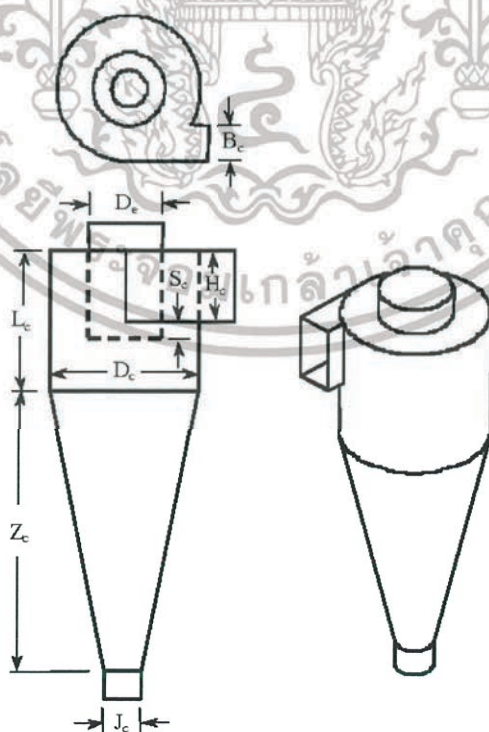
## บทที่ 3

### ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการ

วิธีการดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบส่วนที่มีทางออกสามทางแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองและขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาค

#### 3.1 การศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation)

การศึกษาแบบจำลองปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้นในกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนเพื่อจำลองปรากฏการณ์การไหลโดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณที่ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาจากไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานหรือแบบที่มีส่วนทางออกสองทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุปกรณ์ 50 มิลลิเมตร เริ่มต้นโดยการออกแบบและกำหนดโครงสร้างของอุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 3.1 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความยาวของอุปกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.1 วิธีการดำเนินการสำหรับการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ตารางที่ 3.1 ขนาดของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) [4]

ตัวแปร	ความยาว (มิลลิเมตร)
$D_c$	50.00
$H_c$	10.00
$B_c$	6.50
$D_e$	15.00
$S_c$	21.00
$J_c$	10.00
$L_c$	71.00
$Z_c$	270.00

#### 3.1.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre Processing)

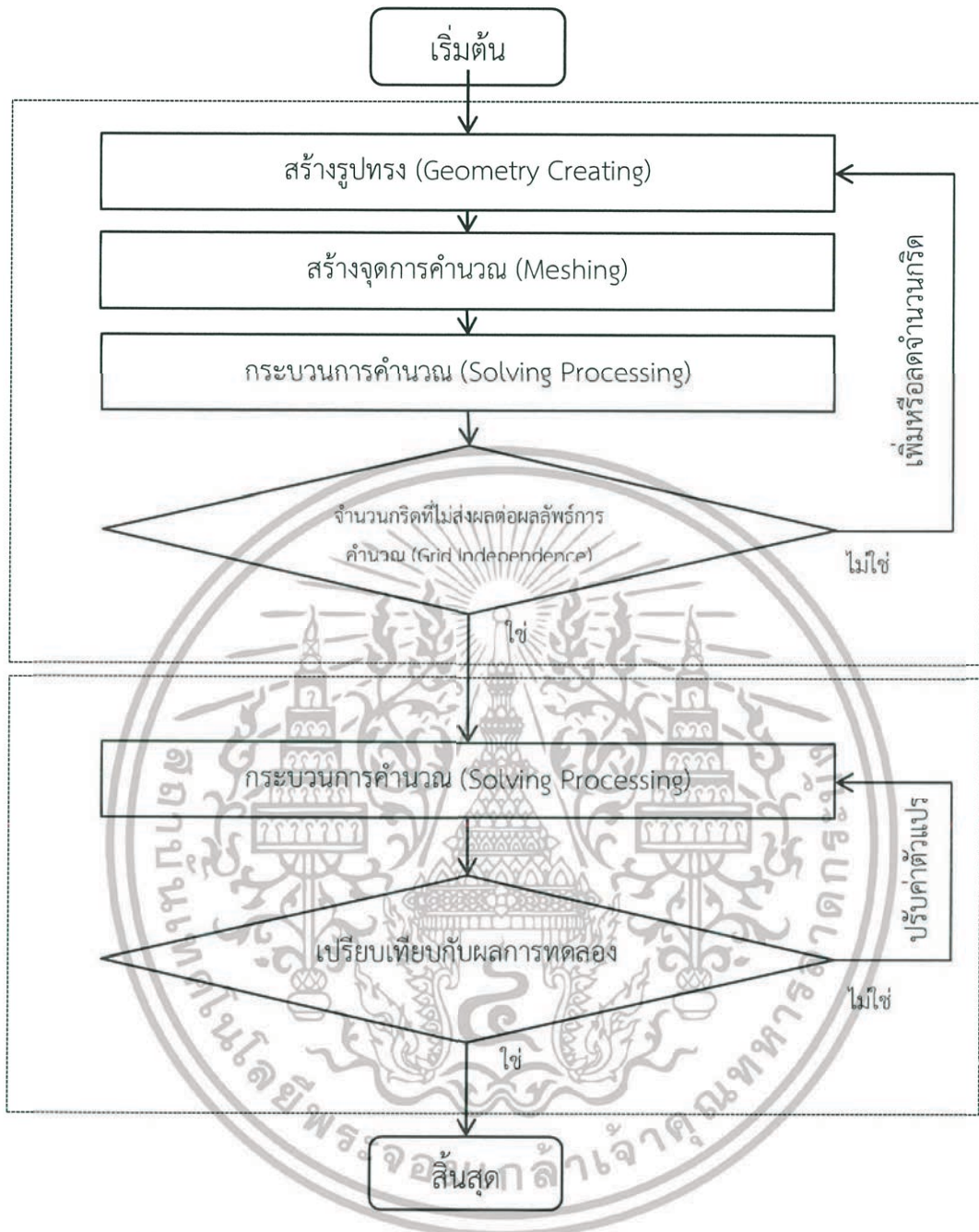
กระบวนการก่อนการคำนวณประกอบด้วยการสร้างรูปทรง (Creating Geometry) และการสร้างเซลล์คำนวณ (Meshing) โดยใช้โปรแกรม Gambit 2.4.6 การสร้างรูปทรงส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น ส่วนทรงกระบอก ส่วนทรงกรวย ส่วนทางออกด้านบนและส่วนทางออกด้านล่าง ขั้นตอนถัดมาเป็นการกำหนดปริมาตรกรคำนวณโดยใช้ทรงหกหน้า (Hexahedral) ให้กับรูปทรงแสดงดังรูปที่ 3.3 เพื่อใช้คำนวณจำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณ (Grid Independence) และศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองเปรียบเทียบผลการทดลองของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานจากงานวิจัย [4]

#### 3.1.2 กระบวนการคำนวณ (Solve Processing)

กระบวนการคำนวณเริ่มต้นโดยการนำโครงสร้างเซลล์คำนวณดังกล่าวเข้าสู่โปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 กระบวนการดังกล่าวประกอบด้วย การกำหนดสถานะขอบเขต (Boundary Condition) แสดงดังตารางที่ 3.2 การกำหนดแบบจำลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแสดงดังตารางที่ 3.3 และการกำหนดคุณสมบัติของไหล ซึ่งประกอบด้วยน้ำและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทรงกลมที่มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 4 - 80 ไมโครเมตร แสดงดังตารางที่ 3.4 การกำหนดดังกล่าวเพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพกระบวนการแยก ความเร็วแนวแกน (Axial Velocity) ความดันสถิต (Static Pressure) และความดันลด (Pressure Drop)

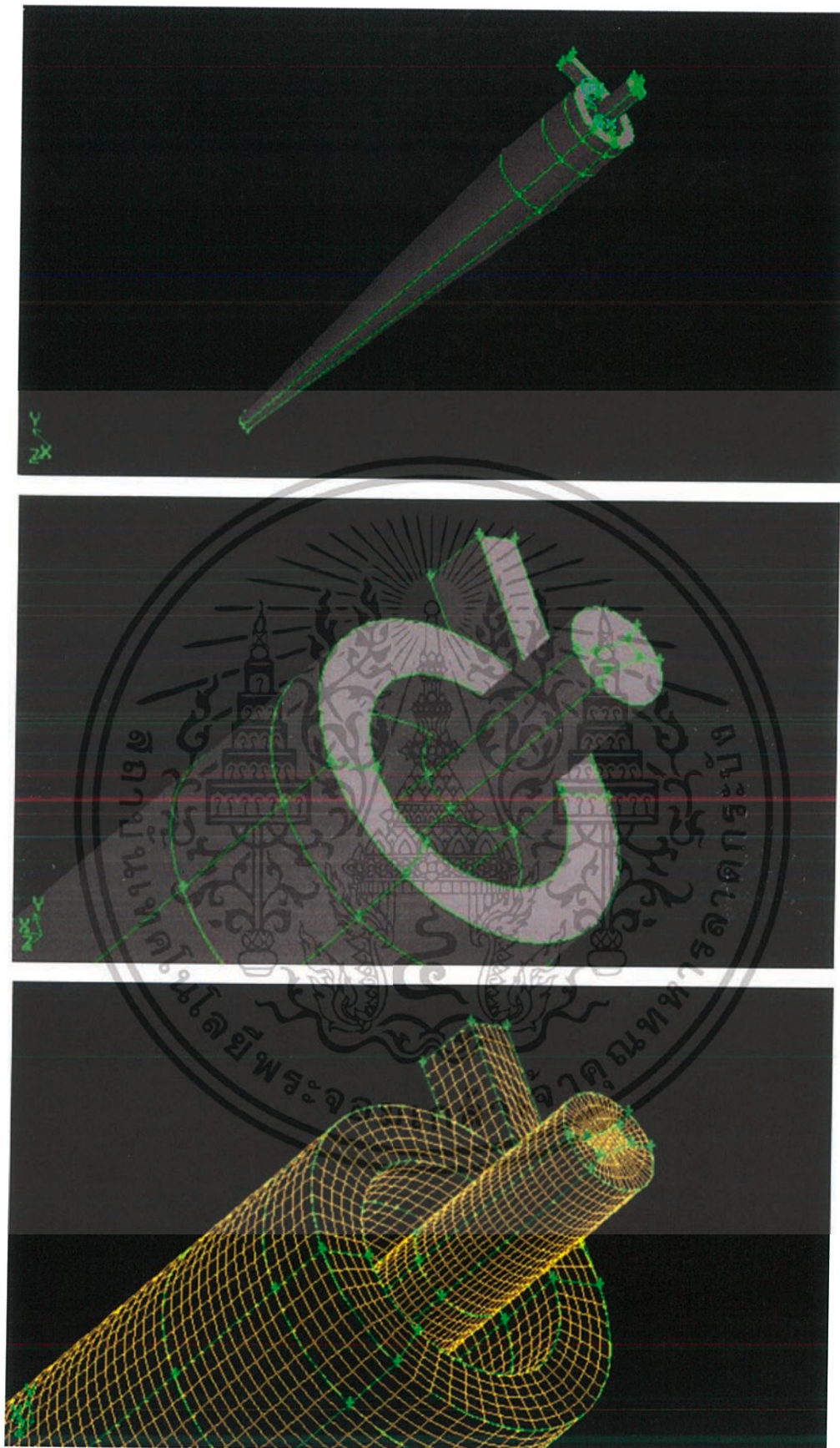
ทั้งนี้การคำนวณกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณสามารถดำเนินการได้โดยการกำหนดสารในระบบเป็นน้ำเพียงอย่างเดียวคำนวณกับจุดการคำนวณ 60,841 จุด เป็นจุดเริ่มต้น จากนั้นเพิ่มจำนวนจุดการคำนวณให้มีจำนวนมากขึ้นและใช้น้ำคำนวณกับจุดการคำนวณที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกันจนพบจำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 วิธีการดำเนินการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 รูปทรง (Geometry) และการสร้างเซลล์คำนวณ (Meshing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) การศึกษาในตอนที่ 1

ประเภท	สภาวะขอบเขต
ส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น (Inlet)	Velocity-Inlet
ส่วนทางออกด้านบน (Overflow Outlet)	Pressure-Outlet
ส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow Outlet)	Pressure-Outlet
ผนัง (Wall)	Wall
เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น (เมตร)	0.010
ความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulent Intensity)	3.801
ความเร็วขาเข้า (เมตรต่อวินาที)	9.911

ตารางที่ 3.3 การกำหนดแบบจำลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Schemes) การศึกษาในตอนที่ 1 [4, 13]

ประเภท	แบบจำลองหรือระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
แบบจำลองความปั่นป่วน	Reynold Stress Model: RSM
แบบจำลองการติดตามอนุภาค	Discrete Phase Particle Model: DPM
Pressure-velocity Coupling	SIMPLEC
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO
Momentum	QUICK
Turbulent Kinetic Energy	QUICK
Turbulent Dissipation Rate	QUICK
Reynold Stresses	QUICK

