

การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของ
ไฮโดรไลโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2559
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Computational Fluid Dynamics Study of Effect of Varying Angles of Cones on
Separation Efficiencies of Two-Concurrent-Cone Liquid-Liquid-Solid Hydrocyclone

Mr. Suttisak Phromthong



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาด
มุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอน
ของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

โดย

นายสุทธิศักดิ์ พรหมทอง

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อ. ดร. สรล ศาลากิจ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโท

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญชัย เลิศนุวัฒน์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อ. ดร. สรล ศาลากิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(อ. ดร. ชัชชานนท์ โพธิคุณ)

สุทธิศักดิ์ พรหมทอง : การศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวย ต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสอง ชั้นต่อกัน (A Computational Fluid Dynamics Study of Effect of Varying Angles of Cones on Separation Efficiencies of Two-Concurrent-Cone Liquid-Liquid-Solid Hydrocyclone) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ ดร. สรล ศาลากิจ, 112 หน้า.

เนื่องจากในปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีแหล่งวัตถุดิบค่อนข้างจำกัดและการสำรวจมีความยากลำบากมากขึ้น ดังนั้นแหล่งพลังงานชนิดใหม่ จึงเข้ามามีความสำคัญเพิ่มขึ้น คือ ทราชน้ำมัน เนื่องจากทราชน้ำมันเป็นสารผสมสามวัฏภาคคือ น้ำ น้ำมัน และ ทราชน โดยจะมีความหนืดสูงมากจึงทำให้ต้องทำการลดความหนืดโดยการผสมน้ำที่มีอุณหภูมิสูงเข้าไป แล้วจึงทำการแยกสารด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบสองวัฏภาคที่มีประสิทธิภาพการแยกค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องทำการติดตั้งไฮโดรไซโคลนดังกล่าวแบบอนุกรมเพื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพ แนวทางการแก้ปัญหาที่มีศักยภาพที่ดีอีกทางหนึ่งคือการประยุกต์ใช้ไฮโดรไซโคลนสามวัฏภาคชนิดแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ในการแยกทราชน้ำมัน

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยสอง ชั้นต่อกันของไฮโดรไซโคลนชนิดแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง โดยทำการปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชั้นต่อกัน 11 โครงสร้างที่ความเร็วช่องทางขาเข้าของสารผสมมีค่าระหว่าง 3.608 ถึง 7.398 เมตรต่อวินาที โดยทำการศึกษาผ่านแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ซึ่งได้ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกที่ได้จากแบบจำลองกับผลการทดลองที่แสดงในงานวิจัย พบว่าปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกน้ำมัน คือ ความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยสองชั้นต่อกันส่งผลเพียงเล็กน้อย ยกเว้นกรณีที่มีมุมทรงกรวยล่างมากกว่ามุมทรงกรวยบนพบว่าเมื่อค่าผลต่างของมุมกรวยล่างมากกว่ามุมกรวยบนเพิ่มขึ้นซึ่งประสิทธิภาพแยกน้ำมันมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด ขณะที่การเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวยสองชั้นต่อกันทำให้การไหลแกว่งของเม็ดทรายรอบแกนกลางทรงกรวยเปลี่ยนไป ซึ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายมากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5970342321 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: CONE CENTER DIAMETER / DOUBLE-CONE / HYDROCYCLONE / LIQUID-LIQUID-SOLID SEPARATOR / CFD

SUTTISAK PHROMTHONG: A Computational Fluid Dynamics Study of Effect of Varying Angles of Cones on Separation Efficiencies of Two-Concurrent-Cone Liquid-Liquid-Solid Hydrocyclone. ADVISOR: SARAN SALAKIJ, Ph.D., 112 pp.

Because nowadays resource for petroleum industries is limited and difficult for exploration, oil sands have become to be new potential resource for petroleum industries. Since oil sands are three-phase composite, consisting of water, oil and sand, which have high viscosity, it requires to reduce viscosity by mixing it with high-temperature water. Then, separating oil from the mixture by using two-phase hydrocyclone, which usually has relatively low separation efficiency. One solution is to install two-phase hydrocyclone in series to improve the separation efficiency. Other potential approach is to apply liquid-liquid-solid three-phase hydrocyclone for separation of oil sands.

This research aims to study the effects of variation of angle of two-concurrent cone of liquid-liquid-solid hydrocyclone by varying center diameter. The eleven cone structures were studied under mixture inlet velocity conditions ranging from 3.608 to 7.398 m/s using Computational Fluid Dynamics (CFD) model. The validation of CFD model was performed by comparing separation efficiency obtained from model with that from experimental data in the literature. The results show that main parameter that affects the oil separation efficiency is mixture inlet velocity. In most cases, the variation of angle of two-concurrent cone does not alter the oil separation efficiency much, except in conditions where the bottom cone angle wider than the top cone. In these cases, by increasing the difference between the bottom and top cone angles, the oil separation efficiency significantly decreases. Variation of angle of two-concurrent cone alters to flow fluctuation of sand around centerline of the cone, which significantly affects the sand separation efficiency. This effects from variation of angle of two-concurrent cone to the sand separation efficiency are more influence than the effects from variation of mixture inlet velocity.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยและวิทยานิพนธ์นี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้นั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและครอบครัว ที่เข้าใจ อดทนคอยให้กำลังใจอย่างสม่ำเสมอ ในช่วงแห่งการศึกษาและการทำงานวิจัยนี้ รวมทั้งให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านยาวนานตลอดมา คอยเป็นแรงผลักดันและแสงสว่างให้การผ่านปัญหาที่พบในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงแต่ อาจารย์ ดร. สรล ศาลากิจ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์นี้ ที่กรุณาตั้งใจให้คำแนะนำและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในทุกๆ ด้านอย่างดียิ่ง รวมทั้งให้ความอดทน เสียสละ เป็นกำลังใจและให้โอกาสแก่ผู้วิจัยอย่างเต็มที่โดยตลอด

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. บุญชัย เลิศนุวัฒน์ รองศาสตราจารย์ ดร. เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ และ อาจารย์ ดร. ชัชชานนท์ โพธิคุณ ที่กรุณาให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ในการทำวิจัยดังกล่าวรวมทั้งกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ให้ผู้วิจัยตั้งแต่เด็กจนโต

และสุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราดุลย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ วรรณโสภากย์ และพี่ น้อง เพื่อนๆ ที่ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ และให้ยืมอุปกรณ์ในการทำงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี และอื่นๆ อีกหลายคนซึ่งไม่สามารถยกมากล่าวได้หมดในที่นี้

สุทธิศักดิ์ พรหมทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญรูปภาพ.....	ฉ
รายการสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 แรงจูงใจ	3
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	4
1.4 ขอบเขตโครงการ	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ	4
1.6 แผนการดำเนินงาน	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ.....	6
2.1.1 กระบวนการแก้ปัญหา	6
2.1.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย	6
2.1.3 เงื่อนไขขอบเขต.....	7
2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล.....	10
2.2.1 สมการเชิงอนุพันธ์มวล.....	11
2.2.2 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม.....	12

2.2.3	สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน.....	13
2.2.4	เงื่อนไขขอบเขต.....	14
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร.....	15
2.4	การคาดการณ์ของประสิทธิภาพการแยกของสาร.....	16
2.5	แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....	17
2.5.1	แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Reynolds Stress Model (RSM).....	17
2.5.1.1	สมการการเปลี่ยนถ่ายของแบบจำลอง Reynolds Stress Model.....	18
2.5.1.2	Modeling Turbulent Diffusive Transport	19
2.5.1.3	Modeling The Pressure-Strain Term (Linear).....	19
2.5.1.4	Effects of Buoyancy on Turbulence (G_{ij}).....	20
2.5.1.5	Modeling the Turbulent Kinetic Energy	21
2.5.1.6	Modeling the Dissipation Rate (ϵ_{ij}).....	21
2.5.1.7	Modeling the Turbulent Viscosity (μ_t).....	22
2.5.1.8	Convective Heat and Mass Transfer Modeling	22
2.5.2	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างวัฏภาค (Interphase Exchange Coefficients).....	22
2.5.2.1	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของไหล (Fluid-Fluid Exchange Coefficient)	23
2.5.2.2	สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของแข็ง (Fluid-Solid Exchange Coefficient)	25
2.6	การไหลแบบหลายวัฏภาค.....	26
2.6.1	แนวทางการสร้างแบบจำลองแบบหลายวัฏภาค	26
2.6.2	การเปรียบเทียบแบบจำลอง	27
2.6.3	ความเสถียรและการลู่เข้า	29

2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method).....	29
2.7.1 การกระจายพจน์สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย	30
2.7.1.1 พจน์การพา (Convection term).....	31
2.7.1.2 พจน์การแพร่กระจาย (Diffusion term).....	32
2.7.1.3 Source term.....	32
2.7.2 การประมาณค่าโดยใช้แบบแผนตัวเลข (spatial discretization)	33
2.7.2.1 Upwind Differencing scheme (UDS).....	34
2.7.2.2 Central differencing scheme (CDS)	34
2.7.2.3 Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetic (Quick).....	34
2.7.3 การประมาณค่าตัวเลขแบบชั่วขณะ (Temporal discretization).....	35
2.7.4 Coupling (Solution algorithm)	36
บทที่ 3 ทบทวนวรรณกรรม.....	38
3.1 การศึกษาไฮโดรไฮโคลนทั่วไป.....	38
3.1.1 ไฮโดรไฮโคลนที่มีการแยกสารแบบสองวัฏภาค	38
3.1.2 ไฮโดรไฮโคลนที่มีการแยกสารแบบสามวัฏภาค.....	42
3.1.2.1 การแยกสารแบบ ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง.....	43
3.1.2.2 การแยกสารแบบ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว	43
3.1.2.3 การแยกสารแบบ ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง.....	44
3.2 ไฮโดรไฮโคลนเพื่อแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง	45
3.3 การพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไฮโคลน	50
3.4 แนวทางการปรับปรุงไฮโดรไฮโคลนเพื่อแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง	57
บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองเพื่อการศึกษาและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง.....	59

ภาคผนวก ข การสร้างและตั้งค่าแบบจำลองการไหลไฮโดรไดนามิกของเหลว-ของเหลว-
 ของแข็ง แบบปั่นป่วนในไฮโดรไดนามิกแบบสามมิติของ ANSYS Fluent..... 109

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 112



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าคงที่ a_i จะถูกกำหนดได้ตามค่า Reynolds Number (2.52)	24
ตารางที่ 2 อัตราส่วนของรูปร่างไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน	60
ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของคุณสมบัติของสารโดยขนาดของเม็ดทรายมีขนาดไม่เท่ากัน การแจกแจงขนาดของเม็ดทรายแสดงในตารางที่ 3	61
ตารางที่ 4 การแจกแจงขนาดของเม็ดทราย	62
ตารางที่ 5 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต	64
ตารางที่ 6 การตั้งค่า Interaction	65
ตารางที่ 7 ตารางการแบ่งส่วนของแต่ละชั้นของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบ สามัญภาค (Double-Cone Of Hydrocyclone Separator) โดยการปรับเปลี่ยน ค่า Numbers of division	66
ตารางที่ 8 ตารางจำนวนกริดของโครงสร้างไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบ สามัญภาค (Grid number) กับขนาดของกริด (Grid size)	67
ตารางที่ 9 การปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยทั้งสองชั้นโดยการเพิ่มและลดขนาดของระยะเส้น ผ่านศูนย์กลางของทรงกรวยสองชั้นต่อกัน (D)	77
ตารางที่ 10 ปริมาณอัตราส่วนของเม็ดทรายที่ไหลออกช่องทางด้านบนต่อปริมาณเม็ดทราย ทั้งหมดที่ไหลเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนสามัญภาคที่ได้ออกแบบจำลอง	77
ตารางที่ 11 ปริมาณอัตราส่วนของหยดน้ำมันที่ไหลออกช่องทางด้านข้างต่อปริมาณหยดน้ำมัน ทั้งหมดที่ไหลเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนสามัญภาคที่ได้ออกแบบจำลอง	78

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 อุปกรณ์แยกสารไฮโดรไซโคลนแบบสองวัฏภาค (Solid-Liquid) [1].....	2
รูปที่ 1.2 อุปกรณ์แยกสารไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาค (Liquid-Liquid-Solid) ออกแบบโดย R. M. M. Changirwa [1]	2
รูปที่ 2.1 รูปแสดงฟลักซ์ของมวลเพื่อใช้ในการแสดงการพัฒนาสมการเชิงอนุกรมมวล.....	11
รูปที่ 2.2 รูปแสดงแรงต่างๆ ในแนวแกน x ที่ทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล	12
รูปที่ 2.3 รูปแสดงพลังงานที่เกิดขึ้นและปริมาณฟลักซ์ในแกน x ที่ไหลผ่านก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล	13
รูปที่ 2.4 แผนผังสำหรับการแยกของสามส่วนประกอบของการผสมในไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาค.....	16
รูปที่ 2.5 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในปริมาตรสามมิติ	31
รูปที่ 2.6 แสดงการสาธิตโครงร่างตาข่ายแบบสองมิติความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ที่ใช้อ้างอิงและเซลล์ใกล้เคียง [4].....	33
รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการในการคำนวณของโปรแกรม ANSYS Fluent	36
รูปที่ 3.1 ด้านซ้าย คือ รูปไฮโดรไซโคลนทรงสี่เหลี่ยม รูปด้านขวาคือรูปไฮโดรไซโคลนแบบทรงกระบอก Rosales et al.[10].....	39
รูปที่ 3.2 ไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกสาร ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ออกแบบโดย Bednarski and Listewnik [15].....	45
รูปที่ 3.3 ไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ของ Changirwa et al. [1, 20, 21].....	49
รูปที่ 3.4 ด้านซ้ายคือ Radial Velocity กับความแตกต่างของความยาวของทรงกระบอก	51
รูปที่ 3.5 ด้านขวาคือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความยาวของทรงกระบอก...	51
รูปที่ 3.6 ด้านซ้ายคือ Radial Velocity กับความแตกต่างของความยาวของทรงกรวย	52
รูปที่ 3.7 ด้านขวาคือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความยาวของทรงกรวย.....	52
รูปที่ 3.8 ด้านซ้ายคือ ความแตกต่างของความยาวของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder).....	53

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.9 ด้านขวา คือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความยาวของช่องทางออก ด้านบน.....	53
รูปที่ 3.10 ด้านซ้าย คือ ความแตกต่างของความกว้างของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder).....	53
รูปที่ 3.11 ด้านขวา คือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความกว้างของช่องทางออก ด้านบน.....	53
รูปที่ 3.12 ด้านซ้าย คือ ความแตกต่างของความหนาของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder).....	54
รูปที่ 3.13 ด้านขวา คือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความหนาของช่องทางออก ด้านบน.....	54
รูปที่ 4.1 เป็นโครงสร้างและขนาดของไฮโดรไซโคลอนแบบสามวัฏภาคที่มีกรวยสองชั้นเชื่อมต่อกันถูก ออกแบบโดย Changirwa [1] และมีขนาดของแต่ละส่วนตามตารางที่ 2.....	60
รูปที่ 4.2 รายละเอียดโครงสร้างและขนาดของกรวยสองชั้นต่อกันไฮโดรแบบสามเฟสของ Changirwa [1].....	61
รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ในการทดลองประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอนสำหรับการทดลอง Changirwa [1].....	63
รูปที่ 4.4 กระบวนการในการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent.....	64
รูปที่ 4.5 การแบ่งกริดของไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการแบ่งตามประเภท ต่างๆตามกรณีตามตารางที่ 7.....	66
รูปที่ 4.6 กริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาในการแยกสารแบบสามวัฏภาคของไฮโดรไซโคลอน แบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยกำหนด Grid Size เฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรทุกมิติ ในแต่ละเซลล์.....	68
รูปที่ 4.7 ผลของค่าการทดลองที่ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของจำนวนกริดที่สนใจกับค่าผล การทดลองของจำนวนกริดที่มีค่ามากที่สุด โดย Overflow คือค่าของผลที่ช่อง ทางออกด้านบน Trans-flow คือค่าของผลที่ช่องทางออกด้านข้าง และ Underflow คือค่าของผลที่ช่องทางออกด้านล่าง.....	69

รูปที่ 4. 8	แผนผังดังกล่าวเป็นลักษณะของกระแสการไหลภายในไฮโดรไซโคลนที่ทำการแยกสารแบบสามภูมิภาค (รูปจากงานวิจัยของ Changirwa et al. [1]).....	71
รูปที่ 4.9	ประสิทธิภาพการแยกของสารในไฮโดรไซโคลนที่ทำการแยกสารแบบสามภูมิภาค เมื่อดำเนินการที่อัตราส่วนต่อปริมาตรของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเท่ากับ 0.1% และอัตราส่วนการไหล Λ เท่ากับ 0.2 (รูปจากงานวิจัยของ Changirwa et al. [1]).....	71
รูปที่ 4.10	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสารน้ำมันที่ความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาที	73
รูปที่ 4.11	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายที่ความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาที.....	74
รูปที่ 5.1	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันต่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีของโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ ..	79
รูปที่ 5.2	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันต่อโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ ที่ทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าเท่ากับ 3.608 5.398 และ 7.398 เมตรต่อวินาที.....	80
รูปที่ 5.3	กระแสการไหลของหยดน้ำมันที่ไหลออกช่องทางออกด้านบนของโครงสร้างแบบจำลอง (ก) D 32 และ (ข) D 80.....	82
รูปที่ 5. 4	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายต่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีของไฮโดรไซโคลนสามภูมิภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน	83
รูปที่ 5.5	การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายต่อโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ ที่ทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าเท่ากับ 3.608, 5.398 และ 7.398 เมตรต่อวินาที.....	84
รูปที่ 5. 6	การเปรียบเทียบ Sand Volume fraction บนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที (ก) D 64 (ข) D 72.....	85

สารบัญตาราง (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 5.7	เวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที (ก) D 64 (ข) D 72	87
รูปที่ 5.8	ภาพขยายบริเวณใกล้ตำแหน่งทางออกด้านข้างแสดงถึงเวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที (ก) D 64 (ข) D 72.....	88
รูปที่ 5.9	แผนภาพแสดงทิศทางการไหลแกว่งรอบแกนกลางของเม็ดทรายในโครงสร้างแบบจำลองไฮโดรไซโคลนสามัญภาคแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันที่มีลักษณะ (ก) ส่งเสริมประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทราย (ข) ลดประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทราย.....	89
รูปที่ 5.10	ภาพขยายบริเวณใกล้ตำแหน่งทางออกด้านข้างแสดงถึงเวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่....	90
รูปที่ 5.11	ภาพขยายบริเวณใกล้ตำแหน่งทางออกด้านข้างแสดงถึงเวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่....	91

รายการสัญลักษณ์

- A_i พื้นที่สัมผัส (interfacial area)
- C_μ ความหนืดจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Viscosity)
- d_o ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำมัน [m]
- d_s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเม็ดทราย [m]
- $D_{T,ij}$ การแพร่เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent diffusion)
- D ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลนทรงกรวยสองชั้นต่อกัน [m]
- D_i ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางขาเข้าไฮโดรไซโคลน [m]
- D_o ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน [m]
- D_s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านข้างไฮโดรไซโคลน [m]
- D_u ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องทางออกด้านล่างไฮโดรไซโคลน [m]
- D_c ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรไซโคลน [m]
- f แรงต้านทาน (drag)
- G_{ij} ผลจากแรงลอยตัวที่เกิดขึ้นการไหลแบบปั่นป่วน (Effects of Buoyancy on Turbulence)
- k ปริมาณสัดส่วนของปริมาตรที่มีการกระจายวิภูภาคในช่องทางขาเข้าไฮโดรไซโคลน
- k_o ปริมาณสัดส่วนของปริมาตรที่กระจายตัวของหยดน้ำมันที่ช่องทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน
- k_s ปริมาณสัดส่วนของปริมาตรที่กระจายตัวของเม็ดทรายที่ช่องทางออกด้านข้างไฮโดรไซโคลน
- k_u ปริมาณสัดส่วนของปริมาตรที่กระจายตัวของหยดน้ำมันหรือเม็ดทรายที่ช่องทางออกด้านล่างไฮโดรไซโคลน
- K_{pq} สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของไหล
- K_{sl} สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของแข็ง
- L ขนาดความยาวของไฮโดรไซโคลน [m]
- L_s ขนาดความยาวของห้องไหลวนในไฮโดรไซโคลน [m]
- L_α ขนาดความยาวของทรงกรวยชั้นที่หนึ่งหรือทรงกรวยบนของไฮโดรไซโคลน [m]
- L_β ขนาดความยาวของทรงกรวยชั้นที่สองหรือทรงกรวยล่างของไฮโดรไซโคลน [m]
- L_u ความยาวของส่วนช่องทางทรงกระบอก (ช่องทางออกด้านล่าง) [m]
- \dot{m} อัตราการไหลเชิงมวล [kg/s]
- Pr_t ตัวเลข Prandtl จากความปั่นป่วนของพลังงาน (Turbulent Prandtl number of energy)
- Q อัตราการไหลปริมาตรที่ช่องทางขาเข้าไฮโดรไซโคลน [m^3 / s]
- Q_o อัตราการไหลปริมาตรที่ช่องทางออกด้านบนไฮโดรไซโคลน [m^3 / s]

- Q_s อัตราการไหลปริมาตรที่ช่องทางออกด้านข้างไฮโดรไซโคลอน [m^3 / s]
- Q_u อัตราการไหลปริมาตรที่ช่องทางออกด้านล่างไฮโดรไซโคลอน [m^3 / s]
- Re** จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
- V ความเร็วการไหล [m / s]
- S_u พจน์ค่าคงที่ของสมการ (2.66)
- S_p พจน์สัมประสิทธิ์ของ σ_p ของสมการ (2.66)
- α ค่ามุมทรงกรวยของทรงกรวยชั้นที่หนึ่ง [$^\circ$]
- β ค่ามุมทรงกรวยของทรงกรวยชั้นที่สอง [$^\circ$]
- ε_{ij} อัตราการกระจายตัว (Dissipation Rate)
- $\eta_{s,oil}$ ประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมัน (Oil separation efficiency)
- $\eta_{s,sand}$ ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทราย (Sand separation efficiency)
- μ ความหนืดของของไหล [$kg / m \cdot s$]
- Λ อัตราส่วนการแยกสาร (Split Ratio)
- Λ_o อัตราส่วนของช่องทางออกด้านบนต่อช่องทางออกด้านล่าง
- Λ_s อัตราส่วนของช่องทางออกด้านข้างต่อช่องทางออกด้านล่าง
- ρ ความหนาแน่นของของไหล [kg / m^3]
- τ_p เวลาความอ่อนไหวของอนุภาค (Particulate relaxation time)
- ϕ_{ij} พจน์ Pressure-Strain
- $\phi_{ij,1}$ พจน์ slow pressure-strain
- $\phi_{ij,2}$ พจน์ rapid pressure-strain
- $\phi_{ij,w}$ พจน์ wall-reflection

บทที่ 1

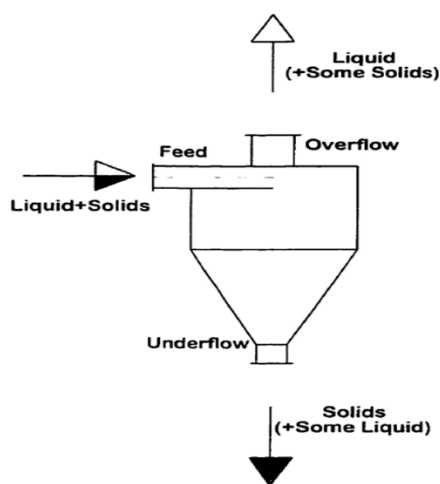
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

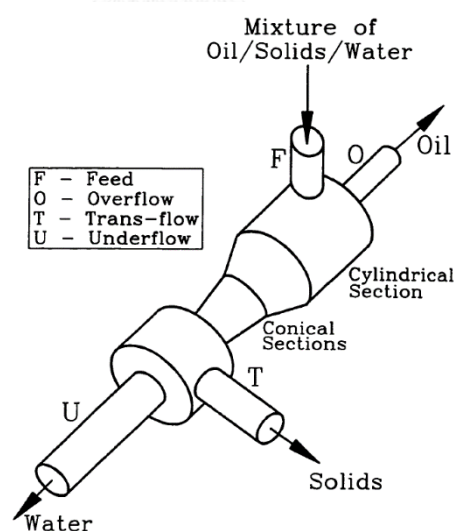
ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) เป็นอุปกรณ์ชนิดหนึ่งที่ใช้ในการแยกสารที่มีการผสมกันของสารหลายวิธภาคในกระบวนการทางอุตสาหกรรมโดยสมัยก่อนนั้น ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) จะถูกใช้แยก พวกรั่ว หิน ทราย โคลน ออกจากน้ำจึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเหมืองแร่ นอกจากนี้ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) จะใช้แยกสารผสมระหว่างของแข็งกับของเหลวแล้ว ยังสามารถแยกของผสมระหว่างของเหลวและก๊าซและของเหลวกับของเหลวเช่น น้ำกับน้ำมันดิบ เป็นต้น รวมทั้งของแข็งที่มีขนาด และน้ำหนักต่างกัน ปัจจุบัน ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ได้ถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมี ปิโตรเคมี อาหารและยา เป็นต้น ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำมันดิบ แยกกรดทรายออกจากน้ำอ้อย ในอุตสาหกรรมน้ำตาล แม้กระทั่งการแยกสารกัดกร่อนในโรงงานนิวเคลียร์ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) ค่อนข้างจะเป็นอุปกรณ์ที่เหมาะสมกับอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากกลไกการแยกสารไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงไม่สูงมากนัก และยังมีความปลอดภัยค่อนข้างสูง โดยสิ่งที่น่าสนใจในปัจจุบันคือทรัพยากรธรรมชาติที่มีอย่างจำกัดและลดลงอย่างรวดเร็วเช่นการนำน้ำมันดิบมาใช้เพื่ออำนวยความสะดวกต่างๆในชีวิตมนุษย์ทำให้มีการคาดการณ์ว่าในอนาคตอันใกล้จะทำให้ น้ำมันดิบที่ขุดขึ้นมาใช้ได้ไม่ยาวนานนักเหมือนยุคสมัยก่อนหน้านี้จะลดลงไปจนไม่เพียงพอต่อความต้องการทำให้มีการเตรียมหาพลังงานสำรองเพื่อเตรียมไปใช้ทดแทนน้ำมันดิบรูปแบบเดิม ทำให้การเข้ามาของอุตสาหกรรมทรายน้ำมัน (Oil Sands) ที่เป็นแหล่งปิโตรเลียมประเภทหนึ่งนั้นกลับขึ้นมาเป็นที่สนใจอีกครั้งซึ่งกระบวนการที่สำคัญในการผลิตน้ำมันจากทรายน้ำมันคือการแยกน้ำมันออกจากทรายน้ำมันซึ่งไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) จะเป็นอุปกรณ์หลักในการแยกน้ำมันออกจากทรายและน้ำทำให้ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) จึงเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความสนใจในการพัฒนาประสิทธิภาพเพิ่มการแยกสารให้เพิ่มขึ้นนั่นเอง

โดยที่มาของชื่อ ไฮโดรไซโคลน (Hydrocyclone) นั้นมาจากการอาศัยหลักการในการแยกสารโดยเคลื่อนที่ของสารที่มีการผสมกันให้เกิดการหมุนทำให้มีการเหวี่ยงเกิดขึ้น ซึ่งทั้งหมดมีลักษณะคล้ายการหมุนของพายุไซโคลนนั่นเอง หลักในการแยกสาร คือ การใช้ประโยชน์ของความหนาแน่นหรือ ขนาดของสารเป็นผลให้การเคลื่อนที่มีความแตกต่างกันเมื่อเกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางเกิดขึ้นและการออกแบบรูปร่างของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนก็จะมีผลต่อการแยกสารเช่นกัน โดยแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นนั้นมีที่มาจากป้อนสารเข้าไปในตัวอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนด้วยความเร็วใต้งานวิจัยในช่วง

ยุคแรกๆของการศึกษาจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกสารที่มีวัฏภาคของสารที่ต้องการแยกเพียงแค่สองวัฏภาคเท่านั้นด้วยเหตุผลในด้านเทคโนโลยีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แต่เมื่อเวลาผ่านไปเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้นและการที่วัตถุดิบต่างๆเริ่มมีราคาสูงทำให้นักวิจัยต้องการศึกษาเพื่อจะพัฒนาประสิทธิภาพการแยกสารของไฮโดรไซโคลอนให้มีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยที่ศึกษาจึงเริ่มมีการศึกษาการแยกสารแบบสามวัฏภาคเป็นที่นิยมขึ้นมาทำให้การศึกษาจึงแบ่งออกเป็นสองกลุ่มโดยมีแบบการศึกษาการแยกสารแบบสองวัฏภาคและแบบสามวัฏภาค



รูปที่ 1.1 อุปกรณ์แยกสารไฮโดรไซโคลอนแบบสองวัฏภาค (Solid-Liquid) [1]



รูปที่ 1.2 อุปกรณ์แยกสารไฮโดรไซโคลอนแบบสามวัฏภาค (Liquid-Liquid-Solid) ออกแบบโดย R. M. M. Changirwa [1]

งานวิจัยที่เป็นพื้นฐานและน่าสนใจควรค่าต่อการค้นคว้าหาความรู้มีหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นการทดลองที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรไซโคลอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกสาร การใช้เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการวัดเพื่อสังเกตรูปแบบการเคลื่อนที่ของสารภายในไฮโดรไซโคลอน

หรือแม้กระทั่งงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนก็ตามโดยงานวิจัยที่น่าสนใจเหล่านี้เป็นพื้นฐานของการพัฒนาประสิทธิภาพของการแยกสารโดยใช้อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน ซึ่งมักจะทำการศึกษากับไฮโดรไซโคลนแบบแยกสารสองวัฏภาค แต่งานวิจัยการแยกสารผสมแบบสามวัฏภาคนั้นมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นจากเดิมทำให้ต้องมีการศึกษาทดลองโดยใช้หลักการพื้นฐานการแยกสารแบบสองวัฏภาคมาเป็นหลักในการศึกษาเพื่อการพัฒนาที่รวดเร็วขึ้น แต่ก็ต้องศึกษาทำความเข้าใจรูปแบบในการผสมกันของสารที่มีการผสมกันแบบสามวัฏภาค โดยรูปแบบของสารผสมที่มีความสำคัญมีดังนี้ เช่น ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง, ของเหลว-เหลว-ของแข็ง และ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว เป็นต้น

1.2 แรงจูงใจ

ทรายน้ำมัน หรือ Oil Sands คือแหล่งปิโตรเลียมประเภทหนึ่ง ที่มีส่วนประกอบของ ทราย โคลน น้ำ และ น้ำมันดิน (Bitumen) ซึ่งจะเรียกแบบไทยๆ ว่า น้ำมันดิน หรือเพื่อความเข้าใจง่ายๆ อาจจะนึกไปถึง ยางมะตอย ที่มีความหนืดสูง อยู่ในรูปกึ่งของแข็ง หรือของแข็ง ซึ่งจะต้องใช้ความร้อนสูงเกือบ 200 องศาเซลเซียส ทำให้ น้ำมันดิน อ่อนตัวแล้วแยกออกมาจากทรายและโคลน กลายเป็นของเหลว ในรูป "น้ำมันดิบ" แล้วจึงนำไปใช้หรือกลั่นตามขั้นตอนต่อไป เทคโนโลยี ในการผลิตน้ำมันจาก ทรายน้ำมัน นับวันจะทันสมัยยิ่งขึ้น ต้นทุนการผลิตต่ำลง ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้กว่าเดิม ในช่วง 40-50 ปีข้างหน้าจากการสำรวจของนักธรณีวิทยา พบว่า ในโลกนี้ แหล่ง "ทรายน้ำมัน" มีที่มา มีอยู่สองแห่ง คือ เวเนซุเอลา และแคนาดา จากปริมาณสำรองทั้งหมด 174 พันล้านบาร์เรล เป็น "ทรายน้ำมัน" 169 พันล้านบาร์เรล หรือมากถึง 97% [2] จากความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการสกัดทรายน้ำมัน (ซึ่งส่วนสำคัญคือเทคโนโลยีการทำเหมือง) ส่งผลให้การผลิตน้ำมันรูปแบบนี้ “คุ้มค่าการลงทุน” กว่าในอดีตมาก

การแยกน้ำมันออกจากทรายน้ำมันวิธีแยกทรายน้ำมันคือเติมน้ำลงไปเพื่อบังคับให้ทรายจมลงไปข้างล่าง น้ำมันดินลอยขึ้นมาข้างบน ก่อนที่จะขนส่งเข้าสู่ปั๊มน้ำมันได้ น้ำมันดินต้องถูกส่งเข้าสู่โรงกลั่นเพื่อกลั่นออกมาเป็นเชื้อเพลิงในเมื่อน้ำมันจากทรายน้ำมันเป็น “น้ำมันหนัก” (heavy oil) การกลั่นจึงต้องใช้ต้นทุนและพลังงานมากกว่าการกลั่นน้ำมันปกติมาก เป็นกระบวนการที่ใช้ทุนสูงและสิ้นเปลืองอย่างมหาศาลต้องใช้ทรายน้ำมัน 2-4 ตัน และน้ำอีก 2-4 บาร์เรล ต่อการผลิตน้ำมันดิบ 1 บาร์เรล จากเหตุผลดังกล่าวนี้ทำให้ข้าพเจ้าจึงมีแรงจูงใจในการพัฒนาอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบแยกสารแบบสามวัฏภาคคือของเหลว-ของเหลว-ของแข็งซึ่งจะอยู่ในกระบวนการแยกน้ำมันออกจากน้ำ และทรายให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพื่อประหยัดทรัพยากรให้ใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงผลจากการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวย 2 ชั้นต่อกันของไฮโดรไฮโคลนเพื่อแยกสารผสมแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง โดยทำการศึกษาผ่านแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ; CFD) ประสิทธิภาพการแยกสารจะเกิดขึ้นจากผลเฉลยจากแบบจำลองการทดลองซึ่งแสดงผลที่สอดคล้องกับข้อมูลการทดลองที่ใช้อ้างอิงจากการทำการทดลอง R. M. M. Changirwa [1] ซึ่งผลจากการตรวจสอบเทียบค่าการทดลองกับแบบจำลอง CFD เมื่อได้ผลการเปรียบเทียบค่าที่พอใจจึงทำการศึกษาผลการปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวย 2 ชั้นต่อกันของไฮโดรไฮโคลนแล้วทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอ้างอิงเพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแยกและลักษณะการไหลภายในเพื่อหาข้อสรุปในการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไฮโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

1.4 ขอบเขตโครงการ

ทำการศึกษาวิจัยอุปกรณ์แยกสารไฮโดรไฮโคลนสามวัฏภาคแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ที่มีต้นแบบพัฒนาโดย R. M. M. Changirwa [1] เนื่องจากแบบจำลองดังกล่าวมีรูปร่างของไฮโดรไฮโคลนที่มีทรงกรวยสองชั้นต่อกันและมีมุมของทรงกรวยทั้งสองต่างกันซึ่งจะแตกต่างจากแบบจำลองของงานวิจัยอื่นๆ ทำให้เกิดมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาผลกระทบของประสิทธิภาพการแยกสารจึงมีความน่าสนใจถ้ามีการปรับเปลี่ยนค่ามุมของทรงกรวยทั้งสองที่ต่อกัน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารของน้ำมันและทรายของแบบจำลองที่ได้ปรับเปลี่ยนค่ามุมแล้วนั้นเมื่อทำการเปรียบเทียบกับแบบจำลองอ้างอิงออกมามีลักษณะเป็นอย่างไร

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับในการทำงานวิจัยชิ้นนี้สามารถแบ่งออกได้เป็นสามส่วนคือ หนึ่ง ประโยชน์ในด้านความรู้และความเข้าใจที่ได้รับทางด้านวิชาการ สองประโยชน์ในด้านการเข้าใจโครงสร้างของโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อที่จะสร้างและศึกษาค้นคว้างานอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่อไป และสุดท้ายประโยชน์ในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรม

ประโยชน์ในด้านความรู้และความเข้าใจที่จะได้รับทางด้านวิชาการนั้นในส่วนของ 1). ทำความเข้าใจทฤษฎีสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล เช่น สมการเชิงอนุพันธ์มวล สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมและสมการ อนุพันธ์พลังงาน เป็นต้น 2). ทำความเข้าใจระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ และ

3). เข้าใจผลกระทบของตัวแปรต่างๆทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกสารจากอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

สองประโยชน์ในด้านการเข้าใจโครงสร้างของโปรแกรม ANSYS Fluent ของ 1). การเข้าใจตัวแปรต่างๆของค่าคงที่ในแบบจำลองทาง CFD ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกของสารทั้งสามภูมิภาคในอุปกรณ์การแยกไฮโดรไซโคลนและ 2). เข้าใจวิธีการใช้โปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อที่จะทำการวิจัยพัฒนาประสิทธิภาพอุปกรณ์ชนิดอื่นๆต่อไป

สุดท้ายประโยชน์ในด้านการนำไปประยุกต์ใช้ทางด้านวิศวกรรม 1). สามารถนำไปใช้ในการออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพอุปกรณ์ทางการแยกสารไฮโดรไซโคลนให้สามารถทำการแยกสารภูมิภาคต่างๆให้ดีขึ้น 2). ได้แนวทางในการคิด วิเคราะห์ และพัฒนาอุปกรณ์ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

1.6 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.
	59	59	59	60	60	60	60	60	60	60
1.ศึกษางานวิจัยที่ผ่านมา	x	x								
2.ศึกษาวิธีการใช้โปรแกรม ANSYS Fluent		x	x							
3.ออกแบบการทดลอง		x	x							
4.เขียนแบบรูปร่างไฮโดรไซโคลน			x	x						
5.ทดสอบค่าความคลาดเคลื่อนจำนวน element ของ mesh				x						
6.ทดสอบและเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนจากผลของโปรแกรมกับผลการทดลองจากต้นแบบงานวิจัย				x	x					
7.เสนอโครงสร้าง					x					
8.เขียนแบบรูปร่างไฮโดรไซโคลนโดยการเปลี่ยนแปลงมุมของทรงกรวย					x	x	x			
9.วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง							x	x		
10.ทำรายงานและนำเสนอผลงาน								x	x	x

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือการวิเคราะห์ปัญหาการไหลเพื่อหาความเร็ว ความดัน อุณหภูมิ เป็นต้น เหมาะสำหรับการใช้ในการแก้ปัญหาในการวิเคราะห์หรือออกแบบทางวิศวกรรม หรือการศึกษาองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์แบบใหม่ๆ โดยพยายามก้าวข้ามเรื่องงบประมาณในการศึกษาวิจัยให้ประหยัดมากที่สุดที่เป็นไปได้ โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics ซึ่งเรียกกันโดยย่อว่า CFD) ในปัจจุบันได้เข้ามาสร้างประโยชน์อย่างมากในปัจจุบัน โดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณผสมผสานกับความรู้ทางระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical methods) โดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computers) เพื่อแก้ปัญหасสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) โดยผ่านการแสดงผลผ่านกราฟฟิกแลบสี ทำให้นักวิจัยสามารถทำการวิเคราะห์ปัญหาการไหลได้ดีขึ้นมากจึงส่งผลให้สามารถปรับปรุง พัฒนาการออกแบบ และแก้ปัญหการไหล จนได้ผลลัพธ์ที่น่าพอใจ ก่อนนำไปสร้างจริงหรือทำการทดลองต่อไป

2.1.1 กระบวนการแก้ปัญหา

การวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ทางวิศวกรรม ไม่ว่าจะเป็นปัญหาทางด้านกลศาสตร์ของแข็ง ปัญหาทางด้านการถ่ายเทความร้อน และปัญหาทางด้านการไหล หรือปัญหาด้านอื่นๆ ก็ตาม ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ปัญหาเหล่านี้ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบใหญ่ ๆ 3 ส่วนคือ (ก) สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equations) ที่อธิบายความเป็นจริงของปัญหานั้น (ข) เงื่อนไขขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับปัญหาในการศึกษานั้น และ (ค) ลักษณะรูปร่าง (Geometry) ของปัญหานั้น ทั้ง 3 ส่วนนี้หากองค์ประกอบใดองค์ประกอบหนึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจะส่งผลให้ผลลัพธ์จากการคำนวณมีค่าเปลี่ยนแปลงไป ทำให้องค์ประกอบทั้ง 3 ส่วนนี้มีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องศึกษาและเข้าใจเพื่อที่จะทำการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการคำนวณได้อย่างมีประสิทธิภาพนั่นเอง โดยภาพรวมของทั้ง 3 ส่วนมีดังนี้

2.1.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย

ปัญหาในเชิงวิศวกรรมต่างมีความลึกซึ้งของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แตกต่างกันออกไป โดยสมการอนุพันธ์ย่อยเป็นหัวใจของการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ยกตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ปัญหา กลศาสตร์ของแข็งนั้นจำเป็นต้องเริ่มจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่จะอธิบายแรงสมดุลทั้ง 3 ทิศทางซึ่งถูกต้องอยู่เสมอ ณ ตำแหน่งใดๆในปัญหานั้น การวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อน

จำเป็นต้องเริ่มจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่แสดงถึงการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และ พลังงาน เป็นต้น โดยยกตัวอย่างสมการอนุพันธ์ย่อยของการไหลแบบหนืดภายใต้ภาวะสองมิติโดยไม่คำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ [18] ประกอบด้วย

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.2)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (2.3)$$

เป็นต้น สำหรับผู้ที่ต้องการแก้ปัญหาจำเป็นต้องทำความเข้าใจและทำความเข้าใจกับสมการอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ก่อนแก้ปัญหา และไม่มองสมการเหล่านี้เป็นเพียงตัวแปรทางคณิตศาสตร์แต่ควรให้มองถึงหลักทางกายภาพด้วยเพื่อทำความเข้าใจความหมายของสมการเหล่านี้ จะได้สร้างทัศนคติที่ดีที่ว่า หากสมการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้ได้ถูกต้อง จะส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่มีความหมายและลึกซึ้งซึ่งจะสามารถนำไปสู่ความเข้าใจในปัญหานั้นๆ ได้อย่างถูกต้องนั่นเอง

2.1.3 เงื่อนไขขอบเขต

ขั้นตอนในการแก้ไขปัญหาระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นเงื่อนไขขอบเขตเป็นองค์ประกอบสำคัญซึ่งนำไปสู่ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน หากปัญหาที่ทำการวิเคราะห์เป็นปัญหาแบบไม่คงตัว (Unsteady) เงื่อนไขเริ่มต้น (Initial Conditions) จำเป็นต้องถูกนำมาประยุกต์ใช้ด้วยกัน เช่นกัน เงื่อนไขขอบเขตที่เปลี่ยนแปลงไปก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหาการไหลในทางการคำนวณนั้นขึ้นอยู่กับชนิดของสมการเชิงอนุพันธ์ ว่าเป็นแบบพาราโบลิก (Parabolic) หรือไฮเพอร์โบลิก (Hyperbolic) ซึ่งขึ้นกับความเร็วของการไหลอีกต่อหนึ่ง เนื่องจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามารถเปลี่ยนจากชนิดหนึ่งไปอีกชนิดหนึ่งได้ภายใต้รูปแบบของการคำนวณ (Computational domain) เดียวกัน การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตจะอธิบายโดยชัดเจนเพื่อให้เกิดความเข้าใจและเพื่อกำหนดเงื่อนไขขอบเขตได้อย่างถูกต้องเหมาะสมกับการไหลชนิดนั้นๆ

2.1.4 ลักษณะรูปร่าง

ในการแก้ปัญหาพื้นฐานโดยทั่วไป ลักษณะรูปร่างของปัญหามักไม่ได้ถูกนำมาเข้ามามีการพิจารณา การไม่นำรูปร่างลักษณะของปัญหาเข้ามามีการพิจารณา ทำให้นักวิจัยและผู้ทำการศึกษามองข้ามความลำบากของการแก้ปัญหาอันเป็นผลมาจากลักษณะรูปร่างของปัญหาโดยเกือบสิ้นเชิง ปัญหาโดยทั่วไปในงานวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ล้วนถูกออกแบบให้มีลักษณะรูปร่างที่ซับซ้อนอยู่เสมอ

ลักษณะรูปร่างซึ่งครอบคลุมพื้นที่การไหลที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้ผลลัพธ์ของการไหลที่เกิดขึ้นนั้นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกันถึงแม้ว่าระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยและเงื่อนไขขอบเขตยังคงเดิม

หากสามารถหาวิธีที่ได้มาซึ่งผลลัพธ์ของปัญหาเหล่านี้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ผู้วิเคราะห์สามารถตัดแปลงเงื่อนไขขอบเขตหรือรูปร่างของปัญหา อันจะก่อให้เกิดผลลัพธ์ตามที่ต้องการได้ ความคิดเช่นนี้เองทำให้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีประโยชน์เป็นอย่างมากต่อการออกแบบงานต่างๆ

ขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเหล่านี้ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้แก้ปัญหาในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล โดยมีเงื่อนไขขอบเขตและลักษณะรูปร่างของปัญหาที่สามารถกำหนดได้โดยสะดวก โดยทั่วไปแล้วทุกๆ โปรแกรมจึงประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ (ก) ขั้นตอนการสร้างลักษณะรูปร่างของปัญหาและเงื่อนไขขอบเขต ซึ่งเป็นขั้นตอนของกระบวนการขั้นต้น (Pre-Processor) (ข) ขั้นตอนการวิเคราะห์แก้ปัญหา (Analysis) ซึ่งจะเป็หัวใจหลักของโปรแกรม และ (ค) ขั้นตอนของกระบวนการขั้นท้าย (Post-Processor) เพื่อการแสดงผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการคำนวณ

(ก) กระบวนการขั้นแรก กระบวนการเริ่มจากการสร้างโดเมนของการไหลที่ต้องการทำการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วยขั้นตอนนับตั้งแต่การสร้างเส้นขอบ (Line) การสร้างพื้นผิว (Surface) รวมถึงการสร้างปริมาตร (Volume) หากเป็นการไหลในสามมิติ จากนั้นจึงแบ่งโดเมนของการไหลที่ได้สร้างขึ้นนี้ออกเป็นเอลิเมนต์ (Element) เล็กๆ หรือออกเป็นตาราง (Mesh) ย่อยๆ โดยเส้นตารางเหล่านี้ตัดกันที่จุด (Grid หรือ Node) ซึ่งจะเป็จุดที่ทำการคำนวณผลลัพธ์ของการไหล ได้แก่ ความเร็ว ความดัน และ อุณหภูมิ เป็นต้น แล้วจึงกำหนดคุณสมบัติของของไหล และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับปัญหานั้นๆ ตามลำดับ

(ข) ขั้นตอนการวิเคราะห์ ขั้นตอนการวิเคราะห์จัดได้ว่าเป็นหัวใจหลักของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปเหล่านี้ การแบ่งโดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดเล็กหรือเป็นตารางที่มีความถี่มากจนเกินไป ก่อให้เกิดจำนวนจุดต่อซึ่งประกอบไปด้วยตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) มากขึ้น อันเป็นผลต่อเนื่องต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (Computational time) และ ปริมาณหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer memory) ที่จำเป็นต้องจัดหาให้ แต่ในทางตรงกันข้าม จะนำไปสู่ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำ (Solution accuracy) สูงมากขึ้นนักวิเคราะห์ผู้มีประสบการณ์ในการแก้ปัญหาจึงจำเป็นต้องชั่งน้ำหนักระหว่างผลได้และผลเสียนี้ก่อนที่ทำการคำนวณ แนวความคิดของการแบ่ง (Discretization) โดเมนของการไหลออกเป็นเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆ ก็เพื่อที่จะสามารถใช้ฟังก์ชันแบบง่ายๆ (Simple functions) สำหรับแทน (Represent) ลักษณะการไหลผ่านเอลิเมนต์หรือตารางเล็กๆ นั้นฟังก์ชันดังกล่าวจะถูกแทนลงไปในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล ผวนกเข้ากับกระบวนการทางคณิตศาสตร์บางอย่างเพื่อทำการลดค่าผิดพลาด (Error) ก่อให้เกิด