ตารางที่ 3.4 การกำหนดคุณสมบัติของไหลการศึกษาในตอนที่ 1 [4]

ประเภทสาร	น้ำ	อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	998.200	2,710.00
ความหนืด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	$1.003 \times 10^{-3}$	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post Processing)

การนำผลลัพธ์การคำนวณที่ได้จากกระบวนการคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองหรือเกณฑ์เป็นขั้นตอนถัดมาของกระบวนการคำนวณ หากผลการคำนวณเป็นไปตามเกณฑ์และยอมรับได้ ผลจากการคำนวณดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อหรือเป็นผลลัพธ์การคำนวณทั้งในการคำนวณกริดที่ไม่ส่งผลต่อการทดลองและการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] หากการคำนวณยังไม่เป็นที่ยอมรับ สามารถแก้ปัญหาโดยการดำเนินการซ้ำและปรับเปลี่ยนตัวแปรการคำนวณจนกว่าผลการคำนวณสามารถยอมรับได้

## 3.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีสามทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนส่วนที่มีสามทางออกสามทางโดยการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคจำนวน 8 ขนาด ได้แก่ 4 6 10 20 30 40 60 และ 80 ไมโครเมตร การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาที่พัฒนาจากไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอุปกรณ์ 50 มิลลิเมตร เริ่มต้นโดยการออกแบบและกำหนดโครงสร้างของอุปกรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.4 โดยการเพิ่มทางออกของผลิตภัณฑ์ที่ส่วนทางออกด้านบนเมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความยาวแสดงดังตารางที่ 3.5 ส่วนทางออกของผลิตภัณฑ์ทั้งสามได้แก่ ส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow) ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow) และส่วนทางออกด้านล่าง ขั้นตอนและวิธีดำเนินการสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแสดงดังรูปที่ 3.5

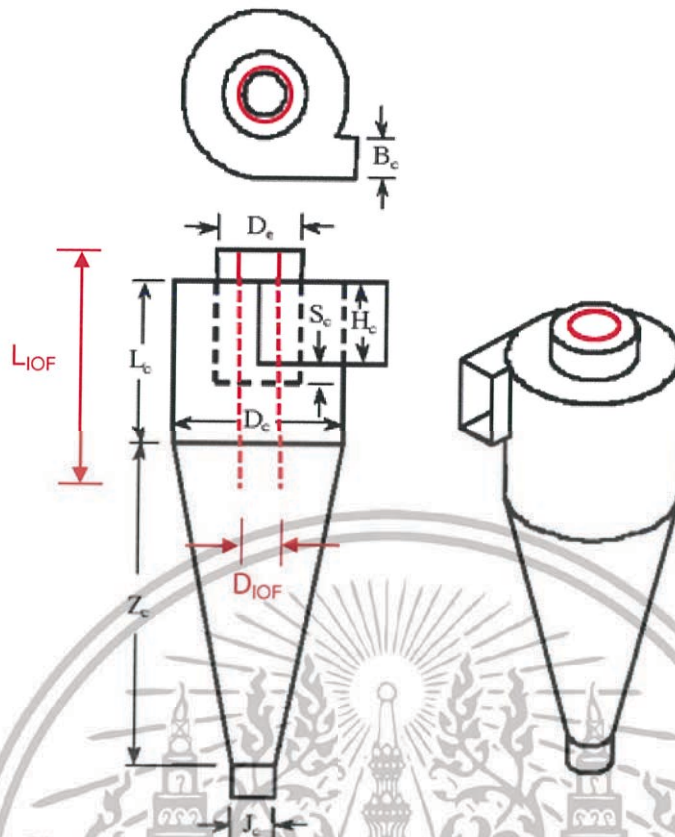
### 3.2.1 กระบวนการก่อนการคำนวณ (Pre Processing)

การสร้างรูปทรงลักษณะเดียวกับหัวข้อการศึกษาความแม่นยำของแบบจำลองโดยเพิ่มทางออกที่สามของผลิตภัณฑ์บริเวณส่วนทางออกด้านบน สร้างรูปทรงเพื่อใช้คำนวณจำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณ

### 3.2.2 กระบวนการคำนวณ (Solve Processing)

การกำหนดสภาวะขอบเขตโดยกำหนดในลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1.1 แสดงดังตารางที่ 3.6 การกำหนดแบบจำลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแสดงดังตารางที่ 3.7 และการกำหนดคุณสมบัติของไหล ซึ่งประกอบด้วยน้ำและอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตทรงกลมที่มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 4 – 80 ไมโครเมตร แสดงดังตารางที่ 3.8 การกำหนดดังกล่าวเพื่อใช้คำนวณประสิทธิภาพกระบวนการแยก ความเร็วแนวแกน ความดันสถิต และความดันลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง  
(Three Product Hydrocyclone)

ตารางที่ 3.5 ขนาดของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

ตัวแปร	ความยาว (มิลลิเมตร)
$D_c$	50.00
$H_c$	10.00
$B_c$	6.50
$D_e$	15.00
$S_c$	21.00
$J_c$	10.00
$L_c$	71.00
$Z_c$	270.00
$D_{IOF}$	8.00
$L_{IOF}$	140.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งนี้การคำนวณกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณสามารถดำเนินการได้โดยการกำหนดสารในระบบเป็นน้ำเพียงอย่างเดียวคำนวณกับจุดการคำนวณ 104,112 จุด เป็นจุดเริ่มต้น จากนั้นเพิ่มจำนวนจุดการคำนวณให้มีจำนวนมากขึ้นและใช้น้ำคำนวณกับจุดการคำนวณที่เพิ่มมากขึ้นในลักษณะเช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.1.1

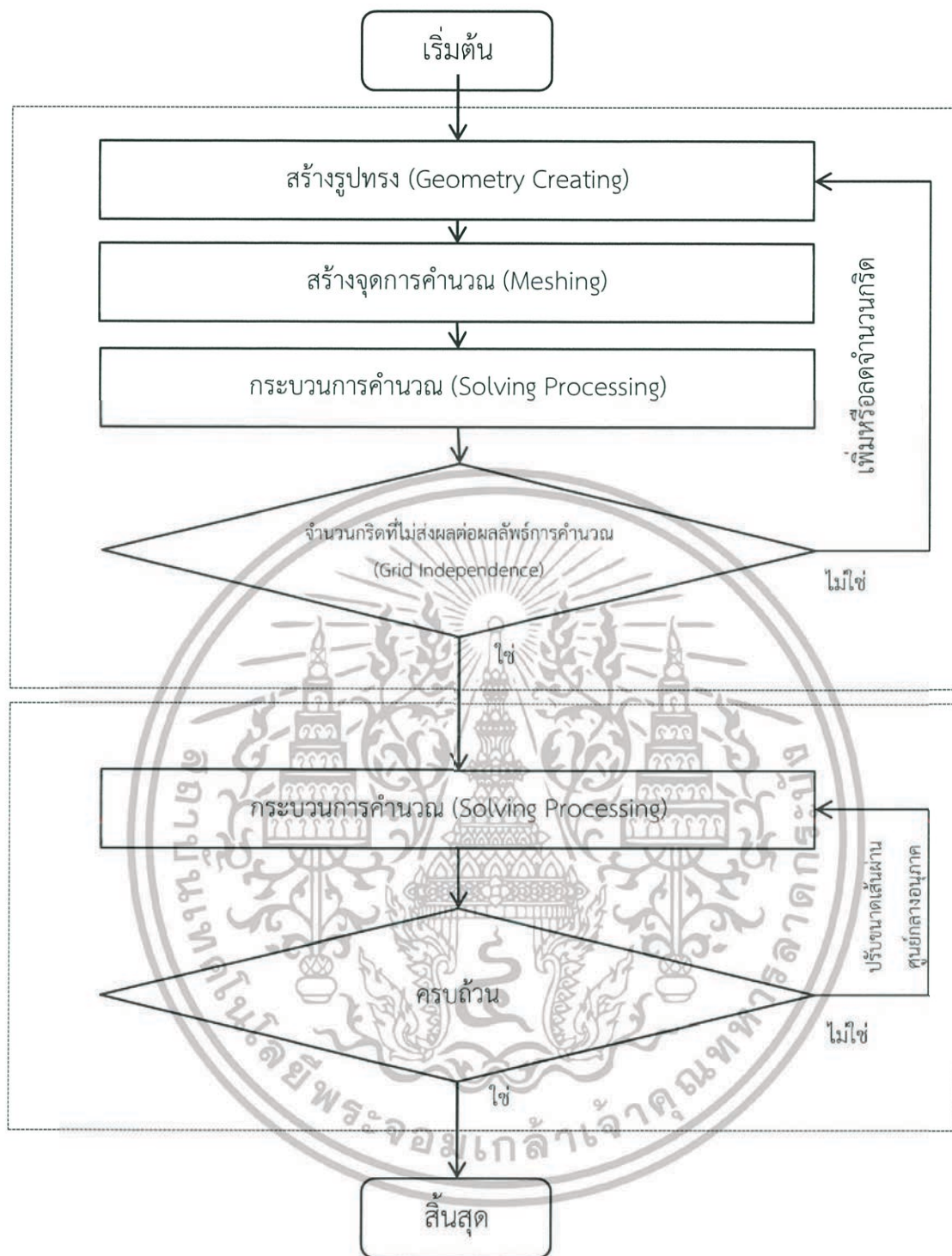
การดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคสามารถทำได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค 4 6 10 20 30 40 60 และ 80 ไมโครเมตร ตามลำดับ

### 3.2.3 กระบวนการหลังการคำนวณ (Post Processing)

นำผลลัพธ์การคำนวณหรือประสิทธิภาพกระบวนการแยกที่ได้จากกระบวนการคำนวณเปรียบเทียบและวิเคราะห์ปรากฏการณ์การไหลที่เกิดขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 วิธีการดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัตขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.6 การกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Condition) การศึกษาในตอนที่ 2

ประเภท	สภาวะขอบเขต
ส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น (Inlet)	Velocity-Inlet
ส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow Outlet)	Pressure-Outlet
ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow Outlet)	Pressure-Outlet
ส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow Outlet)	Pressure-Outlet
ผนัง (Wall)	Wall
เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น (เมตร)	0.010
ความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulent Intensity)	3.801
ความเร็วขาเข้า (เมตรต่อวินาที)	9.911

ตารางที่ 3.7 การกำหนดแบบจำลองและระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Schemes) การศึกษาในตอนที่ 2 [4, 13]

ประเภท	แบบจำลองหรือระเบียบวิธีเชิงตัวเลข
แบบจำลองความปั่นป่วน	Reynold Stress Model: RSM
แบบจำลองการติดตามอนุภาค	Discrete Phase Particle Model: DPM
Pressure-velocity Coupling	SIMPLEC
Gradient	Least Squares Cell Based
Pressure	PRESTO
Momentum	QUICK
Turbulent Kinetic Energy	QUICK
Turbulent Dissipation Rate	QUICK
Reynold Stresses	QUICK

ตารางที่ 3.8 การกำหนดคุณสมบัติของไหลการศึกษาในตอนที่ 2 [4]

ประเภทสาร	น้ำ	อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต
ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	998.200	2,710.00
ความหนืด (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)	$1.003 \times 10^{-3}$	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการจำลองและวิเคราะห์ผลการจำลอง