สมการทางพีชคณิต (System of algebraic equations) ขนาดใหญ่ซึ่งจำเป็นต้องแก้ไขโดยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical method) ต่อไป วิธีการวิเคราะห์ที่เป็นที่นิยม คือ ระเบียบวิธีผลต่างสี่เหลี่ยม (Finite difference method ; FDM) ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method ; FEM) และระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume method ; FVM) โดยทั้งสามแบบมีคุณสมบัติและการใช้งานที่แตกต่างกันคือ FDM มีลักษณะเป็น point-based method คือเมื่อวาง points ลงไปบน domain แล้วทำการ approximate solution เฉพาะจุดที่วางลงไป การ approximate solution ใช้ numerical approximate ของ derivative มา discretize สมการ PDE ที่ต้องการจากนั้นทำการใส่ข้อมูล boundary condition ลงไปแล้วทำการ solve system of linear equations โดยข้อดีคือง่ายในการคำนวณแต่ถ้า domain ซับซ้อนมากๆ วิธีนี้ก็ไม่สามารถให้คำตอบที่เหมาะสมได้ FEM มีลักษณะเป็น based on element โดยจะวาง element ลงไปใน domain โดยที่ขึ้นอยู่กับว่าจะใช้ element ลักษณะแบบไหน เช่นใน 2D ก็มีให้เลือกทั้ง triangular , rectangular เป็นต้นชนิดของ element ที่ต่างกันก็จะให้ approximation function ที่ต่างกัน การ approximation function จะมีความแตกต่างจาก FDM โดย FEM จะเริ่มจากการกำหนด weighted residual error ในรูปแบบ integral แล้วให้มีค่าเท่ากับ 0 จากนั้นก็ transform gradient หรือ derivative ต่างๆ ที่ปรากฏใน integrand ให้อยู่ในรูปแบบอื่นโดยทั่วไปจะใช้ Divergence theorem แต่ถ้ามี time derivative ก็จะมีขั้นตอนเพิ่มขึ้นมาต่อไปก็จะมีค่าประมาณค่า solution ด้วย linear combination ของ approximation function โดยสุดท้ายก็จะเป็นกระบวนการ system of linear equation โดยคำตอบที่ได้ก็คือสัมประสิทธิ์ของ linear combination หรือค่า solution ที่ nodes/points บน element ข้อดีคือจัดการกับรูปร่างที่มีความซับซ้อนได้ดีกว่า FDM แต่ถ้าเงื่อนไขขอบเขตไม่แน่นอนอย่างของไหลก็มักจะเลี่ยงไปใช้วิธีที่ 3 คือ FVM ทำการศึกษาแทนโดย FVM จะมีการสร้าง control volume ขึ้นมาครอบ point หรือ node ที่สนใจซึ่งโดยทั่วไป node พวกนี้ก็จะมาจากการวาง element ขั้นตอนเริ่มต้นจะมีความคล้ายกับ FEM แต่ต่างตรงที่แค่ใส่ integration ในสมการ ที่ให้มาบน control volume แล้วทำการแปลง transform derivative โดยใช้ Divergence theorem เท่ากับว่าเหลือแต่ในรูปของ volumetric term กับ surface flux term จากนั้นก็ approximation ค่าเหล่านี้ โดยขั้นตอนสุดท้ายจะใช้ system of linear equation เช่นกันกับ FDM และ FEM โดยข้อดีของ FVM คือการ discretize สอดคล้องกับ conservation law ในทางฟิสิกส์โดย FVM จะเป็นตัวเลือกที่ดีของการแก้ปัญหาการไหลของของไหลส่วน FEM จะเป็นแนวทางทั่วไปใช้ในการแก้ปัญหาทางกลศาสตร์ ดังนั้นระเบียบวิธีทั้งสามจึงได้รับความนิยมในปัจจุบันได้ถูกนำไปใช้ในการแก้ปัญหาวิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์อย่างแพร่หลาย

(ค) กระบวนการขั้นสุดท้าย ผลที่ได้จากขั้นตอนการวิเคราะห์นั้นโดยปกติมักประกอบไปด้วย

ค่าความเร็วย่อยในทิศแกนต่างๆ ความดันและอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งใดๆในโดเมนการไหลนั้น ซึ่งค่าผลลัพธ์ดังกล่าวจะเป็นค่าในรูปแบบตัวเลข ดังนั้น จึงแทบเป็นไปได้ที่จะดูเพียงแค่ตัวเลขเหล่านี้แล้ว ก่อให้เกิดความเข้าใจในความหมายทางกายภาพของภาวะการไหลโดยเฉพาะถ้าเป็นปัญหาการวิเคราะห์แบบสามมิติ การสร้างผลลัพธ์เหล่านี้ออกมาในรูปแบบกราฟฟิกจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เช่นการสร้างกราฟค่าเป็นเวกเตอร์ ณ ทุกๆจุดต่อตลอดทั้งโดเมนของการไหลเพื่อแสดงลักษณะทิศทางการไหลและภาวะการหมุนวนในบริเวณต่างๆ การสร้างกราฟค่าเหล่านี้อาจแสดงโดยการสร้างค่าแทบสี (Color contour) เพื่อที่จะช่วยให้เกิดความเข้าใจในปัญหาโดยเร็วและดียิ่งขึ้น นอกจากนั้น การแสดงผลยังอาจแสดงในรูปแบบของเส้นทางการเดินของอนุภาค (Particle tracing) โดยผลลัพธ์ในรูปแบบต่างๆ เหล่านี้สามารถแสดงให้เห็นได้ในหลายๆทิศทางรวมไปถึงการแสดงในเชิงการไหลที่มีการเคลื่อนไหว (Fluid motion) เพื่อให้เกิดความรู้สึกที่เป็นจริงมากขึ้นด้วย

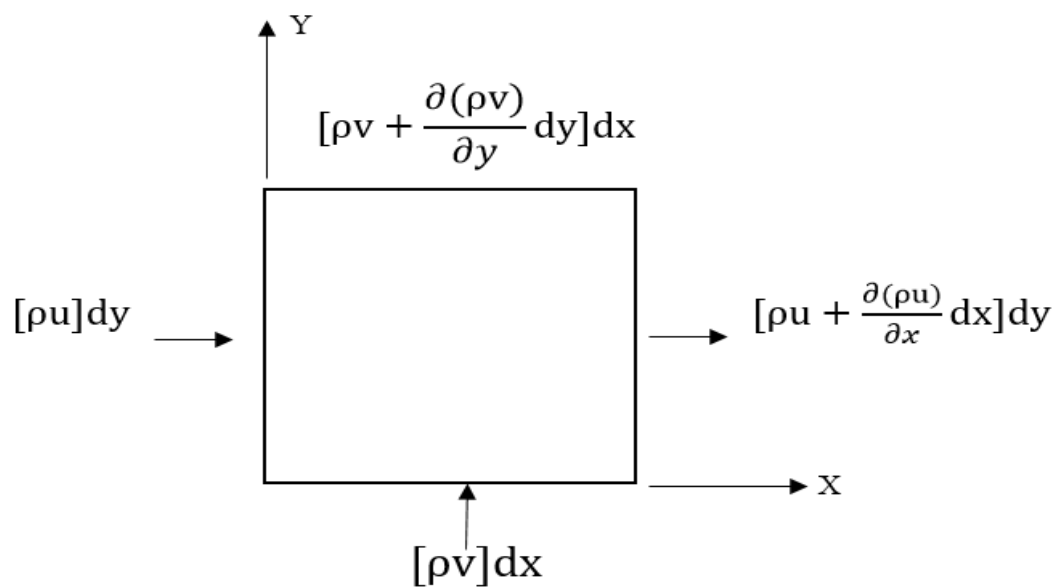
2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล

การวิเคราะห์ปัญหาใดๆ สำหรับการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนั้น ความเข้าใจในอนุพันธ์ย่อยของไหลถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญที่สุดในการแก้ปัญหาทางวิศวกรรม ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเหล่านี้อธิบายถึงความเป็นจริงของการไหลที่เกิดจากการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงาน สมการเหล่านี้ล้วนประกอบไปด้วยพจน์ที่อยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ต่าง ๆ กัน ดังนั้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำความเข้าใจและสร้างความคุ้นเคยกับสมการอนุพันธ์ย่อยต่าง ๆ เหล่านี้ก่อนที่จะทำการทดลอง ต้องทำความเข้าใจสมการเหล่านี้โดยไม่ได้มองเป็นเพียงสมการทางคณิตศาสตร์แต่ต้องทำความเข้าใจในเชิงด้านทางกายภาพด้วย หากเข้าใจสมการเหล่านี้ก็จะสามารถประสบความสำเร็จในการแก้ปัญหาต่างได้ๆ อีกทั้งยังช่วยทำให้เกิดผลลัพธ์ของผลที่มีความถูกต้องแม่นยำและสามารถอธิบายได้ว่าปัญหาที่สนใจนั้นมีที่มาเป็นอย่างไรและทำให้เข้าใจแก่นแท้ของปัญหาได้เป็นอย่างดีนั่นเอง

สมการเหล่านี้จะอยู่ในรูปแบบของพจน์เชิงอนุพันธ์ (Derivative) ซึ่งอาจไม่ค่อยรู้สึกคุ้นเคยมากนัก แต่การที่ต้องทำความเข้าใจความหมายของแต่ละพจน์นั้นมีความสำคัญต่อการแก้ปัญหาทางพลศาสตร์การไหลเชิงคำนวณอย่างมาก เพราะหัวใจของโปรแกรมในปัจจุบันที่ประดิษฐ์ขึ้นล้วนลงไปแก้ปัญหาในระบบสมการอนุพันธ์ย่อยต่างๆเหล่านี้ทั้งนั้น ดังนั้น ความถูกต้องและความเที่ยงตรงของผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจของผู้ใช้ในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยประกอบเข้าด้วยกันเป็นอย่างมาก

2.2.1 สมการเชิงอนุพันธ์มวล

สมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหลนี้เป็นสมการอนุพันธ์มวล (Conservation of mass) ซึ่งมีความหมายแบบให้เข้าใจได้ง่ายๆ คือ ว่ามวลไม่สูญหายไป การพัฒนาสมการเชิงอนุพันธ์นี้สามารถเข้าใจได้ง่ายหากพิจารณาการไหลผ่านกรอบเล็ก ๆ ขนาดกว้าง dx และ dy โดยมีขนาดเพียงหนึ่งหน่วยดังแสดงในรูป 2.1 ณ ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งที่ตรึงอยู่ในโดเมนของการไหล



รูปที่ 2.1 รูปแสดงฟลักซ์ของมวลเพื่อใช้ในการแสดงการพัฒนาสมการเชิงอนุพันธ์มวล

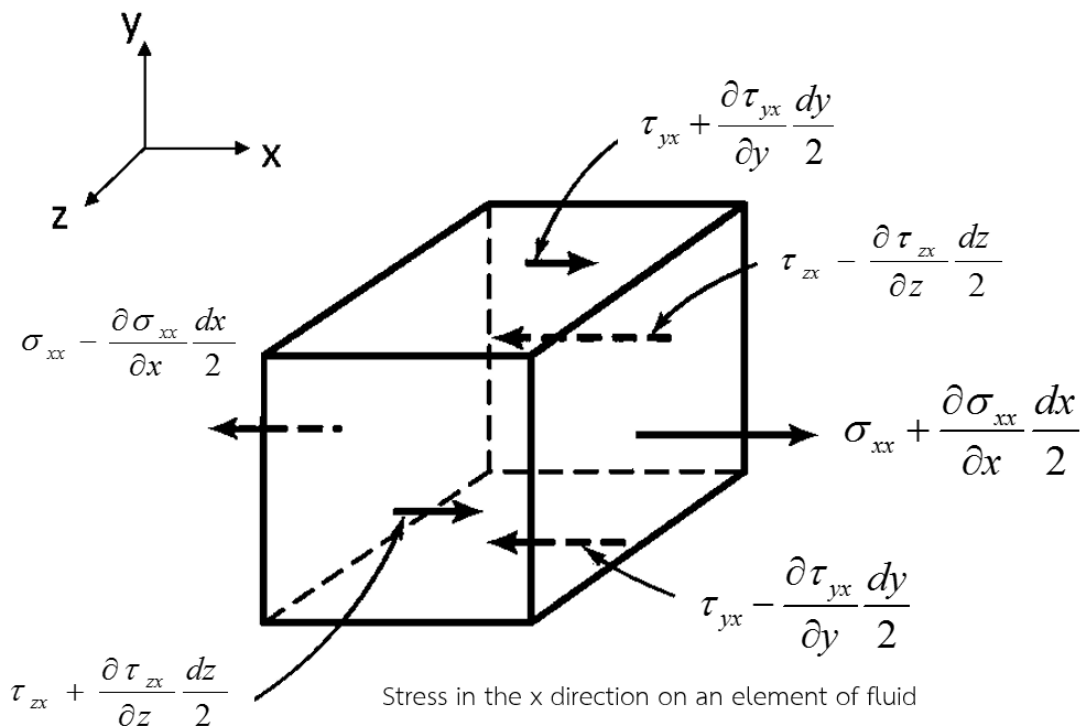
ปริมาณฟลักซ์ของมวลที่เพิ่มขึ้นจากการไหลผ่านขอบ dx และ dy จำเป็นต้องเท่ากับปริมาณฟลักซ์ของมวลในกรอบเล็กๆ ที่ลดลง จึงได้สมการเชิงอนุพันธ์มวล [3] คือ

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.4)$$

ซึ่งสมการเชิงอนุพันธ์มวล ซึ่งเป็นสมการพื้นฐานของความเป็นจริงสมการแรกในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการไหล โดยจะบ่งบอกว่ามวลนั้นไม่มีการสูญหายไปไหน สมการดังกล่าวนี้อยู่ในรูปแบบของพจน์เชิงอนุพันธ์อันดับหนึ่ง อันประกอบไปด้วยตัวแปรไม่ทราบค่า (unknown) ถึง 3 ตัว ได้แก่ p , u และ v ซึ่งต่างเปลี่ยนแปลงไปได้ตลอดโดเมนของการไหล ดังนั้น สมการเชิงอนุพันธ์มวลนี้เพียงสมการเดียวจึงไม่สามารถใช้แก้ปัญหาได้ และจำเป็นต้องประดิษฐ์สมการของความเป็นจริงอื่น ๆ ในการไหลเพิ่มเติมอีกหลายสมการ

2.2.2 สมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัม

จากความเป็นจริงชนิดที่สองของการไหลโดยทั่วไปที่สามารถนำมาประดิษฐ์เป็นสมการการไหลเชิงอนุพันธ์ย่อยเพิ่มเติมได้นั้นมาจากการใช้กฎข้อที่สองของนิวตัน (Newton's second law) ที่ได้กล่าวว่า แรงเท่ากับมวลคูณด้วยอัตราเร่ง ดังนั้น ในการใช้กฎข้อสองของนิวตันที่ต้องมีความสัมพันธ์กับการเร่ง จะพิจารณามวลซึ่งมีขนาดกว้าง dx dy และ dz โดยมีความลึกหนึ่งหน่วย ดังแสดงในรูป 2.2 ซึ่งกำลังเคลื่อนที่ไปกับการไหล



รูปที่ 2.2 รูปแสดงแรงต่างๆ ในแนวแกน x ที่ทำบนก้อนของไหลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

สมการนาเวียร์-สโตกส์ที่อยู่ในรูปแบบอนุพันธ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้แก้ปัญหา [3] ได้ดังนี้

แกน x

$$\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

แกน y

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

แกน z

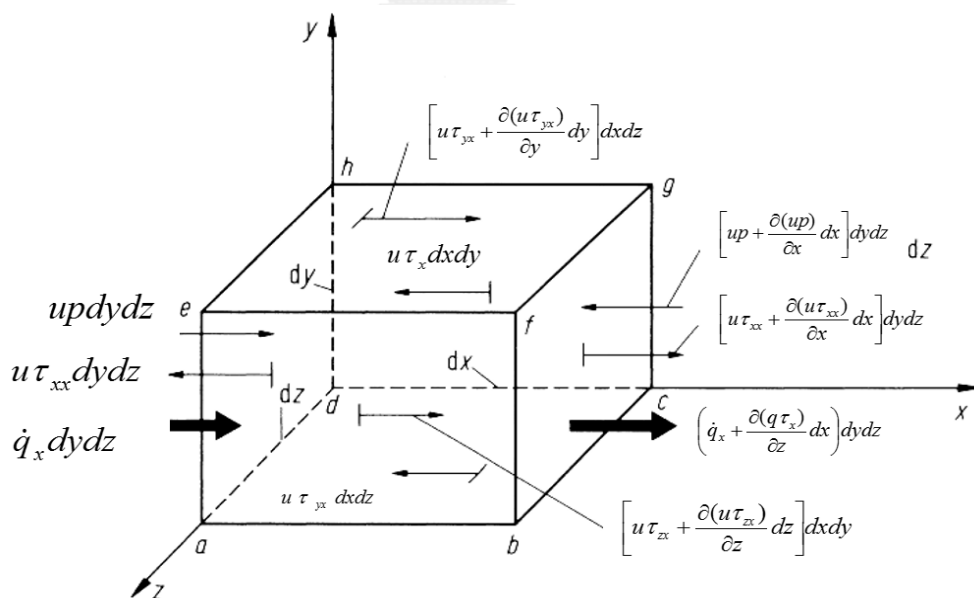
$$\rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

โดยสมการ Navier-Stokes ส่วนของสมการโมเมนตัมสำหรับ Newtonian Fluid สามารถเขียนแบบย่อได้คือ

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2.7)$$

จากสมการสมการเชิงอนุพันธ์โมเมนตัมทั้งสามแกนจะเห็นว่าจะมีหลายพจน์ประกอบเข้าด้วยกันโดยพจน์ที่หนึ่งจะหมายถึง Unsteady term ซึ่งเป็นพจน์ที่ขึ้นกับเวลา พจน์ที่สองจะเป็น Convection term จะหมายถึงการที่โมเมนตัมเคลื่อนที่เข้าออก element of fluid ส่วนพจน์ทางด้านขวามือจะประกอบไปด้วย พจน์ที่หนึ่งคือพจน์ body force ของ element of fluid พจน์ที่สองจะหมายถึงพจน์ของ pressure gradient term จะเป็นพจน์ที่เกี่ยวข้องกับความดันที่เกิดขึ้นกับ element of fluid และพจน์สุดท้ายของฝั่งด้านขวามือคือพจน์ที่กล่าวถึง Viscous Term ที่เกิดขึ้นในทิศทางต่างๆ รอบ element fluid จะเห็นได้ว่าสมการโมเมนตัมของระบบสมการนาเวียร์-สโตกส์จะมีความซับซ้อนซึ่งพจน์ต่างๆ นั้นอยู่ในรูปแบบของค่าอนุพันธ์ของตัวแปรไม่รู้ค่า ซึ่งทำให้เกิดความซับซ้อนมากในการแก้ปัญหาของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเช่นนี้ไม่ว่าจะด้วยการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบใดก็ตาม

2.2.3 สมการเชิงอนุพันธ์พลังงาน



รูปที่ 2.3 รูปแสดงพลังงานที่เกิดขึ้นและปริมาณพลังค์ในแกน x ที่ไหลผ่านก้อนมวลซึ่งเคลื่อนที่ไปกับการไหล

การไหลหลายชนิด เช่น การไหลผ่านยานอวกาศที่ขับเคลื่อนด้วยความเร็วสูงหลายเท่าของเสียง หรือการไหลของอากาศร้อนในห้องนอน ความเร็วของการไหลและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปใน

ของไหลนั้นต่างขึ้นอยู่กับกันและกัน ดังนั้น ความจริงชนิดที่สามของการไหลใดที่สามารถนำมาใช้เพื่อ ประดิษฐ์สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพิ่มเติมได้อีกนั้นคือกฎที่ว่าพลังงานนั้นไม่สูญหายไป (conservation of energy) รูป 2.3 แสดงมวลที่มีขนาดกว้าง dx dy และ dz โดยมีความลึกหนึ่งหน่วยซึ่งกำลัง เคลื่อนที่ไปกับการไหล

สมการเชิงอนุพันธ์พลังงานสามารถประดิษฐ์มาจากกฎข้อแรกของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งกล่าวว่า อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงานในก้อนมวลจะเท่ากับปริมาณ พลังค์ความร้อนที่ให้แก่มวลบวก กับอัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่างๆ ที่กระทำบนก้อนมวลนั้น [3]

$$\begin{aligned} \rho \frac{D}{Dt} \left(e + \frac{V^2}{2} \right) = & \rho \dot{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{\partial (up)}{\partial x} - \frac{\partial (vp)}{\partial y} \\ & - \frac{\partial (wp)}{\partial z} + \frac{\partial (u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (u\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (u\tau_{zz})}{\partial z} + \frac{\partial (v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (v\tau_{zy})}{\partial z} \\ & + \frac{\partial (w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \end{aligned} \quad (2.8)$$

โดยแต่ละพจน์จะมีความหมายแตกต่างกันโดยสามารถแบ่งได้ 3 พจน์หลักโดยพจน์ A คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน element of fluid พจน์ B คือปริมาณพลังค์ความร้อนที่ให้แก ก้อนมวล และพจน์ C คืออัตราของงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงต่าง ๆ บนก้อนมวลนั้น หากพิจารณา สมการนี้โดยละเอียดจะเห็นได้ว่าแต่ละพจน์จะค่อนข้างซับซ้อนเป็นอย่างมากในทางคณิตศาสตร์ โดย พจน์ส่วนใหญ่จะเป็นพจน์แบบไม่เชิงเส้นซึ่งจะเป็นผลต่อเนื้อทำให้มีความซับซ้อนในการประยุกต์ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข โดยเฉพาะหลายพจน์ทางด้านขวามือเป็นพจน์เชิงอนุพันธ์ของผลคูณระหว่าง ความเร็วและความเค้นในทิศทางต่าง ๆ กัน

2.2.4 เงื่อนไขขอบเขต

ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์ขึ้นอยู่กับเงื่อนไข ขอบเขต (Boundary conditions) และลักษณะรูปร่างของปัญหาอีกด้วยเช่น ในการคำนวณหา ภาวะการไหลในห้องนั่งเล่นที่มีรูปร่างลักษณะใดลักษณะหนึ่ง หากกำหนดให้อากาศที่ไหลผ่านทางช่อง ระบายอากาศนั้นมีความเร็วในแต่ละตำแหน่งที่แตกต่างกัน ก็จะเกิดให้ผลลัพธ์ของภาวะการไหลใน ห้องที่แตกต่างกันด้วย ทั้งๆที่ยังแก้ระบบสมการอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์ชุดเดียวกันและลักษณะ รูปร่างของปัญหาที่เหมือนกัน เป็นต้น

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ถูกต้องเหมาะสมนั้นไม่สามารถทำได้โดยง่าย ในบางกรณีอาจมี ผลต่อการสร้างขนาดของโดเมนเพื่อใช้ในการคำนวณ เช่น โดเมนต้องกว้างมากเพียงพอที่ทำให้เงื่อนไข ขอบเขตที่กำหนดตลอดขอบของโดเมนนั้นใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด การกำหนดเงื่อนไข

ขอบเขตที่ไม่เหมาะสมหรือไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง อาจก่อให้เกิดผลลัพธ์ที่เปลี่ยนแปลงไปจากความเป็นจริงได้เป็นอย่างมาก นอกจากนี้ยังกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ถูกต้องเหมาะสม ยังขึ้นอยู่กับความเข้าใจในชนิดของระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์ภายใต้ภาวะของการไหลที่ทำการศึกษายู่อยู่ในรูปแบบของสมการเอลลิปติก พาราโบลิก ไฮเพอร์โบลิกหรือผสมผสานกัน

เมื่อปัญหามีเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions) ที่ไม่เหมือนกัน รวมทั้งลักษณะรูปร่าง (Geometries) ที่ไม่แตกต่างกัน จะก่อให้เกิดผลลัพธ์ของสภาวะการไหลที่หลากหลาย ทำให้ผู้วิเคราะห์เกิดความเข้าใจในปัญหานั้น ๆ ได้ดีมากยิ่งขึ้น และในขณะเดียวกันจะเกิดความสนุกสนานที่เกิดจากการแก้ปัญหาในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนาเวียร์-สโตกส์ ที่สามารถทำให้ผลลัพธ์ต่าง ๆ มากมายที่ทำได้ยากกลับมายั่งยืนทำให้เกิดความรู้สึกลอยากแก้ปัญหาลักษณะเช่นนี้ต่อไปในอนาคต และเกิดความชอบในการศึกษาความรู้เกี่ยวกับพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamics) ซึ่งแตกต่างออกไปจากความรู้สึกแบบอื่นที่เคยได้รับการศึกษาความรู้เรื่องพลศาสตร์ของไหลก่อนหน้านี้อย่างสิ้นเชิง

2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

แบบจำลองเป็นข้อจำกัดการผสมของสารสามตัวแปรซึ่งความหนาแน่นของการผสมสามารถแสดงได้เป็นการรวมกันแบบเชิงเส้นของส่วนประกอบความหนาแน่น โดยข้อสมมุติฐานที่ใช้ในแบบจำลองก็คือ

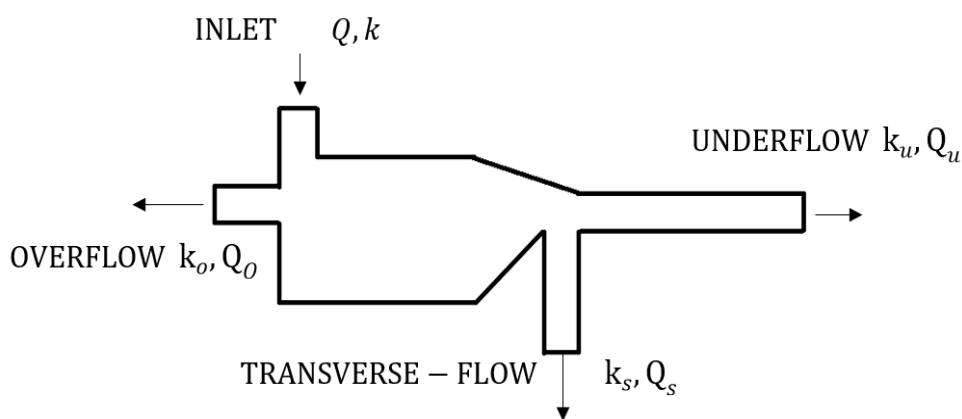
- 1) กระแสการไหลทั้งหมดอยู่ภายใต้สนามแรงเหวี่ยง
- 2) การแยกสารดังกล่าวอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่มีอุณหภูมิเท่ากันหรือมองข้ามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่เกิดจากสนามแรงเหวี่ยง
- 3) กระบวนการแยกสารเกิดขึ้นที่สถานะคงตัวซึ่งจะไม่มี การรวมตัวกันของสารหรือการบดผสมกันของอนุภาคของสารที่เกิดขึ้นในไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาค

ภายใต้เงื่อนไขข้อสมมุติฐานด้านบนสามารถเขียนได้พร้อมกันแบบเดียวของเครื่องแยกสารไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาคตามรูปที่ 2.4 อัตราการไหลรวมของการป้อนจำเป็นต้องเท่ากับผลรวมของอัตราการไหลของทางออกการไหลด้านบน ด้านข้างและด้านล่าง ถ้าไม่มีการสะสมของวัสดุในเครื่องแยกสาร โดยมีสมการสมดุลสำหรับอัตราการไหล Q , Q_o , Q_s และ Q_u แทนการไหลเข้า, การไหลออกด้านบน, การไหลออกด้านข้าง, และการไหลออกด้านล่าง เป็นต้นตามลำดับสามารถเขียนเป็นสมการ [1] ได้ดังนี้

$$Q = Q_o + Q_s + Q_u \quad (2.9)$$

สมมูลของอัตราการไหลจำเป็นที่จะต้องนำไปประยุกต์ใช้กับขนาดใดๆก็ตามของการป้อนค่าของการไหลเข้าถ้าไม่มีการเปลี่ยนแปลงในขนาดอนุภาคของสารภายในเครื่องแยกสารไฮโดรไซโคลอนฉะนั้นสมการสมมูลสำหรับการแยกสารสามารถเขียนได้เป็น [1]

$$kQ = k_o Q_o + k_s Q_s + k_u Q_u \quad (2.10)$$



รูปที่ 2.4 แผนผังสำหรับการแยกของสามส่วนประกอบของการผสมในไฮโดรไซโคลอนแบบสามวัฏภาค

2.4 การคาดการณ์ของประสิทธิภาพการแยกของสาร

ประสิทธิภาพโดยรวมของการแยกวัฏภาคสามารถกำหนดเป็นอัตราส่วนของอัตราการไหลของการแยกออกจากกันของหยดหรืออนุภาคต่ออัตราการไหลของการป้อนสารผสมในไฮโดรไซโคลอนแบบสามวัฏภาค สำหรับประสิทธิภาพการแยกของน้ำมัน $\eta_{s,oil}$ สามารถแสดงได้เป็น [1]

$$\eta_{s,oil} = \frac{k_o Q_o}{kQ} \quad (2.11)$$

สำหรับประสิทธิภาพการแยกของแข็งหรือทรายสำหรับการทดลอง $\eta_{s,sand}$ สามารถแสดงได้เป็น [18]

$$\eta_{s,sand} = \frac{k_s Q_s}{kQ} \quad (2.12)$$

จากสมการการคาดการณ์ประสิทธิภาพการแยกของสารทั้งสองสมการนี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อการศึกษาทดลองงานวิจัยขั้นนี้ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และการทดลองจริงได้ จะส่งผลให้การพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนได้ดีขึ้นโดยจะสามารถก้าวข้ามต้นทุนในการทดลองได้ดีขึ้น

2.5 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) หรือการไหลที่ไม่เป็นระเบียบ โดยทั่วไปจะเกิดขึ้นกับของไหลที่มีความหนืด (Viscosity) ต่ำและไหลด้วยความเร็วสูง หรือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ของไหลไหลผ่านมีขนาดเล็กเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของไหลที่ไหลภายในท่อ รูปแบบการไหลของไหลทิศทางและความเร็วที่ไม่แน่นอน และมีการผสมกันระหว่างชั้นของไหลในขณะเคลื่อนที่ ลักษณะการไหลของของไหลมีความสำคัญต่อการเลือกใช้อุปกรณ์เครื่องมือวัดให้เหมาะสมกับการใช้งานโดยสามารถพิจารณาได้จากค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Numbers, Re) ซึ่งเป็นตัวเลขที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติของไหลที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ (Temperature) และความดัน (Pressure) ได้แก่ ความหนาแน่น (ρ) และความหนืด ความเร็วของของไหล ที่ไหลภายในท่อและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อของไหลในท่อที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะมีตัวเลขเรย์โนลด์สูง โดยจะมีค่าเรย์โนลด์วิกฤติเป็นตัวบ่งบอกถึงการเปลี่ยนลักษณะการไหลแบบราบเรียบเปลี่ยนแปลงเป็นลักษณะการไหลแบบปั่นป่วนโดยจะมีตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ที่ 2,300 โดยถ้าตัวเลขเรย์โนลด์อยู่ต่ำกว่า 2,300 คือการไหลแบบราบเรียบ แต่ถ้าตัวเลขเรย์โนลด์มากกว่า 4,000 คือการไหลแบบปั่นป่วนโดยค่าตัวเลขเรย์โนลด์สามารถหาได้จาก [1]

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.13)$$

เมื่อ	Re	=	จำนวนเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number)
	V	=	ความเร็วการไหล (เมตรต่อวินาที)
	D	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (เมตร)
	ρ	=	ความหนาแน่นของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรกำลังสาม)
	μ	=	ความหนืดของของไหล (กิโลกรัมต่อเมตรวินาที)

ซึ่งแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจะมีสมการที่ใช้ในการศึกษาหลายรูปแบบซึ่งสำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบมาตรฐานมาใช้ในการแก้ปัญหาการแยกสารของไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาค

2.5.1 แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Reynolds Stress Model (RSM)

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนแบบ Reynolds stress model (RSM) คือแบบจำลองที่ถือว่าซับซ้อนมากที่สุดของแบบจำลอง Reynolds – averaged Navier-Stokes ที่โปรแกรม ANSYS Fluent มีให้ โดยจะมีการตั้งสมมุติฐานโดยไม่นำค่า isotropic eddy-viscosity hypothesis มาใช้ในการคำนวณ แบบจำลอง RSM เป็นชนิดแบบปิดในการคำนวณของสมการ the Reynolds-averaged

Navier-Stokes โดยทำการคำนวณสมการ transport สำหรับการหา Reynolds stresses ไปพร้อมกันกับสมการ dissipation rate

เนื่องจาก RSM มีผลกระทบกับ streamline แบบเส้นโค้ง แบบหมุน แบบการโคจรหรือหมุนเวียน และการเปลี่ยนแปลงโดยทันทีทันใดในค่าอัตราความเครียด (strain rate) ในรูปแบบที่จะมีความละเอียดของผลจากการคำนวณมากขึ้นกว่าแบบหนึ่งหรือสองสมการซึ่งจะมีศักยภาพในการคำนวณผลของลักษณะการไหลที่มีการไหลแบบซับซ้อนได้มากขึ้น โดยแบบจำลองของ pressure-strain และพจน์ dissipation-rate เป็นสิ่งที่ทำให้อายอย่างมากและบ่อยครั้งการพิจารณาอาจมีผลต่อความถูกต้องของการคำนวณของแบบจำลอง การใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบ RSM จำเป็นต้องใช้เมื่อลักษณะการไหลเป็นผลมาจาก anisotropy ใน Reynolds stresses ตัวอย่างเช่น การไหลแบบไซโคลน กระแสไหลวนสูงในห้องเผาไหม้ การไหลหมุนเวียนการไหล และความเครียดที่เกิดจากการไหลเวียนภายในท่อ เป็นต้น

2.5.1.1 สมการการเปลี่ยนถ่ายของแบบจำลอง Reynolds Stress Model

ผลเฉลยสมการการเปลี่ยนถ่ายของแบบจำลอง Reynolds Stress Model ($\overline{\rho u'_i u'_j}$) สามารถเขียนได้ตามนี้ [4]

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) = & -\frac{\partial}{\partial x_k}[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p'(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)}] \\ & + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \\ & + p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - 2\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}) + S_{user} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Local Time Derivative

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (2.15)$$

Convection Term

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{\rho u_k u'_i u'_j}) \quad (2.16)$$

Turbulent diffusion ($D_{T,ij}$)

$$-\frac{\partial}{\partial x_k}[\overline{\rho u'_i u'_j u'_k} + \overline{p'(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)}] \quad (2.17)$$

Molecular diffusion ($D_{L,ij}$)

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{u'_i u'_j}) \right] \quad (2.18)$$

Stress production (P_{ij})

$$-\rho \left(\overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \quad (2.19)$$

Buoyancy production (G_{ij})

$$-\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \quad (2.20)$$

Pressure Strain (ϕ_{ij})

$$\overline{p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)} \quad (2.21)$$

Dissipation (ε_{ij})

$$-2\mu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}} \quad (2.22)$$

Production by System Rotation (F_{ij})

$$-2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} \varepsilon_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} \varepsilon_{jkm}) \quad (2.23)$$

2.5.1.2 Modeling Turbulent Diffusive Transport

แบบจำลองการเปลี่ยนถ่าย Turbulent diffusion ($D_{T,ij}$) โดยแบบจำลองทั่วไปของ gradient-diffusion ของ Daly and Harlow [5] อย่างไรก็ตามสมการดังกล่าวได้ถูกโปรแกรม ANSYS Fluent นำประยุกต์ใช้กับ scalar turbulent diffusivity ตามสมการดังต่อไปนี้ [4]

$$D_{T,ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right) \quad (2.24)$$

โดยแบบจำลอง Turbulent Viscosity (C_μ) จะใช้สมการในการคำนวณคือ

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.25)$$

โดยให้ C_μ เท่ากับ 0.09

2.5.1.3 Modeling The Pressure-Strain Term (Linear)

ค่าเริ่มต้นของ Pressure-Strain Term (ϕ_{ij}) ในสมการ (2.26) จะเป็นสมการที่สอดคล้องกับบทความวิจัยของ Gibson and Launder [6] Fu et al. [7] และ Launder [8] โดยรูปแบบทั่วไปของแบบจำลองโดยสามารถแยกออกได้ดังนี้

$$\phi_{ij} = \phi_{ij,1} + \phi_{ij,2} + \phi_{ij,w} \quad (2.26)$$

โดยที่ $\phi_{ij,1}$ คือพจน์ slow pressure-strain

$\phi_{ij,2}$ คือพจน์ rapid pressure-strain

$\phi_{ij,w}$ คือพจน์ wall-reflection

พจน์ slow pressure-strain ($\phi_{ij,1}$) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_{ij,1} \equiv -C_1 \rho \frac{\varepsilon}{k} [\overline{u'_i u'_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k] \quad (2.27)$$

โดยให้ C_1 เท่ากับ 1.8

พจน์ rapid pressure-strain ($\phi_{ij,2}$) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\phi_{ij,2} \equiv -C_2 [(P_{ij} + F_{ij} + \frac{5}{6} G_{ij} - C_{ij}) - \frac{2}{3} \delta_{ij} (P + \frac{5}{6} G - C)] \quad (2.28)$$

โดยให้ C_2 เท่ากับ 0.6

พจน์ wall-reflection ($\phi_{ij,w}$) จะเป็นสมการที่หาค่า normal stress ใกล้เคียงโดยจะมีความสัมพันธ์ที่เกี่ยวข้องกันโดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \phi_{ij,w} = & C'_1 \frac{\varepsilon}{k} (\overline{u'_k u'_m n_k n_m} \delta_{ij} - \frac{3}{2} \overline{u'_i u'_k n_j n_k} - \frac{3}{2} \overline{u'_j u'_k n_i n_k}) \frac{C_1 k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon d} \\ & + C'_2 (\phi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \phi_{ik,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \phi_{jk,2} n_i n_k) \frac{C_1 k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon d} \end{aligned} \quad (2.29)$$

โดยให้ C'_1 เท่ากับ 0.5 C'_2 เท่ากับ 0.3 n_k จะเป็นส่วนหนึ่งของ x_k ที่เป็น unit normal ของผนัง d เป็นระยะของผนัง และ $C_1 k^{\frac{3}{2}}$ โดยค่า C_1 เท่ากับ 0.09 และ k คือค่าคงที่ของ von karman เท่ากับ 0.4187 ซึ่งค่า พจน์ wall-reflection ($\phi_{ij,w}$) จะถูกรวมอยู่ในค่าตั้งต้นของ Reynolds Stress Model

2.5.1.4 Effects of Buoyancy on Turbulence (G_{ij})

ผลของค่าแรงลอยตัวที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนโดยแบบจำลองที่มีเงื่อนไขในการเกิดจากแรงลอยตัวสามารถเขียนได้ดังนี้

$$G_{ij} = -\rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) \quad (2.30)$$

$$\overline{U_i \theta} = \frac{\mu_t}{Pr_t} \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2.31)$$

โดยที่ Pr_t คือ Turbulent Prandtl number of energy โดยค่าตั้งต้นเท่ากับ 0.85

การอธิบายความหมายของ coefficient of thermal expansion (β) สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (2.32)$$

ผลของแรงลอยตัวที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อใช้สำหรับการคำนวณก๊าซในอุณหภูมิต่ำสามารถใช้สมการดังนี้

$$G_{ij} = -\frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \left(g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) \quad (2.33)$$

2.5.1.5 Modeling the Turbulent Kinetic Energy

โดยทั่วไปเมื่อ turbulent kinetic energy จำเป็นต้องถูกใช้งานในพจน์ที่กำหนดขึ้นโดยตาม Reynolds stress tensor

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (2.34)$$

ซึ่งจะทำการอธิบายโดย Wall Boundary Conditions ซึ่งเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่สามารถใช้งานได้ในการแก้ปัญหาคำนวณ transport equation สำหรับ turbulent kinetic energy เพื่อที่จะให้เกิดเงื่อนไขขอบเขตสำหรับ Reynolds stress ในกรณีนี้ของสมการแบบจำลองคือ

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon (1 + 2M_t^2) + S_k \quad (2.35)$$

โดย σ_k เท่ากับ 0.82 และ S_k จะเป็นพจน์ที่จะเป็นผู้ใช้หรือนักพัฒนาที่กำหนดสมการเพิ่มเติมได้สำหรับ Reynolds stress

2.5.1.6 Modeling the Dissipation Rate (ε_{ij})

สมการ Dissipation (ε_{ij}) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} (\rho \varepsilon + Y_m) \quad (2.36)$$

โดย $Y_m = 2\rho \varepsilon M_t^2$ เป็นการเพิ่มเติมพจน์ dilatation dissipation สอดคล้องกับแบบจำลองของ Sarkar [9] โดยจะมีพจน์ของ Turbulent Mach number กำหนดตามสมการดังต่อไปนี้

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \quad (2.37)$$

โดยที่ $a (\equiv \sqrt{\gamma RT})$ คือค่าความเร็วของเสียงซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการอัดตัวซึ่งจะสามารถใช้ได้เมื่อการอัดตัวจากกฎของก๊าซอุดมคติ

Scalar dissipation rate (ε) เป็นการคำนวณแบบจำลองของสมการ transport คล้ายคลึงกับการใช้ในแบบจำลอง standard $k-\omega$ โดยสามารถเขียนสมการได้ดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] C_{\varepsilon 1} \frac{1}{2} [P_{ii} + C_{\varepsilon 3} G_{ii}] \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2 \rho} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.38)$$

โดย σ_ε เท่ากับ 1.0 $C_{\varepsilon 1}$ เท่ากับ 1.44 $C_{\varepsilon 2}$ เท่ากับ 1.92 $C_{\varepsilon 3}$ เป็นการประมาณค่าในส่วนของการคำนวณของทิศทางการไหลต่อทิศทางของสนามแรงดึงดูดของโลก

ในกรณีเมื่อแบบจำลอง Reynolds stress คือ coupled กับสมการ omega โดยแบบจำลอง Dissipation tensor (ε_{ij}) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\varepsilon_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho \beta_{RSM}^* k \omega \quad (2.39)$$

โดยที่ β_{RSM}^* คือการกำหนดในพจน์แบบจำลอง Pressure-Strain และ Specific dissipation rate (ω) โดยจะทำการคำนวณทิศทางเดียวกันกับแบบจำลอง standard $k - \omega$

2.5.1.7 Modeling the Turbulent Viscosity (μ_t)

แบบจำลอง Turbulent Viscosity (μ_t) จะมีลักษณะคล้ายคลึงกับแบบจำลอง standard $k - \omega$ โดยสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.40)$$

โดย C_μ เท่ากับ 0.09

2.5.1.8 Convective Heat and Mass Transfer Modeling

สำหรับ Reynolds stress model ใน ANSYS Fluent จะมีการใช้ Turbulent heat transport เป็นแบบจำลองใช้กับ Reynolds' analogy กับ turbulent momentum transfer โดยแบบจำลองสมการ energy เขียนได้ดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(k + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right] + S_h \quad (2.41)$$

โดย E เป็นค่าพลังงานรวม (total energy) และ $(\tau_{ij})_{eff}$ คือ deviatoric stress tensor สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (2.42)$$

โดยพจน์ที่เกี่ยวข้องกับ $(\tau_{ij})_{eff}$ จะถูกแทนที่ด้วย viscous heating และ จะทำการคำนวณใน density based solvers แต่จะไม่นำไปคำนวณใน pressure-based solver ทั้งนี้ทั้งนั้นสามารถที่จะทำการคำนวณได้ในช่อง Viscous Model dialog box โดยโปรแกรมจะทำการกำหนดค่า prandtl number มีค่าเท่ากับ 0.85 เช่นเดียวกันกับ turbulent mass transfer โดยค่าตั้งต้นของ turbulent Schmidt number เท่ากับ 0.7

2.5.2 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างวัฏภาค (Interphase Exchange Coefficients)

จากสมการอนุรักษ์โมเมนตัมสำหรับวัฏภาคของไหล (q) คือ

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \\ \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad (2.43)$$

และสำหรับโมเมนต์สำหรับภูมิภาคของแข็ง (s^{th})

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ \sum_{l=1}^N (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl}) + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s} + \vec{F}_{td,s}) \end{aligned} \quad (2.44)$$

การเปลี่ยนถ่ายโมเมนต์ระหว่างภูมิภาคซึ่งเป็นพื้นฐานค่าของสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของไหลและ สำหรับการไหลแบบเม็ดเล็กๆ สำหรับการสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของแข็ง

2.5.2.1 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของไหล (Fluid-Fluid Exchange Coefficient)

สำหรับการไหลของไหล-ของไหล แต่ละภูมิภาคลำดับที่สองจะมีการสมมติฐานรูปแบบหยดหรือฟองอากาศซึ่งจะส่งผลต่อวิธีการของแต่ละของไหลที่จะกำหนดให้แก่แต่ละภูมิภาค โดยสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายสำหรับการไหลหลายประเภทเช่น ฟองอากาศ ของไหล-ของไหล หรือ ก๊าซ-ของไหล โดยสามารถเขียนสมการในรูปแบบทั่วไป คือ

$$K_{pq} = \frac{\rho_p f}{6\tau_p} d_p A_i \quad (2.45)$$

โดย A_i คือ พื้นที่สัมผัส (interfacial area)

f คือ สมการแรงต้านทาน (drag) จะกำหนดโดยความแตกต่างของแบบจำลองสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างภูมิภาคการไหล

τ_p คือ เวลาความอ่อนไหวของอนุภาค (Particulate relaxation time) โดยสมการเขียนสมการ คือ

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (2.46)$$

โดย d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของฟองอากาศหรือหยดของสาร p

สำหรับแต่ละส่วนภูมิภาค ในการไหลของของไหล-ของไหล โดยสามารถเลือกใช้แบบจำลองสมการความต้านทานเพื่อแก้ปัญหา เช่น

แบบจำลอง Schiller and Naumann [10]

แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองพื้นฐานที่โปรแกรมจะกำหนดให้เพื่อใช้ในการแก้ปัญหา

$$f = \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2.47)$$

$$\text{โดย } C_D = \begin{cases} 24(1 + 0.15 \text{Re}^{0.687}) / \text{Re} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.44 & \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (2.48)$$

ซึ่ง Re จะเป็นความสัมพันธ์ของ Reynolds stress number โดยจะกำหนด ภูมิภาคอันดับแรกคือ p และ ภูมิภาคอันดับที่สอง คือ q โดยจะมีรูปแบบ คือ

$$\text{Re} = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad (2.49)$$

ความสัมพันธ์ของ Reynolds stress number สำหรับภูมิภาคอันดับที่สอง p และ r โดยจะมีรูปแบบ คือ

$$\text{Re} = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p| d_{rp}}{\mu_{rp}} \quad (2.50)$$

โดย $\mu_{rp} = \alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r$ คือ ความหนืดของส่วนผสม ของภูมิภาค p และ r แบบจำลอง Morsi and Alexander [11]

แบบจำลองนี้สามารถมีสมการเพื่อใช้ในการแก้ปัญหาคือ

$$f = \frac{C_D \text{Re}}{24} \quad (2.47)$$

ซึ่งรูปแบบดังกล่าวจะเหมือนกับสมการ 2.47 แต่จะมีค่าแตกต่างที่พจน์ C_D คือ

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2} \quad (2.51)$$

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ a_i จะถูกกำหนดได้ตามค่า Reynolds Number (2.52)

Reynolds number	a_1	a_2	a_3
0-0.1	0	24	0
0.1-1	3.690	22.73	0.0903
1-10	1.222	29.1667	-3.8889
10-100	0.6167	46.50	-116.67
100-1000	0.3644	98.33	-2778
1000-5000	0.357	148.62	-47500
5000-10000	0.46	-490.546	578700
มากกว่า 10000	0.5191	-1662.5	5416700

แบบจำลอง Morsi and Alexander เป็นชุดที่สมบูรณ์แบบที่สุดโดยการปรับฟังก์ชันการทำงานให้ครอบคลุมในช่วงของตัวเลข Reynolds stress numbers ให้มีความละเอียด แต่การคำนวณด้วยโมเดลนี้อาจมีความเสถียรน้อยกว่าแบบจำลองการแก้ปัญหาอื่น ๆ

2.5.2.2 สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของแข็ง (Fluid-Solid Exchange Coefficient)

สัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างของไหล-ของแข็ง (K_{sl}) โดยสามารถเขียนรูปแบบทั่วไปคือ

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (2.53)$$

โดย f คือ สมการแรงต้านทาน (drag) จะกำหนดโดยความแตกต่างของแบบจำลองสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่ายระหว่างวัฏภาคการไหล

τ_p คือ เวลาความอ่อนไหวของอนุภาค (Particulate relaxation time) โดยสมการเขียนสมการ คือ

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_l} \quad (2.54)$$

โดย d_s คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของวัฏภาคของแข็ง การกำหนดค่าสมการต้านทาน (drag function) จะประกอบไปด้วย drag function (C_d) ซึ่งจะเห็นส่วนประกอบของความสัมพันธ์ Reynolds number (Re_s) โดยค่าต่างๆ เหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงตามแบบจำลองสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนถ่าย

แบบจำลอง Hulin-Gidaspow [12]

แบบจำลองนี้จะเหมาะสมเมื่อของปริมาณสัดส่วนของปริมาตรมีค่าน้อยกว่า 0.2

$$K_{sl} = \psi 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_l) \mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1.75 \frac{\alpha_s \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} + (1 - \psi) \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_l \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{d_s} \alpha_l - 2.65 \quad (2.55)$$

โดย พจน์ stitching (ψ) จะเขียนได้ คือ

$$\psi = \frac{1}{2} + \frac{\arctan(262.5(\alpha_s - 0.2))}{\pi} \quad (2.56)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_l Re_s} \left[1 + 0.15(\alpha_l Re_s)^{0.687} \right] \quad (2.57)$$

และ

$$Re = \frac{\rho_l d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_l|}{\mu_l} \quad (2.58)$$

2.6 การไหลแบบหลายวัฏภาค

ในกลศาสตร์ของไหลการไหลแบบหลายวัฏภาคคือการไหลในขณะในเวลาเดียวกันหรือพร้อมกันของสารที่มีความต่างวัฏภาคหรือสถานะ เช่น ก๊าซ ของเหลว หรือ ของแข็ง เป็นต้น หรือสารที่มีความแตกต่างทางคุณสมบัติทางเคมีแต่มีวัฏภาคหรือสถานะคล้ายคลึงกัน เช่น ระบบของเหลว-ของเหลว หยดน้ำมันในน้ำ สำหรับการพิจารณาเพื่อทำการแยกสารเหล่านี้จะกำหนดปริมาณสัดส่วนของปริมาตร (Volume fraction) โดยต้องมีการรวมปริมาณของสารต่างๆ ให้เป็นหนึ่งเดียว และสมการการไหลเดียวกัน โดยสมการอนุรักษ์สำหรับการไหลแต่ละชนิดของสารนั้นจะสามารถเขียนได้ง่ายขึ้น [3]

2.6.1 แนวทางการสร้างแบบจำลองแบบหลายวัฏภาค

ในโปรแกรม ANSYS Fluent แบบจำลองหลายวัฏภาคที่แตกต่างกันสามวัฏภาคแบบออยเลอร์แบ่งได้เป็นแบบจำลองแบบปริมาตรของของไหล (The volume of fluid; VOF) แบบจำลองแบบผสม (The mixture model) และแบบจำลองออยเลอร์ (The Eulerian model) [3]

- 1) แบบจำลองแบบปริมาตรของของไหล (The volume of fluid; VOF) เป็นแบบจำลองชนิดหนึ่งที่ใช้วิธีแบบตามรอยพื้นผิวที่นำมาประยุกต์ใช้กับตาข่ายที่ตำแหน่งคงที่แบบวิธีออยเลอร์ซึ่งถูกออกแบบสำหรับสารของไหลสองชนิดหรือมากกว่านั้นที่ผสมเข้ากันไม่ได้ที่ตำแหน่งของผิวสัมผัสระหว่างของไหลที่สนใจ แบบจำลองดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นมาจากสมการโมเมนตัมเพียงสมการเดียวโดยของไหลและส่วนของปริมาตรของแต่ละของเหลวในการคำนวณแต่ละเซลล์จะถูกติดตามตลอดขอบเขต การประยุกต์ของแบบจำลอง VOF Model ประกอบไปด้วยการไหลแบบเป็นชั้นๆ การไหลแบบพื้นผิวอิสระ การเคลื่อนที่ของฟองอากาศขนาดใหญ่ในของไหลหลังจากการป้อนของไหล การคาดการณ์ของหัวฉีด(แรงตึงผิว) และ คงตัวหรือการติดตามขึ้นกับเวลา ของของไหลแบบของเหลว-ก๊าซ เป็นต้น
- 2) แบบจำลองแบบผสม (The mixture model) ถูกออกแบบสำหรับของไหลหรืออนุภาคแบบสองวัฏภาคหรือวัฏภาคมากกว่านั้น แบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองแบบออยเลอร์แบบหนึ่งแบบจำลองแบบผสมจะแก้ปัญหาสำหรับสมการโมเมนตัมวัฏภาคผสมและกำหนดความเร็วสัมพัทธ์ในการอธิบายการกระจายของวัฏภาค การนำไปประยุกต์ของแบบจำลองผสมประกอบไปด้วยกระแสการไหลที่รับภาระอนุภาคกับการบรรทุบน้ำหนักไม่มากนัก การไหลของฟองอากาศ การตกตะกอน และเครื่องแยกสารแบบไซโคลน เป็นต้น โดยแบบจำลองแบบผสมสามารถใช้งาน

โดยปราศจากความสัมพันธ์ทางความเร็วสำหรับการกระจายของวิภูภาคต่อแบบจำลองการไหลหลายวิภูภาคที่เป็นเนื้อเดียวกัน

- 3) แบบจำลองออยเลอร์ (The Eulerian model) คือความซับซ้อนของแบบจำลองแบบหลายวิภูภาคในโปรแกรม ANSYS Fluent การแก้ปัญหาที่กำหนดค่า n ของสมการโมเมนตัมและความต่อเนื่องสำหรับของแต่ละวิภูภาค การจับคู่คือการบรรจุเป้าหมายผ่านความดันและสัมประสิทธิ์แลกเปลี่ยนภายใน ในลักษณะความสัมพันธ์ซึ่งควบคุมเป็นคู่กันขึ้นอยู่กับชนิดของวิภูภาคที่เกี่ยวข้องกัน เช่น กระแสการไหลแบบเม็ด (ของเหลว-ของแข็ง) เป็นควบคุมความแตกต่างกว่าการไหลที่ไม่เป็นแบบเม็ด (ของเหลว-ของเหลว) คุณสมบัติหลายอย่างเกิดจากการนำไปใช้ประโยชน์ ทฤษฎีพลังงานจลน์ การแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างวิภูภาคที่ขึ้นกับชนิดของสารผสมในแบบจำลอง การนำไปใช้ประโยชน์ของแบบจำลองหลายวิภูภาคของออยเลอร์เช่น ฟลูอิดไรซ์เบด คอลัมน์ฟอง อนุภาคสารแขวนลอย เป็นต้น

2.6.2 การเปรียบเทียบแบบจำลอง

โดยปกติจะมีการกำหนดระบบการไหลแทนที่ระบบการไหลแบบหลายวิภูภาคซึ่งจะสามารถเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมที่ตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- 1) สำหรับการไหลแบบฟอง การไหลแบบหยด และการไหลเป็นชั้นๆ ในรูปแบบวิภูภาคผสมหรือการแยกของวิภูภาค ส่วนของปริมาตรเกิน 10 เปอร์เซ็นต์จะสามารถใช้แบบจำลองทั้งแบบผสมและแบบออยเลอร์ได้
- 2) สำหรับการไหลฟองอากาศมีขนาดเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ และฟิล์มของของเหลวเคลื่อนที่ไปตามผนังของท่อระหว่างฟองอากาศ และแท่งของของเหลวอาจมีฟองอากาศมีฟองขนาดเล็กเกิดขึ้น (Slug flow) สามารถใช้ VOF Model
- 3) สำหรับการไหลที่อยู่ในสภาวะที่ของไหลที่เป็นของเหลวมีผิวที่สัมผัสกับอากาศการไหล (Stratified/free-surface flows) สามารถใช้ VOF Model
- 4) สำหรับการส่งผ่านที่เกี่ยวข้องกับลม (Pneumatic transport) ใช้แบบจำลองผสมสำหรับการไหลแบบเนื้อเดียวกันหรือแบบจำลองออยเลอร์สำหรับการไหลของเม็ด (Granular flow)
- 5) สำหรับการไหลแบบฟลูอิดไรซ์เบด (fluidized beds) สามารถใช้แบบจำลองทั้งแบบออยเลอร์ (The Euler Model) สำหรับการแบบเป็นเม็ด (Granular flow)

- 6) สำหรับการไหลของสารละลายและการเคลื่อนที่ของน้ำ (slurry flows and hydrotransport) สามารถใช้แบบจำลองผสม (the mixture) และแบบจำลองแบบออยเลอร์ได้ (The Euler Model)
- 7) สำหรับการตกตะกอน (sedimentation) สามารถใช้แบบจำลองแบบออยเลอร์ (The Euler Model)
- 8) สำหรับกรณีทั่วไป การไหลหลายเป็นเป็นการไหลแบบซับซ้อนที่เกี่ยวข้องกับระบบการไหลหลายแบบการเลือกทุกลักษณะของการไหลเป็นที่น่าสนใจที่สุดและการเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับชนิดการไหล

แบบจำลองแบบปริมาตรของของไหล (The volume of fluid; VOF) จะเหมาะสมสำหรับการไหลที่อยู่ในสถานะที่ของไหลที่เป็นของเหลวมีผิวที่สัมผัสกับอากาศการไหล (Stratified/free-surface flows) และแบบจำลองผสม (the mixture Model) และแบบจำลองแบบออยเลอร์ได้ (The Euler Model) จะเหมาะสมกับการไหลแบบที่วัฏภาคของแต่ละสารมีการผสมกันหรือแยกกันโดยส่วนของปริมาตร (volume fractions) ควรจะเกิน 10 เปอร์เซ็นต์

โดยวิธีการเลือกระหว่างแบบจำลองผสม (The Mixture Model) กับแบบจำลองออยเลอร์ (The Euler Model) ควรจะพิจารณาตามหลักเกณฑ์ดังต่อไปนี้

- 1) ถ้าความกว้างของการกระจายของวัฏภาค (ตัวอย่างเช่นการเปลี่ยนแปลงขนาดของอนุภาคและความใหญ่ของอนุภาคโดยไม่สามารถแยกจากการไหลได้ตั้งแต่แรก) แบบจำลองแบบผสมอาจจะดีกว่าถ้าการกระจายของวัฏภาคที่มีความเข้มข้นเพียงในส่วนขอบเขตควรที่จะใช้แบบจำลองแบบออยเลอร์ได้ (The Euler Model) แทน
- 2) แบบจำลองออยเลอร์ (The Euler Model) โดยปกติจะใช้ในการกำหนดผลความถูกต้องกว่าแบบจำลองผสม (The Mixture Model) แม้ว่าที่ผ่านมาจะใช้ได้เหมือนกันทั้งคู่
- 3) สำหรับกรณีแก้ปัญหาทั่วไปซึ่งต้องการผลจากการคำนวณไม่มากนักแบบจำลองผสม (The Mixture Model) อาจจะดีกว่าสำหรับตัวกรณีแบบนี้ การแก้ปัญหามการที่มีจำนวนตัวเลขไม่มากเมื่อเทียบกับแบบจำลองออยเลอร์ (The Euler Model) ถ้าความแม่นยำจะมีความสำคัญกว่าเมื่อเทียบผลของการคำนวณสำหรับกรณีแบบนี้แบบจำลองออยเลอร์ (The Euler Model) จะเป็นตัวเลือกที่ดีกว่า อย่างไรก็ตามที่ความซับซ้อนของแบบจำลองออยเลอร์ (The Euler Model) สามารถที่ทำการคำนวณให้ผลที่คงตัวน้อยกว่าแบบจำลองผสม (The Mixture Model)

โดยเหตุนี้การวิจัยในครั้งนี้นี้จึงเลือกใช้แบบจำลองออยเลอร์ (The Euler Model) เพราะมีการไหลภายในตัวไฮโดรโซโคลนแบบความซับซ้อนจึงต้องอาศัยความแม่นยำของการคำนวณมากกว่าแบบจำลองผสม (The Mixture Model)

2.6.3 ความเสถียรและการลู่เข้า

การแก้ปัญหาของระบบหลายภูมิภาคที่โดยธรรมชาติจะมีความยากและเป็นปัญหาสำหรับความเสถียรและการลู่เข้าของปัญหา เมื่อการแก้ปัญหาเป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเวลาสนามที่เริ่มต้นเหมาะสมคือสิ่งที่ต้องการหลีกเลี่ยงความไม่มั่นคงซึ่งโดยปกติจะเกิดขึ้นจากสนามที่เริ่มต้นแบบต่างๆ ถ้าเวลาของระบบคำนวณในคอมพิวเตอร์จะเกี่ยวข้องกับปัญหาในการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับเวลา (Transient problems) ซึ่งจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดที่จะใช้คอมพิวเตอร์แบบทั่วไป เมื่อแรงจากน้ำหนักวัตถุเป็นแบบเฉพาะตัวหรือถ้ากระบวนการแก้ปัญหาต้องการระบบคำนวณเชิงตัวเลขที่ละเอียดจึงมีการใช้ช่วงเวลาทีละน้อยๆซึ่งจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพหลังจากใช้ช่วงเวลาทีละน้อยดีกว่าจะใช้การประมาณค่าสนามความดันสำหรับการแก้ปัญหาที่คงตัวควรที่จะใช้การแก้ปัญหาหลายภูมิภาคแบบควบคู่กันไปธรรมชาติการทำซ้ำที่ต้องการแก้ปัญหาก็จะเริ่มต้นได้ดีขอบเขตการติดตั้ง ถ้ามีความยากลำบากในการแก้ปัญหาเนื่องจากกระบวนการคำนวณเชิงตัวเลขที่มีกำลังค่อนข้างสูงหรือเนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาอาจจะจำเป็นต้องลดค่าตัวเลขคูเรนต์ (Courant number) โดยค่าเริ่มต้นของค่าตัวเลขคูเรนต์ (Courant number) คือ 200 แต่สามารถลดลงให้ต่ำสุดได้เท่ากับ 4 สามารถปรับค่ากระบวนการทำซ้ำให้เพิ่มจำนวนการดำเนินงานขึ้นจะทำให้ค่าออกแบบมีความเสถียรมากกว่าเดิม ยิ่งไปกว่านั้นมีความชัดเจนภายใต้ตัวแปรที่มีความยืดหยุ่นสำหรับตัวแปรความเร็วและความดัน

2.7 ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method)

ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) เป็นวิธีการในการลดรูปของสมการอนุพันธ์ย่อยให้อยู่ในรูปของพีชคณิตเพื่อให้สามารถหาค่าอย่างง่าย การสร้างสมการมีลักษณะคล้ายกับระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือระเบียบวิธีการผลต่าง (Finite Difference Method) ไฟไนต์วอลุ่มจะอ้างอิงถึงพื้นที่ผิวที่อยู่รอบๆ จุดต่อ (Node Point) การคำนวณเป็นแบบปริพันธ์ (Integral) สมการอนุพันธ์ที่ประกอบไปด้วยค่าเวกเตอร์ของสมการพื้นผิวแต่ละพื้นผิว ความได้เปรียบของระเบียบวิธีนี้คือสามารถใช้ได้ดีในแบบจำลองที่มีการแบ่งเอลิเมนต์ที่ไม่เป็นระเบียบ (Unstructured Mesh)

ในหัวข้อนี้แสดงการแก้ปัญหาการไหลที่สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สามารถแสดงให้อยู่ในรูปทั่วไปของตัวแปร ϕ ได้และแก้สมการรูปทั่วไปของสมการความต่อเนื่องสำหรับการไหลในสามมิติได้ดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i}) + S_\phi \quad (2.59)$$

2.7.1 การกระจายพจน์สำหรับปัญหาการพาและการแพร่กระจาย

จากสมการ (2.59)

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i}) + S_\phi$$

สมการเชิงอนุพันธ์พื้นฐานที่นำมาแก้สมการ โดยสามารถใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) มาเปลี่ยนรูปแบบของสมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อยให้เป็นสมการพีชคณิต โดยทำการอินทิเกรตตลอดปริมาตรควบคุม Control Volume จะได้เป็นดังนี้

$$\int_{cv} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dv + \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\phi u_i) dv = \int_{cv} \frac{\partial}{\partial x_i}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i}) dv + \int_{cv} S_\phi dv \quad (2.60)$$

จากสมการ 2.24 เป็นสมการพื้นฐานในรูปทั่วไปที่เขียนในรูปอินทิเกรต เมื่อทำการพิจารณาเป็นปัญหาการแพร่กระจายและการพาในสามมิติจะได้

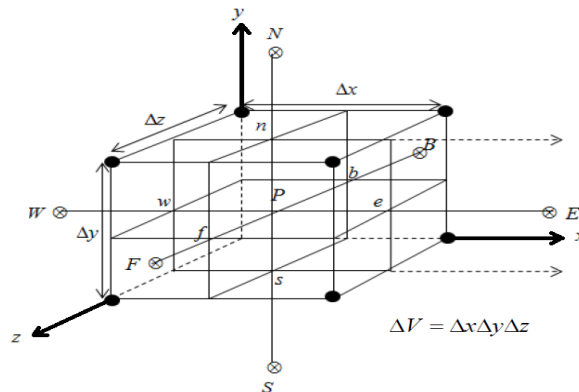
$$\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}) + S_\phi \quad (2.61)$$

เปลี่ยนรูปสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยการใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยทำการอินทิเกรตสมการเริ่มต้นตลอดปริมาตรควบคุม

$$\int_{\Delta V} \left[\frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} \right] dV = \int_{\Delta V} \left[\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}) + S_\phi \right] dV \quad (2.62)$$

พิจารณาในปริมาตรควบคุมในสามมิติรูปที่ 2.5

$$\begin{aligned} \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} dx dy dz = \\ \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}) dx dy dz + \int_{\Delta V} S_\phi dV \end{aligned} \quad (2.63)$$



รูปที่ 2.5 การวางตัวของปริมาตรควบคุมในปริมาตรสามมิติ

โดยกำหนดให้ $A_e = A_w = 1 \times \Delta y$, $A_n = A_s = 1 \times \Delta x$ และ $A_b = A_f = 1 \times \Delta z$

2.7.1.1 พจน์การพา (Convection term)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho v \phi)}{\partial y} dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial(\rho w \phi)}{\partial z} dx dy dz = \quad (2.64)$$

$$[(\rho u A)_e \phi_e - (\rho u A)_w \phi_w] + [(\rho v A)_n \phi_n - (\rho v A)_s \phi_s] + [(\rho w A)_b \phi_b - (\rho w A)_f \phi_f]$$

สามารถเขียนแสดงฟลักซ์ที่ไหลผ่านปริมาตรควบคุมได้ดังนี้

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออก (E)

$$(\rho u A)_e \phi_e = F_e \phi_e \quad (2.64a)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตก (W)

$$(\rho u A)_w \phi_w = F_w \phi_w \quad (2.64b)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศเหนือ (N)

$$(\rho v A)_n \phi_n = F_n \phi_n \quad (2.64c)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศใต้ (S)

$$(\rho v A)_s \phi_s = F_s \phi_s \quad (2.64d)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (B)

$$(\rho w A)_f \phi_f = F_f \phi_f \quad (2.64e)$$

ฟลักซ์ที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตกเฉียงใต้ (F)

$$(\rho w A)_b \phi_b = F_b \phi_b \quad (2.64f)$$

เมื่อ F คือ $\rho u A$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน

2.7.1.2 พจน์การแพร่กระจาย (Diffusion term)

$$\int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy dz + \int_{\Delta V} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) dx dy dz =$$

$$\left[\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] + \left[\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n - \Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s \right] +$$

$$\left[\Gamma_b A_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_b - \Gamma_f A_f \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_f \right] \quad (2.65)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออก (E)

$$\Gamma_e A_e \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \Gamma_e A_e \frac{(\phi_E - \phi_P)}{\delta x_{PE}} = D_e (\phi_E - \phi_P) \quad (2.65a)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตก (W)

$$\Gamma_w A_w \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w = \Gamma_w A_w \frac{(\phi_P - \phi_W)}{\delta x_{WP}} = D_w (\phi_P - \phi_W) \quad (2.65b)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศเหนือ (N)

$$\Gamma_n A_n \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_n = \Gamma_n A_n \frac{(\phi_N - \phi_P)}{\delta x_{PN}} = D_n (\phi_N - \phi_P) \quad (2.65c)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศใต้ (S)

$$\Gamma_s A_s \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_s = \Gamma_s A_s \frac{(\phi_P - \phi_S)}{\delta x_{SP}} = D_s (\phi_P - \phi_S) \quad (2.65C)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (B)

$$\Gamma_f A_f \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_f = \Gamma_f A_f \frac{(\phi_F - \phi_P)}{\delta x_{PF}} = D_f (\phi_F - \phi_P) \quad (2.65d)$$

การแพร่กระจายที่ไหลผ่านผิวปริมาตรควบคุมทิศตะวันตกเฉียงใต้ (F)

$$\Gamma_b A_b \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_b = \Gamma_b A_b \frac{(\phi_P - \phi_B)}{\delta x_{BP}} = D_b (\phi_P - \phi_B) \quad (2.65e)$$

เมื่อ D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่กระจาย ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{\Gamma A}{\delta x}$

2.7.1.3 Source term

สามารถประมาณค่า Source term ในรูปของความสัมพัทธ์เชิงเส้น

$$S_\phi = S_u + S_p \phi_P \quad (2.66)$$

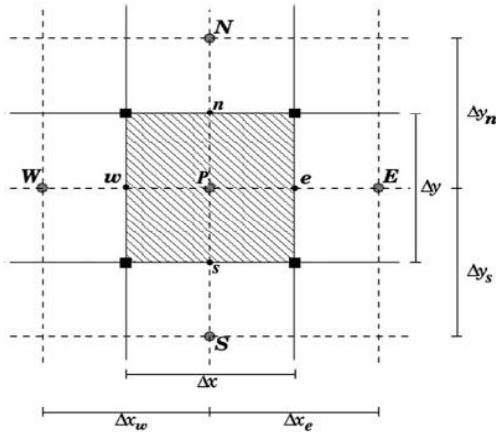
เมื่อ S_u คือ พจน์ค่าคงที่

S_p คือ พจน์สัมประสิทธิ์ของ ϕ_P

หลังจากนั้นทำการอินทิเกรตสมการ 2.66 จะได้

$$\int_{\Delta V} S_{\phi} dV = S_u \Delta V + S_p \phi_p \Delta V \quad (2.67)$$

2.7.2 การประมาณค่าโดยใช้แบบแผนตัวเลข (spatial discretization)



รูปที่ 2.6 แสดงการสาธิตโครงร่างตาข่ายแบบสองมิติความสัมพันธ์ระหว่างเซลล์ที่ใช้อ้างอิงและเซลล์ใกล้เคียง [4]

เมื่อทำการประมาณค่า ϕ บนปริมาตรควบคุม สามารถหาได้จากการประมาณค่าด้วย Scheme ต่างๆ เช่น Upwind differencing scheme, Second order Upwind differencing scheme, Power-law scheme และ Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics (Quick) เป็นต้น จากรูป 2.6 เป็นตัวอย่างลักษณะของเซลล์อย่างง่ายในสองทิศทางกับจุดศูนย์กลางของการพิจารณาเซลล์เรียกว่า Node โดยรูปแบบความแตกต่างของสมการการอนุรักษ์ที่ตำแหน่ง Node ตามสมการดังต่อไปนี้

$$0 = -(V_x A \phi)_e + (V_x A \phi)_w - (V_x A \phi)_n + (V_x A \phi)_s - (V_x A \phi)_e + \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w + \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n + \left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s + S_{\phi} V \quad (2.68)$$

สมการอนุรักษ์ทั้ง 4 ทิศทางในสมการ 2.54 สามารถคำนวณได้ตามสมการข้างต้นสำหรับตัวอย่างในทิศทาง e คือ

$$\left(\Gamma A \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e = \left(\Gamma_e A_e \frac{(\phi_P - \phi_E)}{\delta x_{EP}} \right) \quad (2.68a)$$

เมื่อ

$$\delta x_{EP} = \text{ระยะระหว่าง Node E และ P}$$

โดยค่าใหม่ของ ϕ_e ที่ตำแหน่งพื้นที่ของ Node e จะสามารถหาค่าจาก ϕ ที่รู้ค่าก่อนหน้านี้ที่ตำแหน่งใกล้เคียงกลางของ Node มีหลายๆ ขั้นตอนที่จะคำนวณ ϕ_e ต่อไปนั่นเอง

2.7.2.1 Upwind Differencing scheme (UDS)

โดย scheme นี้จะมีสองชนิดที่นำมาใช้ คือ แบบ first order upwind scheme และ second order upwind scheme ซึ่ง first order upwind scheme เป็น scheme ที่ทั่วไปและค่อนข้างที่จะเสถียรแต่มีความแม่นยำของผลเฉลยค่อนข้างต่ำ ส่วน second order upwind scheme จะให้ความแม่นยำของผลเฉลยที่มากกว่านั่นเอง เพื่อหลีกเลี่ยงการลู่ออก (divergence) ของผลเฉลยเนื่องจากค่าผลเชิงลบ ทิศทางของแรง ตัวอย่างเช่น $F_e = \rho V_x$ เป็นค่าสำหรับการตัดสินผลของ ϕ_e ตามสมการดังต่อไปนี้

1) first order upwind

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ } F_e > 0 \quad (2.69)$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ } F_e < 0 \quad (2.70)$$

2) Second Order Upwind

$$\phi_e = \phi_p \quad \text{เมื่อ } F_e > 0 \quad (2.71)$$

$$\phi_e = \phi_E \quad \text{เมื่อ } F_e < 0 \quad (2.72)$$

2.7.2.2 Central differencing scheme (CDS)

$$\phi_E = \frac{\delta x_{Ee} \phi_E + \delta x_{eP} \phi_P}{\delta x_{EP}} \quad (2.73)$$

2.7.2.3 Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetic (Quick)

$$\phi_e = -\frac{1}{8} \phi_{ee} + \frac{6}{8} \phi_E + \frac{3}{8} \phi_P \quad (2.74)$$

แม้ว่า scheme ต่างๆจะมีความเหมาะสมในการเลือกใช้ หลังการทำซ้ำหลายๆครั้งจะทำให้ได้ค่าใหม่ ϕ คือบางครั้งจะมีค่าที่เหมือนกันง่ายกว่าการที่จะนำค่าที่ไม่มีความเสถียรมาใช้เพื่อความเหมาะสมหรือการลู่ออกนั่นเอง (Divergence) ภายใต้อัตราตัวแปรที่มีความผ่อนคลาย (Under-relaxation factor) เป็นค่าที่ควบคุมกันเพื่อที่จะลดการเปลี่ยนแปลงค่าครั้งละมากๆของค่าใหม่ที่ได้จากการคำนวณในการทำซ้ำ (Iteration) หลายๆครั้ง คือ

$$\phi_{eff} = \phi_{old} + \alpha \Delta \phi \quad (2.75)$$

เมื่อ

ϕ_{eff} คือ ค่าที่เกิดจาก ϕ ที่นำมาใช้คำนวณ

ϕ_{old} คือ ค่าเก่าของ ϕ จากการคำนวณซ้ำ (Iteration) ก่อนหน้า

$\Delta \phi$ คือ ความแตกต่างใหม่ระหว่างและค่าเก่าของ ϕ หลังจากการทำซ้ำ

2.7.3 การประมาณค่าตัวเลขแบบชั่วขณะ (Temporal discretization)

การประมาณค่าตัวเลขแบบชั่วขณะเป็นกระบวนการในการแก้ปัญหาการเปลี่ยนถ่ายอนุพันธ์เวลาไปสู่รูปแบบเชิงเส้น ให้สมการอนุพันธ์เวลาของ ϕ รูปแบบของ ϕ คือ

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = F(\phi) \quad (2.76)$$

มีแบบทั่วๆไปอยู่ 2 ชนิดของการประมาณค่าตัวเลขที่ไม่ต่อเนื่อง (discretization) ที่จะใช้ในการแก้ปัญหา คือ

- 1) First order discretization

$$\frac{\phi^{n+1} - \phi^n}{\Delta t} = G(\phi) \quad (2.77)$$

- 2) Second order discretization

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = G(\phi) \quad (2.78)$$

เมื่อ

ϕ^{n+1} คือ ค่าของ ϕ ที่เวลาขั้นถัดไป ($t + \Delta t$)

ϕ^n คือ ค่าของ ϕ ที่เวลาปัจจุบัน (t)

ϕ^{n-1} คือ ค่าของ ϕ ที่เวลาก่อนหน้า ($t - \Delta t$)

$G(\phi)$ คือ ค่าตัวแปรตัวใหม่ของ ϕ ที่ซึ่งกำหนดค่าจาก $F(\phi)$ โดยอ้างถึงกระบวนการแก้ปัญหาดังนี้

Explicit Method

$$G(\phi) = F(\phi^n) \quad (2.79)$$

Implicit Method

$$G(\phi) = F(\phi^{n+1}) \quad (2.80)$$

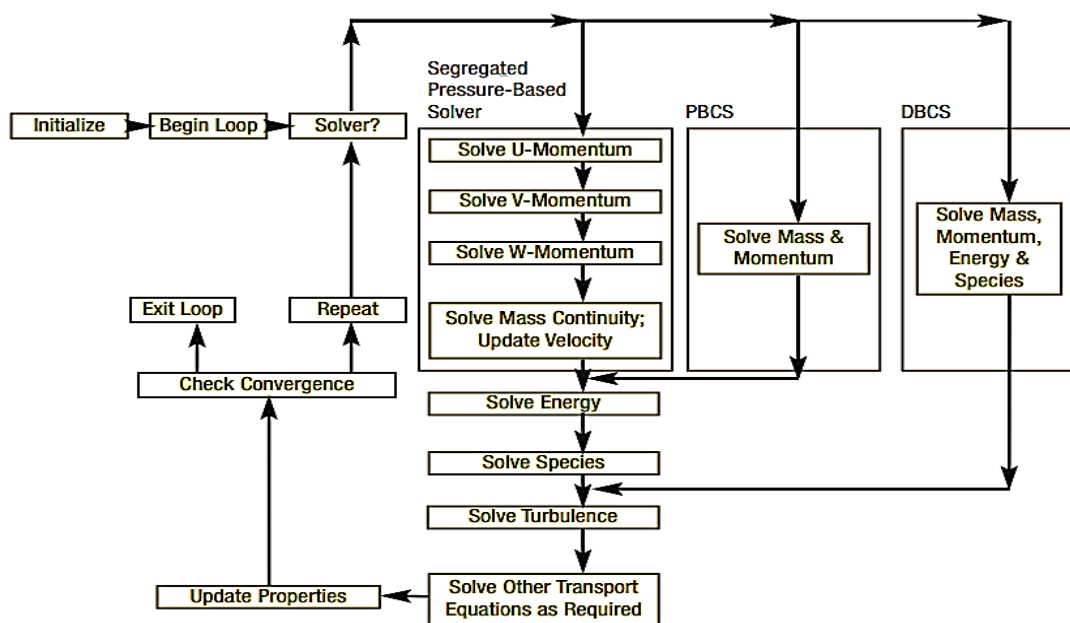
Crank-Nicolson Method

$$G(\phi) = \frac{F(\phi^n) + F(\phi^{n+1})}{2} \quad (2.81)$$

ถ้ามีการเลือกอนุพันธ์แบบไม่ต่อเนื่อง (discretization) กับ second order ที่เป็นรูปแบบของสมการของ Implicit method ถูกเรียกว่า second order Implicit method โดยกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับปัญหาพลศาสตร์ของไหล

2.7.4 Coupling (Solution algorithm)

สำหรับโปรแกรม ANSYS Fluent ในการหาค่าผลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) เป็นการแก้ปัญหาภายใต้การพัฒนาที่ยาวนานเพื่อความแข็งแกร่งในความแม่นยำของค่าผลเฉลยสำหรับความกว้างขวางในการทำการศึกษาค่าของโปรแกรมเชิงพาณิชย์โดยโปรแกรมจะมีการทำการคำนวณในหลายลักษณะ แบบที่หนึ่งก็คือ Density-based coupled (DBCS) ใช้ในการคำนวณการไหลของระบบ Coupled ของสมการผลศาสตร์ของไหล (Continuity momentum และ Energy) แบบที่สอง คือ Pressure-based algorithm ที่ใช้ในการแก้ปัญหาสมการที่ใช้วิธีการคำนวณแบบแยกออก (segregated or uncoupled manner) โดยวิธีดังกล่าวจะสามารถใช้ในการทำงานที่ค่อนข้างกว้างกว่าในแบบจำลองเชิงฟิสิกส์ เช่น การไหลหลายวัฏภาค การถ่ายเทความร้อน หรือการเผาไหม้ ซึ่งการนำไปประยุกต์ต่างๆเหล่านี้ แต่ก็ไม่สามารถใช้สำหรับการยืนยันการลู่เข้าของผลเฉลยได้



รูปที่ 2.7 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการในการคำนวณของโปรแกรม ANSYS Fluent

ทำให้นักพัฒนาโปรแกรมเชิงพาณิชย์ดังกล่าวได้นำเสนอ Franklyn J. Kelecy [4] แบบกระบวนการในการแก้ปัญหาที่คล้ายคลึงกันคือ Pressure-based coupled solver (PBCS) โดยระบบดังกล่าวจะทำการแก้ปัญหาของระบบสมการความต่อเนื่อง (Continuity) และโมเมนตัม (Momentum) ไปแบบพร้อมๆกันจะทำให้ผลเฉลยของทั้งสองสมการมีความใกล้เคียงกันกว่าการแยกคำนวณผลเฉลยกว่าวิธีการที่ใช้แก้ปัญหาท่อน้ำ ทั้งนี้ทั้งนั้น Coupling นำไปสู่การพัฒนาความแม่นยำของผลเฉลยเช่น ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ที่เกิดจากการกำหนดค่าขอบเขตเงื่อนไขเริ่มต้น รูปร่างที่ไม่เป็นเชิงเส้นของแบบจำลองการศึกษา หรือแม้กระทั่งการสร้างกริดที่ไม่สมดุลในแบบจำลอง

นั้นจะไม่สร้างผลกระทบต่อความเสถียรของกระบวนการทำซ้ำของผลเฉลยสุดท้าย กระบวนการ Pressure-based coupled solver (PBCS) สามารถที่จะนำไปใช้ในการศึกษาแบบจำลองได้หลายอย่างเช่น การไหลที่ทำปฏิกิริยากัน (reacting flows) การไหลที่มีรูพรุน (porous media) และ การไหลแบบหลายวัฏภาค (Multiphase flow) โดยกระบวนการทำงานของ Pressure-based coupled solver (PBCS) เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการใกล้เคียงเป็นไปตามรูป

แผนผังตามรูป 2.7 ได้แสดงการคำนวณหาค่าของสองกระบวนการคือ Pressure-based solver และ Density-based solver ในการคำนวณกระบวนการแบบแยกคตินั้น (segregated or uncoupled manner) จะทำการแยกคตสมการโมเมนตัมสำหรับหาส่วนประกอบความเร็วต่อหนึ่งช่วงเวลาซึ่งเป็นสมการแบบสเกลาร์ แล้วจึงทำการแยกคตสมการสำหรับหามวลและความดัน ซึ่งการใช้กระบวนการดังกล่าวคำนวณนั้นจะทำการลู่เข้าช้าลงกว่าที่ควรจะเป็น สำหรับกรณีการคงอยู่ของความดันและความเร็วของแบบจำลอง

ซึ่งกระบวนการ Pressure-based coupled solver (PBCS) จะมีความแตกต่างในกระบวนการคำนวณก็คือจะมีการคำนวณสมการความต่อเนื่อง (Continuity) และโมเมนตัม (Momentum) ไปแบบพร้อมๆกันในระบบเมทริกเดียวกันนั่นเองแต่ PBCS จะไม่ทำการคำนวณสมการพลังงานรวมเข้าไป โดยกระบวนการดังกล่าวจะเป็นกระบวนการสำคัญในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมของการไหลและช่วยในการประหยัดเวลาสำหรับการคำนวณหาผลเฉลย (Time to Convergence) เมื่อเทียบกับทั้งสองกระบวนการ

บทที่ 3

ทบทวนวรรณกรรม

การทบทวนวรรณกรรมแบ่งเป็นหัวข้อสำคัญ 4 ส่วนคือ การศึกษาไฮโดรไฮโคลนแบบทั่วไป ไฮโดรไฮโคลนเพื่อแยกสาร ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง การพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไฮโคลน แนวทางการปรับปรุงไฮโดรไฮโคลนเพื่อแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การศึกษาไฮโดรไฮโคลนทั่วไป

งานวิจัยในช่วงยุคแรกๆของการศึกษาจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวกับการแยกสารที่มีวัฏภาคของสารที่ต้องการแยกเพียงแค่สองวัฏภาคเท่านั้น ด้วยเหตุผลในด้านเทคโนโลยีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แต่เมื่อเวลาผ่านไปเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้นและการที่วัตถุดิบต่างๆเริ่มมีราคาสูงทำให้นักวิจัยต้องการศึกษาเพื่อจะพัฒนาประสิทธิภาพการแยกสารของไฮโดรไฮโคลน ให้มีประสิทธิภาพการแยกเพิ่มมากขึ้น งานวิจัยที่ศึกษาจึงเริ่มมีการศึกษาการแยกสารแบบสามวัฏภาคเป็นที่นิยมขึ้นมา ทำให้การศึกษาจึงแบ่งออกเป็นสองกลุ่มโดยมีแบบการศึกษาการแยกสารแบบสองวัฏภาคและแบบสามวัฏภาค

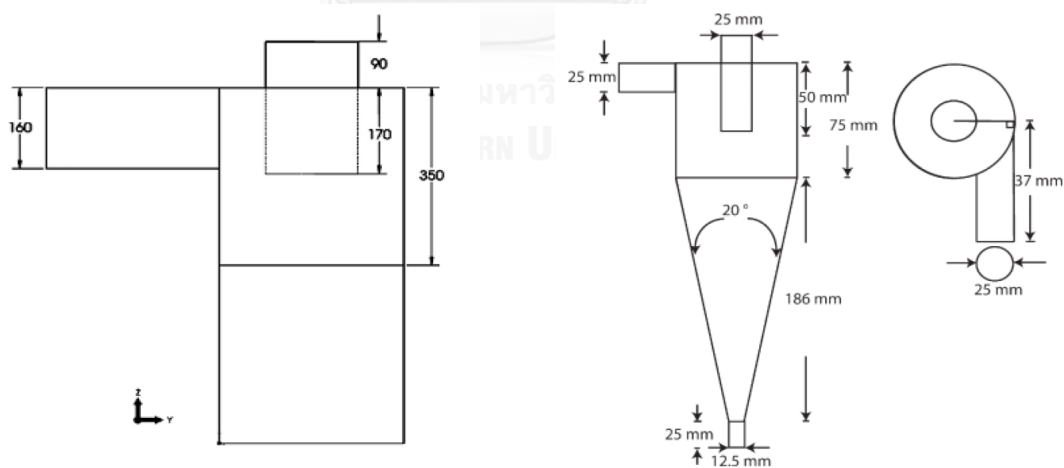
3.1.1 ไฮโดรไฮโคลนที่มีการแยกสารแบบสองวัฏภาค

งานวิจัยในช่วงแรกของการพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไฮโคลนนั้นเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแยกสารแบบสองวัฏภาคที่มีการผสมกัน เนื่องมาจากข้อจำกัดของเทคโนโลยีและการใช้งานในแต่ละประเภทของอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยที่เป็นพื้นฐานและน่าสนใจควรค่าต่อการค้นคว้าหาความรู้มีหลายรูปแบบไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องการทดลองเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรไฮโคลนว่ารูปร่างแบบไหนถึงมีประสิทธิภาพในการแยกสารมากกว่ากัน การใช้เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการวัดเพื่อสังเกตรูปแบบการเคลื่อนที่ของสารภายในไฮโดรไฮโคลนหรือแม้กระทั่งงานวิจัยที่ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไฮโคลน โดยงานวิจัยที่น่าสนใจเหล่านี้เป็นพื้นฐานของการพัฒนาประสิทธิภาพของการแยกโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแยกสารของไฮโดรไฮโคลนที่มีสองสถานะมีดังนี้

C. Rosales et al. [13] การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไฮโคลนที่มีรูปร่างแตกต่างกันคือ รูปร่างแบบทรงกระบอก และ รูปร่างแบบสี่เหลี่ยมซึ่งวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ ซึ่งสารที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้นเป็นการแยกสารผสมแบบน้ำมันและน้ำใช้กระบวนการศึกษาแบบ Large Eddy Simulation model ซึ่งเป็นการไหลแบบปั่นป่วน อัตราการไหลของน้ำมันจะมีการติดตามศึกษาสำหรับทางออกด้านบนและทางออกด้านล่าง

ของไฮโดรไซโคลอน โดยผลที่มีการเปรียบเทียบของแต่ละไฮโดรไซโคลอนเพื่อทำการประเมินประสิทธิภาพในการแยกของไฮโดรไซโคลอนที่มีรูปร่างแตกต่างกันคือ รูปร่างแบบทรงกระบอก และรูปร่างแบบสี่เหลี่ยม

งานวิจัยดังกล่าวใช้ซอฟต์แวร์ทางด้าน Computational Fluid Dynamics ในการสร้างแบบจำลองสามมิติและแก้สมการ transient NS equations ซึ่งจะมีการแสดงรูปร่างและขนาดของไฮโดรไซโคลอนแบบสี่เหลี่ยมและเป็นการแสดงรูปร่างและขนาดของไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกระบอก ซึ่งทั้งสองแบบจะต้องมีการสร้างตารางกริดของแบบจำลองทั้งสองโดยแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนแบบสี่เหลี่ยมและแบบทรงกระบอกตามลำดับ มีคุณสมบัติที่ใช้พิจารณาดังนี้ ความหนาแน่นน้ำมัน (Oil density) เท่ากับ 500 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) ความหนืดของน้ำมัน (Oil viscosity) เท่ากับ 1.06 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที (kg/m-s) ความหนาแน่นของน้ำ (Water density) เท่ากับ 998.2 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) และ ความหนืดของน้ำ (Water viscosity) เท่ากับ 0.001 กิโลกรัมต่อเมตร-วินาที (kg/m-s) กระบวนการที่สมมุติขึ้นมานี้จะมีความเรียบง่ายสำหรับการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลข (Numerical) สองภูมิภาคเพื่อพิจารณากล่าวคือน้ำและน้ำมันโดยใช้ความเร็วขาเข้า 10 เมตรต่อวินาทีสำหรับส่วนผสมระหว่างน้ำและน้ำมัน การผสมของสารทางด้านขาเข้าจะมีคุณสมบัติ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำและ 50 เปอร์เซ็นต์ในปริมาตรของน้ำมันโดยสมมุติการดำเนินการของคอมพิวเตอร์ใช้ 10 วินาทีในการวิเคราะห์ไฮโดรไซโคลอนแบบสี่เหลี่ยม และ แบบทรงกระบอก



รูปที่ 3.1 ด้านซ้าย คือ รูปไฮโดรไซโคลอนทรงสี่เหลี่ยม รูปด้านขวาคือรูปไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกระบอก Rosales et al. [13]

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นที่มีความผิดปกติไปเกิดขึ้นจากการสูญเสียโมเมนตัมจากการที่รูปร่างของไฮโดรไซโคลอนแบบสี่เหลี่ยม มีค่ามุมที่มีความคมตรงตำแหน่งที่ติดกับผนัง โดยไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกระบอกอัตราการไหลของน้ำมันจะมากขึ้นในทางออกด้านบนมากกว่าทางออกข้างล่าง ซึ่ง

พฤติกรรมดังกล่าวนี้คาดการณ์ว่าเนื่องมาจากความหนาแน่นที่น้อยกว่าของน้ำมัน โดยในการเปรียบเทียบระหว่างการแยกสารผสมของน้ำและน้ำมันระหว่างไฮโดรไซโคลนแบบทรงกระบอกกับแบบสี่เหลี่ยมโดยแบบทรงกระบอกจะมีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีกว่า แสดงให้เห็นว่ารูปร่างของไฮโดรไซโคลนที่เป็นแบบสี่เหลี่ยมนั้นไม่เหมาะสมในการใช้งานได้จริง ถ้าต้องการจะใช้งานให้ได้จริงนั้น ต้องมีการแก้ปัญหาที่เกิดจากการสูญเสียโมเมนตัมในไฮโดรไซโคลนแบบสี่เหลี่ยมและศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความเร็วขาเข้าในไฮโดรไซโคลนซึ่งทั้งสองกรณีจะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพให้ไฮโดรไซโคลนแบบสี่เหลี่ยม

Dai et al. [14] เครื่องมือในการวัดชนิดหนึ่งคืออุปกรณ์การวัดที่ใช้ laser ในการทำงานได้ถูกเรียกว่า Particle Dynamics Analyzer (PDA) ซึ่งจะวัดค่าส่วนประกอบความเร็วตามแนวรัศมีและตามแนวแกน ขนาดของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลนคือการวัดและการติดตามการกระจายของอนุภาคของแข็งที่ได้รับ ในการวิเคราะห์หลักการแยกตามหลักกลศาสตร์ของอนุภาคของแข็งเป็นเหตุผลหลักในการไหลออกของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่สู่ทางออกทางด้านบนและรอยขีดข่วนบนผนังของไฮโดรไซโคลน การวัดที่เป็นรูปแบบ PDA ได้รับการตรวจสอบเพื่อใช้สำหรับแบบจำลองการวัดของการเคลื่อนที่ของของแข็งและอนุภาคของไหลในการไหลแบบสองวัฏภาคซึ่งเป็นการศึกษาแบบจำลองของความเร็วของขนาดของอนุภาคและความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งในไฮโดรไซโคลน

การวิจัยดังกล่าวได้พบสิ่งที่น่าสนใจเกี่ยวกับรูปแบบการเคลื่อนที่ของอนุภาคตามแนวความเร็วแบบต่างๆ จึงได้ข้อสรุปดังนี่คือความเร็วตามแนวแกนและความเร็วตามแนวรัศมีที่เป็นส่วนประกอบของความเร็วมีผลกระทบสำคัญแต่การแยกในการแสดงตัวอย่างของอนุภาคที่มีการไหลเวียนที่มีลักษณะเป็นเกลียวภายในซึ่งบางส่วนจะเคลื่อนที่ออกทางด้านบนและบางอนุภาคที่มีการไหลวนภายในจะเคลื่อนที่ไหลไปไหลวนตามแนวรอบนอกต่อจนเคลื่อนที่ไหลลงด้านล่างของช่องทางออกที่อยู่ส่วนด้านบน (vortex finder) ของตัวไฮโดรไซโคลนและจะมีการแยกกันอีกครั้งหนึ่ง ผลที่ได้เหล่านี้เป็นการบ่งชี้ว่า Equilibrium orbit theory ซึ่งสมมุติว่าอนุภาคที่มีการไหลวนอยู่ภายในจะเคลื่อนที่ออกทางด้านบนและการไหลวนรอบนอกเคลื่อนที่ออกทางด้านล่างนั้นควรต้องมีการปรับปรุง ความเร็วตามแนวรัศมีของอนุภาคมีผลต่อลักษณะเฉพาะในการแยกสารของไฮโดรไซโคลน ความสำคัญของส่วนประกอบความเร็ว สำหรับการแยกอนุภาคของแข็งจากของไหลการเพิ่มขึ้นความเร็วตามแนวรัศมีจากแนวผนังสู่ตรงกลางของไฮโดรไซโคลนนั้นจะมีค่าสูงสุดใกล้พื้นที่ผิวหน้าระหว่างอากาศและน้ำ (air core) แล้วก็จะลดลงเมื่อเงื่อนไขอื่น ๆ ไม่เปลี่ยนแปลงก็สามารถพบกับการลดลงของความเร็วเชิงมุมของอนุภาคขนาดใหญ่ที่มากกว่าของอนุภาคขนาดเล็กที่ตำแหน่งเดียวกัน ทางออกด้านบนนั้นมีการกระจายความเร็วของ อนุภาคของแข็งมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนจากของไหล เพื่อที่จะพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนควรจะลดพื้นที่ด้านบนให้เยอะเท่าที่จะ

เป็นไปได้เพราะจากความคล้ายคลึงกันของความเร็วตามแนวแกนของอนุภาคของแข็งในส่วนด้านล่างของชิ้นส่วนทรงกรวย

การกระจายความเข้มข้นของขนาดอนุภาคจากผลการทดลองบ่งชี้ว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ที่อยู่ใกล้ผนังจะทำให้มีรอยขีดข่วนที่ผนังเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากโมเมนต์ที่ตำแหน่งดังกล่าวค่อนข้างสูงที่เกิดจากอนุภาคขนาดใหญ่ ซึ่งเป็นหนึ่งในเหตุผลหลักของรอยขีดข่วนผนังด้านในของไฮโดรไซโคลน สิ่งที่น่าสนใจอีกอย่างหนึ่งคือสิ่งที่พบว่ามีอนุภาคบางส่วนที่ไหลออกทางด้านบนทำให้ประสิทธิภาพการแยกสารทางด้านบนมีประสิทธิภาพลดต่ำลง