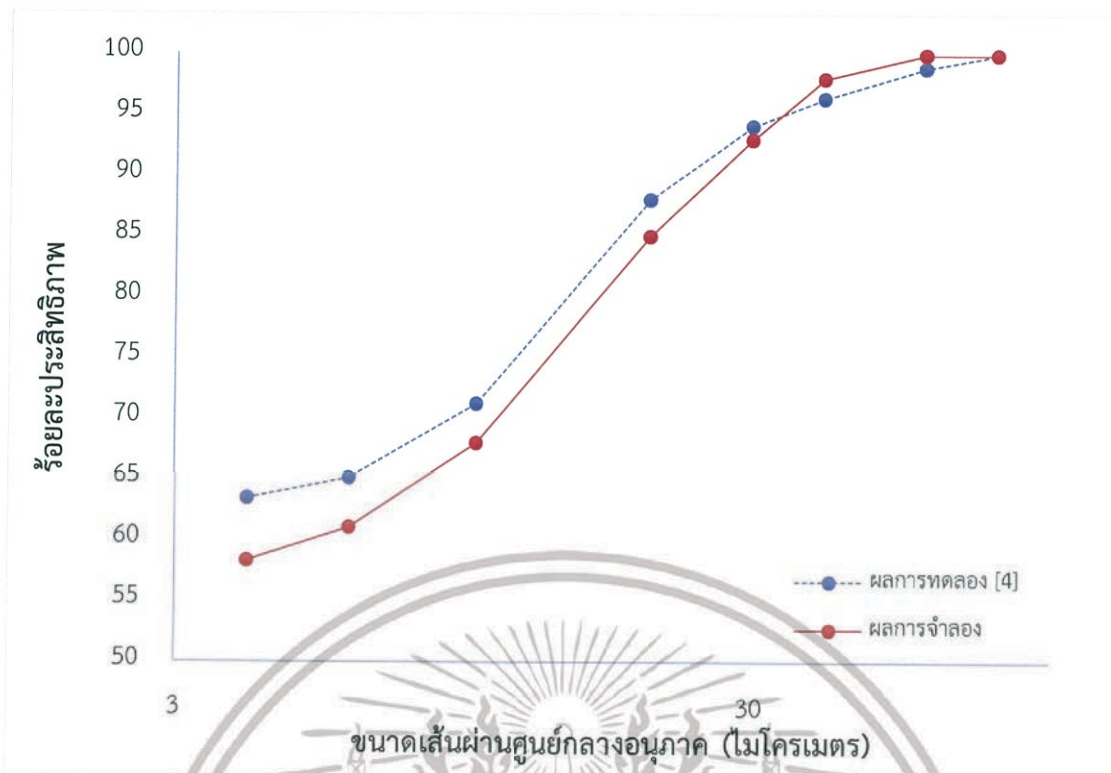
ปรากฏการณ์การไหลของกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนประกอบด้วยอนุภาค แคลเซียมคาร์บอเนตที่มีลักษณะทรงกลมถูกป้อนเข้าสู่บริเวณทางเข้าของสารตั้งต้นภายใต้ อุณหภูมิห้องและสมมติฐานให้กระบวนการดังกล่าวมีอุณหภูมิคงที่ (Isothermal) ในกระบวนการแยก โดยไฮโดรไซโคลนไม่คำนึงถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาค (Particle Interaction) เนื่องจากสารตั้งต้นมีความเข้มข้นเจือจาง (Dilute Solution)

กระบวนการคำนวณถูกคำนวณผ่านโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 โดยมี สมมติฐานและการกำหนดค่าภายในโปรแกรมดังที่ได้กล่าวในบทที่ 3 ผลการคำนวณถูกแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ ผลการจำลองความแม่นยำของแบบจำลองและผลการจำลองประสิทธิภาพ กระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง

### 4.1 ผลการจำลองความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation)

ผลการคำนวณความแม่นยำของแบบจำลองหรือการศึกษาในตอนต้นที่ 1 เพื่อหาสถานะและการ ตั้งค่าภายในโปรแกรมที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อให้เป็นที่ยอมรับ ทั้งนี้สถานะ และการตั้งค่าภายในโปรแกรมดังกล่าวถูกนำมาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนแบบ ส่วนที่มีทางออกสามทางหรือการศึกษาในตอนต้นที่ 2 เพื่อใช้จำลองประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาด อนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางและปรากฏการณ์การไหล

จำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณสำหรับไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 313,609 จุด ถูกนำมาใช้ในกระบวนการคำนวณโดยกำหนดแบบจำลองความปั่นป่วนและแบบจำลอง การติดตามอนุภาคเพื่อเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] สารตั้งต้น ประกอบด้วยอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนต ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร เมื่อความเร็วบริเวณ ส่วนทางเข้าของสารตั้งต้นมีค่าเท่ากับ 9.911 เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของการทดลองเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบมีขนาดระหว่าง 4 - 80 ไมโครเมตร



รูปที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) ระหว่างผลการทดลองและผลการจำลอง

ผลลัพธ์การเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแยกระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองแสดงดังรูปที่ 4.1 จากผลการจำลองที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจำนวน 8 ขนาด ได้แก่ 4 6 10 20 30 40 60 และ 80 ไมโครเมตร

จากรูปที่ 4.1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยกร้อยละ 80 ของผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] มีค่าเท่ากับ 15.96 ไมโครเมตร ในขณะที่ผลการจำลองมีค่าเท่ากับ 17.03 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองมีค่าเท่ากับ 6.70

ผลการจำลองพบว่าร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกมีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองและมีลักษณะแนวโน้มที่สอดคล้องกันเนื่องจากร้อยละความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.00 – 8.03 ในช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคเล็กพบร้อยละความผิดพลาดสูงมากกว่าช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคใหญ่เนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่กับอนุภาคขนาดเล็ก สมมติฐานของแบบจำลองการติดตามอนุภาคของการจำลองละการคำนวณปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคและอนุภาคขนาดเล็กไม่อยู่ภายใต้อิทธิพลการหมุนวน (Wake) บริเวณด้านหลังของอนุภาคขนาดใหญ่ที่เกิดจากของไหลไหลผ่านอนุภาคขนาดใหญ่ อนุภาคแต่ละอนุภาคมีการเคลื่อนที่ที่อิสระต่อกัน ซึ่งตรงข้ามกับ

ลักษณะการเคลื่อนที่ของอนุภาคในการทดลอง อนุภาคขนาดเล็กตกอยู่ภายใต้อิทธิพลการหมุนวนบริเวณด้านหลังของอนุภาคขนาดใหญ่และไหลสู่ส่วนทางออกด้านล่างพร้อมกับอนุภาคขนาดใหญ่ ส่งผลให้ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กในการทดลองมีค่าสูงกว่าการจำลอง

ความดันลดของผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] มีค่าเท่ากับ 241,178.17 ปาสคาล ในขณะที่ผลการจำลองมีค่าเท่ากับ 256,001.01 ปาสคาล เมื่อพิจารณาร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดลองและผลการจำลองมีค่าเท่ากับ 6.16 การเปรียบเทียบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองแสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการเปรียบเทียบความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง

ตัวแปร	หน่วย	ผลการทดลอง	ผลการจำลอง
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 80 ( $D_{80}$ )	ไมโครเมตร	15.96	17.03
ความดันลด (Pressure Drop)	ปาสคาล	241,178.17	256,001.01

ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกและความดันลดพบความคลาดเคลื่อนที่มีค่าต่ำและยอมรับได้ แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองมีความแม่นยำและความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำแบบจำลองดังกล่าวใช้ทำนายประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคโดยไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางหรือการศึกษาในตอนี่ 2

#### 4.2 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

ผลการคำนวณประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนส่วนที่มีทางออกสามทางหรือการศึกษาในตอนี่ 2 เพื่อประเมินแนวโน้มช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่สามารถแยกออกทางส่วนทางออกของผลิตภัณฑ์ทั้งสามสายผลิตภัณฑ์ได้แก่ ส่วนทางออกด้านบน ชั้นใน ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอกและส่วนทางออกด้านล่าง

แบบจำลองจากการศึกษาในตอนี่ 1 ถูกนำมาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคและจำลองปรากฏการณ์การไหล การศึกษาในตอนี่ 2 ถูกแบ่งกรณีศึกษาออกเป็นสองกรณีได้แก่ กรณีศึกษากระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตของไฮโดรไซโคลนแบบที่มี

ส่วนทางออกสามทางและกรณีศึกษาปรากฏการณ์การไหลภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง

จำนวนกริดที่ไม่ส่งผลต่อผลลัพธ์การคำนวณสำหรับไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีค่าเท่ากับ 524,585 จุด ถูกนำมาใช้ในกรณีศึกษาทั้งสองกรณี

#### 4.2.1 ประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนต

ผลลัพธ์การคำนวณประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดของอนุภาคของแคลเซียมคาร์บอเนตแสดงดังรูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคในส่วนทางออกด้านบนชั้นในมีค่าสูงในช่วงอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กหรืออนุภาคขนาดเล็ก ส่วนประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคในส่วนทางออกด้านล่างมีค่าสูงในช่วงอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่หรืออนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่ประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคในส่วนทางออกด้านบนชั้นนอกมีค่าสูงในช่วงอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างส่วนทางออกด้านบนชั้นในและส่วนทางออกด้านล่าง ขนาดตัดของกระบวนการตัดขนาดอนุภาคแสดงดังตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงประสิทธิภาพกระบวนการตัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ขนาดตัด (Cut Size Diameter:  $D_{50}$ ) ของส่วนทางออก

ส่วนทางออก	ขนาดตัด (ไมโครเมตร)
ส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow Outlet)	25.03
ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow Outlet)	6.41
ส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow Outlet)	4.27

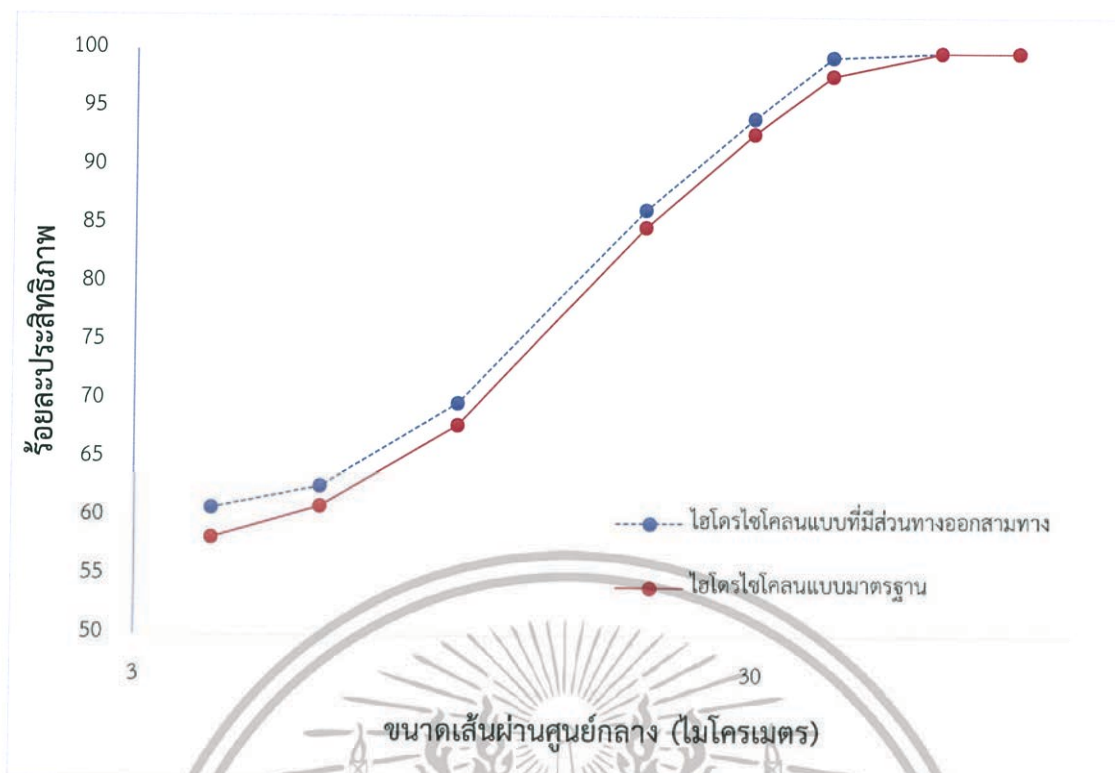
จากตารางที่ 4.2 พบว่าขนาดตัดของกระบวนการคัดขนาดอนุภาคส่วนทางออกด้านล่างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าส่วนทางออกด้านบนชั้นนอกและขนาดตัดของกระบวนการแยกส่วนทางออกด้านบนชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าส่วนทางออกด้านบนชั้นในตามลำดับ

กระบวนการคัดขนาดของอนุภาคขนาดเล็กหรืออนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก อนุภาคดังกล่าวมีขนาดแรงต้านมากกว่าขนาดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง ส่งผลให้อนุภาคขนาดเล็กเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณกลางของไฮโดรไซโคลอนและเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของกระแสหมุนวนที่มีทิศเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนบริเวณตรงกลางของไฮโดรไซโคลอน ประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของส่วนทางออกด้านบนชั้นในจึงมีค่าสูงในอนุภาคขนาดเล็ก ส่วนอนุภาคขนาดใหญ่หรืออนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางสูงมีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากกว่าแรงต้าน ส่งผลให้อนุภาคขนาดใหญ่เคลื่อนที่ออกสู่บริเวณด้านนอกภายใต้อิทธิพลของกระแสหมุนวนที่มีทิศเคลื่อนที่ลงด้านล่างสุดของไฮโดรไซโคลอน ประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของส่วนทางออกด้านล่างจึงมีค่าสูงในอนุภาคขนาดใหญ่ ในขณะที่อนุภาคขนาดกลางมีแรงต้านใกล้เคียงกับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเคลื่อนที่อยู่ในช่วงรอยต่อระหว่างกระแสหมุนวนที่มีทิศเคลื่อนที่ขึ้นและเคลื่อนที่ลง (Transient Region) ซึ่งอิทธิพลของกระแสหมุนวนที่มีทิศเคลื่อนที่ขึ้นส่งผลมากกว่าเล็กน้อยในบริเวณดังกล่าว อนุภาคขนาดกลางจึงเคลื่อนที่สู่ทางออกส่วนด้านบนชั้นนอก

นอกจากนี้หากเปรียบเทียบกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตในส่วนทางออกด้านล่างระหว่างไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐาน (ผลการจำลองในการศึกษาตอนที่ 1) และไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางแสดงดังรูปที่ 4.3 ประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางสามารถแยกอนุภาคขนาดใหญ่ที่สูงกว่า

ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยกร้อยละ 80 ของส่วนทางออกด้านล่าง ไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีค่าเท่ากับ 16.07 ไมโครเมตร และไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 17.94 ไมโครเมตร เมื่อพิจารณาร้อยละความแตกต่างของไฮโดรไซโคลอนทั้งสองประเภทมีค่าเท่ากับ 10.99

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแยกของทางออกส่วนด้านล่าง (Underflow)

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกโดยประสิทธิภาพกระบวนการแยกร้อยละ 80 ( $D_{80}$ ) ของส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow)

ประเภทไฮโดรไซโคลน	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 80 (ไมโครเมตร)
ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)	16.07
ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)	17.94

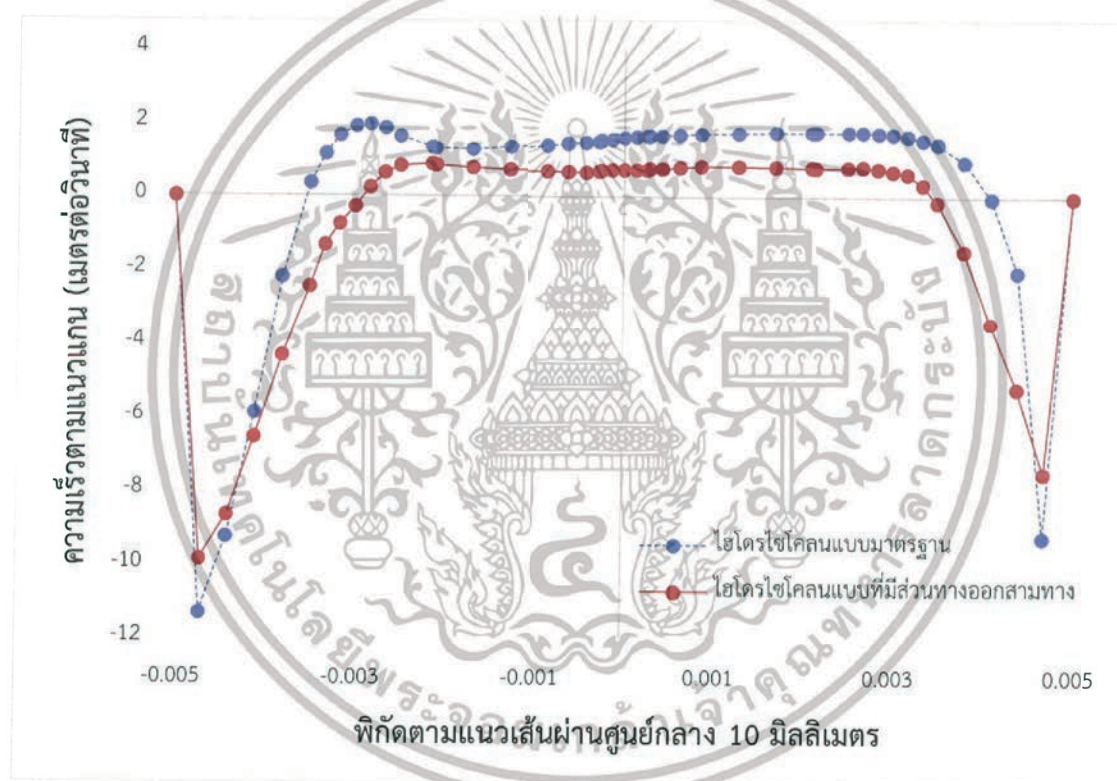
ลักษณะทางด้านโครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางที่สำคัญคือการสร้างท่อทรงกระบอกบริเวณตรงกลางไฮโดรไซโคลนเพื่อเพิ่มทางออกที่สามของผลิตภัณฑ์ ท่อทรงกระบอกดังกล่าวเพิ่มความเสถียรให้กับการไหลเข้าสู่ไฮโดรไซโคลนของสารตั้งต้น สารตั้งต้นถูกบังคับให้ไหลลงสู่บริเวณการแยกด้านล่างตามความยาวของท่อทรงกระบอกและลดการเกิดกระแสไหลลัด (Short Circuit) ส่งผลให้โอกาสที่อนุภาคขนาดใหญ่ไหลเข้าสู่บริเวณตรงกลางหรือเคลื่อนที่ภายใต้อิทธิพลของกระแสหมุนวนที่มีทิศเคลื่อนที่ขึ้นต่ำลง อนุภาคขนาดใหญ่จึงเคลื่อนออกสู่ทางออกส่วนด้านล่างมากกว่ากระบวนการแยกโดยไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2 ปრაกฏการณ์การไหลภายในภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง

ปรากฏการณ์การไหลภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีความแตกต่างจากปรากฏการณ์การไหลภายในไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานในรูปแบบตัวแปรความเร็วตามแนวแกน ความดันสถิตและความดันลด

ความเร็วตามแนวแกนเป็นตัวแปรที่สำคัญในการศึกษาปรากฏการณ์การไหลของของไหล หากพิจารณาผลการจำลอง รูปที่ 4.4 แสดงความเร็วตามแนวแกนบริเวณส่วนทางออกด้านล่างที่ความสูง 0.341 เมตร เมื่อวัดจากด้านบนของส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น ความเร็วตามแนวแกนที่มีค่าบวกหมายถึงของไหลมีทิศทางขึ้นสวนทางกับส่วนทางออกด้านล่าง ความเร็วตามแนวที่มีค่าลบหมายถึงของไหลมีทิศทางการเคลื่อนที่ลงสู่ส่วนทางออกด้านล่าง



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity) บริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow)

จากรูปที่ 4.4 แสดงความเร็วตามแนวแกนบริเวณส่วนทางออกด้านล่างเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานและไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง พื้นที่หน้าตัดกระแสมุขวนด้านนอกที่มีทิศลงสู่ด้านล่าง (ความเร็วตามแนวแกนที่มีค่าลบ) ของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน รวมถึงความเร็วตามแนวแกนที่มีค่าบวกหรือกระแสมุขวนด้านในที่มีทิศขึ้นสู่ด้านบนของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีค่าต่ำกว่า

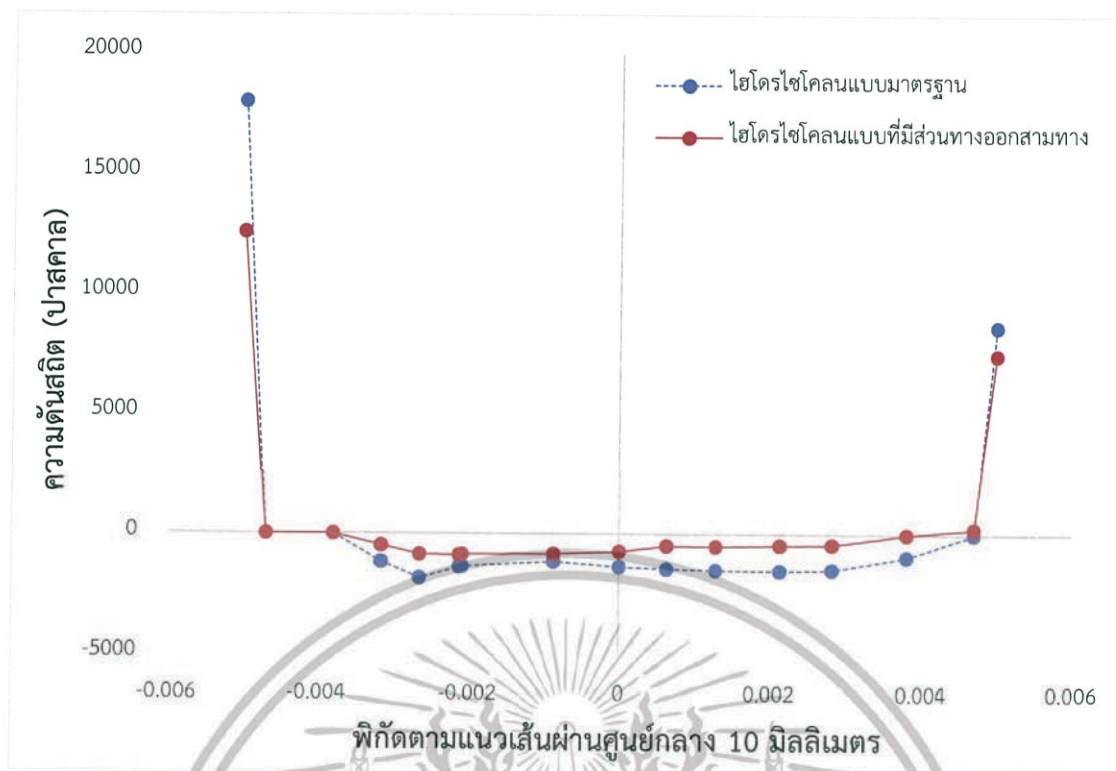
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ในบริเวณส่วนทางออกด้านล่างอนุภาคเนื่องจากสมดุลแรงเรียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเริ่มจากขนาดใหญ่จนถึงขนาดเล็กในบริเวณด้านนอกจนถึงด้านในตามลำดับ ส่งผลให้กระบวนการคัดขนาดอนุภาคภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จนถึงขนาดกลางออกทางส่วนทางออกด้านล่างได้สูงกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานที่มีพื้นที่กระแสมุมวนที่มีทิศลงสู่ทางออกส่วนด้านล่างต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง อนุภาคขนาดกลางในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของกระแสมุมวนด้านในและเคลื่อนที่สู่ด้านบน

หากพิจารณาความเร็วตามแนวแกนดังรูปที่ 4.4 ความเร็วตามแนวแกนที่มีทิศขึ้นสู่ด้านบน (ความเร็วตามแนวแกนที่มีค่าบวก) ของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางพบว่ามีค่าต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน อนุภาคที่ตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของกระแสมุมวนดังกล่าวมีระยะเวลาในกระบวนการคัดขนาดอนุภาค (Resident Time) สูงขึ้น เกิดกระบวนการคัดขนาดอนุภาคที่มีประสิทธิภาพตามสมดุลแรงระหว่างแรงต้านและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าออกสู่ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอกและอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าออกสู่ส่วนทางออกด้านบนชั้นใน

ความดันสถิตหมายถึงความดันภายในไฮโดรไซโคลนมีผลต่อกระบวนการแยก หากมีค่าความดันสถิตสูง ส่งผลให้มีความจำเป็นในการใช้พลังงานเพิ่มขึ้น รูปที่ 4.5 แสดงความดันสถิตบริเวณส่วนทางออกด้านล่าง ที่ความสูง 0.341 เมตร เมื่อวัดจากด้านบนของส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น

ของไหลมีลักษณะการเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความดันสูงไปยังบริเวณที่มีดันต่ำ หากพิจารณาความสถิตดังรูปที่ 4.5 บริเวณกลางของส่วนทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีความดันสถิตต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ส่งผลให้ของไหลเคลื่อนที่จากบริเวณชั้นนอกหรือบริเวณที่มีความดันสถิตสูงเข้าสู่บริเวณตรงกลางหรือบริเวณที่มีความดันสถิตต่ำได้ต่ำกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน กระแสมุมวนด้านในที่มีทิศขึ้นของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีอิทธิพลต่ออนุภาคต่ำกว่าอิทธิพลของกระแสมุมวนด้านนอกที่มีทิศลงซึ่งสอดคล้องกับผลการจำลองความเร็วตามแนวที่ได้กล่าวมาข้างต้น



พิงัดตามแนวเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร  
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบความดันสถิต (Static Pressure) บริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow)

ความดันสถิตหมายถึงความแตกต่างระหว่างความดันส่วนทางเข้าของสารและความดันส่วนทางออกด้านล่าง ความดันสถิตแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการแยกภายในไฮโดรไซโคลน ตารางที่ 4.4 แสดงความดันสถิตระหว่างไฮโดรไซโคลนที่มีส่วนทางออกสามทางและไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบความดันสถิต (Pressure Drop) ของไฮโดรไซโคลน

ประเภท	ความดันสถิต (ปาสคาล)
ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)	305,751.44
ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)	256,001.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.4 พบว่าไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีความดันลดมากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานเนื่องจากไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีพื้นที่สัมผัสผนังของของไหลค่ามากกว่าไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานจากพื้นที่ผนังที่ถูกเพิ่มจากส่วนทางออกด้านบนขึ้นใน นอกจากนี้ยังแสดงถึงพลังงานที่ใช้ในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีค่าสูงกว่า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการจำลอง

#### 5.1 สรุปผลการจำลอง

จากการศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยการจำลองโดยเทคนิคพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อใช้แก้ปัญหาระบวนการแยกในอุตสาหกรรม แบบจำลองปรากฏการณ์การไหลและแบบจำลองการติดตามอนุภาคถูกนำมาใช้ในการจำลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

##### 5.1.1 การศึกษาความแม่นยำของแบบจำลอง (Validation)

การศึกษาตอนที่ 1 เพื่อหาสถานะและการตั้งค่าภายในโปรแกรมที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองเพื่อให้เป็นที่ยอมรับ เมื่อการจำลองดังกล่าวเป็นการจำลองกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 – 80 ไมโครเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร สารตั้งต้นดังกล่าวมีความเร็ว 9.911 เมตรต่อวินาที การจำลองพบว่าประสิทธิภาพกระบวนการแยกของแบบจำลองมีร้อยละความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] อยู่ระหว่าง 0.00 – 8.03 ความคลาดเคลื่อนที่มีค่าสูงพบในประสิทธิภาพกระบวนการแยกของอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กเนื่องจากสมมติฐานของแบบจำลองละการคำนวณปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่กับอนุภาคขนาดเล็ก ค่าความเฉพาะปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคกับของไหล ความดันลดของการจำลองมีร้อยละความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] เท่ากับ 6.16

##### 5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

แบบจำลองในการศึกษาตอนที่ 1 ถูกนำมาใช้ในการจำลองตอนที่ 2 เพื่อศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางโดยการเพิ่มส่วนทางออกด้านบนขึ้นในไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน ไฮโดรไซโคลนดังกล่าวถูกนำมาใช้ในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 – 80 ไมโครเมตร ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยปริมาตร สารตั้งต้นดังกล่าวมีความเร็ว 9.911 เมตรต่อวินาที การจำลองพบว่าขนาดตัดของส่วนทางออกด้านล่าง ส่วนทางออกด้านบนนอกและส่วนทางออกด้านบนชั้นในมีค่าจากสูงไปต่ำ ในอีกความหมายหนึ่งคือส่วนทางออกด้านล่างสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ ส่วน

ทางออกด้านบนชั้นนอกสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดกลางและส่วนทางออกด้านบนชั้นในสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กตามสมดุลแรงระหว่างแรงต้านและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางบนอนุภาค รวมถึงความเร็วตามแนวแกนที่มีทิศขึ้นสู่ด้านบนของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานมีค่าต่ำ อนุภาคที่ตกอยู่ภายใต้อิทธิพลของกระแสหมุนวนด้านในมีระยะเวลาในกระบวนการแยกสูงขึ้น เกิดกระบวนการแยกที่มีประสิทธิภาพตามสมดุลแรงระหว่างแรงต้านและแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางดังกล่าว ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอกจึงสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่สูงกว่าส่วนทางออกด้านบนชั้นใน

นอกจากนี้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่สามารถแยกด้วยประสิทธิภาพร้อยละ 80 ทางออกส่วนด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางและไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 16.07 ไมโครเมตร และ 17.94 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีค่าต่ำกว่าของไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานเนื่องจากส่วนทางออกด้านบนชั้นในที่ถูกเพิ่ม ส่วนทางออกด้านบนชั้นในสร้างความเสถียรโดยบังคับสารตั้งต้นให้ไหลลงสู่บริเวณการแยกด้านล่างและลดการเกิดกระแสไหลลัด รวมถึงปรากฏการณ์การไหลภายในไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐานพบว่าบริเวณส่วนทางออกด้านล่างมีพื้นที่หน้าตัดกระแสหมุนวนด้านนอกที่มีทิศลงสู่ด้านล่างมากกว่า อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่และขนาดกลางถูกแยกออกมาในส่วนทางออกด้านล่างได้สูงกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐาน

ผลการจำลองความดันสถิตบริเวณกลางทางออกส่วนด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีความดันสถิตต่ำกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐาน ส่งผลให้น้ำเคลื่อนที่จากบริเวณชั้นนอกหรือบริเวณที่มีความดันสถิตสูงเข้าสู่บริเวณตรงกลางหรือบริเวณที่มีความดันสถิตต่ำได้น้อยกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐาน กระแสหมุนวนด้านในที่มีทิศขึ้นของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีอิทธิพลต่ออนุภาคต่ำกว่าอิทธิพลของกระแสหมุนวนด้านนอกซึ่งมีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับความเร็วตามแนวแกนที่ได้กล่าวมาข้างต้น

การใช้พลังงานของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางมีค่าสูงเนื่องจากความดันลดที่เกิดจากกระบวนการแยกมีค่าสูงกว่าไฮโดรไซโคลอนแบบมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนาไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางจากไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐานสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในกระบวนการคัดขนาดอนุภาคเชิงอุตสาหกรรมเนื่องจากกระบวนการคัดขนาดอนุภาคมีประสิทธิภาพสูงสำหรับกระบวนการที่มีความต้องการสามผลิตภัณฑ์ที่มีช่วงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคต่างกันภายในอุปกรณ์เดียว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการคัดขนาดอนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตในสารผสมที่มีน้ำเป็นของไหล

## 5.2 วิจารณ์ผลการจำลอง

- (1) แบบจำลองการติดตามอนุภาคไม่สามารถให้ผลการจำลองที่แม่นยำตรงในอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กมากเนื่องจากสมมติฐานไม่คำนวนปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคขนาดใหญ่และอนุภาคขนาดเล็ก ผลการคำนวณประสิทธิภาพกระบวนการแยกมีความคลาดเคลื่อนที่อนุภาคขนาดเล็ก
- (2) แบบจำลองดังกล่าวไม่สามารถให้ผลการคำนวณที่แม่นยำตรงในสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นสูงเนื่องจากสมมติฐานไม่คำนวนปริมาตรของอนุภาคที่แทนที่ในปริมาตรของของไหล
- (3) การทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] ใช้อนุภาคแคลเซียมคาร์บอเนตที่มีความหนาแน่นไม่คงที่ ซึ่งต่างจากการจำลองที่กำหนดความหนาแน่นให้มีค่าคงที่ ผลการจำลองเป็นอุดมคติสูงส่งผลให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง
- (4) การทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] อาจเกิดการถ่ายเทความร้อนขึ้นเนื่องจากการเสียดสีระหว่างอนุภาคและผนังของไฮโดรไซโคลนซึ่งต่างจากสมมติฐานการจำลองที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน การจำลองจึงจำลองเฉพาะการถ่ายเทโมเมนตัม
- (5) การจำลองมิได้จำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิงส่วนทางออกด้านบน ผลการจำลองเป็นอุดมคติสูงส่งผลให้อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากผลการทดลอง

## 5.3 ข้อเสนอแนะ

- (1) ควรศึกษาตัวแปรทางด้านโครงสร้างและตัวแปรทางด้านดำเนินการอื่นๆ ควบคู่กันในการออกแบบเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการแยก
- (2) ควรทดลองประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคเปรียบเทียบกับผลการจำลองของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (3) ควรตั้งสมมติฐานและตั้งค่าโปรแกรมให้มีความใกล้เคียงกับการทดลองมากยิ่งขึ้นเพื่อเพิ่มความแม่นยำการจำลอง
- (4) ควรศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของอนุภาคชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเพื่อนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม
- (5) ควรศึกษาประสิทธิภาพกระบวนการคัดขนาดอนุภาคของของไหลชนิดอื่นๆ ที่ใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมเพื่อนำไปใช้งานจริงในอุตสาหกรรม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

## ข้อมูลผลการจำลองและผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง

การคำนวณประสิทธิภาพกระบวนการแยก (Collection Efficiency) ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) แต่ละขนาดอนุภาคของการจำลองสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ก.1

$$E_i = \frac{m_{U,i}}{m_{F,i}} \times 100 \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ  $E_i$  หมายถึง ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$   $m_{U,i}$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$  ส่วนทางออกด้านล่าง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) และ  $m_{F,i}$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$  ส่วนทางเข้าของสารตั้งต้น (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

ตารางที่ ก.1 ประสิทธิภาพกระบวนการแยกของการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] และผลการจำลองสำหรับไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)

ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ผลการทดลอง		ผลการจำลอง		ความคลาดเคลื่อน (%)
	ประสิทธิภาพ (%)	ประสิทธิภาพสะสม (%)	ประสิทธิภาพ (%)	ประสิทธิภาพสะสม (%)	
4.00	63.39	9.36	58.30	10.35	8.03
6.00	65.07	18.97	61.00	21.18	6.25
10.00	71.22	29.49	68.00	33.25	4.52
20.00	88.02	42.49	85.00	48.34	3.43
30.00	94.12	56.39	93.00	64.85	1.19
40.00	96.36	70.63	98.00	82.25	-1.70
60.00	98.88	85.23	100.00	100.00	-1.13
80.00	100.00	100.00	100.00	100.00	0.00

การคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อน (Error Percentage) แต่ละขนาดอนุภาคระหว่างผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] และผลการจำลองสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ก.2

$$\% \text{ Error} = \frac{E_{E,i} - E_{S,i}}{E_{E,i}} \times 100 \quad (\text{ก.2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $E_{E_i}$  หมายถึง ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$  จากผลการทดลองและ  $E_{S_i}$  หมายถึง ร้อยละประสิทธิภาพกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $i$  จากผลการจำลอง

ตารางที่ ก.1 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกระบวนการแยกระหว่างผลการทดลองจากงานวิจัยอ้างอิง [4] และผลการจำลอง

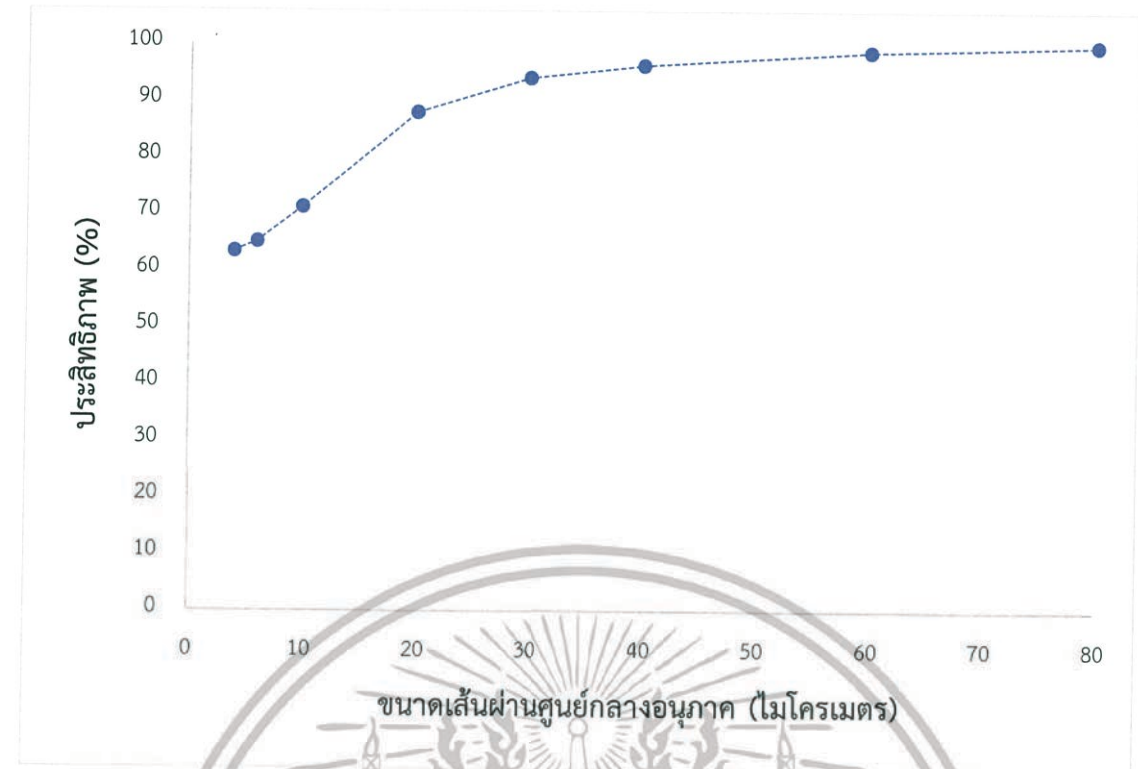
ตารางที่ ก.2 แสดงผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางสำหรับการศึกษาตอนที่ 2 ส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow Outlet) ส่วนทางด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow Outlet) และส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow Outlet)

กราฟผลการทดลองและผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกถูกนำเสนอในรูปแบบร้อยละประสิทธิภาพ (Efficiency) และประสิทธิภาพสะสม (Cumulative Efficiency) สำหรับการศึกษตอนที่ 1 แสดงดังรูปที่ ก.1 ถึงรูปที่ ก.4 และกราฟผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกสำหรับการศึกษตอนที่ 2 แสดงดังรูปที่ ก.5 ถึงรูปที่ ก.11

ตารางที่ ก.2 ประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลอนแบบที่มีส่วนทางออกสามทางสำหรับส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow) ส่วนทางด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow) และส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค (ไมโครเมตร)	ส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow)		ส่วนทางออกด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow)		ส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow)	
	ประสิทธิภาพ (%)	ประสิทธิภาพสะสม (%)	ประสิทธิภาพ (%)	ประสิทธิภาพสะสม (%)	ประสิทธิภาพ (%)	ประสิทธิภาพสะสม (%)
4.00	60.84	8.81	22.63	24.47	16.53	48.95
6.00	62.74	17.90	21.51	47.73	15.75	95.59
10.00	69.84	30.42	28.81	78.88	1.35	99.59
20.00	86.45	42.95	13.50	93.48	0.05	99.73
30.00	94.32	56.61	5.63	99.57	0.05	99.88
40.00	99.56	71.03	0.40	100.00	0.04	100.00
60.00	100.00	85.51	0.00	100.00	0.00	100.00
80.00	100.00	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

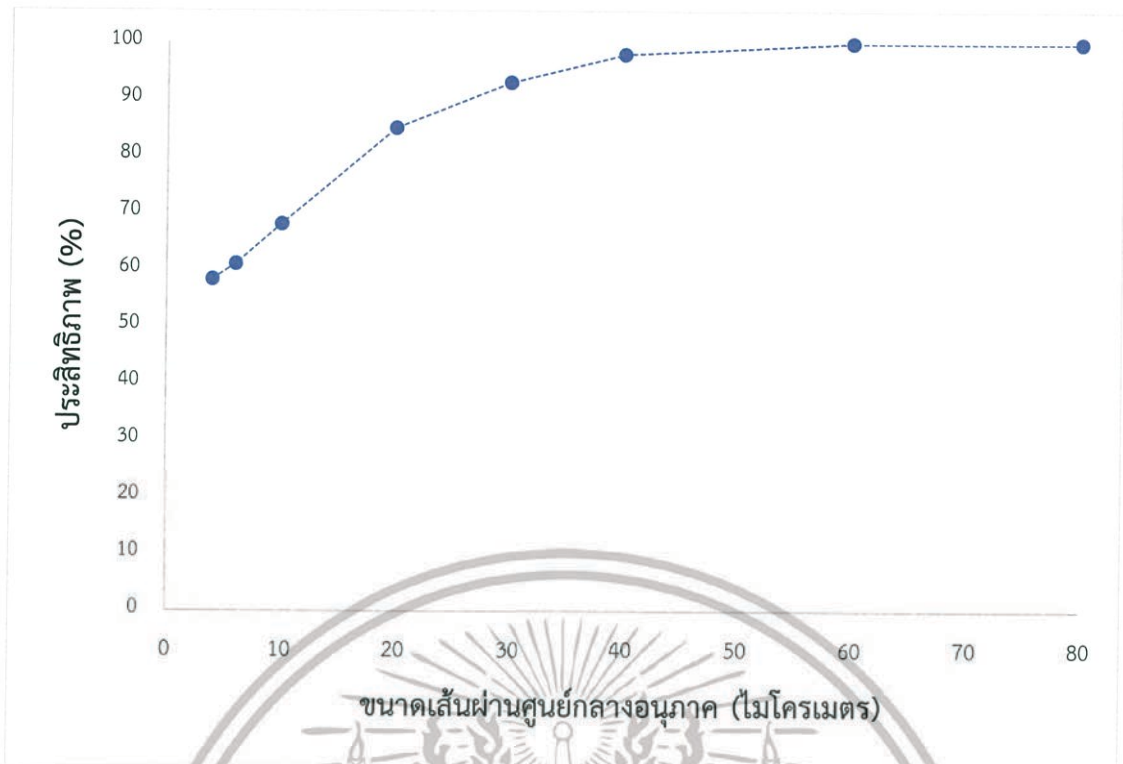


รูปที่ ก.1 ผลการทดลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)

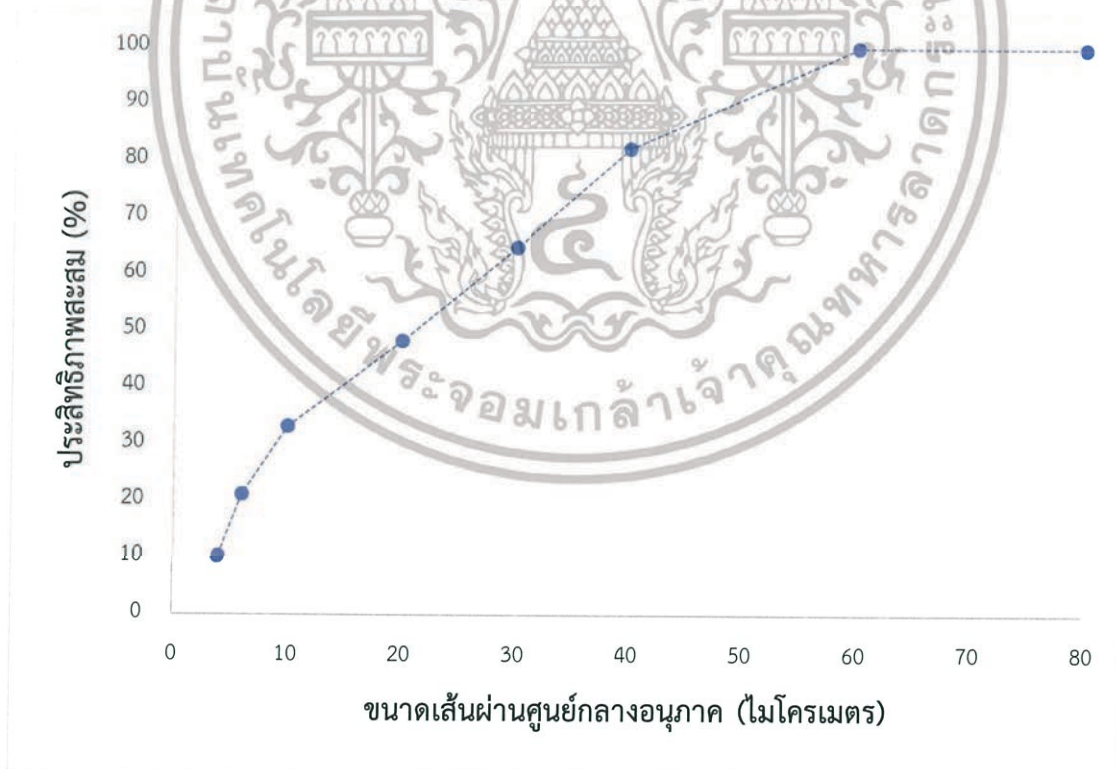


รูปที่ ก.2 ผลการทดลองประสิทธิภาพสะสมกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

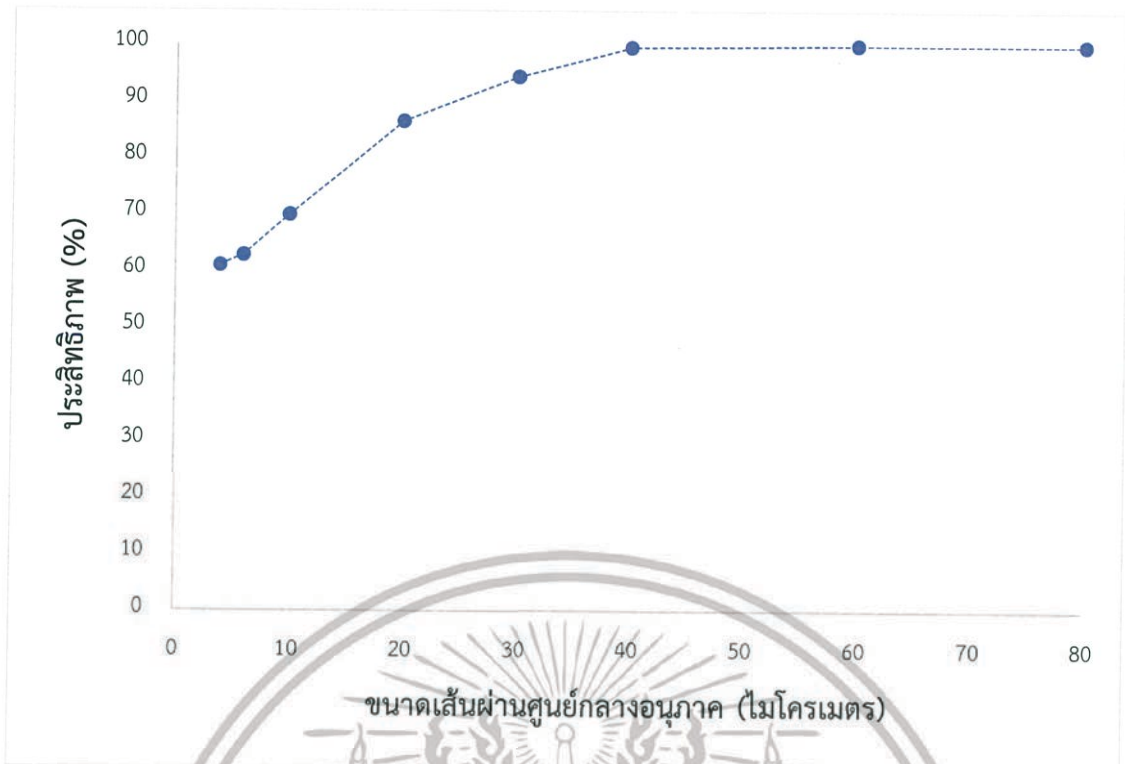


รูปที่ ก.3 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)

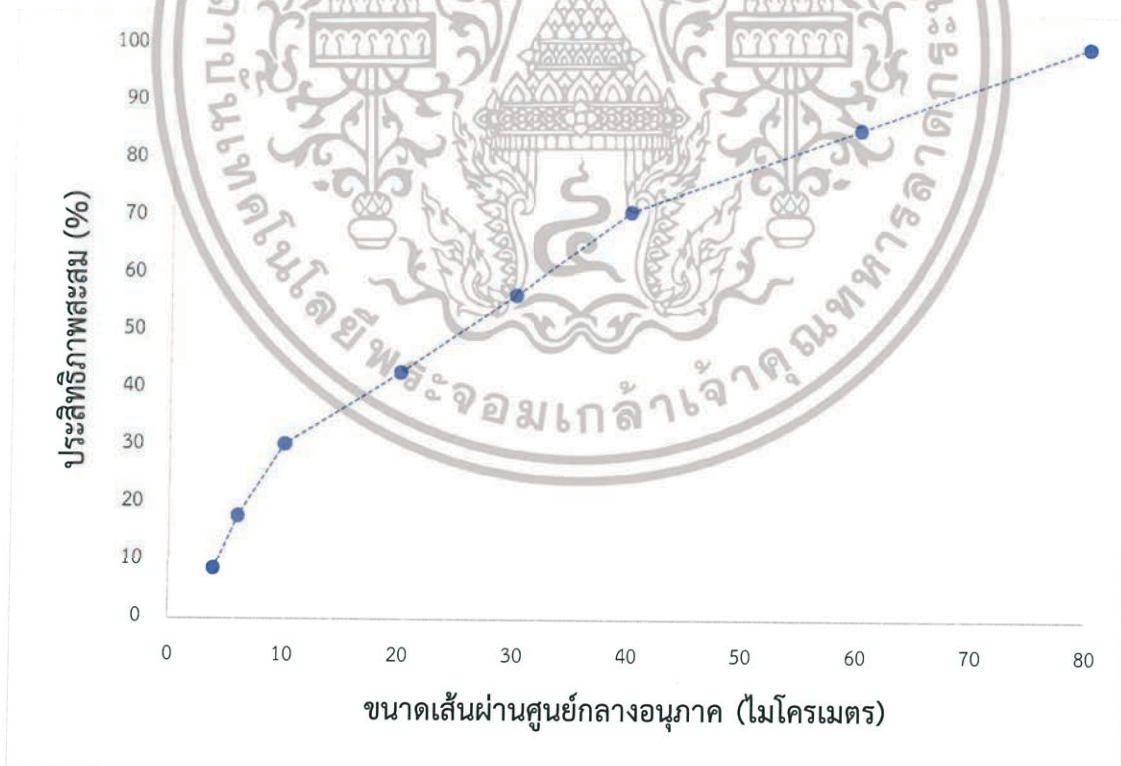


รูปที่ ก.4 ผลการจำลองประสิทธิภาพสะสมกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