L. Y. Wang et al. [15] ศึกษาตัวแปรต่างๆที่สำคัญในการประเมินประสิทธิภาพไฮโดรไซโคลนแบบของไหล-ของแข็งโดยหลักๆจะบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพในการแยกและความเร็วของของไหลโดยอัตราส่วนของไหลผสมน้ำมันและน้ำสิ่งที่ปรากฏขึ้นนั้นอนุภาคขนาดเล็กจะมีความไวค่อนข้างมากต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรซึ่งจะอธิบายตามทฤษฎีผ่านการวิเคราะห์แรงของประสิทธิภาพในการแยกสารของ Reynolds number และ Stoke number

การทดลองที่เกี่ยวข้องอนุภาคขนาดเล็กจะเคลื่อนที่จากทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนไปสะสมอยู่ด้านล่างแทนในการไหลจะใช้กำหนดตัวแปรในการทดลองตามสารผสมระหว่างน้ำและน้ำมัน โดยค่าตัวแปรที่กำหนดไว้คือ ความเร็ว 0-3 เมตรต่อวินาที (m/s) อัตราส่วนของน้ำที่ผลิตเมื่อเทียบกับปริมาณของของเหลวทั้งหมดที่ผลิต (water cut) 0.45-1 และค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของแข็งที่เข้าของไฮโดรไซโคลนเริ่มที่ 8 -18 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) โดยตัวแปรที่มีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการแยกสารแบบมีนัยสำคัญคือความเร็วขาเข้าจะมีการเปรียบเทียบระดับประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนซึ่งจะเปลี่ยนแปลงความเร็วโดยจะมีการเพิ่มขึ้นในด้านขาเข้าจาก 1.2 1.5 และ 1.7 เมตรต่อวินาทีของการป้อน การกระจายของขนาด และ อัตราส่วนของน้ำที่ผลิตเมื่อเทียบกับปริมาณของของเหลวทั้งหมดที่ผลิต (water cut) เท่ากับ 0.45 ระดับประสิทธิภาพเป็นการพัฒนาตามการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหล สำหรับอนุภาคขนาดเล็กที่มีขนาดน้อยกว่า 0.18 ไมโครเมตรลงมา ประสิทธิภาพการแยกเท่ากับ 3.42 10.39 และ 20.88 เปอร์เซ็นต์ตรงกันกับความเร็ว 1.2 1.5 และ 1.7 เมตรต่อวินาที

ผลของอัตราส่วนน้ำกับน้ำมันมีอิทธิพลต่อความหนืดจากการผสม (mixture viscosity) และ ความหนาแน่นที่เกิดจากการผสม (mixture density) ในประสิทธิภาพของการแยกสาร ความเร็วขาเข้าและขนาดของอนุภาคจะรักษาการกระจายโดยไม่แปรตามแต่ละการดำเนินการซึ่งอัตราส่วนของน้ำที่ผลิตเมื่อเทียบกับปริมาณของของเหลวทั้งหมดที่ผลิต (water cut) เท่ากับ 0.40 0.52 0.89 และ 1 ตามลำดับ มีผลให้ในการบ่งชี้ต่อประสิทธิภาพการแยกสำหรับทั้งสามขนาดที่มีค่าเพิ่มขึ้น

การทดลองสามารถวิเคราะห์ได้ว่าไฮโดรไซโคลนแบบของไหล-ของแข็ง จะมีประสิทธิภาพในการแยกสูง การแยกสาร ความเร็วขาเข้า อัตราส่วนน้ำกับน้ำมัน และขนาดการกระจายของอนุภาค

ทั้งหมดมีผลค่อนข้างมากต่อประสิทธิภาพการแยก ซึ่งการเพิ่มขึ้นของความเร็วการไหลเข้าหรือการลดลงของอัตราส่วนน้ำกับน้ำมันสามารถที่จะพัฒนาประสิทธิภาพการแยกได้ และอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีความไวอย่างมากทำให้มีการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรเกิดขึ้นประกอบไปด้วยความเร็วขาเข้า อัตราส่วนน้ำมันกับน้ำจากงานวิจัยนี้จะช่วยให้งานวิจัยต่อไปทำการศึกษาและวิเคราะห์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวแปรเหล่านี้มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกทำให้สามารถพัฒนาหาค่าที่เหมาะสมกับไฮโดรไซโคลอนที่ออกแบบขึ้นมาให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นแต่เนื่องจากในปัจจุบันการแยกสารแบบสองวัฏภาคนั้นไม่ได้แก้ปัญหาในอุตสาหกรรมได้ดีเท่าที่ควรจึงเริ่มมีการศึกษาการแยกสารแบบสามวัฏภาคโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนแยกสารที่มีสถานะที่แตกต่างกันมากขึ้นกว่าเดิมเข้ามาใช้งานแทนที่

การศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาไฮโดรไซโคลอนแบบสองวัฏภาคพบว่าการศึกษา Rosales et al. [13] มีความน่าสนใจเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของไฮโดรไซโคลอนนั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารจึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจสำหรับการปรับปรุงประสิทธิภาพการแยกสารจากการออกแบบรูปร่างของไฮโดรไซโคลอนทำได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพการแยกโดยวิธีอื่น ส่วนการศึกษา Dai et al. [14] เป็นศึกษาผลการวัดที่ใช้เลเซอร์ในการทำงานถูกเรียกว่า particle dynamics analyzer (PDA) มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาร โดยแนวคิดที่จะทำการศึกษานั้นเป็นงานวิจัยที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการหาประสิทธิภาพการแยกทำให้งานวิจัยดังกล่าวไม่มีความน่าสนใจที่จะนำไปศึกษาพัฒนาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และจากการศึกษางานวิจัยของ Wang et al. [15] ที่ทำการศึกษาตัวแปรต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของสารซึ่งตัวแปรหลายตัวที่เหมาะสมที่จะทำการศึกษาต่อไป เช่น ความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้า ขนาดของอนุภาคในการไหล และความเข้มข้นของสารต่างๆในการไหล เป็นต้น โดยตัวแปรจะศึกษาหาความสัมพันธ์เพื่อนำไปพัฒนาประสิทธิภาพการแยกสารของไฮโดรไซโคลอนที่สนใจได้ต่อไป

3.1.2 ไฮโดรไซโคลอนที่มีการแยกสารแบบสามวัฏภาค

งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยที่มีการแยกสารผสมแบบสองวัฏภาคทำให้ในปัจจุบันต้องมีการศึกษาวิจัยการแยกสารแบบสามวัฏภาคโดยใช้ไฮโดรไซโคลอนซึ่งได้รับความนิยมในการศึกษาเนื่องจากข้อจำกัดทางทรัพยากรที่ลดน้อยลงอีกทั้งยังมีราคาที่สูงขึ้นจากเดิมทำให้มีการเร่งการพัฒนาประสิทธิภาพการแยกสารของไฮโดรไซโคลอนให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้โดยการนำเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นในปัจจุบันมาประยุกต์ใช้ช่วยในการลดต้นทุนงานวิจัยและใช้ทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดให้เกิดความคุ้มค่า แต่งานวิจัยการแยกสารผสมแบบสามวัฏภาคนั้นมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นจากเดิมทำให้ต้องมีการศึกษาทดลองโดยใช้หลักการพื้นฐานการแยกสารแบบสองวัฏภาคมาเป็นหลัก

ในการศึกษาเพื่อการพัฒนาที่รวดเร็วขึ้น แต่ก็ต้องศึกษาทำความเข้าใจรูปแบบในการผสมกันของสารแบบสามวัฏภาค โดยรูปแบบของสารผสมที่มีความสำคัญมีดังนี้เช่น ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง ของเหลว-ของแข็ง และ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว เป็นต้นโดยมีบทวิเคราะห์ที่น่าศึกษาคือ

Liu et al. [16] การแยกสารแบบสามวัฏภาคของไฮโดรไซโคลนโดยจะมีการแบ่งกลุ่มของสารผสมสามวัฏภาคโดยมีรูปแบบของสารผสมในการแยกสารมี 3 ชนิดคือ เช่น ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง ของเหลว-ของแข็ง และ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว เป็นต้นซึ่งทั้งสามรูปแบบมีความยากง่ายแตกต่างกันไปเนื่องมาจากความแตกต่างของสารผสมที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสารของแต่ละรูปแบบสารผสมมีความแตกต่างกันด้วยเช่นกัน ดังนั้นจึงมีการรวบรวมและวิเคราะห์งานวิจัยจะมีการศึกษาวิจัยและการพัฒนา ไฮโดรไซโคลนในรูปแบบของการแยกสารแบบสามวัฏภาคดังนี้

3.1.2.1 การแยกสารแบบ ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง

การแยกสารที่ความหนาแน่นมีความแตกต่างกันมากทำให้การแยกสารของไฮโดรไซโคลนมีประสิทธิภาพที่ดีโดยนักวิจัยหลายคนที่ทำการศึกษาและมีแนวคิดที่น่าสนใจหลายแนวคิดเช่น แนวคิดที่เพิ่มเส้นผ่านศูนย์กลางและเพิ่มทางออกด้านล่างเป็นสองช่อง Aslin [17] หรือแม้แต่การปรับมุมของช่องทางขาเข้าให้เอียงทำมุมนั้นจะสอดคล้องกับการอธิบายของ Bednarski and Listewnik [18] ซึ่งมีการเอียงของช่องทางด้านขาเข้าจะเป็นการแยกของก๊าซ-ของเหลว ก่อนล่วงหน้าซึ่งจะสอดคล้องกับการหลีกเลี่ยงการไหลแบบผิดปกติ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพที่ได้นั้นก็ไม่ว่างกับค่าใช้จ่ายในปี 2013 แบบจำลองนี้ได้รับการปรับปรุงโดย Zhong et al. [19] โดยใช้ชิ้นส่วนของห้องทรงกระบอกขบกันเป็นชุดโดยเชื่อมต่อสู่ไฮโดรไซโคลนแบบ ก๊าซ-ของเหลวในแนวคิดนี้สามารถจะลดการไหลแบบปั่นป่วนที่รุนแรงของการไหลด้านช่องทางออกด้านล่างได้นั่นเอง

3.1.2.2 การแยกสารแบบ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว

การแยกของสารสามวัฏภาคแบบดังกล่าวนิยมใช้แยกก๊าซและน้ำ ในปี 2013 ได้มีการจดสิทธิบัตรโดย Yu et al. [20] ซึ่งแบบจำลองดังกล่าวประสิทธิภาพของการแยกก๊าซสูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์และประสิทธิภาพการแยกน้ำมันประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์จากแบบจำลองดังกล่าวได้รับการปรับปรุงโดย Zhang et al. [21] ซึ่งจะคล้ายคลึงกับ Yu et al. [20] เป็นการมีส่วนทรงกรวยสองตัวต่อกันเพื่อต้องการแยกแบบของไหลสองวัฏภาคโดยประสิทธิภาพที่ได้มีความสอดคล้องกับ Colman et al. [22] ที่ได้นำเสนอคือเมื่อมีการติดตั้งโดยการตรึงไฮโดรไซโคลนทำให้มีประสิทธิภาพของการแยกสารมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเพราะว่าอุปกรณ์ที่เพิ่มเข้าไปในส่วนขาเข้าของสารนั้นจะทำให้ไฮโดรไซโคลนมี

อาการนี้ดีกว่าเดิม ขึ้นที่ทำให้มั่นคง (stabilizer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการลดการไหลปั่นป่วนอย่างรุนแรงสำหรับการแยกของไหล-ของไหล ขึ้นส่วนดังกล่าวจะทำการติดตั้งด้านทางเข้าทางที่สองที่มีความเร็วต่ำซึ่งจะหลีกเลี่ยงการผสมกันอย่างไรก็ตามการตรึงไฮโดรไซโคลนด้านทางเข้าทำให้เกิดการหมุนแบบ Archimedes spiral ทำให้มีการผลิตที่สูงเป็นผลให้ชิ้นส่วนทรงกรวยด้านในและทรงกรวยสองตัวที่ขบกันควรจะพิจารณาเมื่อการแยกที่เกี่ยวข้องก๊าซและน้ำจากน้ำมัน

3.1.2.3 การแยกสารแบบ ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง

รูปแบบการแยกสารที่มีความยากมากกว่าแบบอื่นเพราะว่ามีความแตกต่างของความหนาแน่นค่อนข้างน้อยทำให้ไม่เป็นที่นิยมในการศึกษาวิจัย ทั้งนี้ทั้งนั้นก็ยังมีงานวิจัยที่สำคัญสำหรับรูปแบบการแยกสารดังกล่าว เช่น การนำเสนองานวิจัยการแยกน้ำมันและอนุภาคของแข็งจากน้ำที่ของเรือน้ำมัน Bednarski and Listewnik [18] โดยทั้งสองช่องทางเข้าจะทำมุมตั้งฉากแบบตรงข้ามกันของสนามการไหลซึ่งส่วนทรงกรวยแบบตัวเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อแรงเหวี่ยงที่เกิดขึ้นภายในซึ่งทำให้เกิดปัญหา จึงต้องมีการพัฒนาเพื่อที่จะแยกสารแบบของไหลสองวัฏภาคทำให้มีการใช้ทรงกรวยแบบสองตัวขึ้นมาโดยทำงานร่วมกันเรียกว่า Concurrent three phase ไฮโดรไซโคลนซึ่งคล้ายคลึงกับแบบ Bednarski and Listewnik [18] ได้นำเสนอโดย Changirwa et al. [23] เมื่อความเร็วลดลงความหนาแน่นของของไหลสองวัฏภาคซึ่งคิดว่าจะทำการแยกได้ไม่ถ่วงนั้น แต่เมื่อทำการป้อนความเร็วเพิ่มขึ้นของไหลทั้งสองวัฏภาคสามารถแยกออกจากการผสมกันได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งซึ่งการแยกที่มีความหนืดสูงและส่วนผสมที่มีความเข้มข้นของวัฏภาคสูงซึ่งมันจะมีคุณสมบัติทำให้มีความเหนียวส่งผลทำให้การใช้ส่วนทรงกระบอกสองตัวต่อกันนั้นเหมาะสำหรับการพิจารณาเมื่อมีของไหลสองวัฏภาคผสมกันแนวคิดหลักๆในการออกแบบของไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาคต้องการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพโดยส่วนมากจะปรับปรุงประสิทธิภาพจากพื้นฐานก็คือการออกแบบรูปร่างของไฮโดรไซโคลนโดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามรูปแบบส่วนผสมของสารซึ่งได้ข้อสรุปที่น่าสนใจ เช่น จากการศึกษาไฮโดรไซโคลนแบบ ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง มีประสิทธิภาพการแยกสูงและมีการศึกษาค่อนข้างมากกว่าตัวอื่น ชิ้นส่วนทรงกรวยด้านในมีผลต่อประสิทธิภาพในการแยกก๊าซ การใช้ทรงกระบอกสองตัวต่อกันจะมีประสิทธิภาพต่อการแยกน้ำมันจากน้ำ เป็นต้น

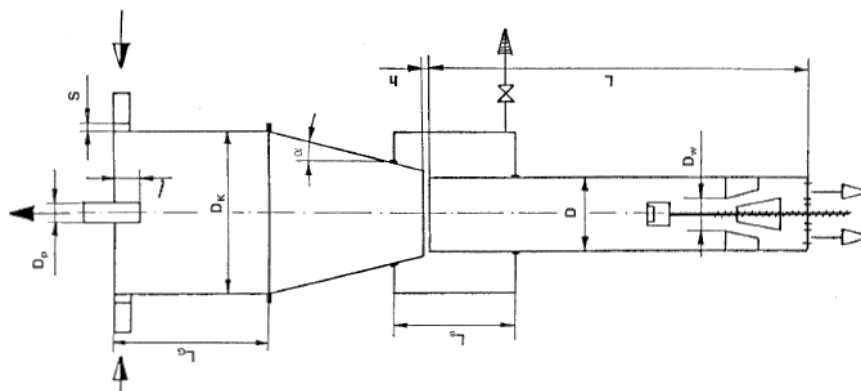
จากงานวิจัยที่ได้ทำการรวบรวมงานวิจัยไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาคของ Liu et al. [16] โดยทั้ง 3 ชนิดพบว่าการศึกษาไฮโดรไซโคลนแบบ ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง มีความนิยมในการศึกษาน้อยที่สุดเนื่องจากความยากในการศึกษาเพราะว่ามีความแตกต่างของความหนาแน่นของสารค่อนข้างต่ำทำให้ประสิทธิภาพการแยกสารของอุปกรณ์น้อยกว่าแบบอื่นๆ จึงได้รับความนิยมในการศึกษาวิจัยค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้ทั้งนั้นจากประเภทการศึกษาวิจัยที่มีน้อยนั้นทำให้การศึกษาคาร์แยก

สารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง มีความน่าสนใจในการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มฐานความรู้ในการแยกสารของสามัญภาคแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ต่อไป

3.2 ไฮโดรไซโคลนเพื่อแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง

จากการศึกษาวิจัยที่ศึกษาการแยกสารแบบสามัญภาคของไฮโดรไซโคลน โดย Liu et al. [16] พบว่าการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง เป็นการแยกน้ำมันออกจากทรายน้ำมันซึ่งพบมากในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับธุรกิจน้ำมันและก๊าซทำให้มีความน่าสนใจในการศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพของต้นแบบไฮโดรไซโคลนแบบ ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ซึ่งงานวิจัยพื้นฐานของก่อนหน้ามีงานวิจัยการศึกษาดังนี้

Bednarski and Listewnik [18] การแยกของเหลวที่มี 2 ชนิดนั้นโดยใช้ไฮโดรไซโคลนเป็นเรื่องยากกว่าระบบการแยกแบบของแข็ง-ของเหลว โดยความต้องการที่จะแยกสารจากน้ำมันใต้ท้องเรือจึงมีการออกแบบแบบจำลองขึ้นมาโดยพยายามนำของแข็งในน้ำออกให้มากที่สุดซึ่งของแข็งเหล่านั้นจะเป็น ดินเหนียว ซิลิกา โคลน ยางมะตอย (Asphalt) โลหะหนักหรือ เกลืออัลคาไลน์เอิร์ธ (Alkaline-earth Metals) เป็นต้น



รูปที่ 3.2 ไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกสาร ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ออกแบบโดย Bednarski and Listewnik [18]

การออกแบบระบบแยกน้ำมันออกจากใต้ท้องเรือ (ship bilge water de-oiling systems) น้ำมันจะไม่ได้ถูกสูบโดยตรงจากระบบการแยกซึ่งในส่วนข้างล่างของถังกักเก็บจะมีน้ำมันที่มีลักษณะทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กจะกระจายของขนาดหยดน้ำมัน 5-1000 ไมโครเมตรซึ่งน้ำมันจะเบากว่าน้ำ โดยทั่วไปจะมีความหนาแน่นน้อยกว่า 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรซึ่งเป็นความหนาแน่นที่น้อยกว่าน้ำ ซึ่งจะมีความแตกต่างเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแยกของของแข็งจากของไหลและจะเห็นได้ชัดในการแยกน้ำมันซึ่งเป็นงานที่ยากมากในการที่จะนำออกไปจากระบบ โดยตัวไฮโดรไซโคลน

จะช่วยแยกของแข็งในของไหลซึ่งส่วนใหญ่ของไหลจะเป็นระยะวัฏภาคที่เคลื่อนที่ต่อเนื่องมีการเคลื่อนที่ผ่านทางช่องทางด้านบนแต่วัฏภาคของแข็งจะเคลื่อนที่ผ่านออกด้านช่องทางด้านล่าง หนึ่งในปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเงื่อนไขการไหลที่เหมาะสมที่จุดขาเข้าของไฮโดรไซโคลอน ตัวอย่างค่าการหมุนที่สูงนั้นเกิดโดยการไหลแบบปั่นป่วนที่มีมากจนเกินไป การเลือกตัวเลือกที่ถูกต้องของขนาดช่องทางขาเข้า ในการทดสอบแบบจำลองที่ได้ออกแบบมานั้นจะมีตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับขนาดของช่องทางด้านขาเข้าของไฮโดรไซโคลอนซึ่งจะเป็นพื้นฐานของการเพิ่มขึ้นของค่าโมเมนตัมที่มีค่าสูงสุดของการไหล ในทางด้านขาเข้าสำหรับคุณสมบัติไฮโดรไซโคลอนจะผ่านการคำนวณทางทฤษฎีและมีการตรวจสอบเพื่อเปรียบเทียบกับผลทดลอง

การออกแบบแบบจำลองสำหรับแยกสารของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง โดยประสิทธิภาพการแยกผลิตภัณฑ์ ไฮโดรคาร์บอนจะมีการกระจายที่เพิ่มขึ้นของหยดน้ำมันขนาดใหญ่ (ตัวอย่าง ขนาดหยด 40-50 ไมโครเมตร) ในน้ำทิ้งในเรือ ชั้นที่สอง ควรจะทำการแยกสารพร้อมกัน ความเป็นไปได้ อย่างสูงที่เกิดขึ้นในการควบคุมความเร็วขาเข้าและอัตราส่วนของอนุภาคของแข็งในสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ การแยกน้ำมันในเครื่องแยกน้ำมันอนุภาคของของแข็งเหล่านั้น มีส่วนประกอบของความหนาแน่นและขนาดของแข็ง ทำให้มีโอกาสที่จะไปอุดตันที่รูของตัวกรอง (coalescing) และบ่อยครั้ง เหตุของตัวกรองทำงานผิดพลาดนั้น ผลมาจากการเพิ่มขึ้นของการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการไหล (head loss) และสิ่งที่จำเป็นสำหรับตัวกรองคือต้องทำความสะอาดเพื่อจะแก้ปัญหาประสิทธิภาพในการแยก หรือ เปลี่ยนตัวกรองใหม่ แบบจำลองไฮโดรไซโคลอนในการทดลองทำจากแก้ว 'โปร่งใส' เพื่อทำให้เกิดการสังเกตโครงสร้างการไหลเช่นเดียวกับการตรวจวัดความเร็วด้วยเลเซอร์ Doppler Anemometry (LDA) เพื่อที่ช่วยการวัดและเก็บค่าการทดลอง โดยจะเอาของแข็งเหล่านั้นออกไปพร้อมๆกัน จากการผสมกันของน้ำกับน้ำมัน ส่วนด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนที่ชั้นส่วนทรงกรวยและส่วนขึ้นด้านบนที่เป็นทรงกระบอกจะมีที่กักเก็บของแข็งที่ได้ติดตั้งมากับตัวไฮโดรไซโคลอน การตกตะกอนของอนุภาคของแข็งมีการเคลื่อนที่ไปทางด้านล่างกักเก็บซึ่งอยู่ตรงช่องว่างระหว่างทรงกรวยและทรงกระบอก รูปร่างของช่องทางด้านขาเข้าเลือกที่จะใช้ท่อสี่เหลี่ยมมีประสิทธิภาพกว่าท่อแบบวงกลม แม้ว่าจะทำให้เกิดความดันลดลงที่ค่อนข้างสูง ส่วนผสมด้านขาเข้าของห้องที่มีการหมุนเป็นการสร้างความสัมพันธ์ขึ้นแบบการไหลแบบไหลวน (rotating vortex) ที่ค่อนข้างช้า ทางนี้จะเป็นการหลีกเลี่ยงการไหลเข้าที่มีความปั่นป่วนสูงของส่วนผสมในไฮโดรไซโคลอนและความน่าจะเป็นที่หยดน้ำมันเคลื่อนที่ไปด้านที่ผิด (break-up) จะมีค่าลดลง ภายหลังจากการเกิดการเคลื่อนที่แบบหมุนจากการไหลแบบปั่นป่วนที่ค่อนข้างต่ำในห้องการหมุนที่มีการผสมมีการเคลื่อนที่ลงด้านล่างของไฮโดรไซโคลอนไปสู่ส่วนทรงกรวย การลดลงจะเป็นเหตุของอัตราเร่งจากมวลที่มีการผสมกันจากการหมุน (rotating mixture mass) เป็นผลกระทบให้ทวีความรุนแรงในการแยกผลิตภัณฑ์

อิทธิพลของขนาดทางด้านของขาเข้าทั้งสองต่อประสิทธิภาพไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดขาเข้าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง ระยะระหว่าง 4 ถึง 6 มิลลิเมตร ความกว้างของขาเข้าที่เล็กที่สุดส่วนใหญ่อาจก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ไปด้านที่ผิด (break-up) เพิ่มเติมของหยดน้ำมันที่มีขนาดใหญ่ ในขณะที่หนึ่งจะไม่ได้ทำให้เกิดการไหลวนที่มีความรุนแรงเพื่อให้ได้ผลที่ดีในการแยกสาร ประสิทธิภาพการไฮโดรไซโคลอนขึ้นอยู่กับขนาดหยดน้ำมันในช่องทางด้านขาเข้า (inlet droplet size) อย่างเห็นได้ชัด หยดน้ำมันที่เล็กกว่า 25 ไมโครเมตรของขนาดเป็นผลการแยกออกที่ค่อนข้างยาก ความยาวของส่วนทรงกระบอกของ ไฮโดรไซโคลอนซึ่งจะแปรผัน 3 แบบจากความยาวเท่ากับ 600 800 และ 1,000 มิลลิเมตรไม่ได้แสดงอิทธิพลที่โดดเด่นต่อการแยกสาร แม้ว่าจะมีประสิทธิภาพการแยกสารค่อนข้างสูงที่ความยาว 1,000 มิลลิเมตรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดความยาวที่เท่ากับ 600 มิลลิเมตรซึ่งดูเหมือนว่าเพิ่มขึ้นค่อนข้างน้อยเกินไปของประสิทธิภาพการแยกซึ่งจะไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายและการขยายขนาดความยาวของไฮโดรไซโคลอน โดยกระบวนการแยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็งในไฮโดรไซโคลอนนี้มีประสิทธิภาพการแยกมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของการแยกของของเหลวที่มีความหนาแน่นน้อยกว่าขนาดหยดน้ำมันมีขนาดมากกว่า 40 ไมโครเมตรทำให้การแยกของแข็งมีผลการแยกออกมาค่อนข้างต่ำหรือระดับของประสิทธิภาพอยู่ระดับกลางๆ โดยจะไม่เกิน 47 เปอร์เซ็นต์แต่ได้ผลดีกว่าของการแยกของแข็งที่ได้บันทึกไว้ก่อนหน้านี้

Changirwa et al. [1, 23] การแยกสารจากทรายน้ำมันโดยมีสารประกอบหลักคือ น้ำ น้ำมัน และ ทรายเป็นส่วนประกอบรวมกันอยู่ซึ่งการอยู่ร่วมกันของทรายและน้ำมันในระบบการแยกคราบน้ำมัน (oily water system) สามารถก่อให้เกิดปัญหาการกัดกร่อนของการทำงานของอุปกรณ์ ใช้เทคนิคการจำลองเพื่อประเมินไฮโดรไซโคลอนแบบผสม (hybrid hydrocyclone) สำหรับการแยกสารแบบสามวัฏภาคของน้ำมัน-ทราย-น้ำจากระบบทรายน้ำมัน สำหรับการแยกของแข็งในระบบไฮโดรไซโคลอนแบบของไหล-ของไหลจะใช้ความเร็วขาเข้าค่อนข้างต่ำและมุมของทรงกรวยที่ต่อกันมีค่าทำมุมระหว่างกันแบบกลางๆเป็นการซ้อนกันบนไฮโดรไซโคลอน จะมีประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุดในการแยกขึ้นอยู่กับรูปแบบของความเร็ว (velocity spectra) และรูปแบบหยดน้ำมันหรืออนุภาคของเม็ดทราย ที่ผ่านมาการศึกษาเกี่ยวกับหยดน้ำมันและอนุภาคเม็ดทรายที่รวมกันและการแยกกันนั้นเป็นผลให้มีความซับซ้อนสำหรับการสร้างไฮโดรไซโคลอนแบบผสมอย่างไรก็ตามมีการขาดความแม่นยำในแบบจำลองนี้สำหรับการป้อนสารที่มีความเข้มข้นมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์โดยมวล ไฮโดรไซโคลอนจะมีการทำงานในรูปแบบการรวมกันของส่วนของทรงกรวยสองตัว (hybrid multiple-cone) จะมีผลผลิตที่ได้ควบคู่กันไปสามแบบคือน้ำมัน ทราย และน้ำ การจำลองส่วนที่สามสร้างขึ้นโดยรวมกันของทางออกตามขวางสำหรับการปล่อยของแข็งเคลื่อนที่ออกไป

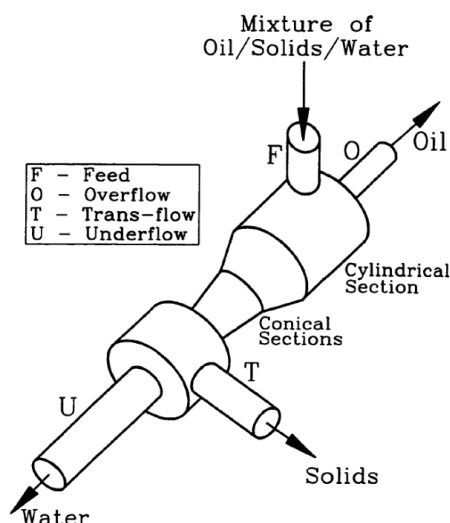
ไฮโดรไซโคลอนแบบสามวัฏภาคจะแยกเป็นน้ำมัน ทราย และน้ำ ในทิศทางตามแนวรัศมีกับของแข็งขนาดใหญ่จะถูกผลักไปกระทบกับผิวของผนังของตัวไฮโดรไซโคลอน เนื่องจากเป็นของแข็ง

ตกตะกอนที่จะถูกลำเลียงผ่านช่องตามขวางของเส้นรอบวงที่เวลาเดียวกันอนุภาคน้ำมันขนาดเล็กหรือหยดน้ำมันจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกนและออกสู่ช่องทางด้านบน โดยจะใช้หลักการเกี่ยวกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่การไหลโดยของไหลจะมีความดันในทิศทางขนานกับผิวสัมผัสหรือเรียกว่าหลักการ Hydrodynamics ทำให้ความเร็วขาเข้าสำหรับการแยกของเหลว-ของเหลวทั้งสองวัฏภาคในไฮโดรไซโคลอนนั้นมีการผสมกันของสารได้ดีขึ้นซึ่งแบบส่วนทรงกระบอกต่อกันแบบสองตัวควรมีความเร็วด้านขาเข้าไม่เกิน 8 เมตรต่อวินาทีและที่เหมาะสมสำหรับแบบไฮโดรไซโคลอนที่มีส่วนทรงกรวยตัวเดียวสำหรับแยกของแข็ง-ของเหลว การแยกควรใช้ความเร็วขาเข้าไม่เกิน 16 เมตรต่อวินาที อย่างไรก็ตามแบบจำลองแบบส่วนทรงกรวยสองตัวนั้นยังมีข้อจำกัดที่แบบจำลองมองข้ามผลกระทบของการไหลแบบปั่นป่วน

หน้าที่หลักของไฮโดรไซโคลอนแบบผสมนั้นจะมีสองหน้าที่คือการแยกแบบของเหลว-ของเหลว และของเหลว-ของเหลว-ของแข็งและข้อจำกัดของสารแบบเข้มข้นถูกจำกัดให้ไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์โดยมวล โดยการป้อนค่าที่มากเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพเกิดภาวะการแยกลดลง

Changirwa et al. [24] การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการแก้ปัญหาการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็งโดยใช้ทรงกรวยสองชิ้นต่อกันแบบสามวัฏภาค (Multiphase-cone Concurrent Three-phase : CTP) ซึ่งมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมขึ้นมาโดยการเปลี่ยนแปลงปรับปรุงแบบจำลองจากลักษณะส่วนทรงกรวยตัวเดียวสำหรับการแยกแบบของแข็ง-ของเหลวและของเหลว-ของเหลวที่มีประสิทธิภาพในการแยกสารแบบสามวัฏภาคที่ค่อนข้างต่ำ ทำให้มีความต้องการพัฒนาประสิทธิภาพในการทำงานให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นจึงมีการคิดค้นการแก้ไขปัญหาจากความต้องการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงมีการออกแบบเพื่อพัฒนาการแยกสารแบบพร้อมกันทั้งสามวัฏภาค ใช้ไฮโดรไซโคลอนแบบ CTP แยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ด้านบน โดยจะใช้หลักการเกี่ยวกับของไหลที่มีการเคลื่อนที่การไหลโดยของไหลจะมีความดันในทิศทางขนานกับผิวสัมผัสหรือเรียกว่าหลักการ Hydrodynamic ทำให้ความเร็วขาเข้าสำหรับการแยกของเหลว-ของเหลวทั้งสองวัฏภาคในไฮโดรไซโคลอนผสมผสานกันดีขึ้นกับการใช้ช่องทางออกทางขวางไปสู่การออกแบบไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันแบบสามวัฏภาค

สำหรับการใช้ไฮโดรไซโคลอนแบบ (CTP) นั้นการที่เกิดการไหลหมุนวนรอบนอกย้ายลงมาข้างล่างของตัวไฮโดรไซโคลอนนั้นทำให้ของไหลบางส่วนมีการสูญเสียพลังงานและการสูญเสียโมเมนตัมเชิงมุมไปในการหมุนวนรอบนอกสามารถทดแทนโดยการทำให้เกิดการซ้อนทับกัน (multiple-stacked) มีผลให้มีการลดองศาของมุมได้ (narrowing radius) การลดลงในมุมของทรงกรวยเป็นการลดลงของขนาดตัด (the cut size) เป็นขนาดของอนุภาคที่ถูกแยกด้วยประสิทธิภาพ 50% นั่นคืออนุภาคที่ใหญ่กว่าขนาดตัดจะถูกไซโคลอนจับด้วยประสิทธิภาพมากกว่า 50% ขนาดตัดของอนุภาคขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของก๊าซและอนุภาค ขนาดของไซโคลอน และสภาวะการเดินเครื่องเป็นต้น



รูปที่ 3.3 ไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ของ Changirwa et al. [1, 23, 24]

การระบายของแข็งเป็นพื้นที่ของจุดที่มีความดันต่ำและของแข็งจะถูกกำไลยในชั้นขอบเขตจุดต่อกับทางออกด้านล่างที่เปิดอยู่โดยโมเมนตัมเชิงมุมของการไหลสามารถป้องกันและมีประสิทธิภาพการแยกของแข็งให้เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการไหลที่ป้อนเข้ามาต้องให้เหมาะสมที่จะสร้างความหนาของชั้นขอบเขตของแข็งที่เหมาะสมจะมีการเปิดเสียดกันซึ่งเป็นสัดส่วนผกผันกันตามรัศมีของผนังทำให้สามารถสร้างช่องทางออกตามขวางซึ่งเป็นจุดที่สามารถเอาของแข็งออกได้จากระบบ ดังนั้นสามารถบรรลุประสิทธิภาพแยกพร้อมกันทั้งสามวัฏภาคได้นั่นเอง

การตรวจสอบแบบจำลองและทดสอบความสามารถของแบบจำลองส่วนประกอบที่สำคัญของการกำหนดค่าทดสอบในการทดสอบคืออ่างกักเก็บอนุภาคของแข็ง และควบคุมระบบจัดเก็บข้อมูลสารละลายที่ถูกดูดไปเรื่อยๆ ของระบบส่งผ่านไฮโดรไซโคลนแบบ CTP ภายใต้การทดสอบสำหรับการทำงานทั้งหมดและตัวแปรต่างๆ การทดลองพบว่าประสิทธิภาพของการแยกน้ำมันอยู่ในช่วงระหว่าง 0.62 ถึง 0.88 แต่ประสิทธิภาพการแยกของแข็งอยู่ในช่วงระหว่าง 0.41 ถึง 0.47 โดยค่าประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันและเม็ดทรายควรจะสูงที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

รูปแบบความเร็วเชิงเส้น (Linear velocity profiles) ที่มีอยู่จากแนวแกนต่อแนวรัศมีที่ 5 มิลลิเมตรซึ่งการเปลี่ยนแปลงจากการไหลวนที่ตึงแรงเข้าไป (forced vortex) เป็นการไหลวนที่เกิดอิสระ (free vortex) จากการเปลี่ยนแปลงตามแนวรัศมีทำให้รูปแบบความเร็ว (velocity spectra) เปลี่ยนแปลงเป็นส่วนกลับกำลังสองของของแนวรัศมี ความเร็วต่อประสิทธิภาพถูกตรวจสอบจากการทดลองที่ช่องทางออกตามขวางที่ขนาด 6 มิลลิเมตรแนวโน้มของประสิทธิภาพของการแยกน้ำมันจะลดลง การเพิ่มขึ้นของการป้อนความเร็วขาเข้าและในทางกลับกันสำหรับประสิทธิภาพของแข็งจะถูกยืนยันจากผลของทฤษฎี ค่าที่มีนัยสำคัญที่เพิ่มขึ้น 60 เปอร์เซ็นต์ของการกระจายที่ช่องทางออก การออกแบบ CTP ควรจะควบคุมความเร็วขาเข้า ที่ 7.7 เมตรต่อวินาทีจาก

การเปรียบเทียบของทฤษฎีและข้อมูลการทดลองที่เปลี่ยนแปลงต่อช่องทางออกด้านบน-อัตราส่วนการบ่อนความเร็วและช่องทางออกด้านล่างต่ออัตราส่วนการบ่อนความเร็วเท่ากับ 0.13 และ 0.33 ตามลำดับ

การทำงานของไฮโดรไซโคลนมีความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการแยกน้ำมันเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพการแยกของแข็งลดลง ในทางกลับกันการเพิ่มขึ้นของการบ่อนความเร็วขาเข้าทำให้ประสิทธิภาพการแยกของทรายเพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการแยกของน้ำมันลดลง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแยกสารของไฮโดรไซโคลนประเภทของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง นั้นพบว่างานวิจัยของ Changirwa et al. [1, 23, 24] มีประสิทธิภาพการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง มีความน่าสนใจและมีรูปแบบโครงสร้างของไฮโดรไซโคลนที่แปลกออกไปจากแบบโครงสร้างไฮโดรไซโคลนแบบอื่นโดยไฮโดรไซโคลนของ Changirwa et al. [1, 23, 24] จะมีทรงกรวยสองชิ้นต่อกันทำให้มีความน่าสนใจในการศึกษาเมื่อมีการปรับปรุงรูปร่างไฮโดรไซโคลน เช่น การปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยสองชิ้นที่ต่อกัน เป็นต้น นั้นจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารเป็นอย่างไรจากข้อสังเกตดังกล่าวทำให้มีความสนใจอย่างมากที่จะนำงานวิจัยของ Changirwa et al. [1, 23, 24] มาทำการศึกษาต่อไปโดยการใช้โปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อทำการศึกษาประสิทธิภาพการแยก

3.3 การพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลน

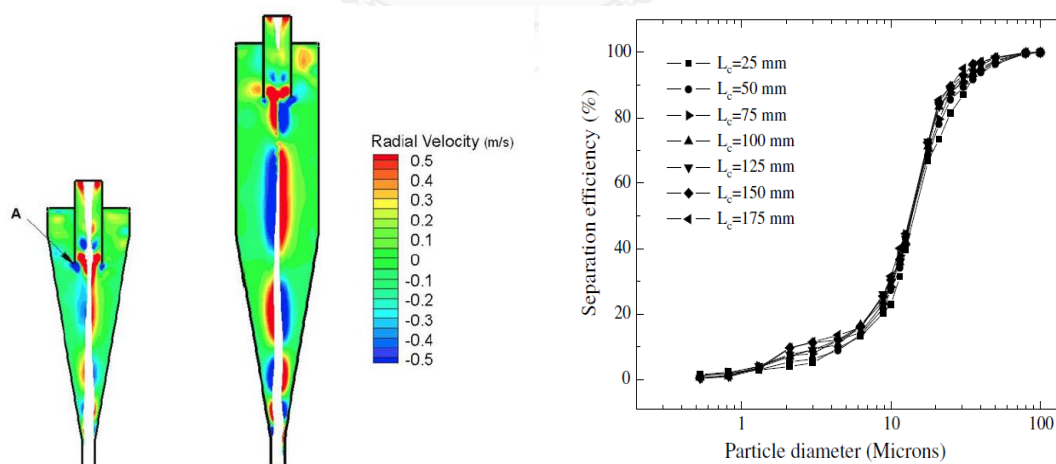
จากการศึกษาและพัฒนาไฮโดรไซโคลนมีมาโดยตลอดตั้งแต่การแยกสารแบบสองวัฏภาค จนกระทั่งศึกษาการแยกสารแบบสามวัฏภาคซึ่งการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็งนั้นยังมีประสิทธิภาพในการแยกค่อนข้างน้อยกว่ารูปแบบอื่นทำให้สนใจการปรับปรุงการแยกสารของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบส่วนทรงกรวยต่อกัน (CTP) ให้มีประสิทธิภาพมากกว่าเดิมจะทำโดยแนวทางการพัฒนาที่เป็นที่นิยมก็คือการปรับปรุงรูปร่างของตัวไฮโดรไซโคลนนั่นเองโดยจะมีการปรับปรุงรูปร่างส่วนประกอบส่วนต่างๆ เช่น การปรับปรุงเปลี่ยนขนาดของช่องทางขาเข้า ขนาดของช่องทางขาออก ปรับปรุงขนาดความยาวทรงกระบอก ปรับปรุงขนาดมุมของทรงกรวยและแม้กระทั่งการปรับปรุงขนาดของช่องทางออกด้านบน (vortex finder) การปรับปรุงประสิทธิภาพที่น่าสนใจมีดังนี้

B. Wang and A. B. Yu [25] มีการศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical) สังเกตการไหลของ ก๊าซ-ของเหลว-ของแข็งในไฮโดรไซโคลนโดยใช้ความแตกต่างขนาดของตัวโครงสร้างซึ่งรวมถึงขนาดความยาวของส่วนทรงกระบอกและทรงกรวย การไหลแบบปั่นป่วนของก๊าซและของเหลวเป็นแบบจำลองที่ต้องใช้ Reynolds stress model ในระหว่างผิวสัมผัสของของเหลวและช่องอากาศ (air core) เป็นแบบจำลองโดยการใช้ปริมาตรของแบบจำลองของเหลวหลายวัฏภาค

และผลที่ได้จะนำมาใช้ในแบบจำลองของอนุภาคการไหล อธิบายโดย stochastic Lagrangian model คุณสมบัติที่มีการตรวจสอบในรูปแบบของสนามการไหล ความดันที่ลดลงและอัตราส่วนในการแยก โดยจะนำเสนอผ่านด้านช่องทางออกด้านล่าง ลักษณะขนาดอนุภาค และประสิทธิภาพการแยกใช้การวัดแบบ Laser Doppler velocimetry (LDV)

การไหลของของเหลวในแบบจำลองแบบปั่นป่วนจะอธิบายโดย Reynolds stress model (RSM) หน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและช่องระบายอากาศเป็นแบบจำลองที่อธิบายโดย the volume of fluid (VOF) model และผลที่ได้จากแบบจำลองของอนุภาคการไหลจะอธิบายโดย stochastic Lagrangian model โดยสมการโมเมนตัมเป็นตัวที่ไม่อิสระต่อการเสียดทานตามปริมาตรของวัฏภาคของไหลกับคุณสมบัติของความหนาแน่นและความเสียดทาน การเคลื่อนที่ของอนุภาคเป็นการอธิบายโดย stochastic Lagrangian multiphase flow model มีแรงลอยตัว (buoyancy force) และแรงเสียดทานจากของเหลวต่ออนุภาคที่ทำการคำนวณในกรอบการอ้างอิง Lagrangian แบบจำลองนี้ใช้ version 6 ของโปรแกรม Fluent CFD second-order upwinding และ the simple pressure-velocity coupling algorithm ที่ใช้กลยุทธ์ในการทดลองคือ unsteady solver และ time step เล็ก 0.0001 ถึง 0.01 วินาทีจากการทดลองพบว่าไม่ส่งผลจากการเปลี่ยนแปลง time step

ประสิทธิภาพการแยกที่ลดลงเล็กน้อยเป็นทรงกระบอกที่มีความยาวลดลงอย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ค่อนข้างเล็กน้อยสามารถมองข้ามได้ ความดันที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และ อัตราส่วนการแยกจะนำเสนอในส่วนช่องทางออกด้านล่างตามการเพิ่มขึ้นของส่วนความยาวของทรงกระบอก

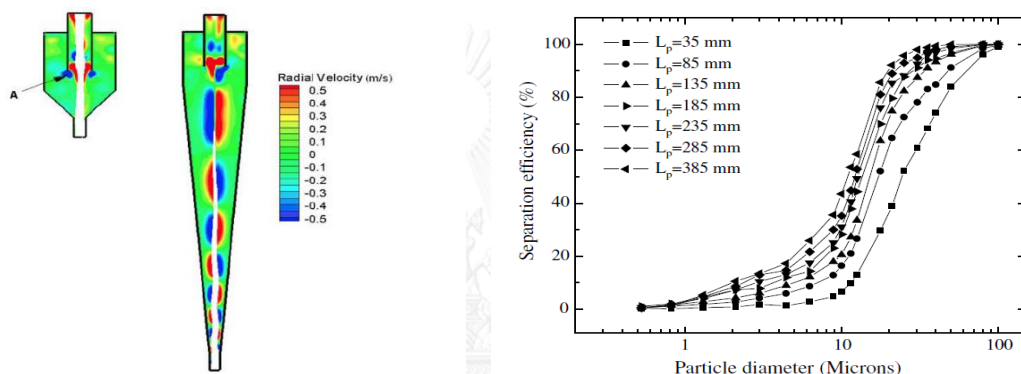


รูปที่ 3.4 ด้านซ้ายคือ Radial Velocity กับความแตกต่างของความยาวของทรงกระบอก

รูปที่ 3.5 ด้านขวาคือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความยาวของทรงกระบอก

การแสดงผลอัตราส่วนการแยกที่เพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความยาวของทรงกระบอกขึ้นส่วนทรงกรวยมีความสำคัญในไฮโดรไซโคลนโดยงานนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลนที่มีความแตกต่างของทรงกรวยในช่วงขนาดความยาวจาก 35 มิลลิเมตรถึง 385 มิลลิเมตรศึกษาตามลำดับ ประกอบไปด้วย

มุมที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 9 องศา ถึง 96 องศาเป็นการสาธิตเกี่ยวกับประสิทธิภาพการแยก รูปร่างที่ลดลงกับการเพิ่มขึ้นของส่วนความยาวทรงกรวยเปรียบเทียบกับทรงกระบอกโดยค่าความดันที่สูญเสียจะลดลงและอัตราส่วนการแยกที่ไหลออกทางช่องทางด้านล่างจะมีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งคล้ายกับผลที่เกิดขึ้นกับ Plitt model โดย Plitt et al. [26] ส่วนทรงกรวยที่มีขนาดยาวจะทำให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น การสมมุติว่าความดันที่สูญเสียลดลงเทียบกับส่วนขนาดของความยาว ความดันที่สูญเสียจะเพิ่มขึ้นกับส่วนการเพิ่มขึ้นของความยาวของช่องทางออกทางด้านบน (vortex finder) และเป็นตัวแปรที่มีความไวต่อความเร็วขาเข้าเหมือนกับขนาดตัด ผลกระทบของการเพิ่มขึ้นของความเร็วขาเข้าและช่องทางออกทางด้านบน (vortex finder) ต่อความดันสูญเสียกลายเป็นส่งผลเล็กน้อยต่อส่วนของทรงกรวยมีความยาวเพิ่มขึ้น



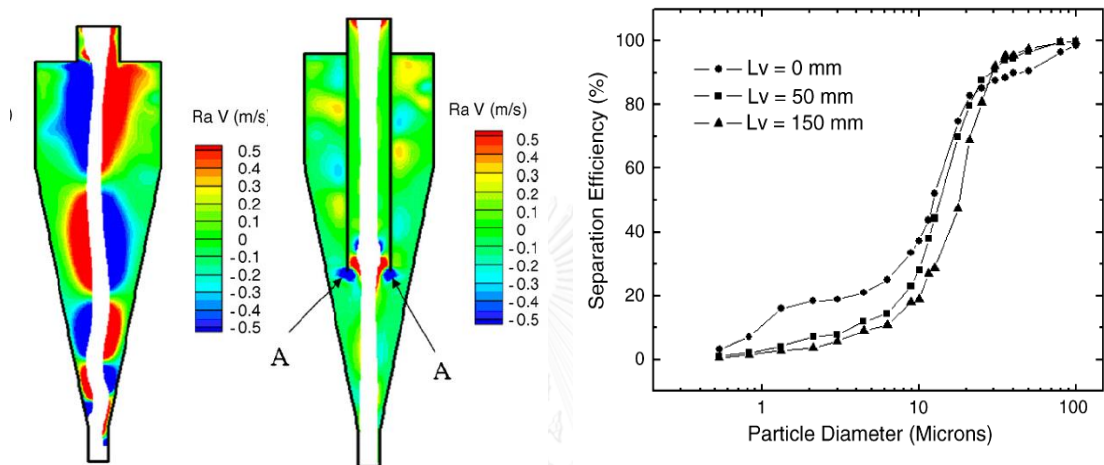
รูปที่ 3.6 ด้านซ้ายคือ Radial Velocity กับความแตกต่างของความยาวของทรงกรวย

รูปที่ 3.7 ด้านขวาคือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความยาวของทรงกรวย

ส่วนทรงกระบอกไม่มีส่วนสำคัญต่อการกักเก็บอนุภาค ส่วนของทรงกรวยที่ยาวที่สุดที่จะเป็นไปได้ โดยเฉพาะ ในไฮโดรไซโคลอนที่มีขนาดเล็กจะสามารถทำให้ประสิทธิภาพการแยกเพิ่มขึ้น การลดลงของความดันที่สูญเสียและลดลงของผลกระทบของ secondary circulation flow

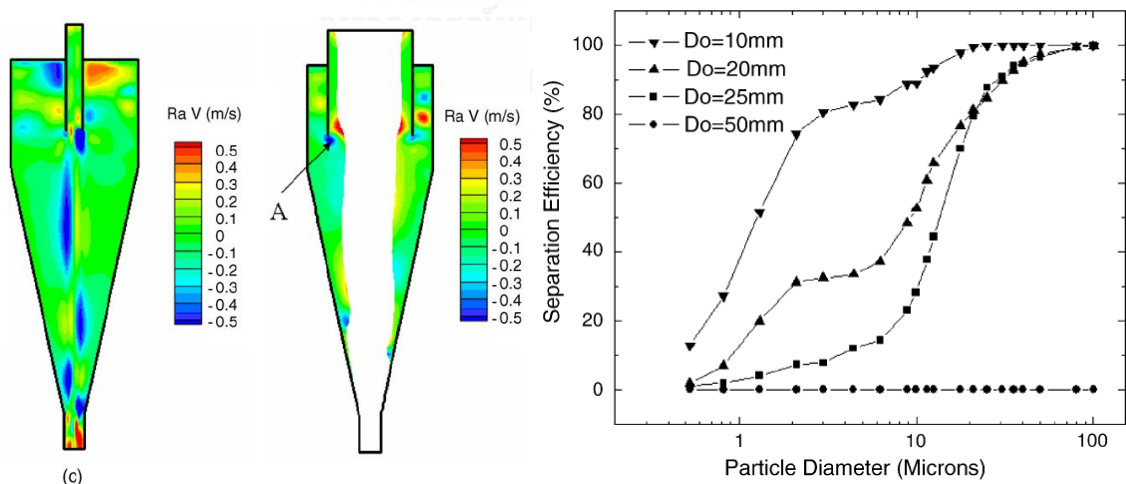
B. Wang and A. B. Yu [27] ผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนรูปร่างช่องทางออกทางด้านบน (vortex finder) โดยเป็นการศึกษาเชิงตัวเลขของน้ำมัน-ของเหลว-ของแข็งในตัวไฮโดรไซโคลอนกับความแตกต่างของรูปร่างของช่องทางออกทางด้านบน (vortex finder) ในแบบจำลองเป็นการไหลแบบปั่นป่วนของก๊าซและของเหลวโดยใช้แบบจำลองของ Reynolds stress model และผิวหน้าสัมผัสระหว่างของเหลว และ ช่องระบายอากาศเป็นแบบจำลองที่ใช้ volume of fluid multiphase model ผลที่ใช้แบบจำลองของอนุภาคการไหลอธิบาย โดย stochastic model ลักษณะการไหลตรวจสอบระยะของสนามการไหล ความดันที่สูญเสีย อัตราส่วนการแยกสารเสนอข้อมูลในการไหลออกทางด้านล่าง การเกาะกลุ่มกันของอนุภาคและประสิทธิภาพการแยก ซึ่งค่าทั้งหมดจะมีค่าที่เปลี่ยนแปลงตามรูปร่างที่เปลี่ยนแปลงไปตามรูปร่างช่องทางออกทางด้านบน (vortex finder)

Reynolds stress model (RSM) เหมาะกับการศึกษาแบบไหลปั่นป่วน VOF เหมาะกับการศึกษาของไหลและช่องทางระบายอากาศ และ The stochastic Lagrangian model เหมาะกับการศึกษาการไหลของอนุภาคโดยมีเงื่อนไขในการศึกษาก็คือความดันในช่องทางออกทั้ง 2 ทางเป็น 1 atm (ความดันบรรยากาศ) ความเร็วขาเข้าและความเร็วอนุภาคจะเท่ากับ 2.25 เมตรต่อวินาทีโดยที่น้ำป้อนใสจะมีความหนาแน่นเท่ากับ 2700 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรในทางด้านการไหลเข้าปริมาตรของแข็งคิดได้น้อยกว่าร้อยละ 10



รูปที่ 3.8 ด้านซ้ายคือ ความแตกต่างของความยาวของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder)

รูปที่ 3.9 ด้านขวาคือ ประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความยาวของช่องทางออกด้านบน

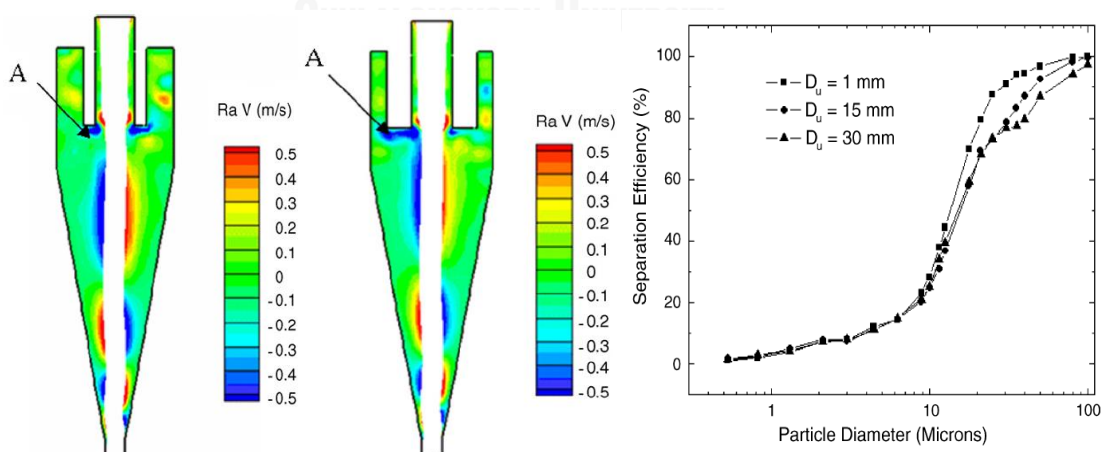


รูปที่ 3.10 ด้านซ้ายคือความแตกต่างของความกว้างของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder)

รูปที่ 3.11 ด้านขวาคือประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความกว้างของช่องทางออกด้านบน

ไฮโดรไซโคลแบบไม่มีช่องทางออกด้านบน (vortex finder) มีประสิทธิภาพในการแยกที่ดีสำหรับอนุภาคขนาดเล็ก ประสิทธิภาพจะต่ำเมื่อแยกอนุภาคที่ขนาดใหญ่ ไฮโดรไซโคลแบบไม่มีช่องทางออกด้านบน (vortex finder) ที่มีขนาดยาวจะได้ผลที่ดีเมื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่แต่ประสิทธิภาพจะต่ำเมื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ฉะนั้นไฮโดรไซโคลแบบไม่มีช่องทางออกด้านบน (vortex finder) ไม่เหมาะที่จะไม่มีหรือมีแบบยาวเกินไปควรออกแบบระหว่างตำแหน่งต่ำสุดของทางเข้าของจุดเชื่อมต่อของกระบอกและส่วนรูปกรวยเมื่อไฮโดรไซโคลแบบไม่มีช่องทางออกด้านบน (vortex finder) มีขนาดมากกว่าที่ 30 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพกลับกลายเป็น 0 เมื่อช่องทางระบายอากาศ (air core) มีขนาดมากกว่าช่องทางออกทางด้านล่าง (apex) สำหรับตัวไฮโดรไซโคลกับกว้างกว่าช่องทางออกด้านบน (vortex finder) ทำให้อนุภาคทั้งหมดสามารถไหลออกทางด้านบนและบางอนุภาคที่มีลักษณะหยาบจะยึดติดแน่นกับผนังและส่วนของรูปกรวย จากการคำนวณความหนาของช่องทางออกด้านบน (vortex finder) ประสิทธิภาพการแยกจะมีความแตกต่างกันค่อนข้างน้อยโดยที่ความหนาเท่ากับ 1 มิลลิเมตรจะดีที่สุดจากการคำนวณความหนาของช่องทางออกด้านบน (vortex finder) จะส่งผลต่ออัตราส่วนการแยกและความดันที่สูญเสียโดยความหนา 15 มิลลิเมตรจะดีที่สุดโดยทำให้อัตราส่วนการแยกมีค่าสูงสุดเท่ากับ 4.9 เปอร์เซ็นต์และความดันที่สูญเสียมีค่าน้อยสุดที่ 40,000 ปาสกาล

ประสิทธิภาพการแยกจะลดลงสำหรับอนุภาคขนาดเล็กแต่เพิ่มขึ้นสำหรับค่าความสัมพันธ์ของอนุภาคขนาดใหญ่ที่ความยาวของช่องทางออกด้านบนมีค่าลดลง ความหนาของช่องทางออกด้านบน (vortex finder) สามารถช่วยในการพัฒนาประสิทธิภาพในการแยก โดยเฉพาะสำหรับอนุภาคขนาดใหญ่แต่ผลที่เกิดจะเป็นการเพิ่มขึ้นของความดันที่มีการสูญเสียโดยเฉพาะผลของ



รูปที่ 3.12 ด้านซ้ายคือความแตกต่างของความหนาของช่องทางออกด้านบน (Vortex Finder)

รูปที่ 3.13 ด้านขวาคือประสิทธิภาพการแยกสารกับความแตกต่างของความหนาของช่องทางออกด้านบน

แบบจำลองพบว่า การไหลที่ผิดเพี้ยนที่มีอยู่ท่ามกลางทางออกของผนังมีผลที่ลดลงของประสิทธิภาพ การติดหิ้งบนช่องทางออกด้านบน (vortex finder) สามารถพัฒนาประสิทธิภาพการแยกสารของ ไฮโดรไซโคลอนได้ และสามารถลดค่าความดันที่สูญเสียได้ 10 เปอร์เซ็นต์ และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพ การแยกอนุภาคเรียบได้ดี

S. B. Kuang et al. [28] การศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขการไหลของของเหลว-ก๊าซ-ของแข็งที่แยกโดยไฮโดรไซโคลอนมีการไหลแบบปั่นป่วนใช้ Reynolds stress model ผิวน้ำที่อยู่ระหว่างของเหลว ช่องระบายอากาศ และการไหลของอนุภาค ซึ่งทั้งคู่เป็นแบบจำลองที่ใช้ในแยกสาร แบบหลายวัฏภาคภายใต้เงื่อนไขที่แตกต่างกันโดยคำนึงความเข้มข้นของทางด้านขาเข้าของ สารประกอบเป็นหลักสำคัญ

ลักษณะการไหลเป็นตัวอย่างในระยะของสนามการไหล ความดันที่สูญเสีย ผลรวมของเหลวที่ ไหลออกในช่องทางออกทางด้านล่างและประสิทธิภาพในการแยกสาร การแสดงผลที่เกิดขึ้นนั้นเมื่อ การป้อนความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกลดลงซึ่งขึ้นกับขนาดของอนุภาค ของแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ความดันขาเข้าเริ่มต้นลดลงสู่ค่าน้อยที่สุดแล้วเพิ่มขึ้นและผลรวมของเหลวที่ ไหลออกทางด้านล่างนั้นเริ่มต้นจากค่ามากและลดลงมันแสดงให้เห็นว่าช่องทางระบายอากาศ อัตรา การไหลมวลของอนุภาคของแข็งในช่องทางออกด้านล่างและทางด้านบน ส่วนความดันที่สูญเสีย ทางด้านขาเข้านั้นมีความผันผวนตามลำดับ อย่างไรก็ตามความผันผวนนั้นมีผลกับค่าเฉลี่ยในการ แยกประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอนเล็กน้อย งานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองของไหลสองวัฏภาค หรือ two-fluid model (TFM) ช่วยอธิบายการจำแนกประเภทไฮโดรไซโคลอนของการไหลและ ประสิทธิภาพภายใต้เงื่อนไขการไหลอย่างกว้างโดยการประยุกต์ใช้ตัวแปรต่างๆในการเปรียบเทียบเชิง ตัวเลขและการทดลอง เช่น ความเร็วการไหล ความดันที่สูญเสียในทางด้านขาเข้า อัตราการไหลของ น้ำ ประสิทธิภาพในการแยก ขนาดตัด (Cut size) และ ความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งทางด้าน ช่องทางขาเข้า เป็นต้นซึ่งความผันผวนของตัวแปรต่างๆเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกสาร

เงื่อนไขที่มีความสำคัญสำหรับการทดลองแบบจำลองเชิงตัวเลขการสร้างกริด (grid) ของ แบบจำลองไฮโดรไซโคลอนผลการทดลองจากแบบจำลองเชิงตัวเลขเพื่อทำให้แน่ใจว่าขนาดของ mesh เล็กเพียงพอที่จะดำเนินการการคำนวณเชิงตัวเลขแบบ mesh-independent เพียงให้เพียงพอในการ แก้ปัญหา ทุกแบบจำลองในงานทดลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent CFD โดยใช้ the second-order upwinding และ the simple pressure-velocity coupling algorithm ในการใช้ในรูปแบบ การลู่เข้า ใช้การแก้ปัญหาแบบไม่คงที่ และ ใช้ time step 10 ยกกำลัง 0.0001 ถึง 10 กำลัง 0.01 วินาที แสดงการทดสอบว่าผลที่ได้นั้นไม่ตอบสนองอย่างรวดเร็วในช่วง time step

การศึกษาลักษณะผลกระทบในการป้อนความเข้มข้นของอนุภาคของแข็งในการจำแนก ประเภทการไหล และ ประสิทธิภาพในการพัฒนาแบบจำลองโดยความเข้มข้นของอนุภาคของแข็ง

พิจารณาของการเปลี่ยนแปลง ตั้งแต่ 1-25 เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาตร เพื่อที่จะเข้าใจถึงพฤติกรรมของขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน การศึกษาเกี่ยวกับระยะเวลาการกระจายของอนุภาคที่เกิดขึ้น ณ การป้อนความเข้มข้นของของแข็งที่ 7.04 เปอร์เซ็นต์ ขนาดของอนุภาคที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงนั้นรอบๆ แกนระบายอากาศเนื่องมาจากการไหลที่ไหลย้อนขึ้น (upward flow) และนำไปสู่ทางออกด้านบนของน้ำ ในขณะที่เดียวกันบางส่วนของความเข้มข้นของอนุภาคใกล้ทางออกด้านล่างเป็นการปล่อยสู่ด้านล่าง สำหรับตัวอย่างพฤติกรรมของอนุภาคขนาดใหญ่ไม่สามารถสังเกตได้สำหรับการป้อนความเข้มข้นของของแข็งที่มากกว่า 15.74 เปอร์เซ็นต์กับการป้อนความเข้มข้นของของแข็งเหล่านี้แม้ อนุภาคขนาดใหญ่ในส่วนไฮโดรไซโคลอนนำไปสู่ทางออกทางด้านบน

แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ถูกพัฒนาขึ้นในการจำลองของการไหลก๊าซ-ของเหลว-ของแข็ง ในการจำแนกประเภทไฮโดรไซโคลอนที่ Reynolds stress model (RSM) ใช้ในการอธิบายการไหลแบบปั่นป่วนและแบบจำลองที่มีการผสมกันแบบหลายวัฏภาคเพื่อหาหน้าสัมผัสระหว่างอากาศและของเหลวและการเคลื่อนตัวของอนุภาคกับขนาดที่แตกต่างกัน เมื่อการป้อนความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการแยกก็จะลดลง อัตราการแยกของน้ำเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดแล้วลดลง ความดันขาเข้าเริ่มต้นลดลงสู่ค่าน้อยสุดและเพิ่มขึ้น ความผันผวนในการป้อนความเข้มข้นในการป้อนนำไปสู่ความผันผวนในการไหลและประสิทธิภาพในการแยกแต่อาจจะไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยพฤติกรรมในการจำแนกของไฮโดรไซโคลอน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาปรับปรุงประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลอน B. Wang and A. B. Yu [27] ที่มีการปรับปรุงช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลอนไม่ว่าจะเป็นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางออก หรือแม้กระทั่งขนาดความยาวของช่องทางออกด้านบนที่ยาวลึกเข้ามาในตัวไฮโดรไซโคลอนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลอนเป็นอย่างไร และจากงานวิจัย B. Wang and A. B. Yu [25] มีความน่าสนใจในจากการที่ทำการปรับปรุงขนาดของทรงกระบอกและขนาดของทรงกรวยของไฮโดรไซโคลอนซึ่งจากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าการปรับปรุงรูปร่างทั้งสองแบบนี้จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยก ซึ่งจากการศึกษาของงานวิจัย B. Wang and A. B. Yu [25, 27] นั้นมีข้อดีที่จะนำไปศึกษาปรับปรุงรูปร่างของไฮโดรไซโคลอนที่จะทำการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสารแบบสามวัฏภาคของไฮโดรไซโคลอนที่มีทรงกรวยสองชั้นเชื่อมต่อกัน ว่าการที่ได้ปรับปรุงรูปร่างแล้วนั้น จะทำให้การแยกหยดน้ำมัน เม็ดทราย และน้ำของไฮโดรไซโคลอนดังกล่าวมีการเปลี่ยนแปลงเป็นอย่างไร

3.4 แนวทางการปรับปรุงไฮโดรไซโคลนเพื่อแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง

จากการศึกษาอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนเพื่อทำการแยกสารพบว่าความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันโดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้กล่าวมานั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง เนื่องจากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยมาข้างต้นนั้นได้พบว่าการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง มีประสิทธิภาพการแยกน้อยกว่าการแยกสารแบบก๊าซ-ของเหลว-ของแข็งและก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว โดยปัญหาที่พบที่ทำให้ประสิทธิภาพในการแยกสารมีค่าน้อยกว่าแบบอื่น นั่นก็คือ ความหนาแน่นของสารที่มีความใกล้เคียงกันทำให้ช่องทางออกของสารมีการไหลปนกันค่อนข้างมากส่งผลให้ประสิทธิภาพการแยกต่ำจึงทำให้เกิดความสนใจที่จะทำการศึกษาและปรับปรุงแบบจำลองไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเพื่อที่จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพการแยกสารแบบของเหลว-ของเหลว-ของแข็งโดยนำข้อมูลจากงานวิจัยที่ได้ศึกษามาปรับปรุงหาแนวทางโดยได้ประเด็นที่น่าสนใจของแต่ละงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ดังนี้

การศึกษางานวิจัยพื้นฐานของไฮโดรไซโคลนที่มีความสนใจคือการศึกษาของแข็ง-ของเหลว ทั้งสองภูมิภาคที่เกิดการไหลในตัวไฮโดรไซโคลน Dai et al. [14] ได้ข้อสรุปที่น่าสนใจคือการไหลภายในนั้นจะมีอนุภาคบางส่วนที่ไหลออกทางด้านบนทำให้ประสิทธิภาพการแยกสารทางด้านบนมีประสิทธิภาพลดลงและอนุภาคบางส่วนทำให้ผนังของตัวไฮโดรไซโคลนเกิดความเสียหายแสดงให้เห็นว่ารูปร่างของไฮโดรไซโคลนมีความสำคัญในการแก้ปัญหาที่เกี่ยวกับประสิทธิภาพของการแยกสารในช่องทางออกของไฮโดรไซโคลน จึงมีผู้สนใจต้องการแก้ปัญหาจึงมีการออกแบบไฮโดรไซโคลนที่มีรูปร่างแบบทรงกระบอกและแบบเหลี่ยมโดยการแยกสารส่วนผสมน้ำและน้ำมัน Rosales et al. [13] โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ารูปร่างไฮโดรไซโคลนที่เป็นแบบเหลี่ยมนั้นไม่เหมาะสมในการใช้งานได้จริงเนื่องจากสูญเสียโมเมนตัมมากกว่าปกติ การศึกษาเกี่ยวกับแยกสารของไฮโดรไซโคลนนั้นจะต้องมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพ Wang et al. [15] พบว่ามีตัวแปรที่สำคัญหลายประเภทที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกเช่น ความเร็วขาเข้า อัตราส่วนน้ำและน้ำมัน ขนาดของอนุภาคที่เกิดการกระจัดกระจาย เป็นต้นโดยทั้งสามตัวแปรนี้มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกโดยงานวิจัยเหล่านี้จะเป็นข้อมูลที่ดีในการศึกษาไฮโดรไซโคลนแบบสามภูมิภาคที่มีความซับซ้อนต่อไป

การศึกษาไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันของ Changirwa et al. [1, 23, 24] มีความน่าสนใจเป็นอย่างมากในการที่จะทำการศึกษารับปรุงพัฒนาไฮโดรไซโคลน ซึ่งมีด้านทางออกทางด้านบน ด้านข้างและทางออกทางด้านล่างของไฮโดรไซโคลนโดยทรงกรวยสองชิ้นที่ต่อกันนั้นจะมีการใช้พลังงานน้อยกว่าไฮโดรไซโคลนที่เป็นการเชื่อมต่อกันแบบเป็น

ชุดในระหว่างกระบวนการแยกสารแบบสามวัฏภาคการกระจายความหนาแน่นสารซึ่งจะมีความแตกต่างกันจะช่วยในการแยกสารแต่ละวัฏภาคได้ดีกว่าไฮโดรไซโคลนกรวยเดียว ดังนั้นงานวิจัยของ Changirwa et al. [1, 23, 24] จึงมีความเหมาะสมที่นำไปศึกษาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการแยกของสารผสมทรายน้ำมันโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยงานวิจัยที่นำแบบจำลองคณิตศาสตร์มาใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนคือ การศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นนั้นเป็นพื้นฐานสร้างความรู้ความเข้าใจในการวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรไซโคลนแบบทั่วไปและการแยกสารแบบ ก๊าซ-ของเหลว-ของเหลว แต่เงื่อนไขและตัวแปรเหล่านี้ค่อนข้างที่จะควบคุมได้ยากทำให้ต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับตัวแปรที่ควบคุมง่าย คือการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงรูปร่างของตัวไฮโดรไซโคลนโดยมีงานวิจัยที่น่าสนใจคือการศึกษาการเปลี่ยนแปลงขนาดของ ไฮโดรไซโคลน B. Wang and A. B. Yu [25] โดยมีข้อสรุปที่น่าสนใจคือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของทรงกรวยของไฮโดรไซโคลนสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการแยกสารได้ การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงช่องระบายด้านบน (vortex finder) ของตัวไฮโดรไซโคลน B. Wang and A. B. Yu [27] โดยการเพิ่ม-ลด ขนาดและความยาวของ ช่องระบายด้านบน (vortex finder) หรือแม้กระทั่งการติดตั้งหิ้งบน ช่องระบายด้านบน (vortex finder) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแยกสาร และ งานวิจัยที่มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นของความเข้มข้นของของแข็ง B. Wang and A. B. Yu [28] การศึกษาการไหลแบบสามวัฏภาคชนิดผสมของเหลว-ก๊าซ-ของแข็ง นั้นเมื่อมีการป้อนของแข็งที่มีเข้มข้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการแยกก็จะลดลง ค่าอัตราการแยกน้ำเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดแล้วลดลงความดันขาเข้าเริ่มต้นลดลงสู่ค่าน้อยสุดและเพิ่มขึ้นซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนเป็นตัวแปรสำคัญที่จะสามารถพัฒนาประสิทธิภาพของไฮโดรไซโคลนให้ดีขึ้นได้ โดยงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาศึกษาเหล่านี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาหาแนวทางการปรับปรุงประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนของ Changirwa et al. [1, 23, 24] ได้คือโปรแกรมการศึกษาลักษณะการไหล (ANSYS Fluent) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการแยกของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนคือ Reynolds Stress Model และแนวทางการปรับปรุงที่คิดว่าเหมาะกับอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนของ Changirwa et al. [1, 23, 24] คือการปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยสองชิ้นต่อกันซึ่งเป็นลักษณะเด่นของอุปกรณ์ดังกล่าวเมื่อเปรียบเทียบกับไฮโดรไซโคลนแบบอื่นที่ส่วนมากจะมีลักษณะแบบกรวยเดียว ดังนั้นแนวทางการทำการศึกษาด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกัน จึงมีความเหมาะสมเพื่อหาความสำคัญของทรงกรวยสองชิ้นต่อกันว่าจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกสารทั้งหมดน้ำมันและเม็ดทรายว่าการปรับเปลี่ยนองศาของกรวยแต่ละตัวนั้นมีประสิทธิภาพการแยกเป็นอย่างไร

บทที่ 4

การสร้างแบบจำลองเพื่อการศึกษาและการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

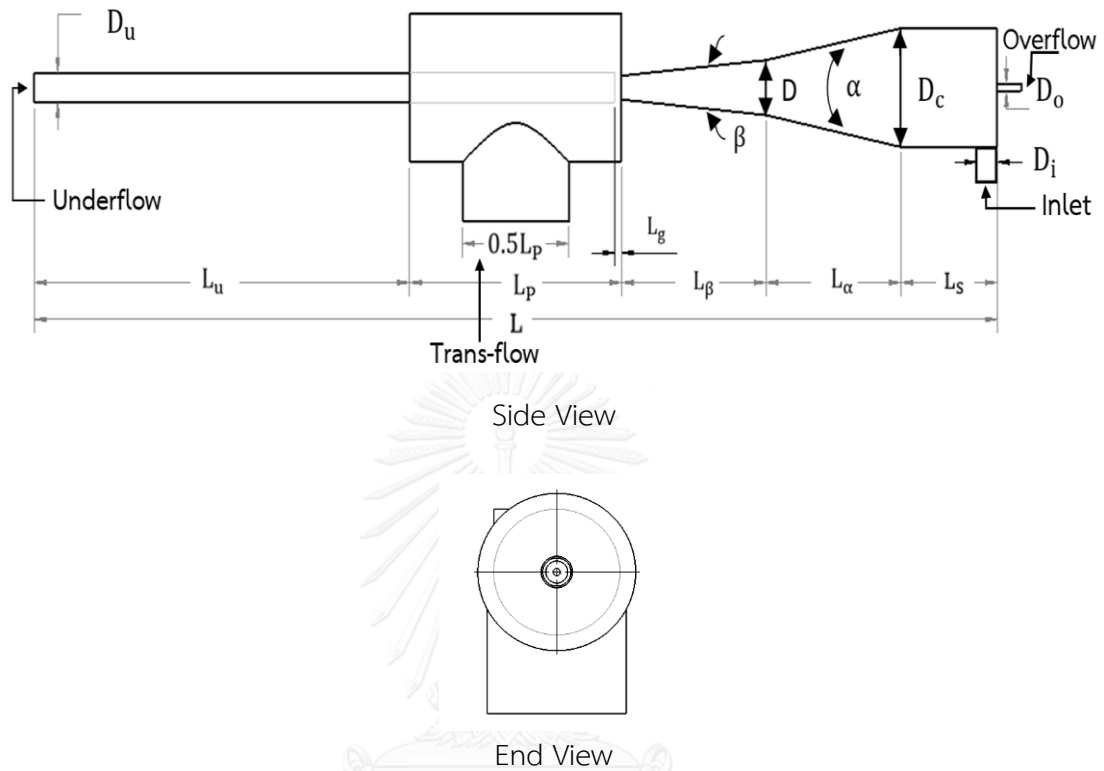
เนื้อหาในบทนี้จะนำแบบจำลองที่คำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มร่วมกับการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน Reynolds Stress Model มาตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) โดยโปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ (Commercial program) ซึ่งเป็นโปรแกรมที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อที่จะแก้ปัญหาการศึกษาแบบจำลองลักษณะการไหลในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ผู้ที่ศึกษาและพัฒนามีความมั่นใจว่าแบบจำลองมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ศึกษาหรือแก้ปัญหาการไหลจะต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นในบทนี้แบ่งเนื้อหาเป็นสาม ส่วนแรกคือรายละเอียดของไฮโดรไซโคลนที่ต้องการทำการศึกษา ส่วนที่สองแสดงการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในไฮโดรไซโคลนแบบสามภูมิภาค และส่วนที่สามเป็นกระบวนการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของสารทั้งการแยกน้ำ น้ำมัน และทรายระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์กับผลการทดลองของ Changirwa [1] การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้นทำเพื่อที่จะสามารถนำผลการเปรียบเทียบไปศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนมุมทรงกรวยสองชิ้นต่อกันของไฮโดรไซโคลนแบบสามภูมิภาคต่อไป

4.1 รายละเอียดของไฮโดรไซโคลนที่ต้องการศึกษา

4.1.1 อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน

การออกแบบไฮโดรไซโคลนสามภูมิภาคสำหรับการศึกษาครั้งนี้เป็นแบบไฮโดรไซโคลนเพื่อแยกสารสามภูมิภาคหรือสามสถานะคือน้ำ น้ำมัน และเม็ดทราย โดยรูปร่างของไฮโดรไซโคลนสามภูมิภาคแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันถูกออกแบบโดย Changirwa [1] ซึ่งแสดงในรูป 4.1 ไฮโดรไซโคลนนี้จะมีส่วนประกอบหลายส่วนไม่ว่าจะเป็นช่องขาเข้าของสารผสม ช่องทางด้านบนของไฮโดรไซโคลนเพื่อที่ต้องการให้น้ำมันไหลออกทางด้านนี้ ส่วนช่องทางออกด้านข้างเพื่อที่ต้องการให้ของแข็งหรือเม็ดทรายไหลออก และส่วนช่องทางออกด้านล่างเพื่อให้น้ำได้ไหลออก ส่วนทรงกระบอกเพื่อที่จะให้เกิดการไหลวนเป็นขั้นแรกของกระบวนการให้สารผสมแยกตัว สำหรับส่วนของทรงกรวยซึ่งในลักษณะสำคัญของไฮโดรไซโคลนนี้คือมุมทรงกรวยที่มีสองชิ้นเชื่อมต่อกันมีขนาดไม่เท่ากันโดยทรงกรวยแรกมีความกว้างทำมุมเท่ากับ 20 องศาและทรงกรวยชิ้นที่สองทำมุมเท่ากับ 10 องศา รายละเอียดของทรงกรวยชิ้นที่สองต่อกันแสดงในรูปที่ 4.2 จะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ (reverse flow) ของน้ำมัน และส่วนทรงกระบอกขนาดใหญ่จะมีช่องทางออกจากด้านข้างจากช่อง

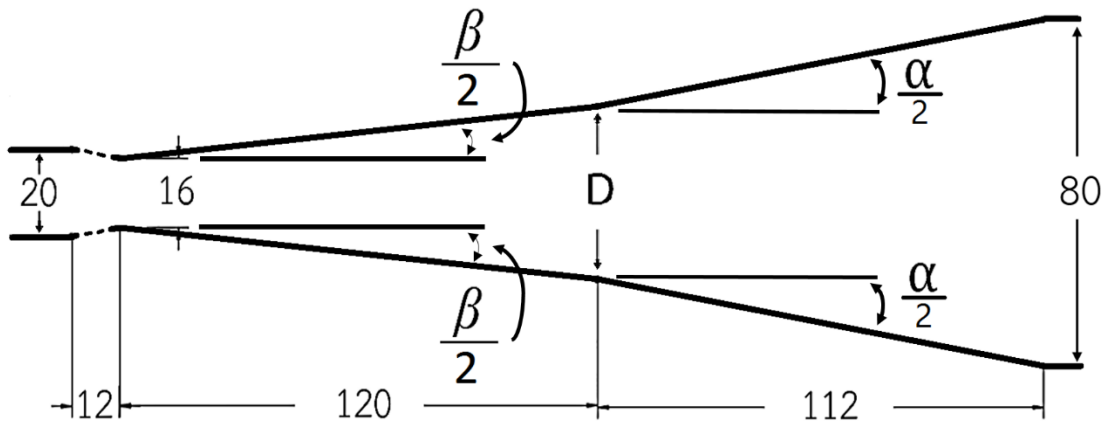
ทางออกของน้ำโดยจะมีลักษณะเหมือนถังเพื่อกักเก็บตะกอนเม็ดทรายที่เหวี่ยงออกมาจากช่องทางดังกล่าว โดยรูปร่างของไฮโดรไซโคลอนสามัญภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันถูกออกแบบโดย Changirwa [1]



รูปที่ 4.1 เป็นโครงสร้างและขนาดของไฮโดรไซโคลอนแบบสามัญภาคที่มีกรวยสองชั้นเชื่อมต่อกันถูกออกแบบโดย Changirwa [1] และมีขนาดของแต่ละส่วนตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 อัตราส่วนของรูปร่างไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

ประเภท	ขนาด (มิลลิเมตร)	ประเภท	ขนาด (มิลลิเมตร)
D	40	L_s	80
L	1,600	L_α	112
D_c	80	L_β	120
D_i	14	L_p	176
D_o	5.6	L_g	12
D_u	20	L_u	1,120



มุมของทรงกรวย (Cone Angles): $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 10^\circ$

รูปที่ 4.2 รายละเอียดโครงสร้างและขนาดของกรวยสองชั้นต่อกันไฮดรแบบสามเฟสของ Changirwa [1]

ความสัมพันธ์ระหว่างมุมทั้งสองของทรงกรวยแสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{L_\alpha}{D} = \frac{1}{2 \tan \frac{1}{2} \alpha} \quad (4.1)$$

และ

$$\frac{L_\beta}{D} = \frac{1}{4 \tan \frac{1}{2} \beta} \quad (4.2)$$

โดยอัตราส่วนของความยาวทรงกรวยด้านบนต่อกับส่วนด้านล่างแสดงได้โดย

$$\frac{L_\alpha}{L_\beta} = \frac{2 \tan \frac{1}{2} \beta}{\tan \frac{1}{2} \alpha} \quad (4.3)$$

4.1.2 คุณสมบัติของสารจากการทดลองของงานวิจัยอ้างอิง Changirwa [1]

4.1.2.1 คุณสมบัติของสารและขนาด

ตารางที่ 3 คุณสมบัติทางกายภาพของคุณสมบัติของสารโดยขนาดของเม็ดทรายมีขนาดไม่เท่ากันการแจกแจงขนาดของเม็ดทรายแสดงในตารางที่ 4

ชนิดของวัสดุ	ค่าความหนืด ที่ 20 องศาเซลเซียส	ค่าความโน้มถ่วงเฉพาะ (Specific Gravity)
น้ำมัน	0.00332 [29]	0.83
เม็ดทราย	-	2.65
น้ำ	0.001003	1

ตารางที่ 4 การแจกแจงขนาดของเม็ดทราย

ขนาด (ไมโครเมตร)	เปอร์เซ็นต์
>140	10
80 - 140	36
45 - 80	42
9 - 45	10

เนื่องจากข้อมูลจากงานวิจัยอ้างอิงเปอร์เซ็นต์ของขนาดเม็ดทรายไม่เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์จากการคำนวณ CFD จึงทำการเลือกใช้ค่าประมาณขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดทราย เท่ากับ 75 ไมโครเมตร

4.1.2.2 อัตราส่วนการแยกของไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาค (Split Ratios In Three-Phase Hydrocyclone)

ตัวแปรหลักที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์แยกสารชนิดไฮโดรไซโคลนคืออัตราการไหลของแต่ละช่องทางหรืออัตราส่วนการแยกสาร (Split Ratio, Λ) งานวิจัยที่ใช้ในการอ้างอิงทำการทดลองโดยใช้วาล์วคอยควบคุมอัตราการไหลที่ช่องทางออกด้านและช่องทางออกด้านล่างของตัวอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลน สำหรับไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาคนั้น อัตราส่วนการแยกสองชนิดของช่องทางออกที่มีอยู่ โดยอัตราส่วนของช่องทางออกด้านบนต่อช่องทางออกด้านล่าง Λ_o และ อัตราส่วนของช่องทางออกด้านข้างต่อช่องทางออกด้านล่าง Λ_s โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\Lambda_o = \frac{Q_o}{Q_u} \quad (4.4)$$

$$\Lambda_s = \frac{Q_s}{Q_u} \quad (4.5)$$

โดยที่ Q_o หมายถึงอัตราส่วนการไหลที่ช่องทางออกด้านบน (Overflow)

Q_s หมายถึงอัตราส่วนการไหลที่ช่องทางออกด้านข้าง (Trans-flow)

Q_u หมายถึงอัตราส่วนการไหลที่ช่องทางออกด้านล่าง (Underflow)

เมื่อนำทั้งสองสมการมารวมกันจะได้ว่า

$$Q_u = \frac{Q}{1 + \Lambda_o + \Lambda_s} \quad (4.6)$$

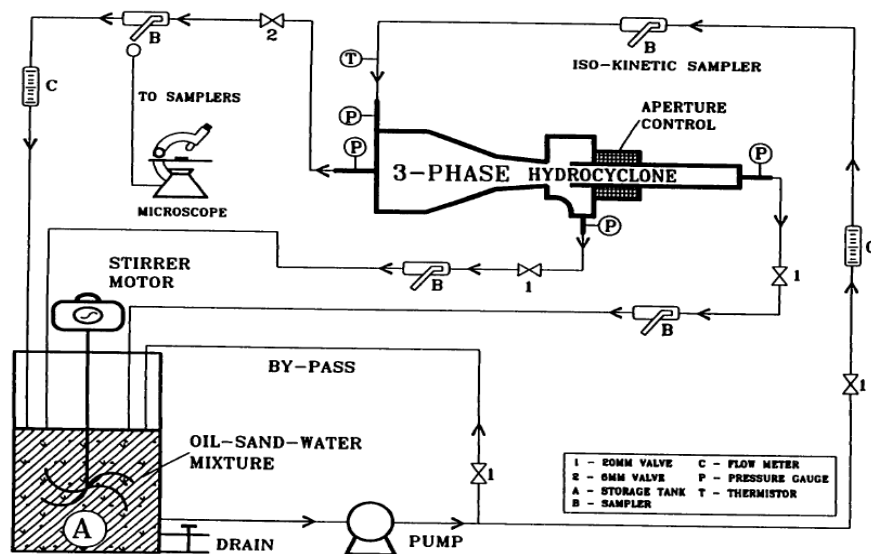
$$Q_s = \frac{Q\Lambda_s}{1 + \Lambda_o + \Lambda_s} \quad (4.7)$$

ในกรณีที่ $\Lambda_s = \Lambda_o = \Lambda$

$$Q_u = \frac{Q}{1+2\Lambda} \quad (4.8)$$

$$Q_s = \frac{Q\Lambda}{1+2\Lambda} \quad (4.9)$$

แผนผังของอุปกรณ์ของการทดลองตามรูปที่ 4.3 นี้จะสังเกตเห็นว่าตรงช่องทางต่างๆทุกทิศทางออกของการไหลจะมีการเชื่อมต่อกับวาล์วเพื่อทำการควบคุมอัตราส่วนการไหลของแต่ละทางให้มีอัตราส่วนของทางออกทางด้านบนและช่องทางออกด้านล่างตามความต้องการเพื่อต้องการควบคุมตัวแปรการไหลของช่องทางต่างๆ ซึ่งในการทดลองของงานวิจัยอ้างอิงได้ทำการกำหนดอัตราส่วนการไหลของแต่ละช่องทางออกเท่ากับ $\Lambda_s = \Lambda_o$ เท่ากับ 0.2



รูปที่ 4.3 อุปกรณ์ในการทดลองประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนสำหรับการทดลอง Changirwa [1]

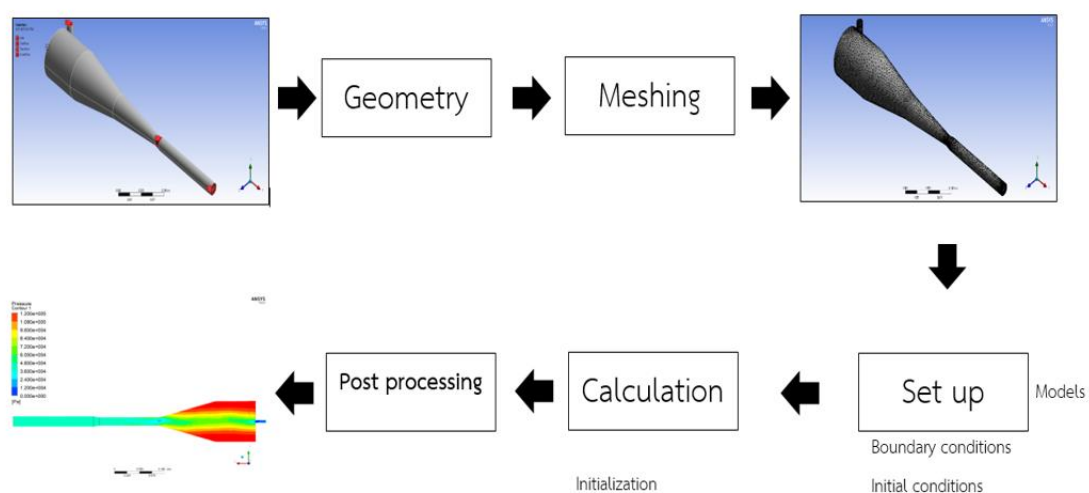
4.2 การตั้งค่าแบบจำลองการไหลของไฮโดรไซโคลนชนิดแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง แบบปั่นป่วนในไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาคสำหรับโปรแกรม ANSYS Fluent

โปรแกรม ANSYS Fluent เป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์ชนิดหนึ่งโดยที่สามารถนำไปใช้สำหรับขั้นตอนการจำลองรวมถึงการวาดโครงสร้างแบบจำลอง การสร้างกริด (Mesh) การตั้งค่าโปรแกรม การตั้งค่าการแก้ปัญหาแบบจำลอง (Calculating) และกระบวนการแสดงในรูปที่ 4.4 โดยโปรแกรมถูกใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ประกอบไปด้วย

- โปรแกรมย่อยในการออกแบบของ ANSYS (Geometry)
- โปรแกรมย่อยในการสร้างกริดของ ANSYS (Mesh)

- โปรแกรมย่อยในการตั้งค่าการแก้ปัญหาของแบบจำลอง ANSYS Fluent (Set up and Calculation)
- โปรแกรมย่อยในการวิเคราะห์ของแบบจำลอง (CFD Post and Microsoft Office Excel)

จากการศึกษางานวิจัยอ้างอิงของ Changirwa [1] ทำให้ต้องมีการตรวจสอบความถูกต้อง



รูปที่ 4.4 กระบวนการในการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณโดยใช้โปรแกรม ANSYS Fluent

ของแบบจำลองโดยทำการทดสอบโดยการนำผลจากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Changirwa [1] ดังนั้นทำให้ต้องมีการเงื่อนไขขอบเขตต่างๆ ของโปรแกรมให้สอดคล้องกับขั้นตอนการทดลองของ Changirwa [1] เช่นกัน ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยแรงต้านการเคลื่อนที่ (drag) ระหว่างภูมิภาคคำนวณโดยใช้แบบจำลองแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขต

Boundary	Conditions	Value
Inlet	Gauge Pressure	37,231 Pa
	Velocity	3.608 5.593 and 7.398 m/s
Outlet	Type	Outlet Ratio
	Overflow	0.1428
	Trans-flow	0.1428
	Underflow	0.7144
Inner Wall Surface	No-slip Condition	

ตารางที่ 6 การตั้งค่า Interaction

Interaction	Sand-Water	Oil-Water	Sand-Oil
Drag coefficient	Hulin-gidaspow	Morsi-alexander	Morsi-alexander
Restitution coefficient	0.9	0.9	0.9

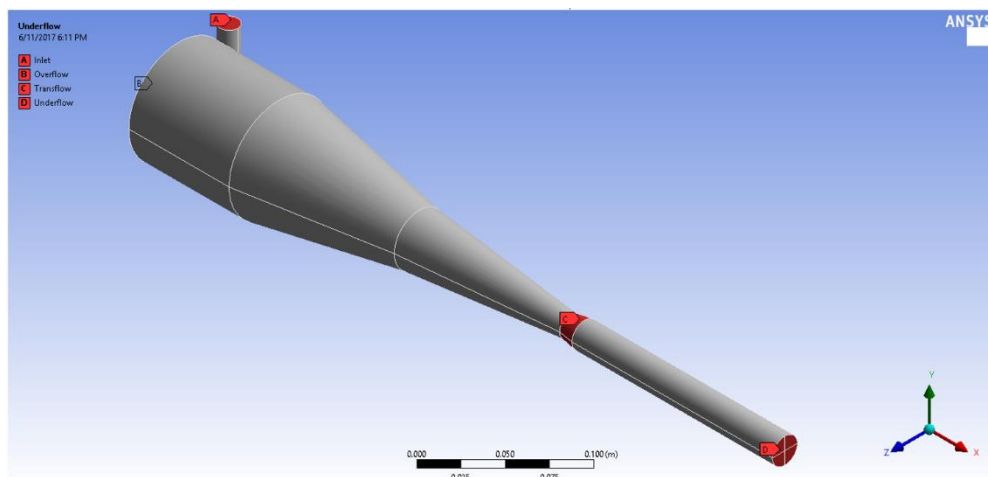
4.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนในไฮโดรไซโคลนแบบสาม

วิถุภาค

สำหรับการศึกษาการวิเคราะห์ลักษณะการไหลและประสิทธิภาพการแยกสารทั้งหยดน้ำมันและเม็ดทรายของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบสามวิถุภาค จะทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Changirwa [1] ซึ่งทำการจำลองการแยกสารแบบสามมิติ เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมของการแยกสารของไฮโดรไซโคลนแบบดังกล่าวโดยจะทำการศึกษาการไหลออกของหยดน้ำมันที่ไหลออกด้านบนต่อการไหลเข้าของหยดน้ำมันด้านขาเข้า และทำการศึกษาการไหลออกของเม็ดทรายต่อการไหลเข้าของเม็ดทรายด้านขาเข้า โดยจะพิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพของการแยกสารของแต่ละด้านโดยทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วสามค่าคือ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาที ในงานวิจัยนี้จะทำการกำหนดขนาดของหยดน้ำมันเท่ากับ 140 ไมโครเมตรและขนาดของเม็ดทรายที่ใช้ในการทดลองคือ 75 ไมโครเมตรโดยประมาณเพื่อให้ง่ายในการทำศึกษา โดยขั้นตอนแรกจะทำการสร้างกริด (Grid generation) เพื่อแบ่งรูปร่างลักษณะของปัญหาออกเป็นชิ้นส่วนที่มีขนาดเล็กๆ แล้วทำการเลือกจำนวนกริด (Grid number) ที่มีขนาดเหมาะสมเพื่อที่จะใช้ในการคำนวณลักษณะของปัญหาในการแยกสารดังกล่าว โดยจะใช้กริดที่มีความละเอียดแบบสม่ำเสมอตลอดทั้งโดเมนการไหลเพื่อให้ผลลัพธ์ในการคำนวณมีความแม่นยำและถูกต้องด้วยวิธีการทดสอบ Grid independency เมื่อทำการตัดสินใจเลือกจำนวนกริดที่เหมาะสมกับการทดลองแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการหาผลลัพธ์ของการคำนวณการแยกสารของไฮโดรไซโคลนเพื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

4.3.1 การสร้างกริดของขอบเขตการวิจัย (Grid generation)

สำหรับการสร้างกริดของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบสามวิถุภาค (Double-Cone Of Hydrocyclone Separator) นั้นมีรูปร่างค่อนข้างซับซ้อน มีส่วนโค้งและขนาดของแต่ละส่วนที่แตกต่างกันทำให้มีความยากลำบากในการสร้างกริดแบบสี่เหลี่ยมและการทำให้ค่าของผลเฉลยมีความแม่นยำจึงจะเป็นต้องทำการแบ่งขนาดของแต่ละส่วนของไฮโดรไซโคลนเพื่อที่จะ



รูปที่ 4.5 การแบ่งกริดของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการแบ่งตามประเภทต่างๆตามกรณีตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางการแบ่งส่วนของแต่ละชั้นของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบสามวิภูภาค (Double-Cone Of Hydrocyclone Separator) โดยการปรับเปลี่ยนค่า Numbers of division

Type	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Circle1	1	10	20	40
Circle2	1	10	20	40
Circle3	1	3	20	40
Oil R1	1	20	20	40
Oil R2	1	20	20	40
Mix R1	1	10	10	20
Mix R2	1	10	10	20
Solid Out	1	22	22	44
Water R1	1	10	10	20
Water R2	1	10	10	20
Oil Axis	1	10	10	20
Mix Axis	1	10	25	50
Cone 1	1	10	40	80
Cone 2	1	5	20	40
Water Axis	1	20	20	40
Cell	144,238	297,915	424,126	902,733