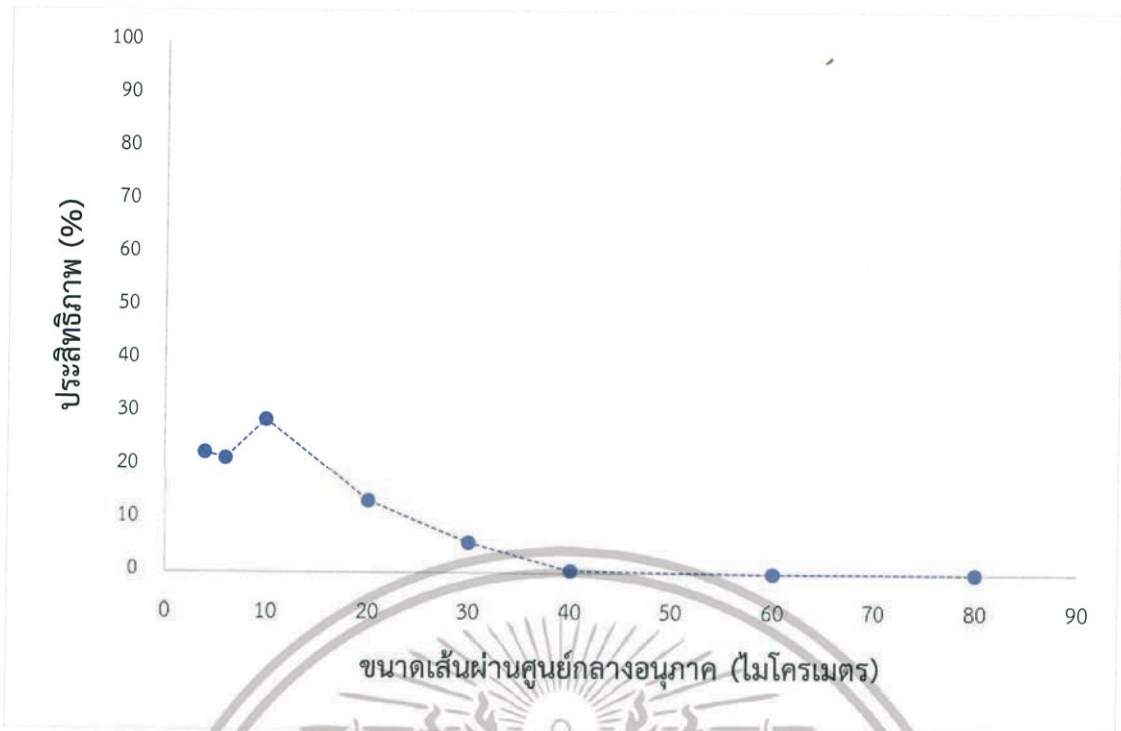


รูปที่ ก.5 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) บริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow)



รูปที่ ก.6 ผลการจำลองประสิทธิภาพสะสมกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) บริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

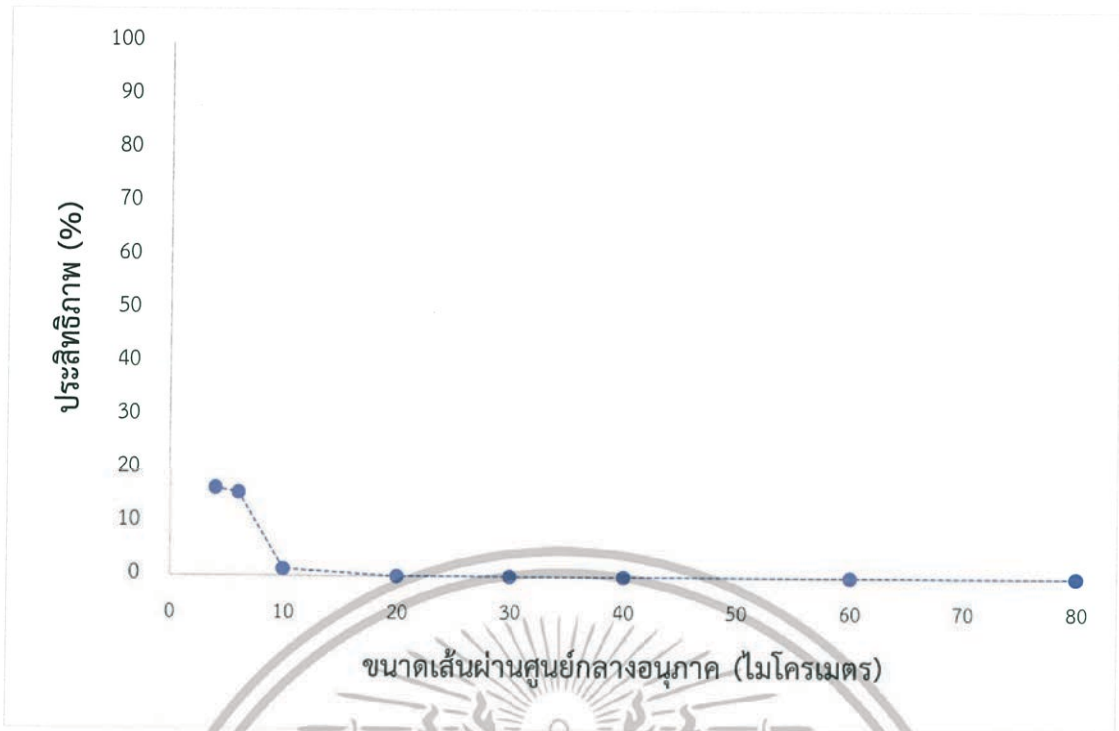


รูปที่ ก.7 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) บริเวณส่วนทางออกด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow)



รูปที่ ก.8 ผลการจำลองประสิทธิภาพสะสมกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) บริเวณส่วนทางออกด้านบนชั้นนอก (Outer Overflow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

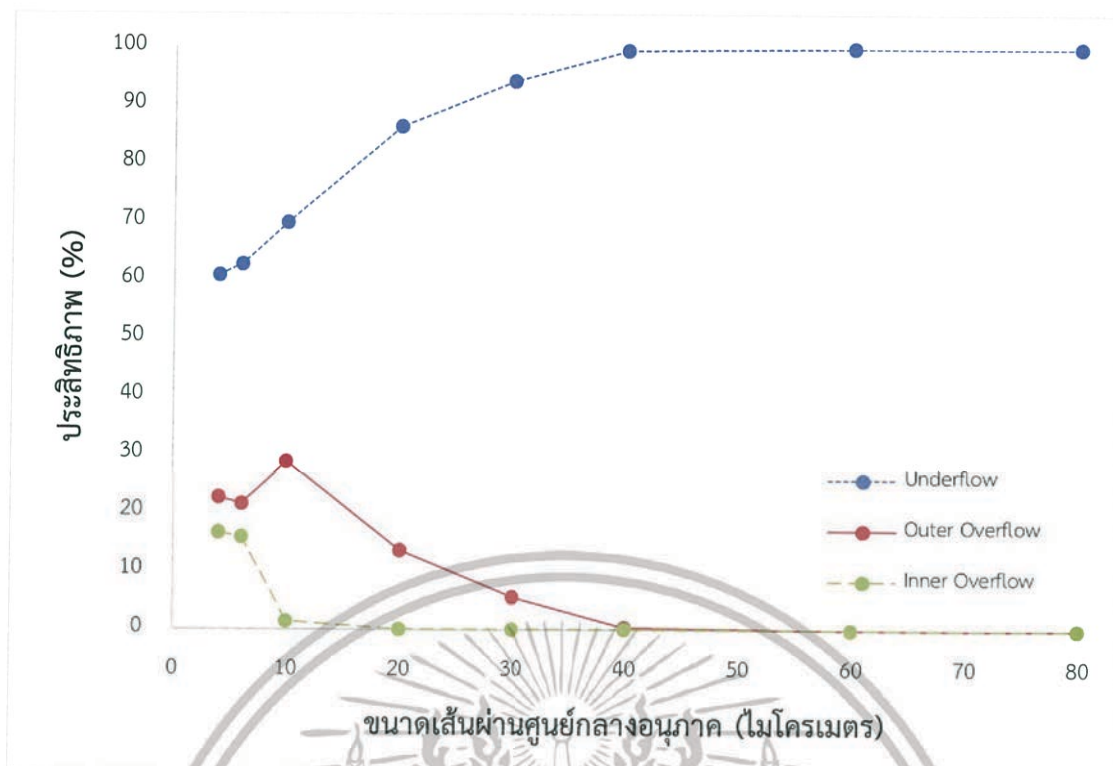


รูปที่ ก.9 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) บริเวณส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow)



รูปที่ ก.9 ผลการจำลองประสิทธิภาพสะสมกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone) บริเวณส่วนทางออกด้านบนชั้นใน (Inner Overflow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.10 ผลการจำลองประสิทธิภาพกระบวนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบที่มี ส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

ความเร็วตามแนวแกน (Axial Velocity) ของกระบวนการแยกภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มี ส่วนทางออกสามทางบริเวณส่วนทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หรือพิกัด ฉากในหน่วยเมตรระหว่าง (0.000,0.336,0.341) ถึง (0.000,0.346,0.341) แสดงดังตารางที่ ก.3

ความดันสถิต (Static Pressure) ของกระบวนการแยกภายในไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วน ทางออกสามทางบริเวณส่วนทางออกด้านล่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หรือพิกัดฉากใน หน่วยเมตรระหว่าง (0.000,0.336,0.341) ถึง (0.000,0.346,0.341) แสดงดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.3 ความเร็วตาม (Axial Velocity) แนวแกนบริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) และไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

พิกัดตามแนวแกนตั้ง (เมตร)	ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (เมตรต่อวินาที)	ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วน ทางออกสามทาง (เมตรต่อวินาที)
0.3360	0.00	0.00
0.3363	-11.32	-9.85
0.3366	-9.24	-8.66
0.3369	-5.88	-6.54
0.3372	-2.20	-4.32
0.3375	0.36	-2.46
0.3377	1.16	-1.32
0.3378	1.67	-0.74
0.3380	1.92	-0.28
0.3382	1.97	0.25
0.3383	1.86	0.65
0.3385	1.65	0.84
0.3389	1.35	0.89
0.3393	1.28	0.78
0.3397	1.34	0.74
0.3401	1.40	0.71
0.3404	1.45	0.70
0.3406	1.49	0.68
0.3407	1.53	0.72
0.3407	1.53	0.73
0.3409	1.58	0.75
0.3410	1.61	0.75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 (ต่อ) ความเร็วตาม (Axial Velocity) แนวแกนบริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) และไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

พิกัดตามแนวแกนตั้ง (เมตร)	ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (เมตรต่อวินาที)	ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วน ทางออกสามทาง (เมตรต่อวินาที)
0.3411	1.64	0.76
0.3413	1.66	0.75
0.3413	1.66	0.78
0.3414	1.67	0.79
0.3416	1.69	0.83
0.3419	1.72	0.85
0.3423	1.75	0.85
0.3427	1.77	0.84
0.3431	1.77	0.82
0.3431	1.77	0.81
0.3435	1.77	0.82
0.3437	1.76	0.84
0.3438	1.74	0.79
0.3440	1.71	0.71
0.3442	1.65	0.65
0.3443	1.57	0.35
0.3445	1.45	-0.12
0.3448	0.98	-1.45
0.3451	-0.02	-3.42
0.3454	-2.04	-5.22
0.3457	-9.27	-7.52
0.3460	0.00	0.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ความดันสถิต (Static Pressure) แกนบริเวณส่วนทางออกด้านล่าง (Underflow) ของไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (Conventional Hydrocyclone) และไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วนทางออกสามทาง (Three Product Hydrocyclone)

พิกัดตามแนวแกนตั้ง (เมตร)	ไฮโดรไซโคลนแบบมาตรฐาน (ปาสคาล)	ไฮโดรไซโคลนแบบที่มีส่วน ทางออกสามทาง (ปาสคาล)
0.3360	17948.40	12548.96
0.3363	0.00	7.59
0.3372	0.00	0.00
0.3378	-1161.73	-475.60
0.3383	-1831.85	-841.21
0.3389	-1380.89	-869.95
0.3389	-1348.45	-844.43
0.3401	-1154.33	-832.57
0.3410	-1361.40	-723.45
0.3416	-1428.22	-474.22
0.3423	-1482.64	-498.53
0.3431	-1511.16	-452.87
0.3438	-1468.01	-425.52
0.3448	-919.06	0.00
0.3457	0.00	254.18
0.3460	8634.36	7464.63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