สามารถทำให้ขนาดของกริดมีขนาดเล็กมากพอที่จะไม่สามารถทำให้ค่าของผลเฉลยมีการเปลี่ยนแปลงหรือคลาดเคลื่อนได้โดยมีการแบ่งส่วนของไฮโดรไซโคลนดังแสดงในรูปที่ 4.5 และตารางที่ 7

จากตารางที่ 7 เป็นการปรับความละเอียดของกริดในแต่ละชั้นส่วนของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบสามัญภาค (Double-Cone Of Hydrocyclone Separator) ซึ่งจะช่วยให้ค่าความแม่นยำและความคลาดเคลื่อนของผลเฉลี่ยดีขึ้นตั้งแต่เมื่อทำการเปรียบเทียบรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.5 จะพบว่ามึรูปร่างแตกต่างกันโดยตัดส่วนที่ไม่ส่งผลต่อการวิเคราะห์การไหลและประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายออกไปคือส่วนกักเก็บเม็ดทรายของช่องทางออกตรงกลางและความยาวของช่องทางออกด้านล่างเนื่องจากจะช่วยประหยัดหน่วยความจำและระยะเวลาในการคำนวณของโปรแกรมที่ต้องเสียไปเมื่อต้องทำการคำนวณ

แบบจำลองมีค่าความละเอียดของกริดมากขึ้นนั้นก็จะมีผลเสียคือการที่เครื่องคอมพิวเตอร์ต้องใช้ความจำ (Memory) มากขึ้นตามไปด้วยทำให้คอมพิวเตอร์อาจไม่สามารถดำเนินการคำนวณได้หรือคอมพิวเตอร์สามารถคำนวณกรณีการศึกษาได้เพียงแค่กรณีเดียวเท่านั้น

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการศึกษาเชิงตัวเลขกับผลการทดลองของ Changirwa [1] ซึ่งทำการจำลองการแยกสารของไฮโดรไซโคลนในสามมิติในกรณีการแยกสารสามชนิด คือ น้ำ หยดน้ำมัน และเม็ดทราย ซึ่งจะนำทั้งสามสารมาทำการเปรียบเทียบการแยกโดยทำการสร้างโครงสร้างของกริด เลือกสร้างแบบที่ขนาดของรูปทรงในแต่ละส่วน โดยทำการเปรียบเทียบกริดดังแสดงในตาราง

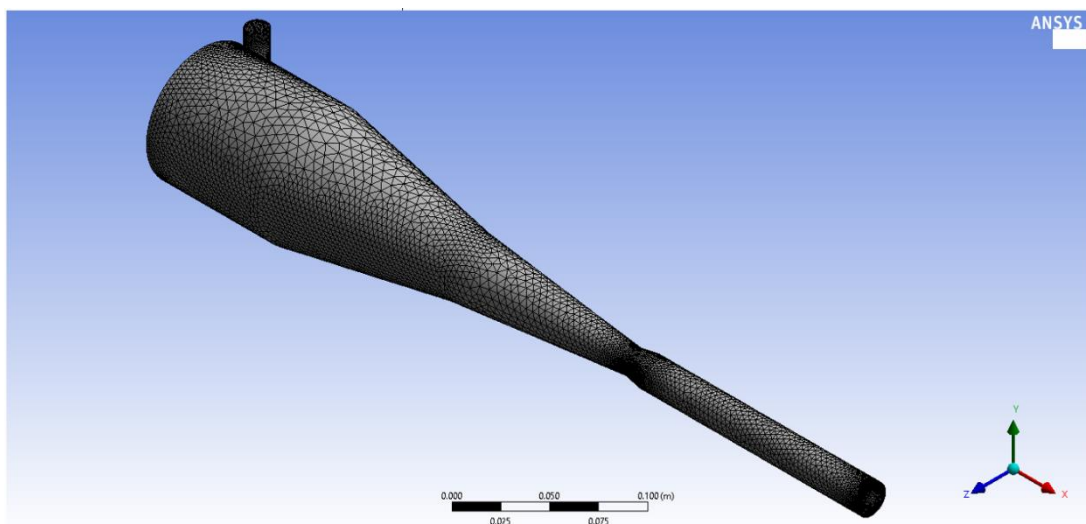
ตารางที่ 8 ตารางจำนวนกริดของโครงสร้างไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบสามัญภาค (Grid number) กับขนาดของกริด (Grid size)

Case (i)	Grid size (mm)	Grid number
1	8.0	144,238
2	5	297,915
3	3.5	424,126
4	1.5	902,733

จากตารางที่ 8 ไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันแบบสามัญภาค (double-cone) ที่มีมุมของทรงกรวยชั้นที่หนึ่งเท่ากับ 20 องศาและมุมของทรงกรวยชั้นที่สองเท่ากับ 10 องศาโดยกำหนด Grid Size เฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรทุกมิติในแต่ละเซลล์ (กรณีที่ 4) จะได้จำนวนเท่ากับ 902,733 ซึ่งพบว่าลักษณะของกริดมีความละเอียดอย่างมาก ดังแสดงในรูป 4.6

รูปที่ 4.6 แสดงกริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาการแยกสารแบบสามัญภาคของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยจะเริ่มต้นจากการเลือกขนาดของกริดที่มีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้โดเมนของการคำนวณไม่สามารถทำให้ผลลัพธ์มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพื่อ

ความแม่นยำของผลเฉลยโดยรูปร่างของกริดจะเป็นรูปทรงแบบสามเหลี่ยมเพื่อความง่ายของการจัดระเบียบในแบบจำลองที่มีส่วนโค้งหรือรูปร่างซับซ้อน โดยการคำนวณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ จะต้องแบ่งรูปร่างของปัญหาเป็นชิ้นเล็กๆ ซึ่งตามทฤษฎีแล้วยิ่งโดเมนมีขนาดเล็กมากเท่าไรความแม่นยำของค่าผลเฉลยก็ยิ่งมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.6 กริดที่ใช้ในการคำนวณสำหรับปัญหาในการแยกสารแบบสามภูมิภาคของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันโดยกำหนด Grid Size เฉลี่ยเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตรทุกมิติในแต่ละเซลล์

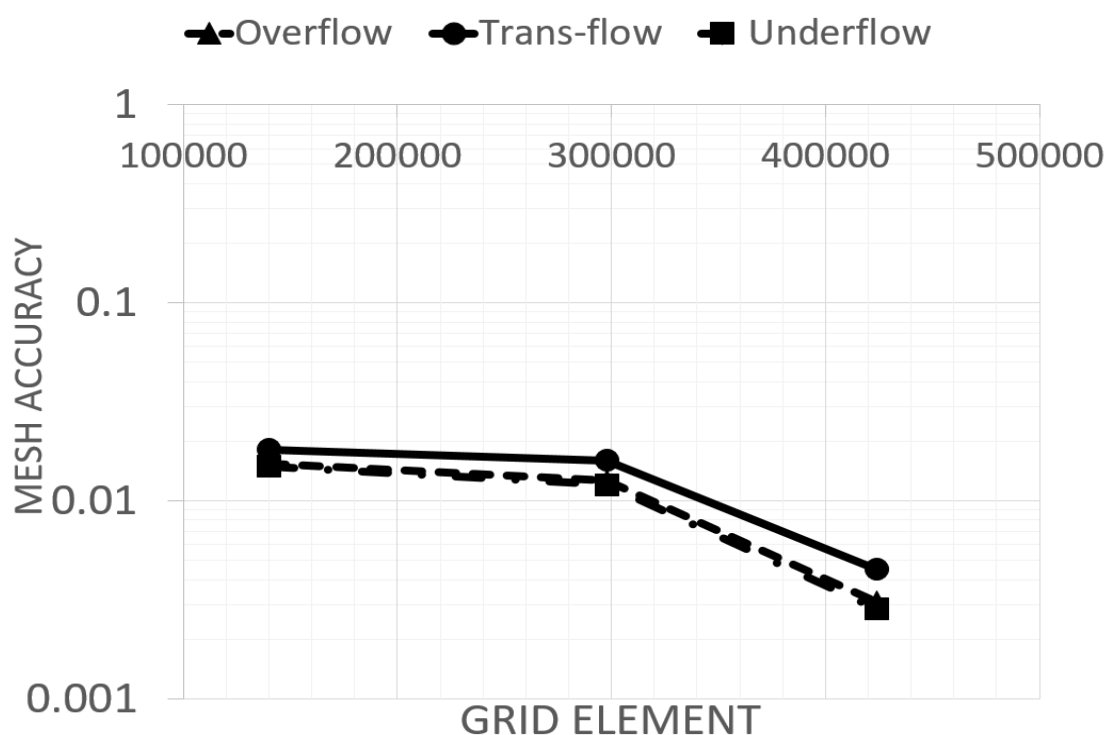
4.3.2 การทดสอบ Grid independency

การทดสอบ Grid independency ทำให้ทราบถึงความเหมาะสมในการทำการสร้างกริด (Grid generation) เพื่อที่จะใช้ในการทดสอบการแยกสารแบบสามภูมิภาคของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันโดยมีเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการตรวจสอบ Mesh Refinement Analysis ที่ความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที กำหนด Volume Fraction ของน้ำมันและทรายเท่ากับ 0.1 เปอร์เซนต์ โดยใช้แบบจำลองแบบ Eulerian Model จากตารางที่ 8 จะมีการทดสอบกริดทั้งหมด 4 กรณีโดยจำนวนกริดมีทั้งหมด 4 ค่าคือ 266,032 321,216 422,746 และ 902,733 ตามลำดับ โดยจะมีการทำการเก็บค่าผลการคำนวณ CFD ทุก 100 Time Step โดยจะกำหนดค่า Time Step Size เท่ากับ 0.001 หรือเท่ากับ 0.1 วินาที โดยการทำการคำนวณ CFD แบบ Transient นั้นจะผลการคำนวณจนเข้าสู่ภาวะ Steady State เมื่อเวลาในการคำนวณมากกว่า 10 วินาที โดยจะทำการเฉลี่ยผลการคำนวณ CFD ทั้งหมด 6 ค่าทุกๆ 0.1 วินาทีเมื่อผลการคำนวณเข้าสู่ภาวะ Steady State เรียบร้อยแล้วและนำค่าของผลการคำนวณ CFD ในการแยกสารทั้ง 4 กรณี

โดยทำการคำนวณจากการนำค่าจากการทดลองของกรณีที่มี Grid Number ที่มีค่ามากที่สุดทำการเปรียบเทียบ ดังสมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$E_{j,i} = \frac{|\dot{m}_{j,4} - \dot{m}_{j,i}|}{|\dot{m}_{j,4}|} \quad (4.11)$$

โดยที่ตัวห้อย i หมายถึงลำดับของกรณีของกริดที่ใช้ในการตรวจสอบดังแสดงในตารางที่ 8 และ j หมายถึงตำแหน่งของช่องทางออก



รูปที่ 4.7 ผลของค่าการทดลองที่ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองของจำนวนกริดที่สนใจกับค่าผลการทดลองของจำนวนกริดที่มีค่ามากที่สุด โดย Overflow คือค่าของผลที่ช่องทางออกด้านบน Trans-flow คือค่าของผลที่ช่องทางออกด้านข้าง และ Underflow คือค่าของผลที่ช่องทางออกด้านล่าง

จากวิธีคิดดังกล่าวทำให้มีกรณีในการทดสอบ Grid independency จากค่าผลของความแม่นยำเมื่อเปรียบเทียบกับผลของจำนวนกริดที่มากที่สุดเท่ากับ 902,733 ต่อจำนวนกริดน้อยไปมาก โดยจะพิจารณาการไหลออกที่ตำแหน่งช่องทางออกด้านบน (Overflow) ช่องทางออกด้านข้าง (Trans-flow) และช่องทางออกด้านล่าง (Underflow) แสดงในรูปที่ 4.7 เห็นว่าเมื่อจำนวนกริดมีค่ามาก ค่าความแม่นยำของผลการทดลองจะมีค่ามากขึ้น แต่ผลเสียของการที่มีจำนวนกริดมากทำให้เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการทดลองใช้ความจำสำรองจำนวนมาก เห็นว่ากรณีที่สามนั้นจะมี

คลาดเคลื่อนของค่าต่ำมากที่สุดที่ 0.001 เมื่อเทียบกับกรณีก่อนหน้า ที่ 0.01 หรือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ขนาด กริดที่ 422,726 เหมาะสมที่จะนำไปทำการเปรียบเทียบไฮโดรไฮโคลนเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการแยกสาร โดยมี Element size เฉลี่ย เท่ากับ 3.5 มิลลิเมตรค่าตัวเลขต่างๆ กับผลการทดลองของ Changirwa [1] จึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการศึกษาการแก้ปัญหาในการแยกสารแบบสามวัฏภาคของไฮโดรไฮโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำ หยदन้ำมัน และเม็ดทรายระหว่างผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลองกับผลการทดลองของ Changirwa [1]

ในการทำการตรวจสอบแบบจำลองการแยกสารแบบสามวัฏภาคของไฮโดรไฮโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันนั้นเป็นการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) สำหรับการไหลแบบสามมิติของไฮโดรไฮโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยจะใช้โปรแกรม ANSYS Fluent สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะศึกษาการแยกสารของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนสามวัฏภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยจะทำการศึกษการแยกสารของ น้ำ หยदन้ำมัน และเม็ดทราย โดยต้องการเปรียบเทียบการแยกสารทั้งสามสารที่ช่องทางออกที่แตกต่างกันคือต้องการให้หยदन้ำมัน ไหลออกที่ช่องทางด้านบน ต้องการให้เม็ดทรายไหลออกที่ช่องทางออกด้านข้าง และให้น้ำไหลออกที่ช่องทางออกด้านล่าง โดยจะทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ทำการทดลองก่อนหน้าของ Changirwa [1] มาอ้างอิงโดยจะมีการตั้งสมมติฐานการไหลของการแยกสารในอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนสาม วัฏภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยคุณสมบัติดังต่อไปนี้

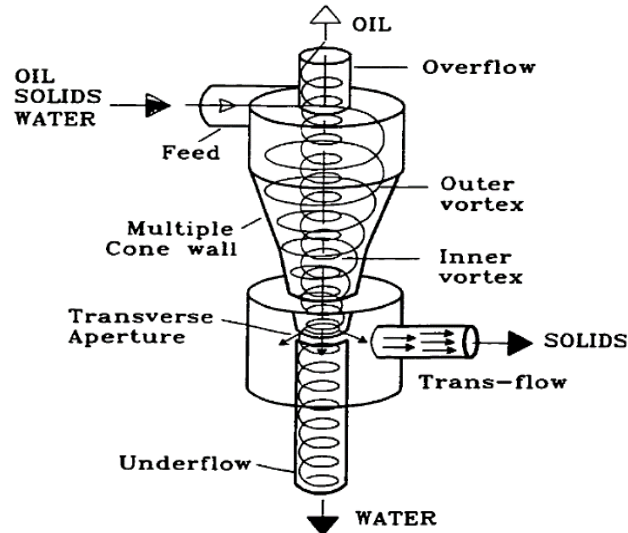
- 1) การไหลเป็นแบบปั่นป่วน
- 2) การไหลเกิดใน 3 มิติ
- 3) การไหลอยู่ในภาวะคงตัวและเป็นชนิดอัดตัวไม่ได้
- 4) คุณสมบัติต่างๆของสารทั้งสามสารในการไหลมีค่าคงที่ตลอดทั้งขอบเขตที่พิจารณา

4.4.1 ประสิทธิภาพการแยกสารของอุปกรณ์ไฮโดรไฮโคลนของวิจัยที่ต้องการศึกษา

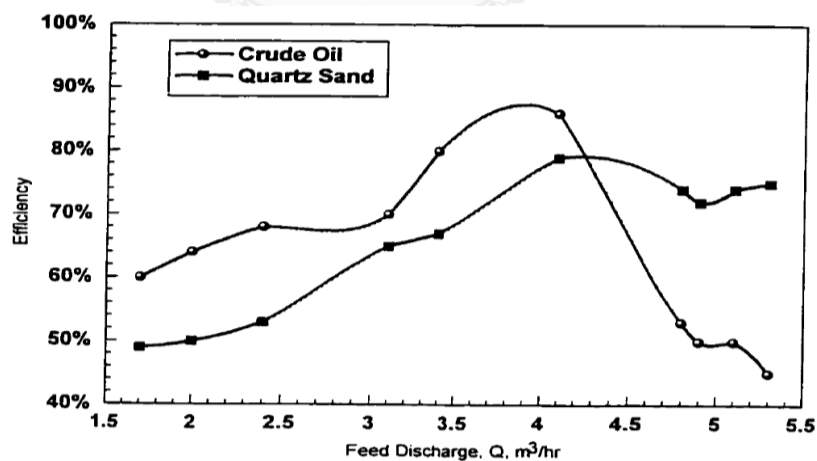
งานวิจัยที่ทำการทดลองของ Changirwa [1] ที่นำมาอ้างอิงผลการทดลองนั้นจะเป็นแบบรูปร่างไฮโดรไฮโคลนแบบสามวัฏภาคที่ทรงกรวยสองชั้นเชื่อมต่อกันซึ่งจะใช้ในการแยกสารผสมโดยการสังเกตกระแสการไหลทั้งสามกระแสโดยจะเป็นการแยกสารทั้ง น้ำ หยदन้ำมัน และเม็ดทราย ตามรูปจากงานวิจัยของ Changirwa et al. [1] ดังรูปที่ 4.8 ต่อไปนี้

จากรูปด้านบนแสดงให้เห็นว่าของไหลผสมที่ไหลเข้ามาด้านขวาเข้านั้นเมื่อไหลเข้าไปในส่วนทรงกระบอกของไฮโดรไฮโคลนนั้นจะเกิดการไหลวนแบบปั่นป่วนทำให้เกิดการแยกตัวของสารที่มี

ความแตกต่างจากคุณสมบัติของความหนาแน่นโดยหยดน้ำมันที่มีความหนาแน่นน้อยที่สุดนั้นจะไหลหมุนวนด้านในทรงแกนของตัวไฮโดรไซโคลอนทำให้เกิดการไหลย้อนกลับ (Reverse Flow) ของวัฏภาคหยดน้ำมันโดยไหลออกจากช่องทางออกด้านบนและส่วนของวัฏภาคเม็ดทรายที่มีคุณสมบัติของความหนาแน่นมากที่สุดจะมีลักษณะการเหวี่ยงของกระแสการไหลของเม็ดทรายออกด้านข้างของตัวไฮโดรไซโคลอนผ่านช่องทางออกด้านข้างไปสู่ที่ถังกักเก็บตะกอนเม็ดทราย



รูปที่ 4. 8 แผนผังดังกล่าวเป็นลักษณะของกระแสการไหลภายในไฮโดรไซโคลอนที่ทำการแยกสารแบบสามวัฏภาค (รูปจากงานวิจัยของ Changirwa et al. [1])



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการแยกของสารในไฮโดรไซโคลอนที่ทำการแยกสารแบบสามวัฏภาค เมื่อดำเนินการที่อัตราส่วนต่อปริมาตรของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเท่ากับ 0.1% และอัตราส่วนการไหล Λ เท่ากับ 0.2 (รูปจากงานวิจัยของ Changirwa et al. [1])

โดยการทดลองของงานวิจัยดังกล่าวมีการทำการศึกษาค่าการเปลี่ยนแปลงของการแยกสารและลักษณะการไหลโดยกำหนดค่าความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมทั้ง 3 ค่าเท่ากับ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีซึ่งความเร็วดังกล่าวผ่านการแปลงจากหน่วยปริมาตรต่อชั่วโมงตามรูปที่ 4.9 และกำหนดความดันขาเข้าเท่ากับ 37,231 ปาสคาล โดยมีการกำหนดอัตราส่วนการไหล (Λ) ของแต่ละช่องทางออกของไฮโดรไซโคลนแบบสามวัฏภาคเท่ากับ 0.2 และค่าความเข้มข้นของปริมาตร (Volume Fraction) ของสารแต่ละสารโดยจะมีการกำหนดค่าดังกล่าวสำหรับหยदन้ำมันและเม็ดทรายส่วนน้ำจะเป็นส่วนที่เหลือหลังจากการกำหนดค่าของหยदन้ำมันและเม็ดทรายแล้ว โดยค่าความเข้มข้นของปริมาตร (Volume Fraction) ของหยदन้ำมันและเม็ดทรายกำหนดค่าไว้เท่ากับ 0.1 เปอร์เซนต์สำหรับขาเข้าของการไหลของสารผสม

จากการกำหนดค่าและคุณสมบัติต่างๆเหล่านี้ได้ผลของประสิทธิภาพการแยกของสารของไฮโดรไซโคลนสามวัฏภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันจากงานวิจัยของ Changirwa [1] โดยกราฟประสิทธิภาพการแยกสารจากงานวิจัยดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.9 แสดงประสิทธิภาพการแยกเป็นดังนี้

จากกราฟประสิทธิภาพการแยกสารแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการแยกของหยदन้ำมันที่ไหลออกจากด้านช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลน และประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายที่ไหลออกจากด้านช่องทางออกด้านล่างของไฮโดรไซโคลนโดยลักษณะของประสิทธิภาพการแยกสารจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อความเร็วขาเข้าเปลี่ยนแปลงก็ทำให้ประสิทธิภาพการแยกของหยदन้ำมันและเม็ดทรายเปลี่ยนแปลงไปด้วยเมื่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมตั้งแต่ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีเห็นว่าประสิทธิภาพการแยกของหยदन้ำมันจะมีค่ามากกว่าการแยกของเม็ดทรายแต่เมื่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมมากกว่า 7.398 เมตรต่อวินาทีหรือค่า Feed Discharge (Q) มากกว่า 4.1 เมตรกำลังสามต่อชั่วโมง ประสิทธิภาพการแยกสารของเม็ดทรายจะมีค่ามากกว่าประสิทธิภาพการแยกของหยदन้ำมัน

4.4.2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสารของการทดลองและแบบจำลอง

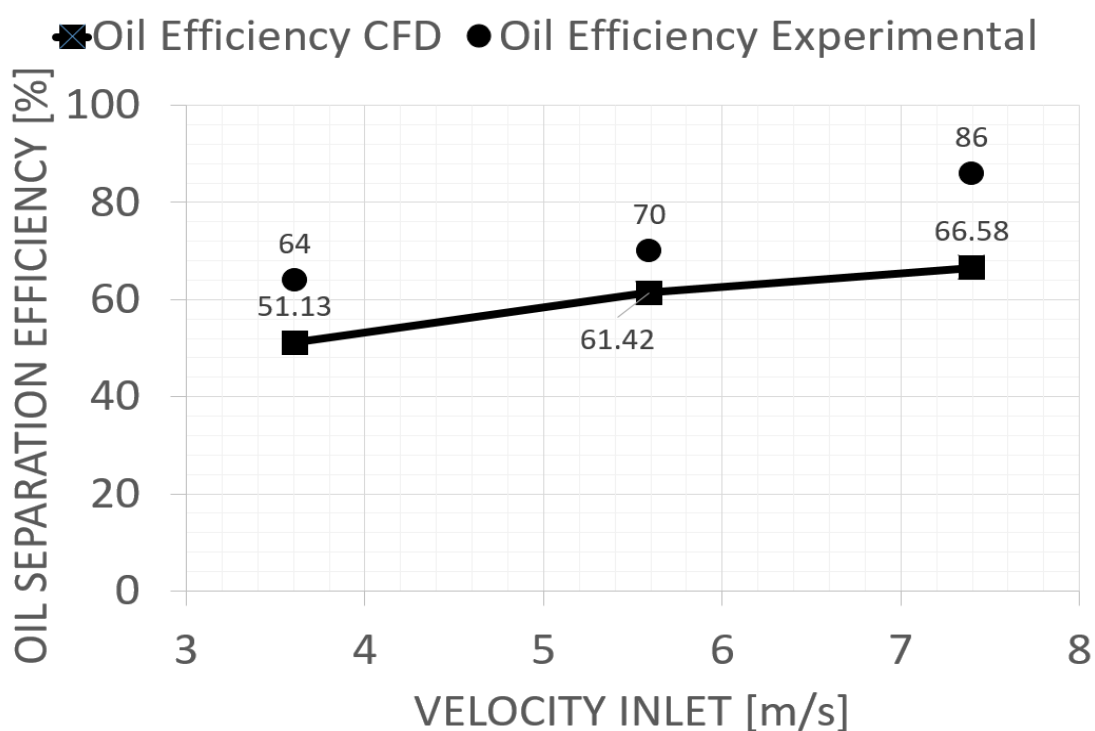
เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้การคำนวณรูปแบบระเบียบวิธีเชิงตัวเลข จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมโดยการเปรียบเทียบผลกับผลการทดลองจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเพื่อให้ผลที่ได้จากการคำนวณถูกต้องและนำแบบจำลองของโปรแกรมห้มาประยุกต์ใช้ในการศึกษาต่อไป โดยการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้นจะกำหนดคุณสมบัติของสารตามตารางที่ 3 ตามเงื่อนไขการทดลองตามงานวิจัยอ้างอิงของ Changirwa [1] และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกน้ำมันและเม็ดทรายที่ต้องการให้หยदन้ำมันแยกออกที่ช่องทางออกด้านบนและ

เม็ดทรายแยกออกที่ช่องทางออกด้านข้างโดยการคำนวณประสิทธิภาพการแยกของน้ำมันตามสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{s,oil} = \frac{|\dot{m}_{Oil,Overflow}|}{|\dot{m}_{Oil,Inlet}|} \times 100 \quad (4.12)$$

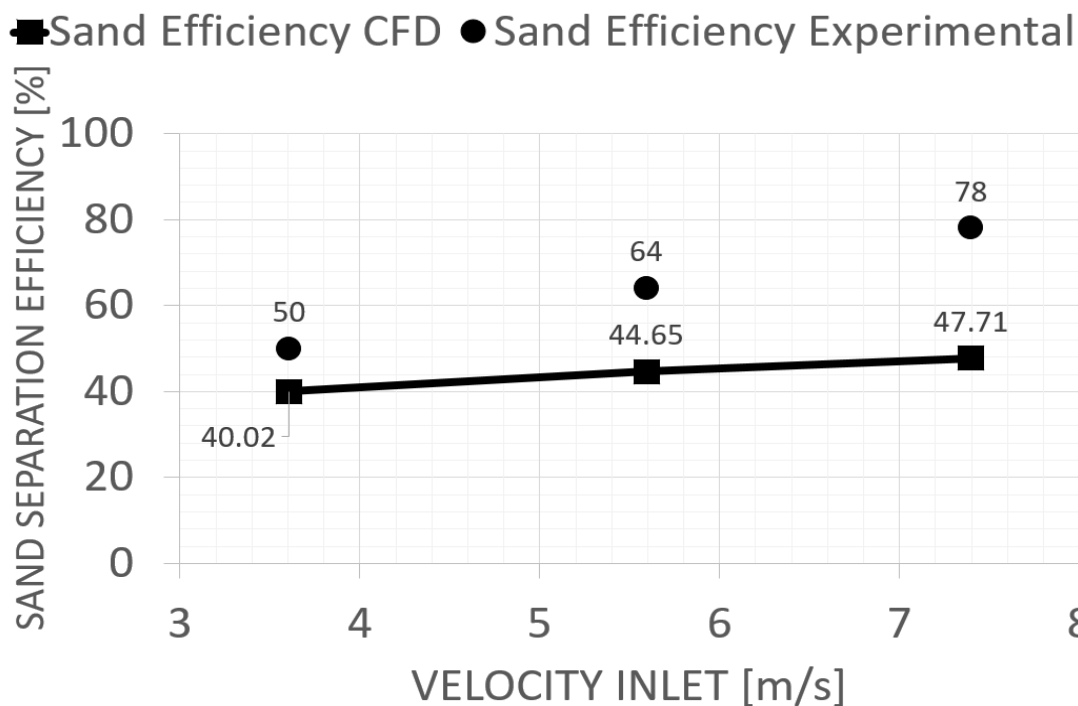
และคำนวณประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายตามสมการดังต่อไปนี้

$$\eta_{s,sand} = \frac{|\dot{m}_{Sand,Trans-flow}|}{|\dot{m}_{Sand,Inlet}|} \times 100 \quad (4.13)$$



รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกสารน้ำมันที่ความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาที

รูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันของการทดลองและการใช้โปรแกรมทำการคำนวณ และรูปที่ 4.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายของการทดลองและการใช้โปรแกรมทำการคำนวณของอุปกรณ์การแยกสารไฮโดรไซโคลอนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันจากการทดลองของ Changirwa [1]



รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายที่ความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาที

ถึงแม้ว่าการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าคลาดเคลื่อนในแนวโน้มที่แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการแยกของทั้งสองสารมีค่าน้อยกว่าผลการทดลองของงานวิจัยอ้างอิง แต่เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกของหยदन้ำมันและเม็ดทรายเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งจะสอดคล้องกับผลการทดลองตามงานวิจัยอ้างอิงของ Changirwa [1] ดังนั้นผลการศึกษาคำนวณในขั้นตอนต่อไปจะสนใจในแนวโน้มของประสิทธิภาพการแยกสารเป็นหลัก

4.5 สรุปผลความถูกต้องของโปรแกรม

สำหรับการตรวจสอบผลการคำนวณความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ANSYS Fluent แม้จะพบการเกิด reverse flow จากการคำนวณ CFD ของระบบบ้างแต่มีผลน้อยมากไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันและเม็ดทราย และเมื่อได้ทำการตัดส่วนถึงกักเก็บเม็ดทรายออกไปนั้นไม่ส่งผลต่อการคำนวณประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันและเม็ดทรายเพราะได้ทำการเก็บค่าผลการคำนวณ CFD เมื่ออยู่ในสภาวะ steady state ดังนั้นจากรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการแยกของหยदन้ำมันและเม็ดทรายของอุปกรณ์การแยกสารไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันจากการทดลองของ Changirwa [1]

และการคำนวณจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะสังเกตได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าเพิ่มขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเพิ่มขึ้นตามไปด้วยซึ่งจะมีแนวโน้มสอดคล้องกับผลการทดลองตามงานวิจัยอ้างอิงของ Changirwa [1]



บทที่ 5

ผลของขนาดมุกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนสามวัฏภาค แบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

การศึกษาผลของขนาดมุกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนสามวัฏภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันทำโดยการใช้รูปร่างของไฮโดรไซโคลนของ Changirwa [1] เป็นพื้นฐาน เนื่องจากไฮโดรไซโคลนของ Changirwa [1] มีจุดเด่นอยู่ที่การนำกรวยสองชั้นที่มีมุมต่างกันคือ α เท่ากับ 20 องศาและ β เท่ากับ 10 องศามาต่อกันโดยมีระยะเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยต่อกันเท่ากับ 40 มิลลิเมตร ข้อควรสังเกตคือการเพิ่มขนาดของระยะกลางกรวยมีผลทำให้มุมของกรวยทั้งสองเปลี่ยนแปลงเท่านั้น แต่จะไม่ทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลาย (ขาเข้ากรวยที่ 80 มิลลิเมตร และขาออกกรวยที่ 16 มิลลิเมตร) และความยาวโดยรวมของกรวยสองชั้นต่อกันเปลี่ยนแปลงตามไปด้วยการศึกษานี้จึงเลือกที่จะศึกษาผลของขนาดของมุกรวยทั้งสองชั้นต่อกันต่อประสิทธิภาพการแยกโดยการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยสองชั้นต่อกันทำให้การปรับปรุงเพื่อการติดตั้งในอุตสาหกรรมทำได้สะดวก ข้อควรสังเกต คือ การเพิ่มระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกรวยสองชั้นต่อกันทำให้มุมของทรงกรวยชั้นที่หนึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้นในทางกลับกันจะทำให้มุมของทรงกรวยชั้นที่สองมีขนาดเล็กลง โดยเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางที่กลางกรวยมีขนาดเท่ากับ 49.1 มิลลิเมตร จะทำให้กรวยสองชั้นต่อกันจะมีลักษณะเหมือนเป็นกรวยเดี่ยว โดยงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับเปลี่ยนระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกรวยสองชั้นต่อกันจาก 40 มิลลิเมตร ให้เปลี่ยนไปเป็นค่าระหว่าง 16 ถึง 80 มิลลิเมตร รวม 11 กรณีโดยแสดงรายละเอียดของการปรับเปลี่ยนทรงกรวยทั้งสองชั้นและจำนวนกริดของไฮโดรไซโคลนที่มีการศึกษาในตารางที่ 8 โดยทำการศึกษาที่ความเร็วช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีโดยทำการกำหนดความดันขาเข้าเท่ากับ 37,231 ปาสคาลอัตราส่วนการไหลที่ช่องทางออกด้านบนต่อช่องทางออกด้านล่างและช่องทางออกด้านข้างต่อช่องทางออกด้านล่างเท่ากับ 0.2 และกำหนด Volume fraction ของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเท่ากับ 0.1 %

ประโยชน์ของการใช้อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันเพื่อแยกของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง ความสามารถของไฮโดรไซโคลนที่ออกแบบโดย Changirwa [1] สามารถที่จะแยกน้ำมันและทรายออกจากกันได้อย่างมีประสิทธิภาพแสดงรายละเอียดของเปอร์เซ็นต์หยดน้ำมันที่ไหลออกที่ช่องทางออกด้านข้างและเปอร์เซ็นต์เม็ดทรายที่ไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนของแบบจำลองในตารางที่ 10 และตารางที่ 11 ซึ่งความสามารถดังกล่าวคือช่องทางออกด้านบนจะมีหยดน้ำมันกับน้ำที่ไหลออกและมีเม็ดทรายไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนเป็นส่วนน้อย

ตารางที่ 9 การปรับเปลี่ยนมุมของทรงกรวยทั้งสองขึ้นโดยการเพิ่มและลดขนาดของระยะเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกรวยสองขึ้นต่อกัน (D)

Type	Cone Center Diameter (D) [mm]	มุม α	มุม β	Element
D 16	16	31.89	0	427,235
D 24	24	28.08	3.820	425,368
D 32	32	24.18	7.620	422,199
D 36	36	22.23	9.530	422,850
D 40	40	20.00	10.00	424,126
D 44	44	18.26	13.31	427,499
D 49.1	49.1	15.71	15.71	427,714
D 56	56	12.23	18.92	427,055
D 64	64	8.180	22.62	425,676
D 72	72	4.090	26.27	424,764
D 80	80	0	29.86	423,782

ตารางที่ 10 ปริมาณอัตราส่วนของเม็ดทรายที่ไหลออกช่องทางด้านบนต่อปริมาณเม็ดทรายทั้งหมดที่ไหลเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนสามวัฏภาคที่ได้ออกแบบจำลอง

Type	Sand Outlet in Overflow [Percent]		
	Velocity Inlet [m/s]		
	3.608	5.593	7.398
D 16	0.536	0.687	0.591
D 24	0.424	0.390	0.390
D 32	0.428	0.366	0.358
D 36	0.706	0.605	0.505
D 40	0.577	0.544	0.513
D 44	0.488	0.496	0.425
D 49.1	0.428	0.394	0.319
D 56	0.467	0.393	0.350
D 64	0.44	0.394	0.386
D 72	0.377	0.415	0.352
D 80	0.435	0.419	0.323

ตารางที่ 11 ปริมาณอัตราส่วนของหยดน้ำมันที่ไหลออกช่องทางด้านข้างต่อปริมาณหยดน้ำมันทั้งหมดที่ไหลเข้าอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนสามวัฏภาคที่ได้ออกแบบจำลอง

Type	Oil Outlet in Trans-flow [Percent]		
	Velocity Inlet [m/s]		
	3.608	5.593	7.398
D 16	7.039	5.865	4.928
D 24	5.162	4.131	3.587
D 32	4.543	3.024	2.991
D 36	5.282	4.097	2.935
D 40	4.582	3.146	2.202
D 44	4.220	3.931	3.354
D 49.1	4.081	2.538	1.864
D 56	4.642	3.532	2.845
D 64	5.556	3.944	3.659
D 72	4.665	2.740	2.128
D 80	4.725	3.920	2.213

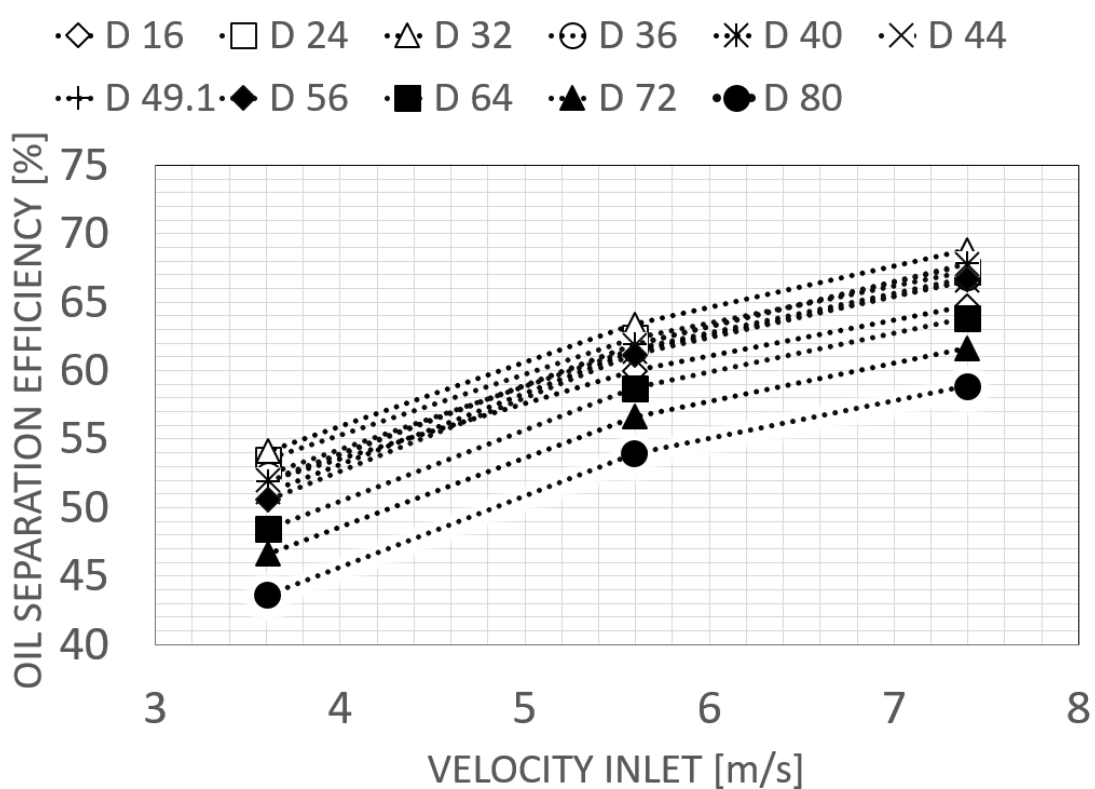
เท่านั้นเช่นเดียวกันที่ช่องทางออกด้านข้างของไฮโดรไซโคลนส่วนใหญ่ก็จะมีเพียงเม็ดทรายกับน้ำเช่นกันที่ไหลออกที่ช่องทางดังกล่าว ดังนั้นไฮโดรไซโคลนที่มีช่องทางออกสามด้านคือช่องทางออกด้านบน ช่องทางออกด้านข้างและ ช่องทางออกด้านล่าง จะช่วยให้การแยกสารผสมประเภทของเหลว-ของเหลว-ของแข็งให้กลายเป็นของเหลว-ของเหลวและของเหลว-ของแข็ง เมื่อผู้ใช้งานทำการติดตั้งไฮโดรไซโคลนแบบชุดอนุกรมก็ยิ่งเพิ่มประสิทธิภาพการแยกน้ำมันและทรายให้ดีขึ้น ไฮโดรไซโคลนชนิดนี้จึงมีความเหมาะสมเป็นอย่างมากที่จะใช้เพื่อแยกทรายน้ำมันหรือสารผสมประเภทของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง

ดังที่กล่าวในบทที่แล้ว การวิเคราะห์โครงสร้างไฮโดรไซโคลนทั้ง 11 โครงสร้างที่สรุปไว้ในตารางที่ 9 จะพิจารณาเรื่องของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการแยกสารเป็นหลัก กล่าวคือ การพิจารณาจะทำได้โดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ CFD ด้วยกันเท่านั้น โดยจะไม่ทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองอ้างอิง ดังนั้น แม้ว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณ CFD ทุกค่าจะมีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพการแยกสารที่ได้จากงานวิจัยอ้างอิงก็ตาม แต่การพิจารณานี้ก็จะสามารถบอกได้ว่าโครงสร้างไฮโดรไซโคลนที่เสนอในงานวิจัยนี้อาจจะมีศักยภาพที่ดีกว่าไฮโดรไซโคลนในงานวิจัยอ้างอิงก็ได้ ถ้าค่าประสิทธิภาพการแยกสารที่ได้มีค่ามากกว่าค่าประสิทธิภาพการแยกสารในโครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 40

โดยจะแบ่งเป็นสองส่วนหลักคือ ผลต่อประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันและผลต่อประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายของไฮโดรไซโคลอนสามวัฏภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

5.1 ประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน

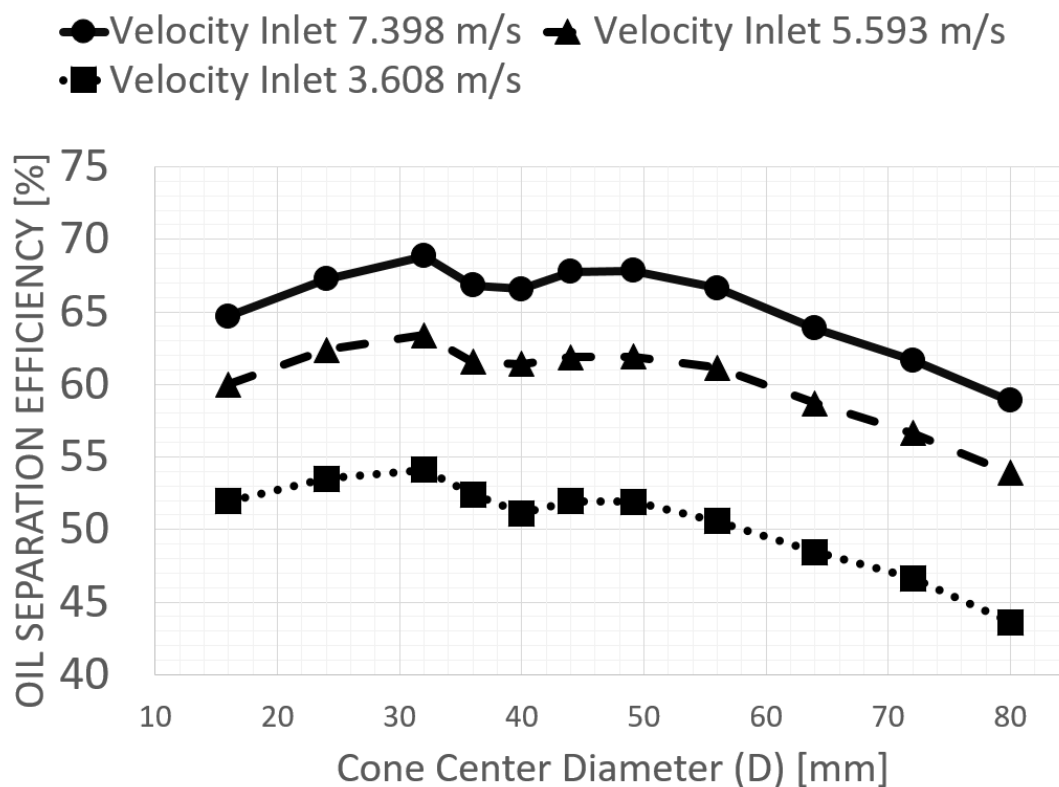
อุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนชนิดทรงกรวยสองชั้นต่อกันเมื่อได้ทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยแล้วทำการทดสอบที่ความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมทั้งสามค่าคือ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีจะพบว่าประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอนของโครงสร้างของแบบจำลองต่างๆ ตามรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันต่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีของโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ

จากรูปที่ 5.1 จะเห็นว่าทุกโครงสร้างของแบบจำลองจะมีประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันในความเร็วทั้งสามค่ามีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันในทุกๆ โครงสร้างแบบจำลองคือเมื่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย แนวโน้มที่เกิดขึ้นนี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการที่ว่าอัตราส่วนการไหลวนที่เร็วขึ้นอันเนื่องมาจากความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดความเร่งเนื่องจากการ

ไหลวนที่มากขึ้นมีผลทำให้น้ำและหยดน้ำมันที่มีความหนาแน่นต่างกัน แยกจากกันได้ดีขึ้นจึงได้มีประสิทธิผลการแยกน้ำมันที่ดีขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบประสิทธิผลการแยกหยดน้ำมันต่อโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ ที่ทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าเท่ากับ 3.608 5.398 และ 7.398 เมตรต่อวินาที

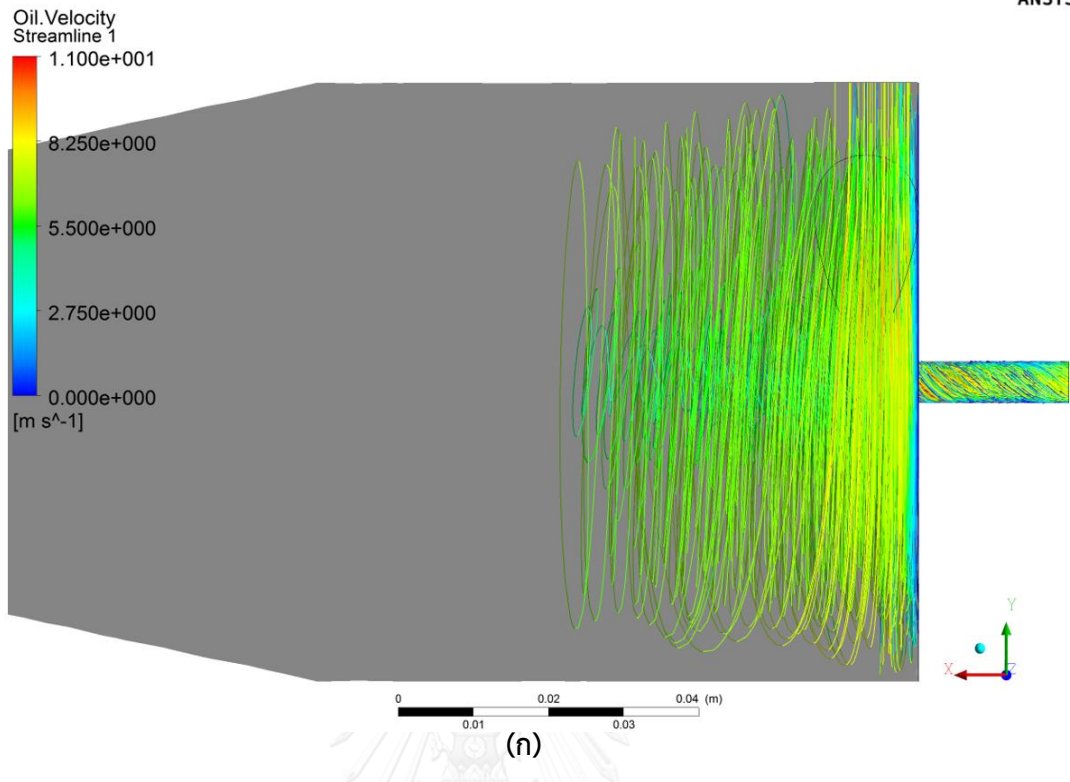
จากรูปที่ 5.2 จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงมุมทรงกรวยสองชิ้นต่อกันอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกัน ที่ความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากันนั้นจะมีผลต่อประสิทธิผลการแยกน้ำมัน โดยจะเห็นได้ว่าทั้งสามความเร็วแสดงแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือเมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันประสิทธิผลการแยกน้ำมันจะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกแล้วจึงค่อยๆ ลดลงแต่สุดท้ายโครงสร้างแบบจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 40 มิลลิเมตรแล้วจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่งแล้วจะลดค่อยๆ ลดลงอีกครั้งโดยจะเกิดเป็นกราฟรูปร่างคล้ายกับตัวอักษร (M)

ในกรณีที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 32 มิลลิเมตรพบว่า Streamline จะอยู่ในตำแหน่งใกล้กับช่องทางออกด้านบนค่อนข้างมากเพราะมีทรงกรวยชิ้นที่หนึ่งมีค่ามุมค่อนข้างแคบทำให้น้ำมันไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนได้มากขึ้นตามรูปที่ 5.3 (ก) ในทาง

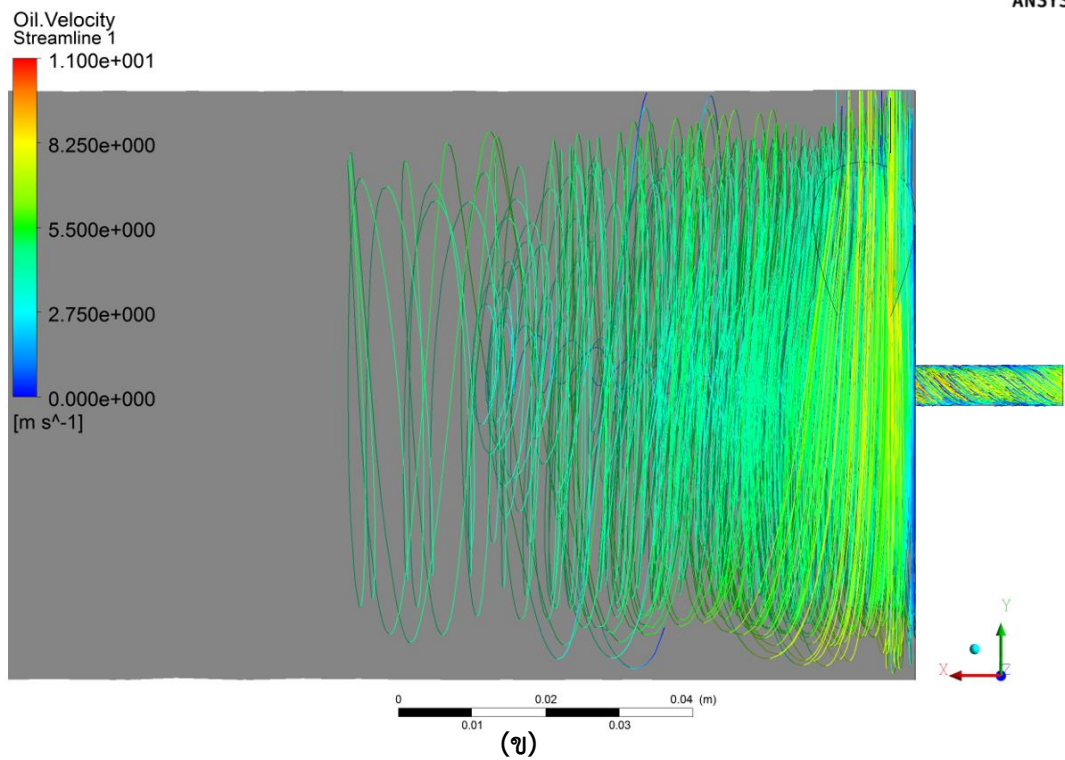
กลับกันสำหรับกรณีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 80 มิลลิเมตรพบว่า Streamline จะลงลึกที่สุดเพราะไม่มีกรวยชิ้นที่หนึ่งทำให้ไม่มีอะไรบีบให้สารเคลื่อนที่ขึ้นไปทำให้พรมมีกรวยชิ้นที่หนึ่งก็ทำให้มีน้ำมันที่แกนกลางไหลขึ้นด้านบนมากขึ้นตามรูปที่ 5.3 (ข) ทั้งนี้ทั้งนั้นถ้ามุมทรงกรวยที่หนึ่งแคบจนเกินไปอาจทำให้น้ำไหลออกที่ช่องทางออกด้านบนมากตามไปด้วยก็จะทำให้ประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันมีค่าลดลงโดยประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันของโครงสร้างแบบจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกัน (D) ในช่วง 32 ถึง 49.1 มิลลิเมตรให้ผลไม่ต่างกันมากนัก แต่สำหรับช่วงโครงสร้างแบบจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันน้อยกว่า 32 มิลลิเมตรประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันเพิ่มตามการเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันโดยอาจเป็นเพราะคุณสมบัติความหนาแน่นของหยदन้ำมันและน้ำมันมีความใกล้เคียงกันเป็นอย่างมากทำให้เมื่อมุมทรงกรวยที่หนึ่งแคบจนเกินไปทำให้น้ำที่มีสัดส่วน Volume fraction ถึง 98 เปอร์เซ็นต์ไหลออกช่องทางออกด้านบนมากขึ้นสอดคล้องกับการทดสอบได้กำหนดอัตราการใช้ที่ช่องทางออกด้านบนต่อช่องทางออกด้านล่างให้เท่ากับ 0.2 จึงทำให้ประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันของโครงสร้างแบบจำลองที่มีขนาดทรงกรวยแคบเกินไปมีค่าประสิทธิภาพลดลง

โดยสรุปจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันขึ้นกับความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเป็นหลัก โดยมีความแตกต่างกันระหว่างโครงสร้างไม่มากนักในช่วงที่มุมของทรงกรวยบนใหญ่กว่ามุมของทรงกรวยล่าง ($D < 49.1$ mm) ในทางกลับกันเมื่อมุมของทรงกรวยบนเล็กกว่ามุมของทรงกรวยล่าง ($D > 49.1$ mm) โครงสร้างของทรงกรวยสองชิ้นต่อกันจะมีผลกับประสิทธิภาพการแยกน้ำมันค่อนข้างมาก โดยที่ประสิทธิภาพการแยกหยदन้ำมันจะลดลงเมื่อผลต่างระหว่างมุมของทรงกรวยบนกับมุมทรงกรวยล่างมีค่ามากขึ้น

ANSYS



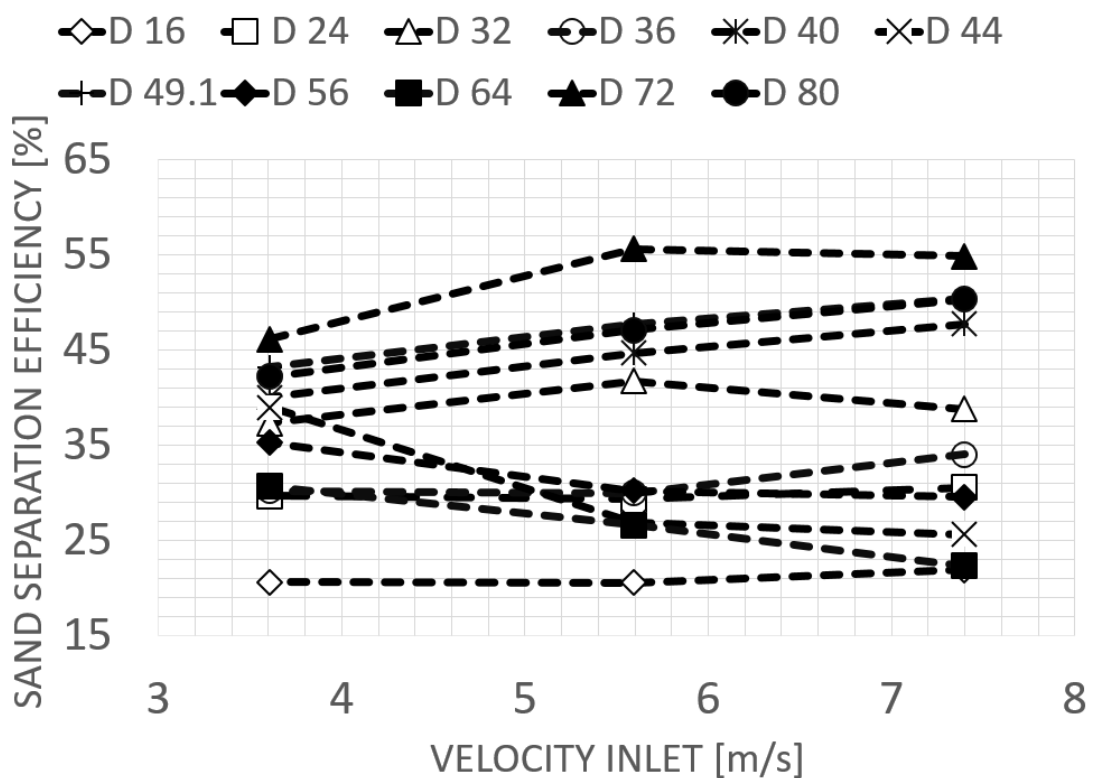
ANSYS



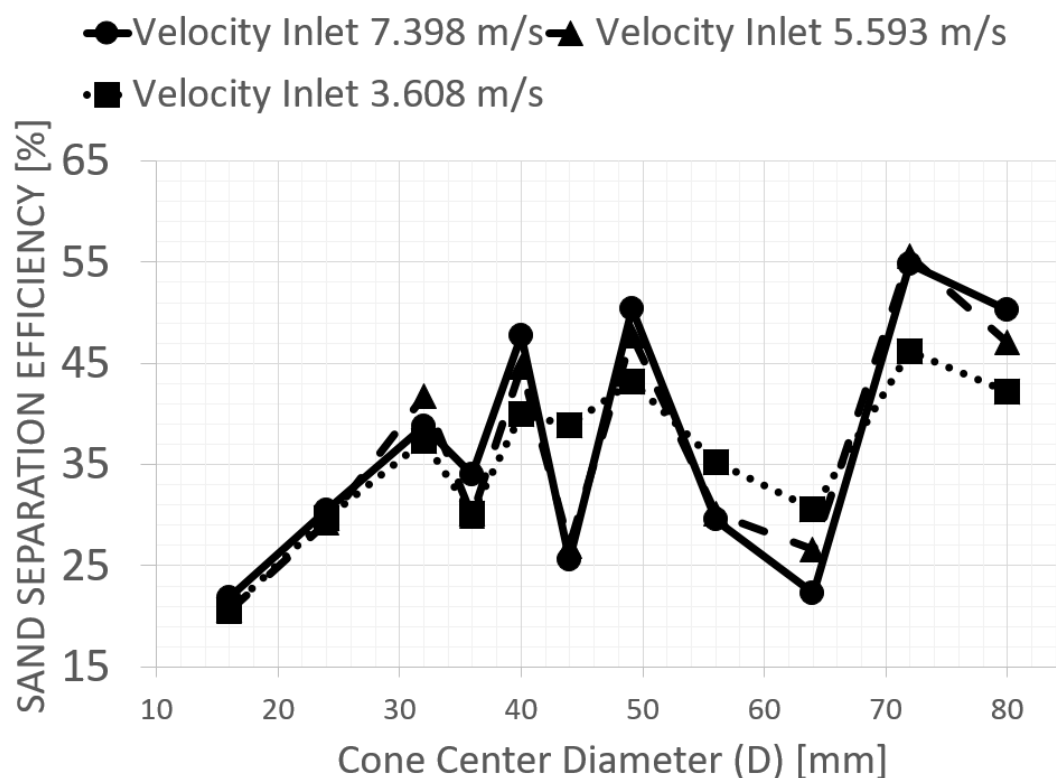
รูปที่ 5.3 กระแสการไหลของหยดน้ำมันที่ไหลออกช่องทางออกด้านบนของโครงสร้างแบบจำลอง (ก) D 32 และ (ข) D 80

5.2 ประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายของอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลอน

สำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายจะเห็นได้จากรูปที่ 5.4 การเปลี่ยนแปลงความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมในแต่ละโครงสร้างแบบจำลองส่งผลต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายไม่ชัดเจน ยกตัวอย่างเช่นโครงสร้าง D40 D49.1 และ D80 การเพิ่มขึ้นของความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมมีผลทำให้ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเพิ่มขึ้นแบบค่อนข้างเป็นเส้นตรงในทางกลับกันการเพิ่มความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสมในโครงสร้าง D44 D56 และ D64 กลับทำให้ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายมีค่าลดลง ในขณะที่ในบางกรณี เช่น กรณีของโครงสร้าง D32 การเพิ่มขึ้นของความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสมทำให้ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเพิ่มขึ้นในช่วงความเร็วหนึ่งและลดลงในอีกช่วงความเร็วหนึ่ง จะเห็นได้ว่าโครงสร้างของทรงกรวยสองชั้นต่อกันมีผลต่อแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพอย่างชัดเจน

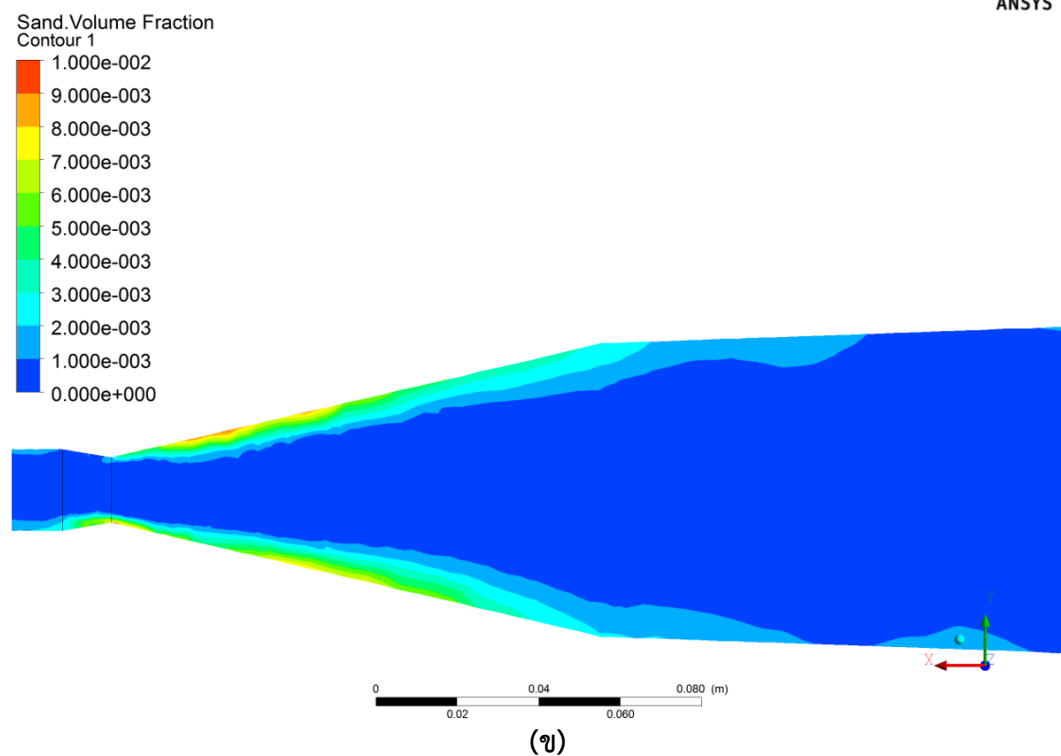
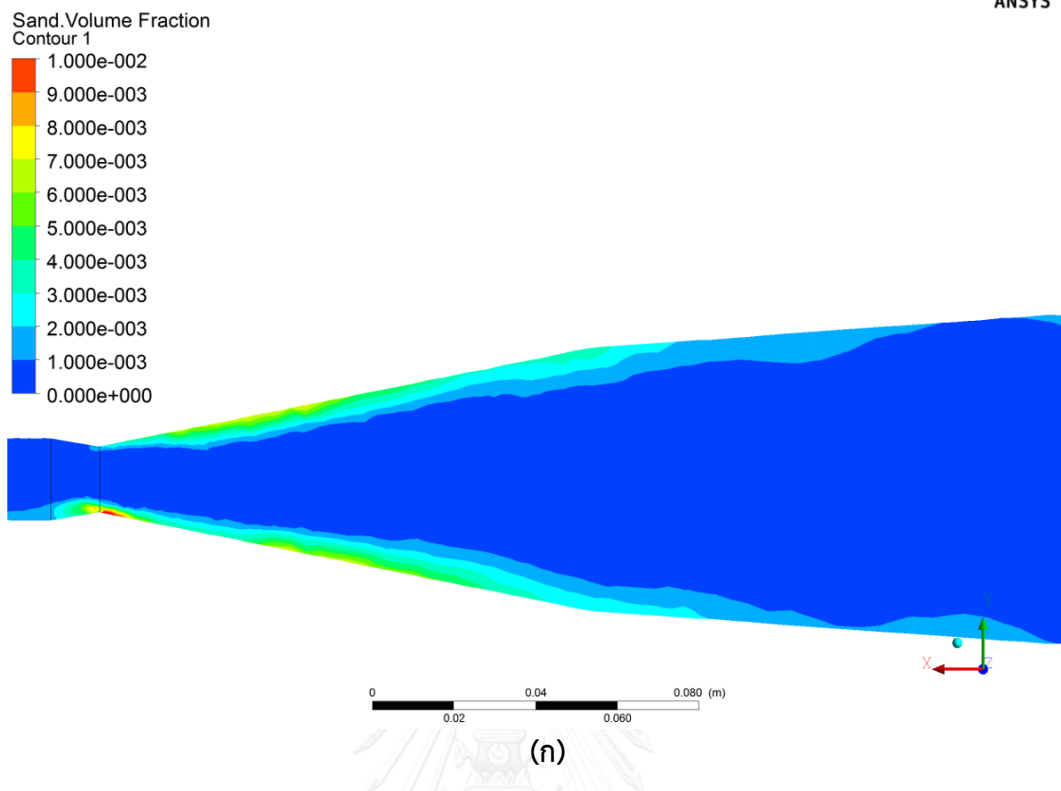


รูปที่ 5. 4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายต่อความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาทีของไฮโดรไซโคลอนสามวิภูภาคแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายต่อโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ ที่ทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ความเร็วของสารผสมทางด้านขาเข้าเท่ากับ 3.608, 5.398 และ 7.398 เมตรต่อวินาที

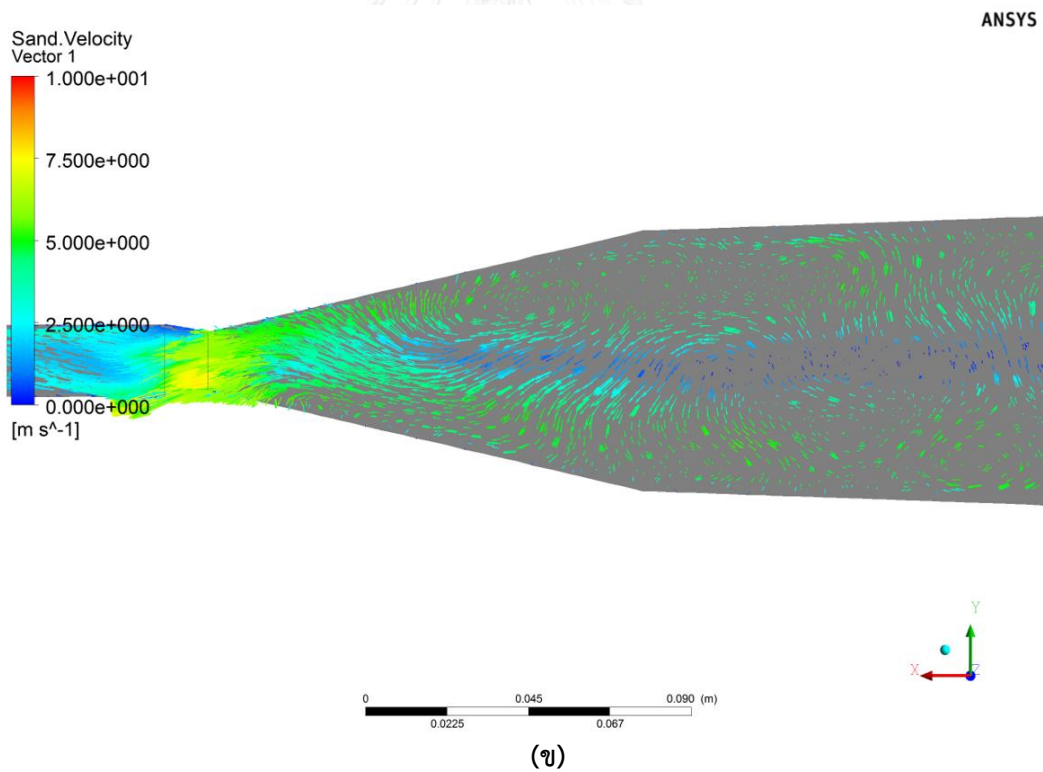
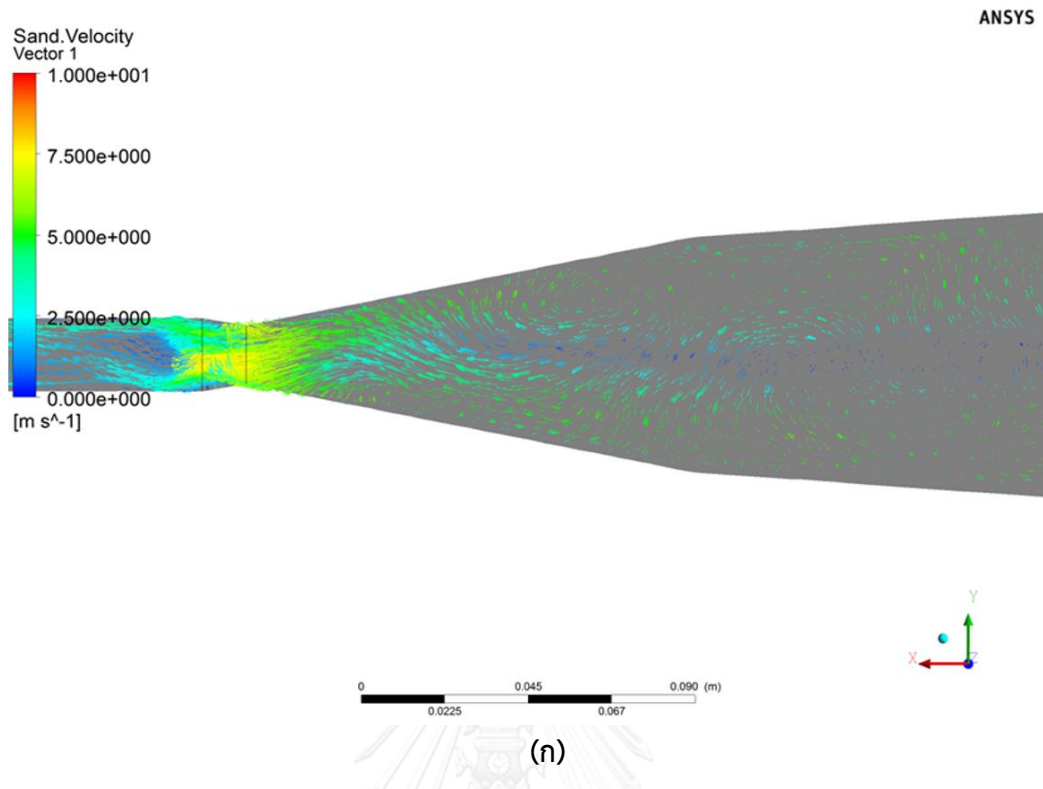
จากรูปที่ 5.5 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายต่อโครงสร้างแบบจำลองต่างๆ ที่ทำการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชั้นต่อกันที่มีความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 3.608, 5.593 และ 7.398 เมตรต่อวินาที พบว่าที่ความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากัน การเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสองชั้นต่อกันมีช่วงที่กว้างมาก เป็นการยืนยันได้ว่าประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายขึ้นกับโครงสร้างของทรงกรวยสองชั้นต่อกันของไฮโดรไซโคลอนเป็นหลัก โดยแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงแบ่งออกเป็นสองช่วง ในช่วงแรกเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชั้นต่อกันมีขนาดเล็กกว่า 36 มิลลิเมตรการเพิ่มระยะเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชั้นทำให้ผลของประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเพิ่มมากขึ้นซึ่งในช่วงการเปลี่ยนแปลงนี้ความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมไม่ส่งผลต่างกันมากนัก ส่วนช่วงที่สองในกรณีที่เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชั้นต่อกันมีขนาดใหญ่กว่า 36 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายมีลักษณะเพิ่มขึ้นและลดลงสลับกันตามการเพิ่มขึ้นของระยะเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยการแกว่งของประสิทธิภาพนี้จะมากขึ้นตามขนาดของความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสม



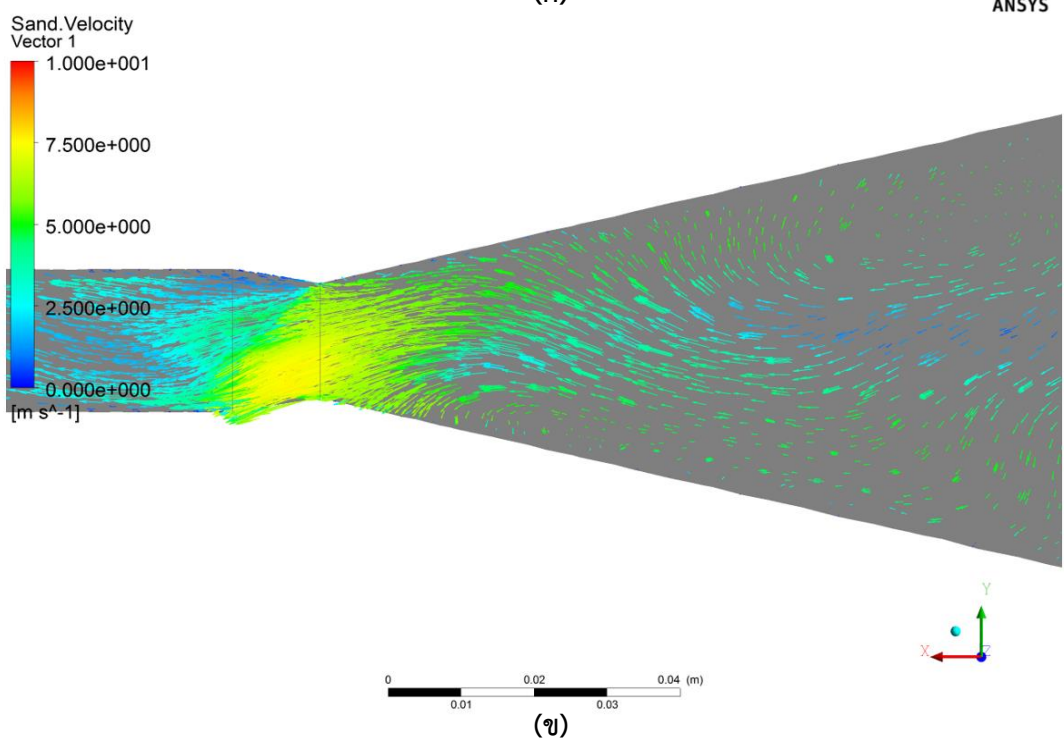
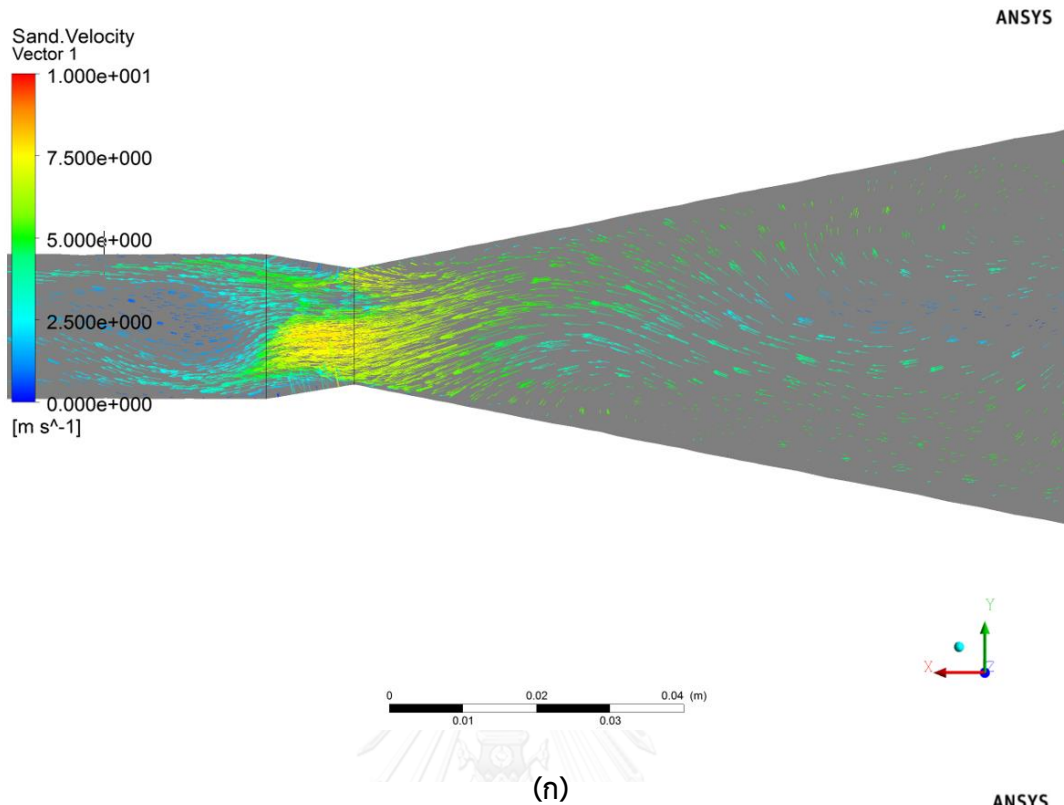
รูปที่ 5.6 การเปรียบเทียบ Sand Volume fraction บนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลน
ที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที (ก) D 64 และ (ข) D 72

เพื่ออธิบายการแกว่งของประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเนื่องมาจากการเปลี่ยนระยะเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกัน จึงเลือกพิจารณาที่โครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 64 มิลลิเมตรและโครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 72 มิลลิเมตรที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาทีซึ่งมีประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายที่แตกต่างกันเป็นอย่างมากทั้งที่โครงสร้างแบบจำลองมีเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาจาก Volume fraction ของเม็ดทราย ดังแสดงในรูปที่ 5.6 จะเห็นได้ว่าการกระจายตัวของเม็ดทรายทั้งในกรณีของโครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยต่อกันเท่ากับ 64 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 5.6 (ก) และ โครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยต่อกันเท่ากับ 72 มิลลิเมตรดังแสดงในรูปที่ 5.6 (ข) แทบไม่มีความแตกต่างกัน โดยที่เม็ดทรายมีการกระจุกตัวกันอยู่ที่ขอบของกรวยที่สองเนื่องจากแรงเหวี่ยงของไฮโดรไซโคลอน จากรูปนี้จึงสามารถอนุมานได้ว่าการกระจายตัวของเม็ดทรายไม่ใช่ปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายแตกต่างกันมาก

เมื่อพิจารณาจากเวกเตอร์ความเร็วของเม็ดทรายที่ไหลภายในทรงกรวยทั้งสองชิ้นจนกระทั่งไหลผ่านช่องทางออกด้านข้างของไฮโดรไซโคลอนที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานของแกนกลางของไฮโดรไซโคลอนตามรูปที่ 5.8 จะเห็นได้ว่าความเร็วของเม็ดทรายในทิศที่ขนานกับหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลอนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเข้าสู่กรวยที่สอง โดยจะมีลักษณะแกว่งไปมารอบแกนกลางของไฮโดรไซโคลอน จะเห็นได้ชัดจากภาพขยายบริเวณใกล้ทางออกด้านข้างที่แสดงในรูปที่ 5.8 ว่าโครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 72 มิลลิเมตร มีการไหลของเม็ดทรายส่วนใหญ่แกว่งไปเฉียดที่ขอบกรวยขึ้นที่สองซึ่งจะมีเม็ดทรายจำนวนมากแสดงให้เห็นในรูปที่ 5.8 (ข) ออกไปที่ทางออกด้านข้างส่งผลให้มีประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายที่สูง ในทางกลับกันโครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 64 มิลลิเมตรแสดงในรูปที่ 5.8 (ก) การไหลของเม็ดทรายส่วนใหญ่มีการแกว่งไปชนผนังของทรงกรวยขึ้นที่สองก่อนที่จะถึงช่องทางออกด้านข้างและไหลออกเลยช่องทางออกด้านข้างไป แตกต่างจากกรณีของโครงสร้างแบบจำลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันเท่ากับ 72 มิลลิเมตรที่ไหลออกตรงช่องทางออกด้านข้างพอดีจึงทำให้กรณีนี้มีประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายที่ต่ำ จากข้อสังเกตนี้จึงสามารถอนุมานได้ว่าการไหลแกว่งตัวของเม็ดทรายอาจทำให้เกิดการส่งเสริมหรือลดประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทรายได้ขึ้นกับแนวการแกว่งตัวของเม็ดทรายดังที่แสดงให้เห็นในแผนภาพอย่างง่ายในรูปที่ 5.9 การแกว่งทำให้เม็ดทรายไหลออกหรือไหลเลยช่องทางออกด้านข้าง

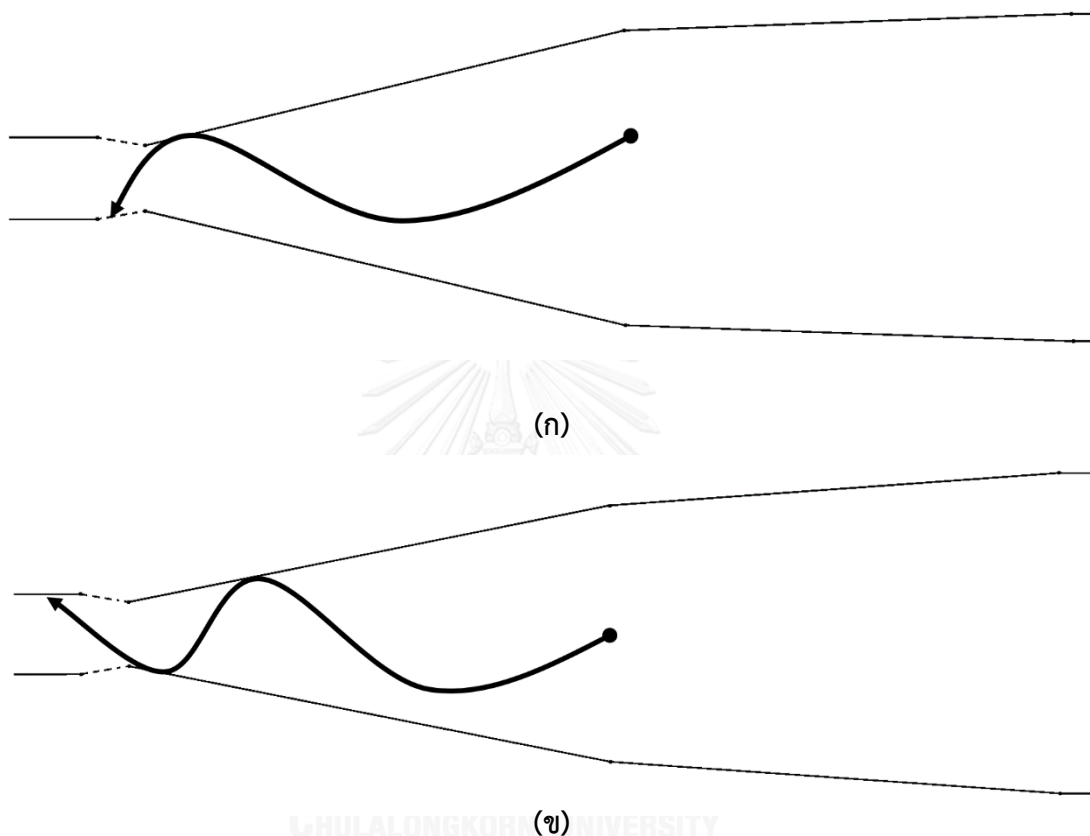


รูปที่ 5. 7 เวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลนที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที (ก) D 64 และ (ข) D 72



รูปที่ 5.8 ภาพขยายบริเวณใกล้ตำแหน่งทางออกด้านข้างแสดงถึงเวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลอนที่มีความเร็วด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที (ก) D 64 และ (ข) D 72

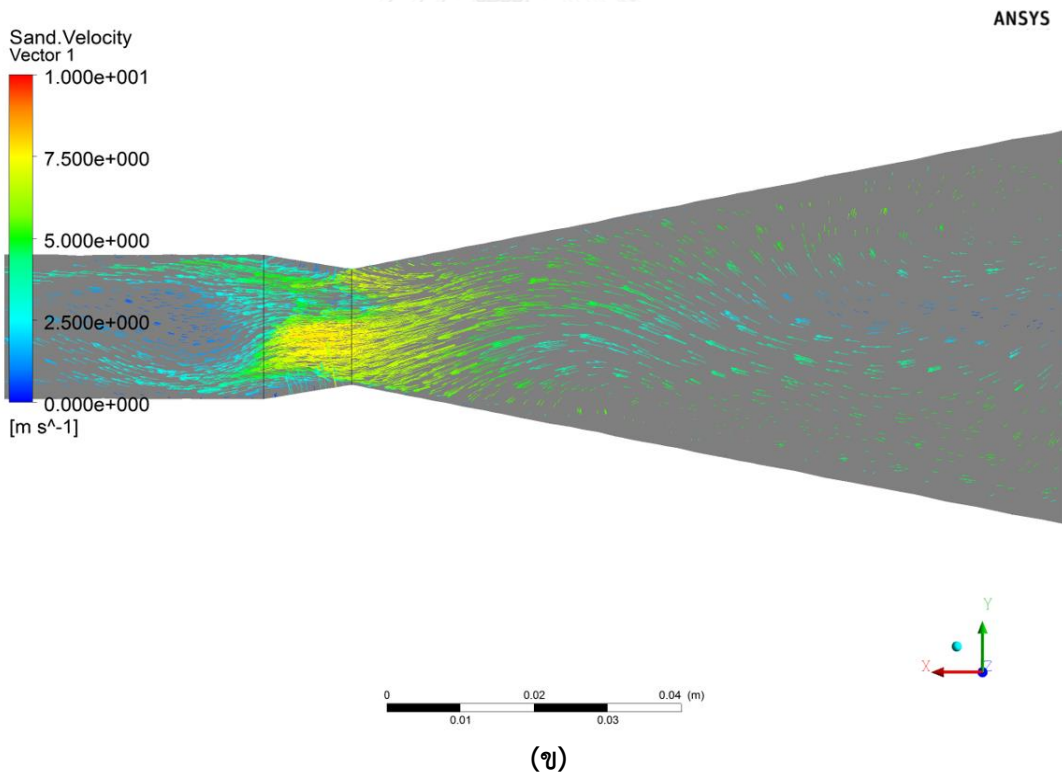
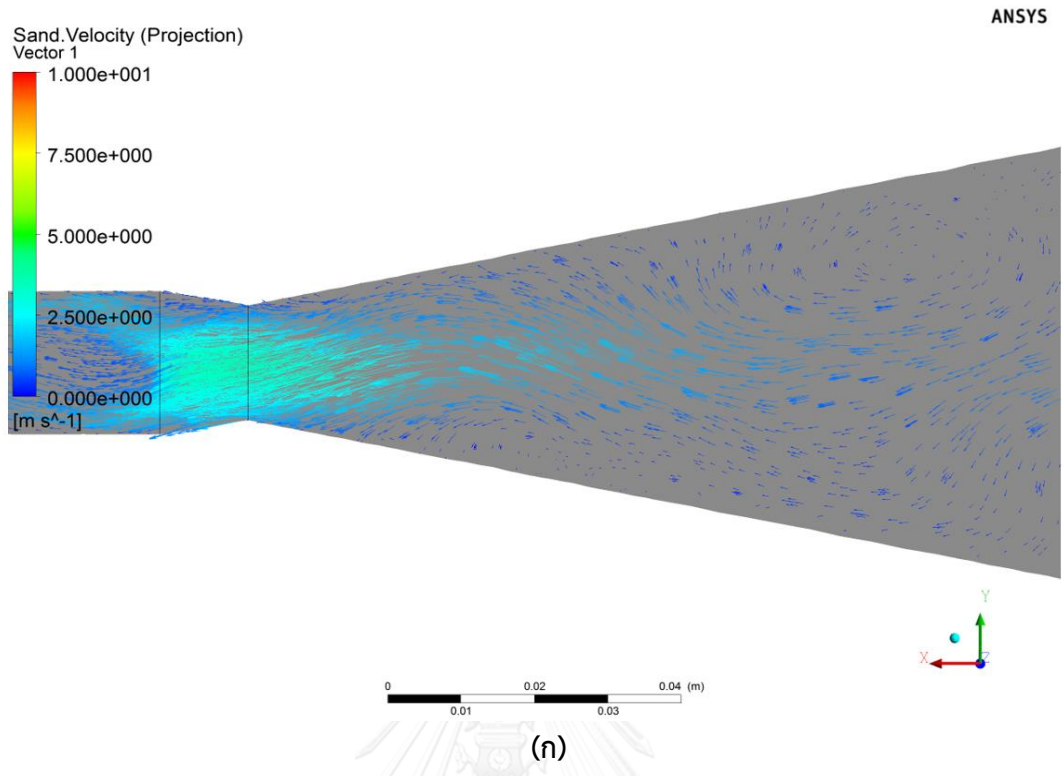
จากสาเหตุที่กล่าวมาสามารถอธิบายได้ว่าการปรับเปลี่ยนระยะเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกรวยสองชิ้นต่อกันทำให้เกิดการแกว่งตัวของประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเป็นเพราะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของทรงกรวยมีผลทำให้การไหลแกว่งรอบแกนกลางของเม็ดทรายมีลักษณะเปลี่ยนไป การเปลี่ยนรูปทรงการไหลเพียงเล็กน้อยอาจทำให้การไหลแกว่งของเม็ดทรายส่วนใหญ่ไหลออกที่ช่องทางออกด้านข้าง (เสริมประสิทธิภาพ) หรือไหลเลยไป (ลดประสิทธิภาพ) ก็ได้



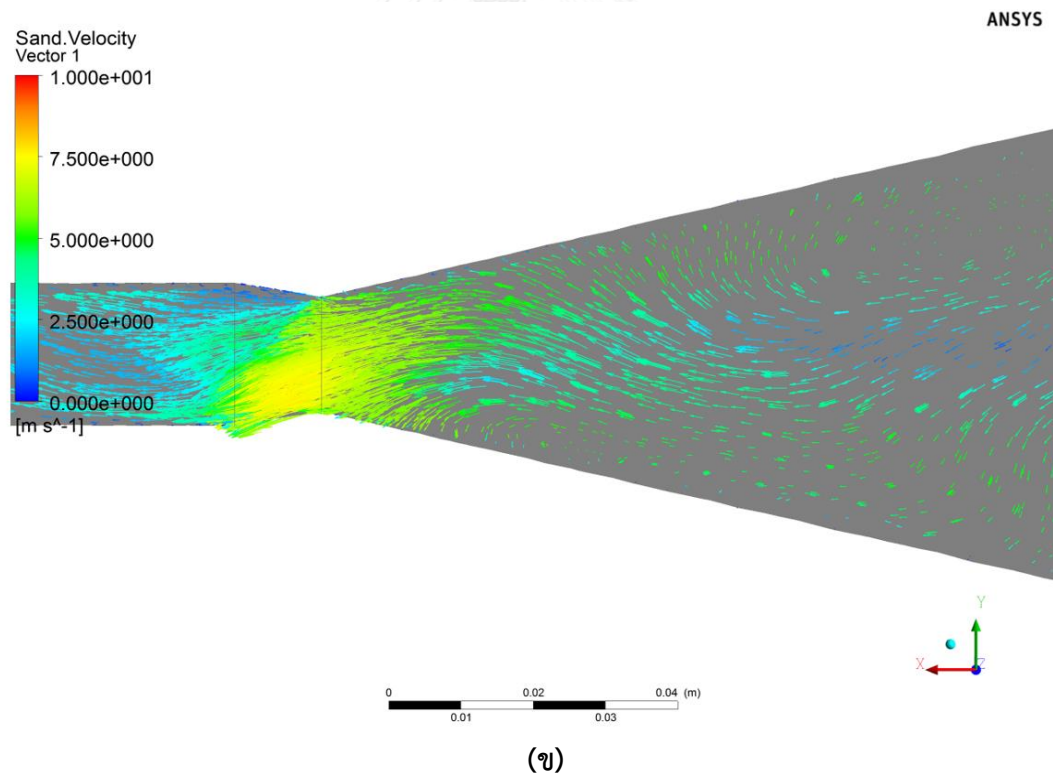
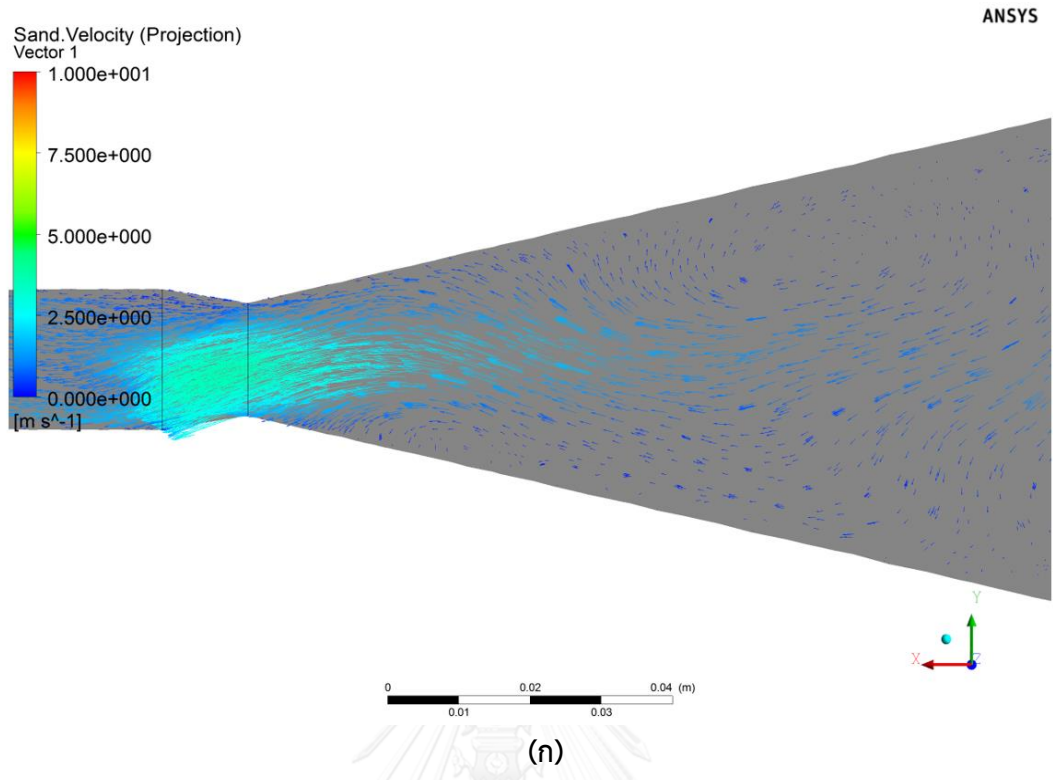
รูปที่ 5.9 แผนภาพแสดงทิศทางการไหลแกว่งรอบแกนกลางของเม็ดทรายในโครงสร้างแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนสามวัฏภาคแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันที่มีลักษณะ (ก) ส่งเสริมประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทราย (ข) ลดประสิทธิภาพการแยกของเม็ดทราย

การเพิ่มหรือลดความเร็วที่ช่องด้านขาเข้าของสารผสมจะไม่ส่งผลต่อรูปร่างการไหลแกว่งรอบแกนกลางของเม็ดทรายส่วนใหญ่มากนัก ยกตัวอย่างเช่น กรณีโครงสร้างที่มีการไหลแกว่งลดประสิทธิภาพการแยกเม็ดทราย เช่น โครงสร้าง D 64 ในรูปที่ 5.10 และกรณีโครงสร้างที่มีการไหลแกว่งเสริมประสิทธิภาพการแยกเม็ดทราย เช่น โครงสร้าง D 72 ในรูปที่ 5.11

ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนความเร็วขาเข้าไม่ได้ทำให้รูปร่างการไหลแกว่งรอบแกนกลางของเม็ดทรายเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ แต่การเปลี่ยนความเร็วขาเข้าก็ทำให้ผลของการเสริมหรือลดประสิทธิภาพการแยกอันเนื่องมาจากการไหลแกว่งเปลี่ยนไป เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 5.5 เมื่อความเร็ว



รูปที่ 5.10 ภาพขยายบริเวณใกล้ตำแหน่งทางออกด้านข้างแสดงถึงเวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลน D 64 ในกรณีที่มีความเร็วขาเข้าเท่ากับ (ก) 3.608 เมตรต่อวินาที และ (ข) 7.398 เมตรต่อวินาที



รูปที่ 5.11 ภาพขยายบริเวณใกล้ตำแหน่งทางออกด้านข้างแสดงถึงเวกเตอร์ความเร็วเม็ดทรายที่โปรเจกบนหน้าตัดขนานที่แกนกลางของไฮโดรไซโคลน D 72 ในกรณีที่มีความเร็วขาเข้าเท่ากับ (ก) 3.608 เมตรต่อวินาที และ (ข) 7.398 เมตรต่อวินาที