## ตัวอย่างการคำนวณตัวแปรการไหลของของไหล

## (1) การคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydrolic Diameter)

การคำนวณการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (Hydrolic Diameter) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.1 เมื่อ  $D_h$  หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (เมตร)  $A$  หมายถึง พื้นที่หน้าตัด (ตารางเมตร) และ  $P$  หมายถึง เส้นรอบพื้นที่การไหลของของไหล (เมตร)

$$D_h = \frac{4A}{P} \quad (\text{ข.1})$$

จากการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] พบว่ามีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความกว้างขาเข้าเท่ากับ  $7.6271 \times 10^{-3}$  เมตร และความยาวขาเข้าเท่ากับ  $15.0811 \times 10^{-3}$  เมตร ตัวอย่างการคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส่วนทางเข้าสารตั้งต้นดังนี้

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

$$D_h = \frac{4(7.6271 \times 10^{-3})(15.0811 \times 10^{-3})}{2(7.6271 \times 10^{-3} + 15.0811 \times 10^{-3})}$$

$$D_h = 0.010 \text{ m}$$

การตั้งค่าเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส่วนทางเข้าสารตั้งต้นภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 มีค่าเท่ากับ 0.010 เมตร

## (2) การคำนวณความเร็วขาเข้า (Velocity Inlet)

การคำนวณความเร็วขาเข้า (Velocity Inlet) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.2 เมื่อ  $v$  หมายถึง ความเร็วขาเข้า (เมตรต่อวินาที)  $Q$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที) และ  $A$  หมายถึง พื้นที่ขาเข้า (ตารางเมตร)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{ข.2})$$

จากการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] พบว่ามีอัตราการไหลเท่ากับ 68.4 ลิตรต่อนาที ความกว้างขาเข้าเท่ากับ  $7.6271 \times 10^{-3}$  เมตร และความยาวขาเข้าเท่ากับ  $15.0811 \times 10^{-3}$  เมตร ตัวอย่างการคำนวณความเร็วขาเข้าดังนี้

$$v = \frac{(68.4 \times 10^{-3})}{60(7.6271 \times 10^{-3})(15.0811 \times 10^{-3})}$$

$$v = 9.911 \text{ m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าความเร็วขาเข้าของสารภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 มีค่าเท่ากับ 9.911 เมตรต่อวินาที

(3) การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number)

การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold Number) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.3 เมื่อ Re หมายถึง ตัวเลขเรย์โนลด์  $\rho$  หมายถึง ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  $v$  หมายถึง ความเร็วขาเข้า (เมตรต่อวินาที)  $D_h$  หมายถึง เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส่วนทางเข้าสารตั้งต้น (เมตร) และ  $\mu$  หมายถึง ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที)

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (\text{ข.3})$$

จากการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] พบว่ามีความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความหนาแน่นของน้ำเท่ากับ 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ความเร็วขาเข้าเท่ากับ 9.911 เมตรต่อวินาที เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิกส่วนทางเข้าสารตั้งต้นเท่ากับ 0.010 เมตร และความหนืดของน้ำเท่ากับ  $1.003 \times 10^{-3}$  กิโลกรัมต่อเมตรต่อวินาที ตัวอย่างการคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ดังนี้

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

$$Re = \frac{998.2(9.911)(0.010)}{1.003 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 98,635.695$$

ตัวเลขเรย์โนลด์มีค่าเท่ากับ 98,635.695

(4) การคำนวณความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulent Intensity)

การคำนวณความเข้มข้นความปั่นป่วน (Turbulent Intensity) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.4 เมื่อ TI หมายถึง ความเข้มข้นความปั่นป่วนและ Re หมายถึง ตัวเลขเรย์โนลด์

$$TI = 0.16Re^{-\frac{1}{8}} \quad (\text{ข.4})$$

จากการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] พบว่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 98,635.695 ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นความปั่นป่วนส่วนทางเข้าสารตั้งต้นดังนี้

$$TI = 0.16(98,635.695)^{-\frac{1}{8}}$$

$$TI = 3.801$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การตั้งค่าความเข้มข้นความปั่นป่วนส่วนทางเข้าของสารตั้งต้นภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 มีค่าเท่ากับ 3.801

(5) การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค (Mass Flow Rate)

การคำนวณอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค (Mass Flow Rate) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ ข.5 เมื่อ  $\dot{m}$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อวินาที)  $\rho$  หมายถึง ความหนาแน่น (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และ  $Q$  หมายถึง อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

$$\dot{m} = \rho Q \quad (\text{ข.5})$$

จากการทดลองงานวิจัยอ้างอิง [4] พบว่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของอนุภาคเท่ากับ 3.6 ลิตรต่อวินาที ความหนาแน่นของอนุภาคเท่ากับ 2,710 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นความปั่นป่วนส่วนทางเข้าสารตั้งต้นดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \rho Q \\ \dot{m} &= \frac{2710(3.6 \times 10^{-3})}{60} \\ \dot{m} &= 0.163 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

การตั้งค่าอัตราการไหลเชิงมวลของอนุภาค ภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 มีค่าเท่ากับ 0.163 กิโลกรัมต่อวินาที

ภาคผนวก ค  
(ตัวอย่างขั้นตอนการจำลองภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

## ตัวอย่างขั้นตอนการจำลองภายในโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0

- (1) เปิดโปรแกรม Ansys Fluent Version 16.0 คลิกเลือก File > Read > Mesh จากนั้นเลือกกริดที่มีนามสกุลไฟล์ประเภท .msh
- (2) คลิกเลือก General > Mesh Was Create In คลิกเลือก mm > Scale > View Length Unit In คลิกเลือก mm จากนั้นคลิก Close
- (3) คลิกเลือก General > Gravitational Acceleration กำหนดค่า  $z$  (m/s<sup>2</sup>) เท่ากับ 9.81
- (4) คลิกเลือก Model > Viscous > Renold Stress (7 eqn) จากนั้นคลิก OK
- (5) คลิกเลือก Model > Discrete Phase > Edit > Injections... > Create คลิกเลือก Injection-0 จากนั้นคลิก Set...
- (6) คลิกเลือก Injection Type คลิกเลือก surface > velocity\_inlet.2 คลิกเลือก Material > calcium carbonate คลิกเลือก Diameter Distribution > uniform จากนั้นคลิกเลือก Inject Using Face Normal Direction
- (7) กำหนดค่า Variable Diameter (m) ตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคที่ต้องการประเมินประสิทธิภาพกระบวนการแยก เช่น กำหนด 4e-06 กำหนดค่า Velocity Magnitude (m/s) เท่ากับ 9.911 กำหนดค่า Total Flow Rate (kg/s) เท่ากับ 0.163
- (8) คลิกเลือก Turbulent Dispersion คลิกเลือก Discrete Random Walk Model กำหนดค่า Number of Tries เท่ากับ 10 กำหนดค่า Time Scale Constant เท่ากับ 0.3 จากนั้นคลิก OK
- (9) คลิกเลือก Materials > Fluid > Fluent Database... คลิกเลือก water-liquid (h2o<l>) > Copy จากนั้นคลิก Change/Create
- (10) คลิกเลือก Cell Zone Conditions > Fluid > Edit... > Material Name คลิกเลือก water-liquid จากนั้นคลิก OK
- (11) คลิกเลือก Materials > Fluid > air > Create/Edit... จากนั้นคลิก Delete
- (12) คลิกเลือก Materials > Solid > calcium carbonate กำหนดค่า Density (kg/m<sup>3</sup>) เท่ากับ 2710 จากนั้นคลิก Change/Create
- (13) คลิกเลือก Boundary Conditions > Feed > Edit... กำหนดค่า Velocity Magnitude (m/s) เท่ากับ 9.911 คลิกเลือก Specification Method > Intensity and Hydraulic Diameter กำหนดค่า Turbulent Intensity (%) เท่ากับ 3.801 กำหนดค่า Hydraulic Diameter (m) เท่ากับ 0.010 จากนั้นคลิก OK
- (14) คลิกเลือก Boundary Conditions > Underflow > Edit... > Specification Method > Intensity and Hydraulic Diameter กำหนดค่า Turbulent Intensity (%) เท่ากับ 3.801

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- กำหนดค่า Hydraulic Diameter (m) เท่ากับ 0.010 คลิกเลือก DPM > Discrete Phase BC Type > trap จากนั้นคลิก OK
- (15) คลิกเลือก Boundary Conditions > Outer\_overflow > Edit... > Specification Method > Intensity and Hydraulic Diameter กำหนดค่า Turbulent Intensity (%) เท่ากับ 3.801 กำหนดค่า Hydraulic Diameter (m) เท่ากับ 0.015 คลิกเลือก DPM > Discrete Phase BC Type > trap จากนั้นคลิก OK
- (16) คลิกเลือก Boundary Conditions > Inner\_overflow > Edit > Specification Method > Intensity and Hydraulic Diameter กำหนดค่า Turbulent Intensity (%) เท่ากับ 3.801 กำหนดค่า Hydraulic Diameter (m) เท่ากับ 0.011 คลิกเลือก DPM > Discrete Phase BC Type > trap จากนั้นคลิก OK
- (17) คลิกเลือก Solution Methods > Scheme คลิกเลือก SIMPLEC Gradient คลิกเลือก Least Squares Cell Based Pressure คลิกเลือก PRESTO! Momentum คลิกเลือก QUICK Turbulent Kinetic Energy คลิกเลือก QUICK Turbulent Dissipation Rate คลิกเลือก QUICK และ Reynold Stresses คลิกเลือก QUICK
- (18) คลิกเลือก Monitors > Residuals – Print, Plot > Edit... คลิกเลือก Normalize จากนั้นคลิก OK
- (19) คลิกเลือก Solution Initialization > Initialization Methods คลิกเลือก Standard Initialization กำหนดค่า Compute from เป็น velocity\_inlet.2 จากนั้นคลิก Initialize
- (20) คลิกเลือก Run Calculation กำหนดค่า Number of Iterations เท่ากับ 100000 จากนั้นคลิก Calculate
- (21) รอผลการคำนวณจนมีการแจ้งเตือน Calculation complete. จากนั้นคลิก OK
- (22) คลิกเลือก Graphics and Animations > Particle Tracks กำหนดค่า Report Type เป็น Console คลิกเลือก injection-0 จากนั้นคลิก Track

## บรรณานุกรม

- [1] Changirwa, R., Rockwell, M.C., Frimpong, S., Szymanski, J. Hybrid simulation simulation for oil-solids-water separation in oil sands production. *Minerals Engineering* 1999, 12 (12), 1459-1468.
- [2] Ahmed, M.M., Ibrahim, G.A., Farghaly, M.G. Performance of a three-product hydrocyclone. *Minerals Process* 2009, 91 (1). 34-40.
- [3] Obeng, D.P., Morrell, S. The JK three-product cyclone performance and potential applications. *Minerals Process* 2003, 69 (1), 129-142.
- [4] ปรีชา แก้วศรีพรหม. “การศึกษาประสิทธิภาพผลในการแยกอนุภาคของไฮโดรไซโคลนแบบใส่แกนโลหะอยู่หนึ่งและแบบใส่แกนโลหะหมุน”, วิทยานิพนธ์ วศ.ม. (วิศวกรรมเครื่องกล) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ 2552.
- [5] Nowakowski, A.F., Cullivan, J.C., Williams, R.A., Dyakowski, T., Application of CFD to modeling the flow in hydrocyclones is this a realizable option or still a research challenge? *Minerals Engineering* 2004, 17, 661-669.
- [6] Vehmaanpera, P., Safonov, D., Kinnarinn, T., Antti. Improvement of the filtration characteristics of calcite slurry by hydrocyclone classification. *Minerals Engineering* 2018, 128, 133-140.
- [7] Liu, Y., Cheng, Q., Zhang, Feng Tian. Three-phase hydrocyclone separator – A review. *Chemical Engineer Research and Design* 2015, 100, 554-560.
- [8] Blue Star Fabrication LLC. Cyclone Separator. [Online]. Available: <http://www.bluestarllcdubai.com> [Accessed: 26 November 2018].
- [9] Kraipech, W. Study of the performance of industrial hydrocyclone. Ph.D. Thesis UMIST England 2002.
- [10] เพ็ญญา ละอองนวล, สโรชา สังขรमानิต. “อิทธิพลของการรบกวนและการแยกของชั้นขอบเขตการไหลต่อประสิทธิภาพของไซโคลนด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ”, วิทยานิพนธ์ วศ.บ. (วิศวกรรมเคมี) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม (ต่อ)

- [11] Song, C., Pey, B.B., Jiang, M., Numeriacal analysis of forces exerted on particles in cyclone separators. *Powder Technology* 2016, 294, 437-448.
- [12] เอกราช บำรุงไทยไชยชาญ. “พื้นฐานพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ”. กรุงเทพฯ 2556.
- [13] Kraipech, W., Suksangpanomrung, A.F., Nowakowski, A., The simulation of the flow within a hydrocyclone operating with an air core and with an inserted metal rod. *Chemical Engineering Journal* 2008, 143, 51-61.
- [14] H. K., Versteeg, W., Malalasekera, An introduction to Computational Fluid Dynamics. Pearson Education Limited 1995.