ทางด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมเพิ่มขึ้นในโครงสร้างที่มีการไหลแกว่งลดประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายจะทำให้มีประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายลดลง ในทางกลับกันสำหรับโครงสร้างที่มีการไหลแกว่งเสริมประสิทธิภาพการแยกเม็ดทราย การเพิ่มความเร็วทางด้านช่องทางขาเข้าของสารผสมกลับทำให้มีประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเพิ่มกว่าเดิม สถานการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยหลักการคือ การลดความเร็วของสารผสมที่ช่องทางขาเข้าทำให้ความเร็วของเม็ดทรายส่วนใหญ่ลดลง มีผลให้ผลของการไหลแกว่งที่ทำให้เม็ดทรายไหลออกที่ช่องทางออกด้านข้าง หรือไหลเลยไปลดลง

จากผลของการคำนวณ CFD แสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.5 พบว่ามีโครงสร้างไฮโดรไซโคลนหลายโครงสร้างที่ให้ค่าประสิทธิภาพการแยกสารดีกว่าโครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 40 ที่เป็นโครงสร้างไฮโดรไซโคลนในงานวิจัยอ้างอิงดั้งเดิม ประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันและเม็ดทรายมีค่ามากที่สุดเมื่อความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสมสูงที่สุดคือเท่ากับ 7.398 เมตรต่อวินาที โดยค่าประสิทธิภาพการแยกน้ำมันที่มากที่สุดเกิดขึ้นในโครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 32 ในขณะที่ค่าประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายที่มากที่สุดเกิดในโครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 72 อนึ่ง สังเกตเห็นได้ว่าเมื่อประสิทธิภาพการแยกของสารใดสารหนึ่งมีค่าสูงสุด ประสิทธิภาพการแยกของสารอีกชนิดหนึ่งจะมีค่าน้อย กล่าวคือโครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 32 มีค่าประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันสูงสุดประมาณ 69 เปอร์เซ็นต์ แต่มีค่าประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเพียงประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ โครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 72 มีค่าประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายสูงสุดประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ แต่มีค่าประสิทธิภาพการแยกหยดน้ำมันเพียงประมาณ 62 เปอร์เซ็นต์ สิ่งที่น่าสนใจจากผลการคำนวณ CFD คือ โครงสร้างไฮโดรไซโคลนที่มีประสิทธิภาพการแยกทั้งหยดน้ำมันและเม็ดทรายค่อนข้างดี (ประมาณ 68 เปอร์เซ็นต์และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) คือโครงสร้างไฮโดรไซโคลน D 49.1 ซึ่งมีลักษณะเป็นทรงกรวยชั้นเดียว แสดงให้เห็นว่าทรงกรวยสองชั้นต่อกันของไฮโดรไซโคลนอาจจะไม่ได้ให้ผลดีกว่าทรงกรวยเดี่ยวดังที่ Changirwa แนะนำ ทั้งนี้ข้อสังเกตที่กล่าวไปควรจะทำการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อทำการยืนยันต่อไป

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยได้ทำการศึกษาวิเคราะห์ประสิทธิภาพการแยกหยदनํ้ามันและเม็ดทรายด้วยอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยใช้โปรแกรมเชิงพาณิชย์ ANSYS Fluent ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโดยทำการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณของโปรแกรมกับผลการทดลองในงานวิจัยอ้างอิง โดยที่ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแยกของหยदनํ้ามันและเม็ดทรายมีทิศทางไปในทางเดียวกัน แบบจำลองที่ได้ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องมาเป็นเครื่องมือในการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดของมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

จากงานวิจัยนี้พบว่าประสิทธิภาพการแยกหยदनํ้ามันจะขึ้นกับความเร็วด้านขาเข้าของสารผสมเป็นตัวแปรหลักโดยความเร็วที่ช่องทางด้านขาเข้าของสารผสมมีค่ามากก็ทำให้ประสิทธิภาพการแยกหยदनํ้ามันเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อทำการเปรียบเทียบที่ความเร็วทางด้านขาเข้าของสารผสมที่มีค่าเท่ากันต่อโครงสร้างแบบจำลองที่ทำการปรับเปลี่ยนขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางกรวยที่ต่อกันต่างๆ พบว่าประสิทธิภาพการแยกนํ้ามันของกรณีโดยผลของประสิทธิภาพการแยกหยदनํ้ามันในกรณีมุมทรงกรวยบนมากกว่ามุมทรงกรวยล่างให้ผลไม่แตกต่างกันมากไม่มากนัก แต่ในกรณีที่มุมทรงกรวยล่างมากกว่ามุมทรงกรวยบนพบว่าเมื่อค่าผลต่างของมุมกรวยล่างมากกว่ามุมกรวยบนเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพแยกนํ้ามันมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด

การศึกษาประสิทธิภาพการแยกเม็ดทราย พบว่าโครงสร้างของกรวยสองชั้นต่อกันในอุปกรณ์ไฮโดรไซโคลนจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายเป็นหลัก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของกรวยสองชั้นต่อกันเพียงเล็กน้อยก็สามารถส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกเม็ดทรายอย่างเห็นได้ชัด โดยมีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลแกว่งของเม็ดทรายรอบแกนกลางของกรวย ซึ่งมีส่วนทำให้การไหลออกของเม็ดทรายที่ช่องทางออกด้านข้างจะถูกเสริมหรือลดได้ จึงมีความจำเป็นที่จะต้องเลือกเส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งกลางทรงกรวยสองชั้นต่อกันที่ทำให้เหมาะสมในการใช้งาน โดยการเพิ่มความเร็วช่องทางขาเข้าของสารผสมจะส่งผลต่อการเสริมหรือลดประสิทธิภาพการแยกอันเนื่องมาจากไหลแกว่งของเม็ดทรายให้มีผลรุนแรงขึ้น

จากข้อสรุปที่ผ่านมามาดูจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงมุมโดยการปรับเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกรวยสองชั้นต่อกัน ส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของหยदनํ้ามันและเม็ดทรายเป็นอย่างมาก จึงเป็นที่น่าสนใจในการทำการปรับเปลี่ยนทรงกรวยสองชั้นต่อกันในรูปแบบอื่นด้วย เช่น การเปลี่ยนแปลง

ระยะของตำแหน่งกลางกรวยสองชิ้นต่อกัน การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปลายกรวยล่าง และการเปลี่ยนแปลงขนาดความยาวของทรงกรวยทั้งสองชิ้น เป็นต้น

นอกจากนี้รูปทรงด้านอื่นๆ ของไฮโดรไซโคลนก็น่าจะมีส่งผลต่อประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายเช่นกัน จึงมีความน่าสนใจที่จะทำการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงรูปทรงไฮโดรไซโคลนส่วนอื่นๆ เช่น การปรับปรุงช่องทางออกด้านบนของไฮโดรไซโคลนโดยการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือทำการยึดช่องทางออกด้านบนให้เข้ามาในภายในส่วนทรงกระบอก (Vortex finder) การเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องทางออกด้านข้าง เป็นต้น ซึ่งแนวทางการศึกษาดังกล่าวมีความน่าสนใจที่ศึกษาเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาประสิทธิภาพไฮโดรไซโคลนของเหลว-ของเหลวของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันต่อไป

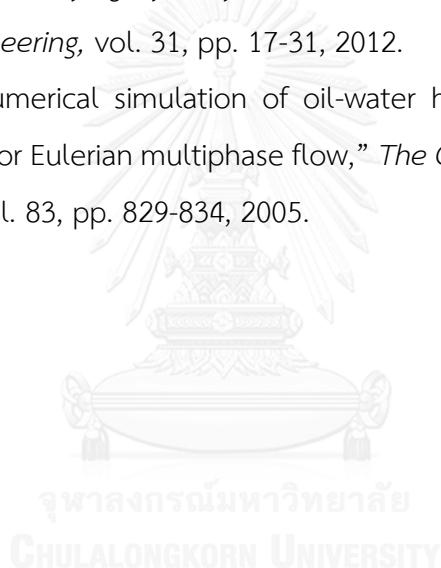


รายการอ้างอิง

- [1] R. M. M. Changirwa, "Phenomenological Separation in a Three-Phase Hydrocyclone," Mining Engineering, Department of Minerals and Metallurgical engineering, Technical University of Nova Scotia, Canada, 1998.
- [2] สุวพงษ์ จันผิงเพชร, "น้ำมัน อินเดียนแดง เมเปิล และรงไตรรงค์," มติชนสุดสัปดาห์, vol. 41, 2014.
- [3] ปราโมทย์ เดชะอำไพ, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และไฟไนต์วอลุ่ม, กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2010.
- [4] A. FLUENT, *Theory Guide Release 15.0 for ANSYS FLUENT*, 2013.
- [5] B. J. Daly, and F. H. Harlow, "Transport Equations in Turbulence," *Phys. Fluids*, vol. 13, pp. 2634-2649, 1970.
- [6] M. M. Gibson, and B. E. Launder, "Ground Effects on Pressure Fluctuations in the Atmospheric Boundary Layer," *J. Fluid Mech*, vol. 86, pp. 491-511, 1978.
- [7] S. Fu, B. E. Launder, and M. A. Leschziner, "Modeling Strongly Swirling Recirculating Jet Flow with Reynolds-Stress Transport Closures," in *In Sixth Symposium on Turbulent Shear Flows*, Toulouse ,France, 1987.
- [8] B. E. Launder, "Second-Moment Closure and Its Use in Modeling Turbulent Industrial Flows," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 9, pp. 963-985, 1989.
- [9] S. Sarkar, and L. Balakrishnan, "Application of a Reynolds-Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer," *ICASE Report 90-18 NASA CR 182002*, 1990.
- [10] L. Schiller, and Z. V. Naumann, "Deutsch," *Ing.-1935.-P*, pp. 77-318, 1935.
- [11] S. Morsi, and A. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, no. 2, pp. 193-208, 1972.
- [12] L. Huilin, and D. Gidaspow, "Hydrodynamics of binary fluidization in a riser: CFD simulation using two granular temperatures," *Chemical Engineering Science*, vol. 58, no. 16, pp. 3777-3792, 2003.

- [13] C. Rosales, M. Barron, I. Hilerio, and D. Medina, "Computer Simulation of Water-Oil Separation in Cylindrical and Square Hydrocyclones," in *The 2011 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods*, 2011, pp. 121-125.
- [14] G. Q. Dai, W. M. Chen, J. M. Li, and L. Y. Chu, "Experimental study of solid-liquid two-phase flow in a hydrocyclone," *Chemical Engineering Journal*, vol. 74, pp. 211-216, 1999.
- [15] L. Y. Wang, Z. C. Zheng, J. Guo, J. Zhang, and C. Tang, "Investigation on separation efficiency of liquid/solid hydrocyclone," *Journal of Hydrodynamics*, vol. 18, pp. 400-404, 2006.
- [16] Y. Liu, Q. Cheng, B. Zhang, and F. Tian, "Three-phase hydrocyclone separator-A review," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 100, pp. 554-560, 2015.
- [17] D. J. Aslin, *Three phase cyclonic separator*, United State of America, 2002.
- [18] S. Bednarski, and J. Listewnik, "Hydrocyclones for simultaneous removal of oil and solid particles from ships' oily waters," *Filtration & separation*, vol. 25, pp. 92-97, 1988.
- [19] Q. Y. Z. e. al., "Performance research on the gas-liquid-solid triphase cylindrical cyclone separator," Dalian University of technology, Chinese, 2013.
- [20] J. Y. Yu, C. Xu, C. Zheng, X. T. Lin, S. H. Nie, and C. Gong, *Oil, water and gas three-phase cyclone separator*, China, 2013.
- [21] X. D. Zhang, R. Y. Gou, X. Q. Sun, Y. Zhang, and G. H. Xu, *Embedded-type inverted double-cone oil-gas-water triphase cyclone separator*, China, 2014.
- [22] D. A. Colman, and M. T. Thew, *Cyclone separator*, United State of America, 1988.
- [23] R. Changirwa, M. C. Rockwell, S. Frimpong, and J. Szymanski, "Hybrid simulation for oil-solids-water separation in oil sands production," *Minerals engineering*, vol. 12, no. 12, pp. 1459-1468, 1999.
- [24] R. Changirwa, M. C. Rockwell, and D. K. Mutua, "Mathematical modelling multiple-cone concurrent three-phase (CTP) hydrocyclone separation," *Journal of Canadian Petroleum Technology*, vol. 38, no. 13, 1999.

- [25] B. Wang and A. B. Yu, "Numerical study of particle–fluid flow in hydrocyclones with different body dimensions," *Minerals Engineering*, vol. 19, pp. 1022-1033, 2006.
- [26] L. R. Plitt, "A mathematical model of the hydrocyclone classifier," 1976, pp. 114-123.
- [27] B. Wang and A. B. Yu, "Numerical study of the gas–liquid–solid flow in hydrocyclones with different configuration of vortex finder," *Chemical Engineering Journal*, vol. 135, pp. 33-42, 2008.
- [28] S. B. Kuang, K. W. Chu, A. B. Yu, and A. Vince, "Numerical study of liquid–gas–solid flow in classifying hydrocyclones: Effect of feed solids concentration," *Minerals Engineering*, vol. 31, pp. 17-31, 2012.
- [29] S. Huang, "Numerical simulation of oil-water hydrocyclone using Reynolds-Stress Model for Eulerian multiphase flow," *The Canadian Journal of Chemical Engineering* vol. 83, pp. 829-834, 2005.



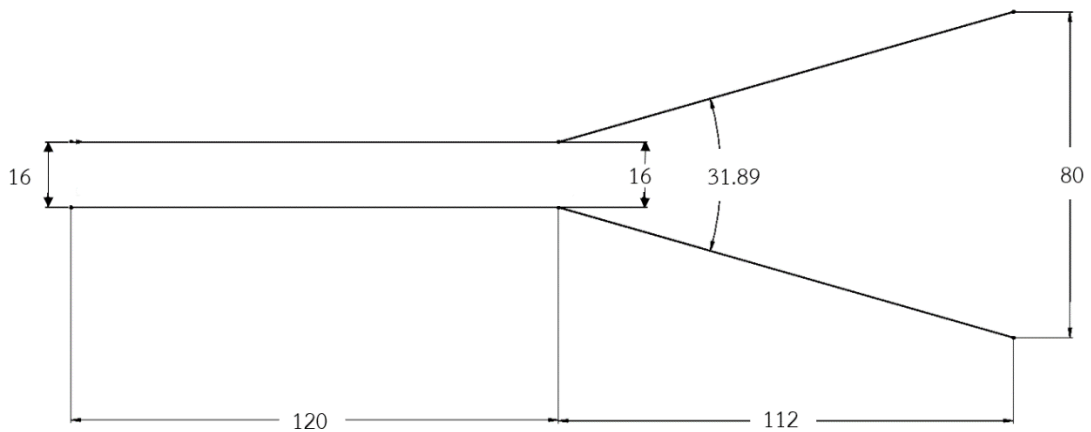
ภาคผนวก



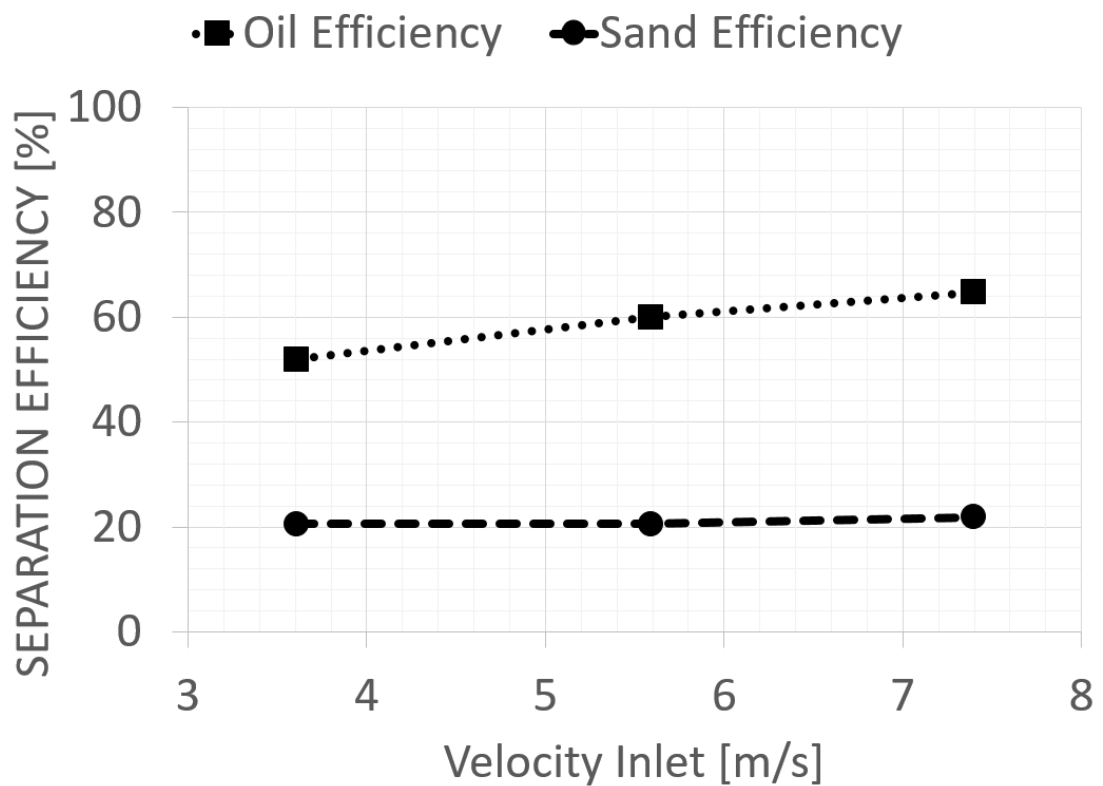
ภาคผนวก ก

โครงสร้างแบบจำลองไฮโดรไซโคลอนที่มีการปรับเปลี่ยนมุมทรงกรวยสองชั้นต่อกัน

ก.1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 16 มิลลิเมตร

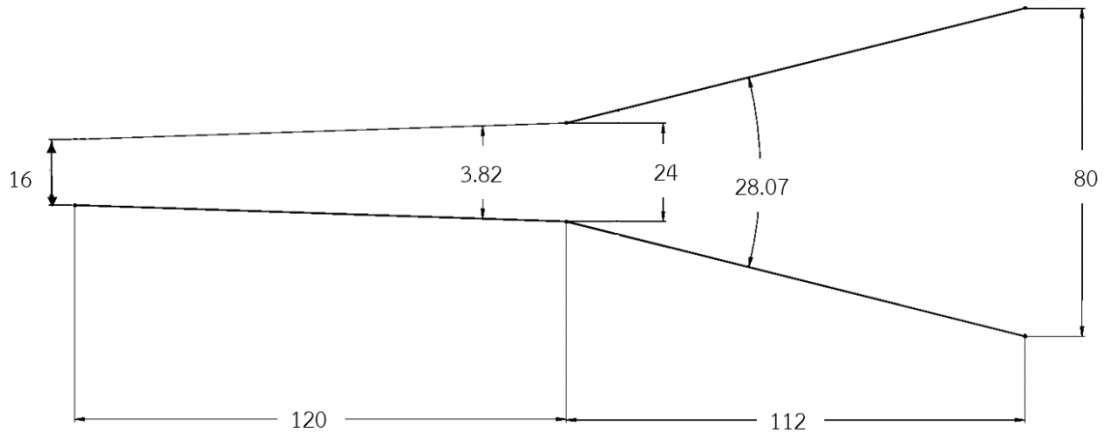


รูปที่ ก.1 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลอนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 16 มิลลิเมตรทำให้มีเฉพาะมุม α เท่ากับ 31.89 องศา

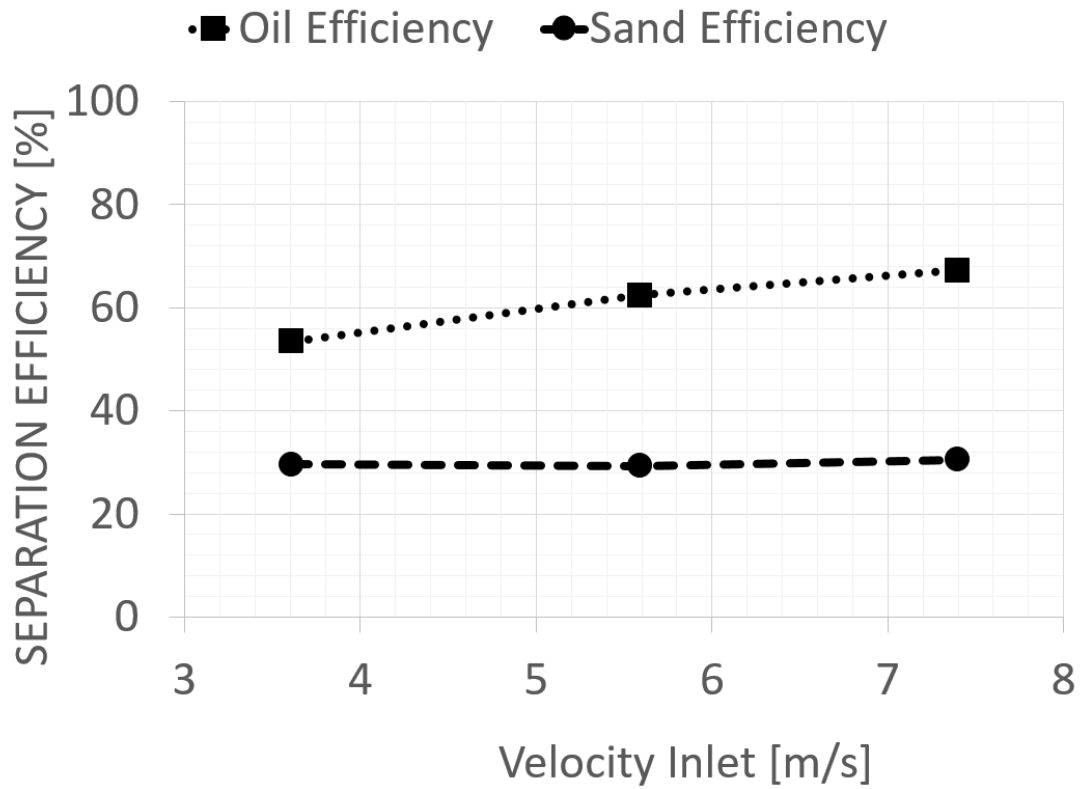


รูปที่ ก.2 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.2 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 24 มิลลิเมตร

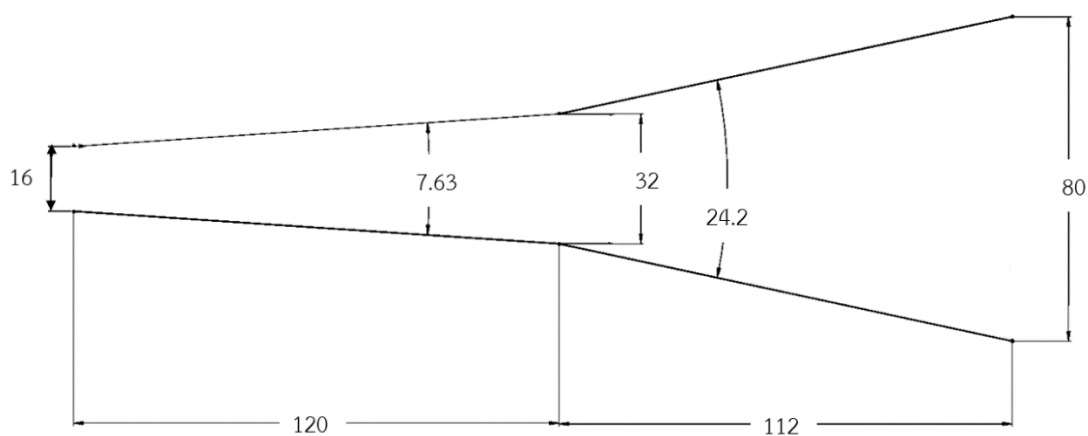


รูปที่ ก.3 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 24 มิลลิเมตรทำให้มี alpha เท่ากับ 28.07 องศาและมุม beta เท่ากับ 3.82 องศา

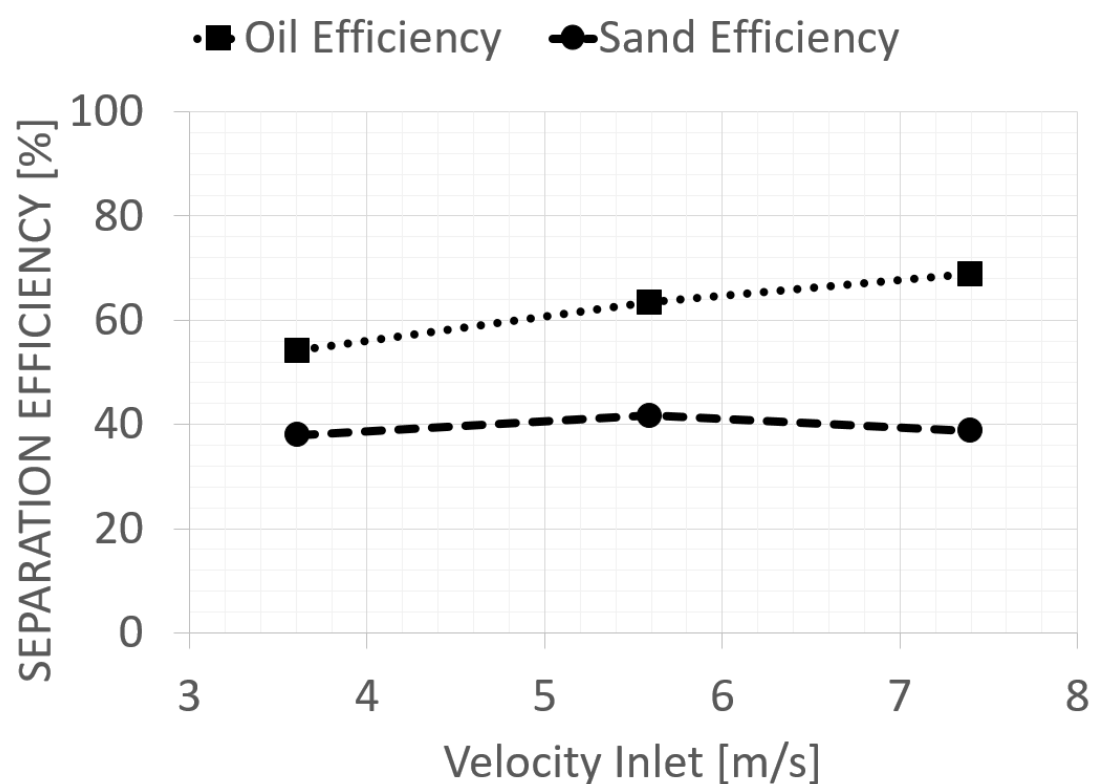


รูปที่ ก.4 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.3 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 32 มิลลิเมตร

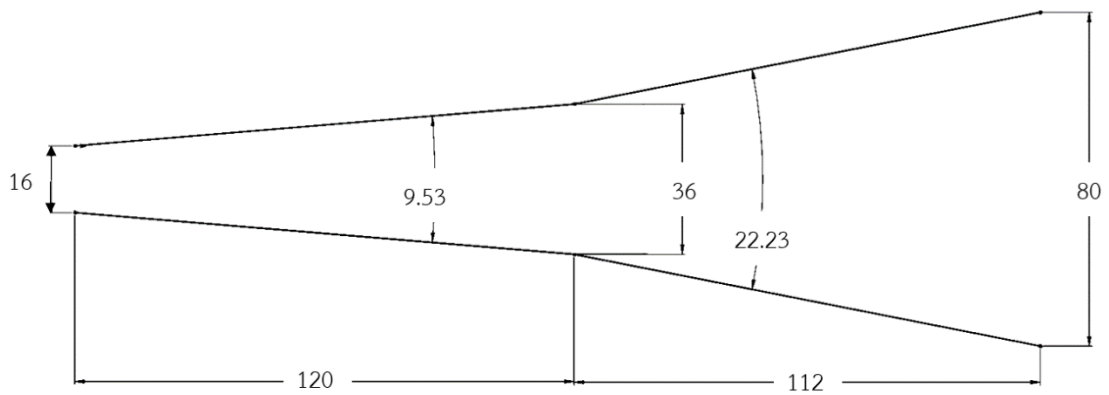


รูปที่ ก.5 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของกรวยเท่ากับ 32 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 24.2 องศาและมุม β เท่ากับ 7.63 องศา

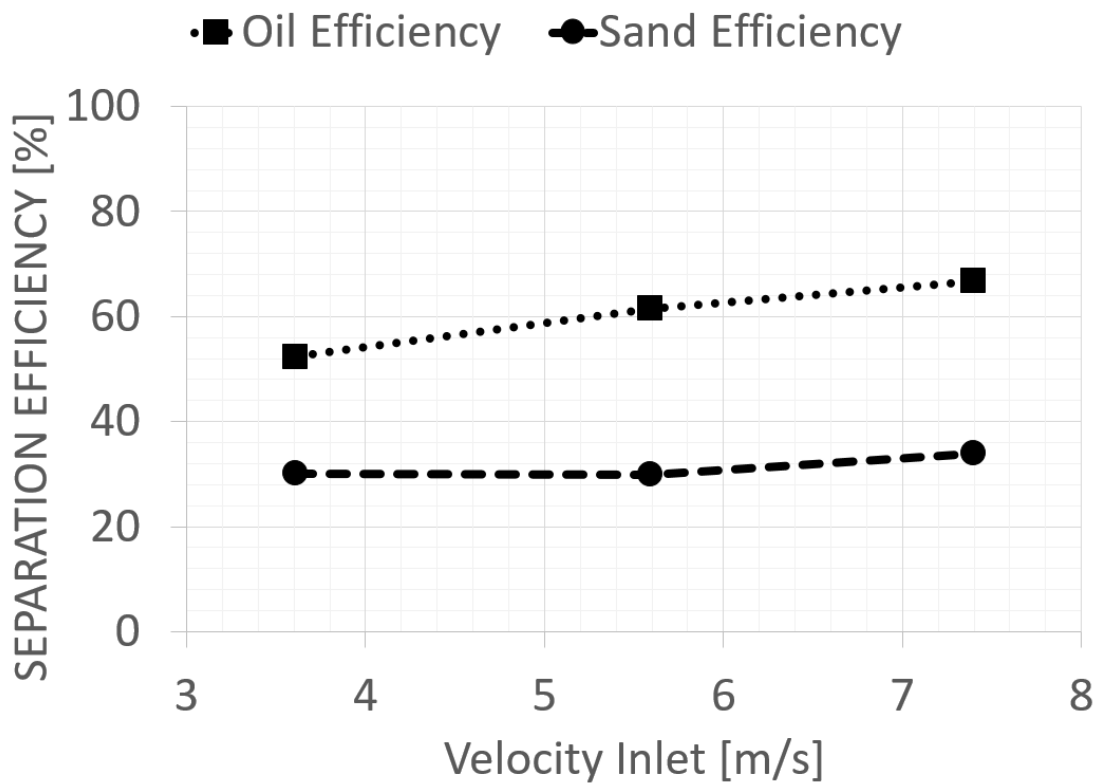


รูปที่ ก.6 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.4 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 36 มิลลิเมตร

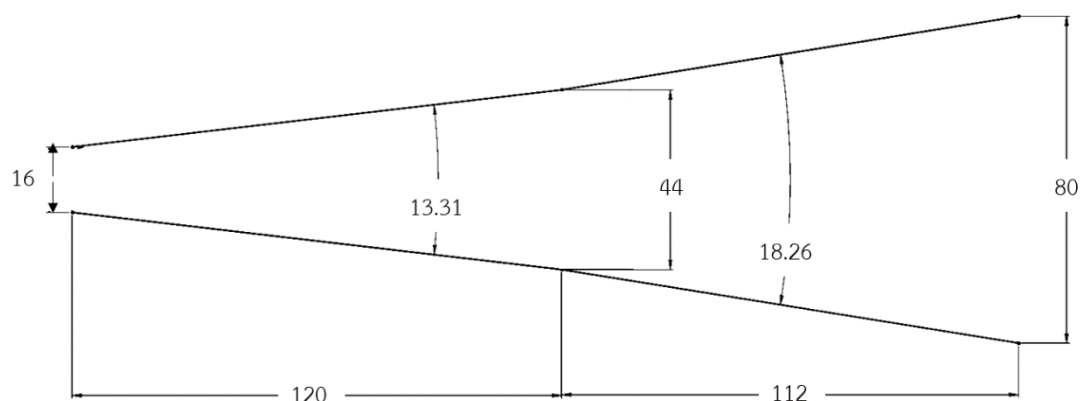


รูปที่ ก.7 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 36 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 22.23 องศาและมุม β เท่ากับ 9.53 องศา

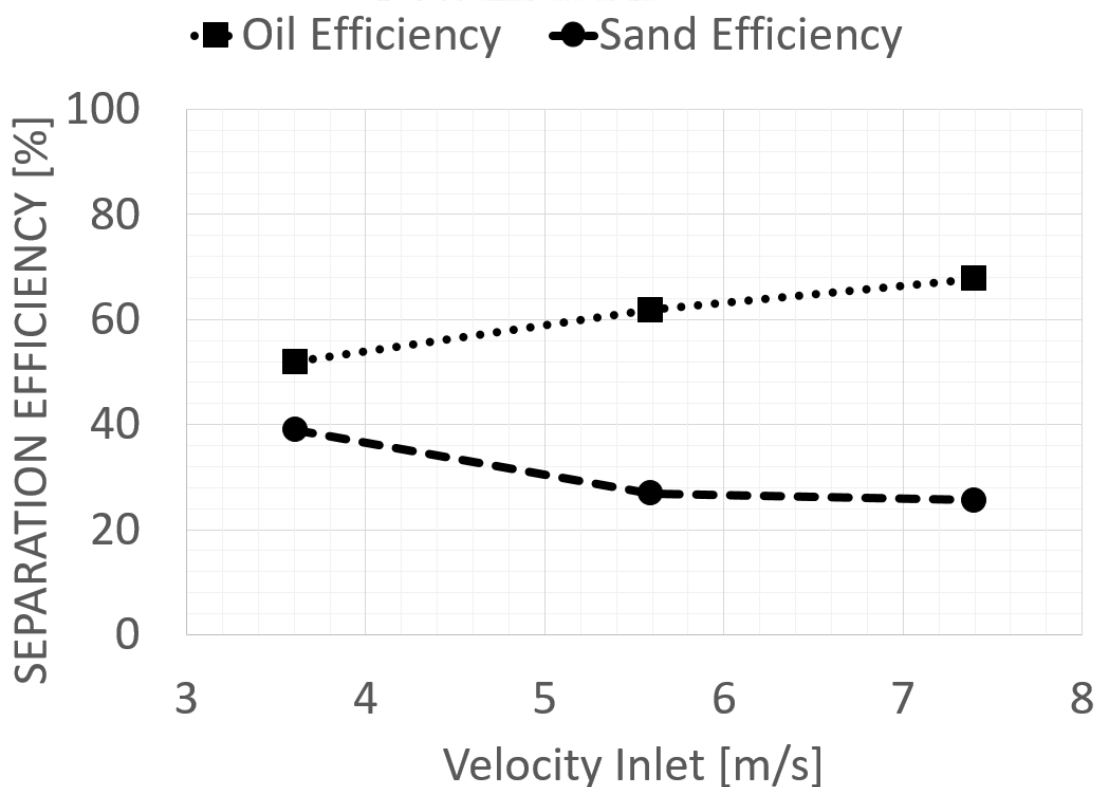


รูปที่ ก.8 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.5 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 44 มิลลิเมตร

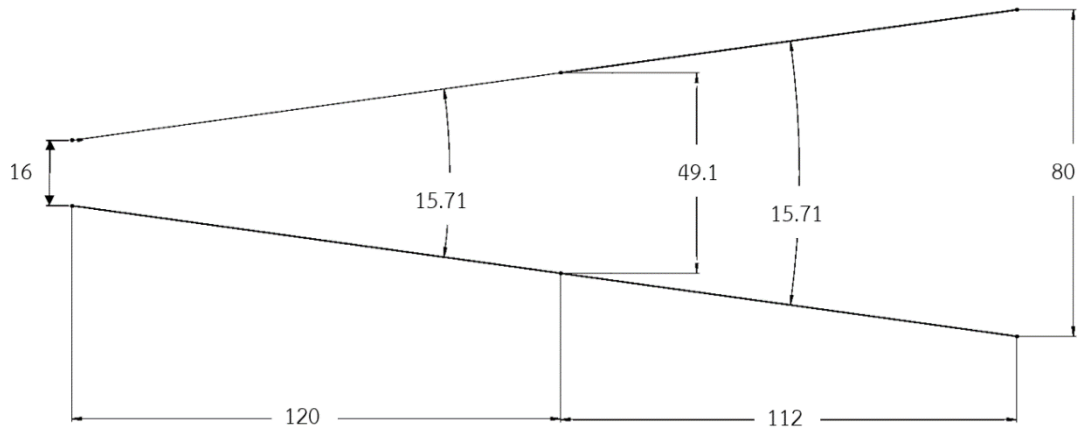


รูปที่ ก.9 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 44 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 18.26 องศาและมุม β เท่ากับ 13.31 องศา

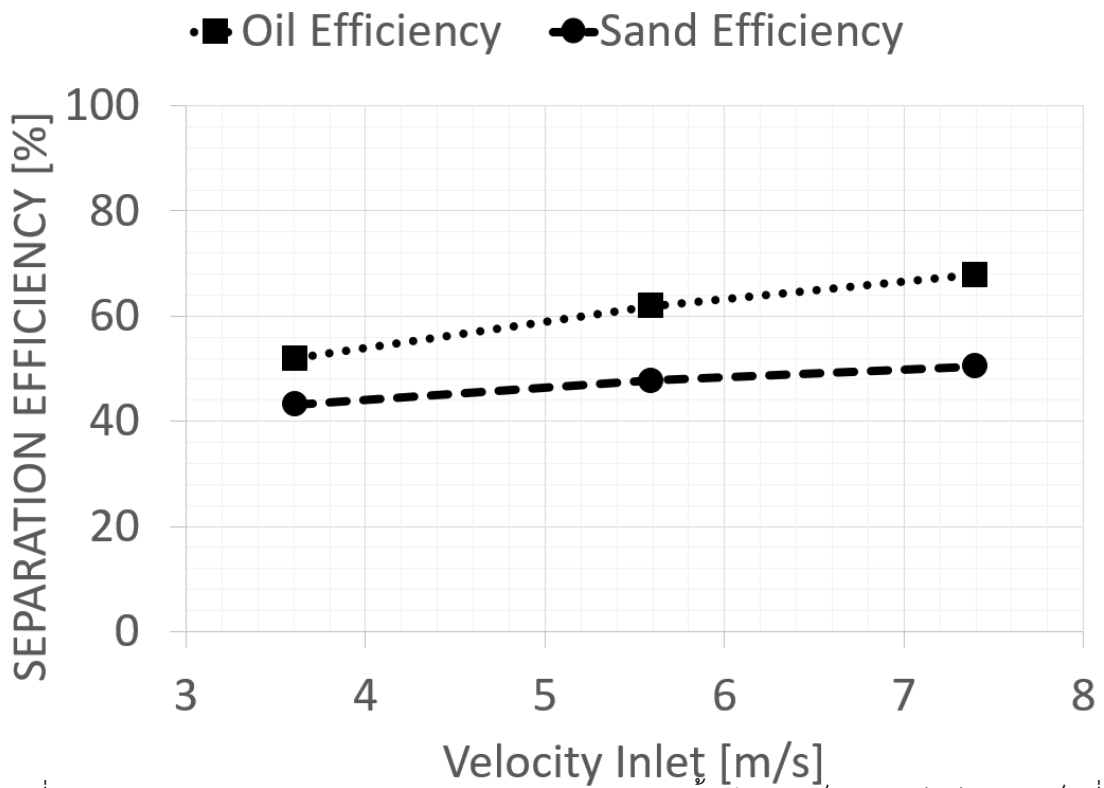


รูปที่ ก.10 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.6 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 49.1 มิลลิเมตร

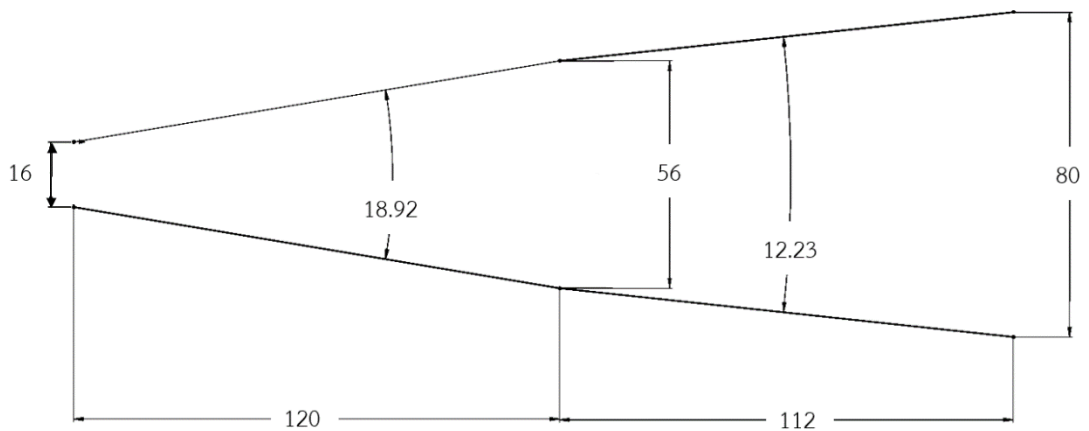


รูปที่ ก.11 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 49.1 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 15.71 องศาและมุม β เท่ากับ 15.71 องศา

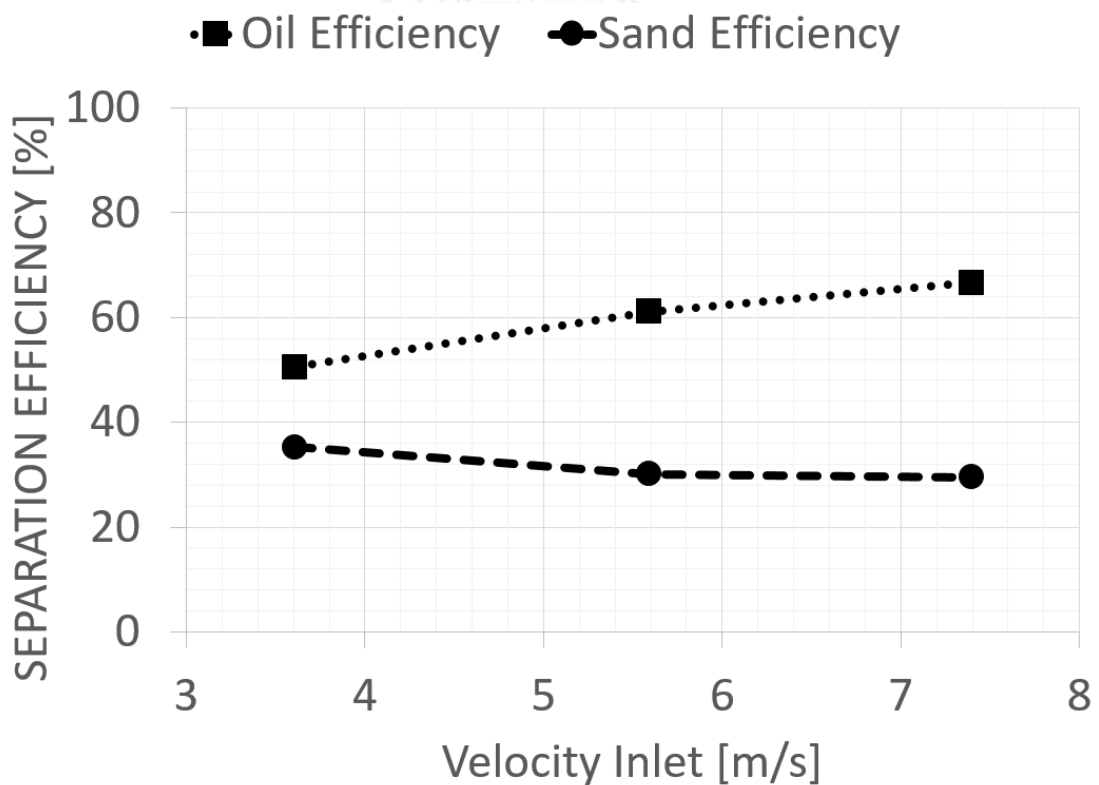


รูปที่ ก.12 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.7 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 56 มิลลิเมตร

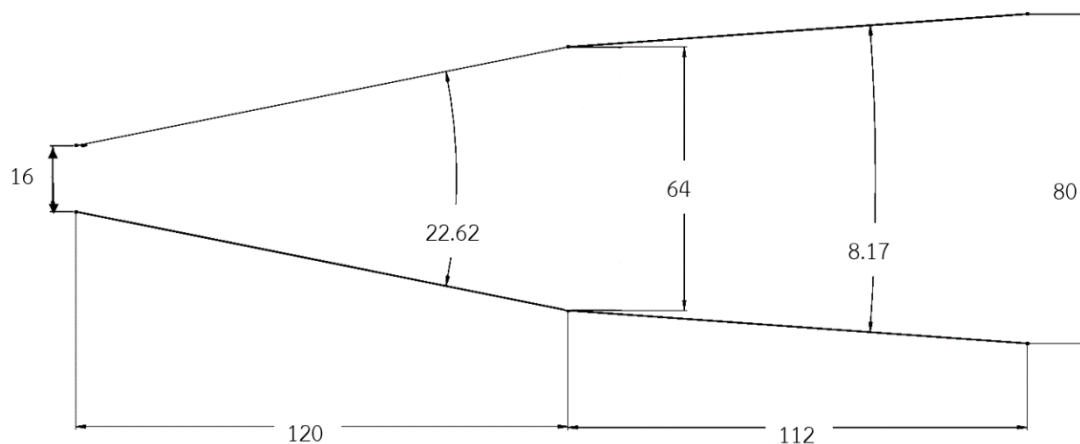


รูปที่ ก.13 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 56 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 12.23 องศาและมุม β เท่ากับ 18.92 องศา

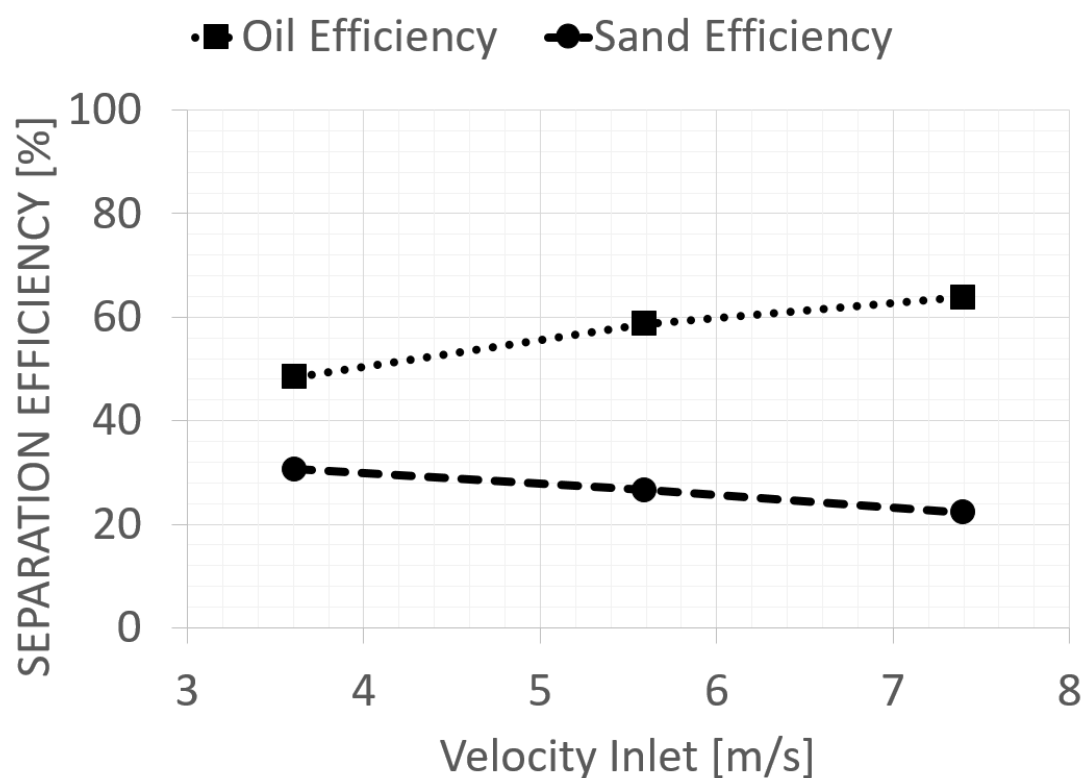


รูปที่ ก.14 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.8 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 64 มิลลิเมตร

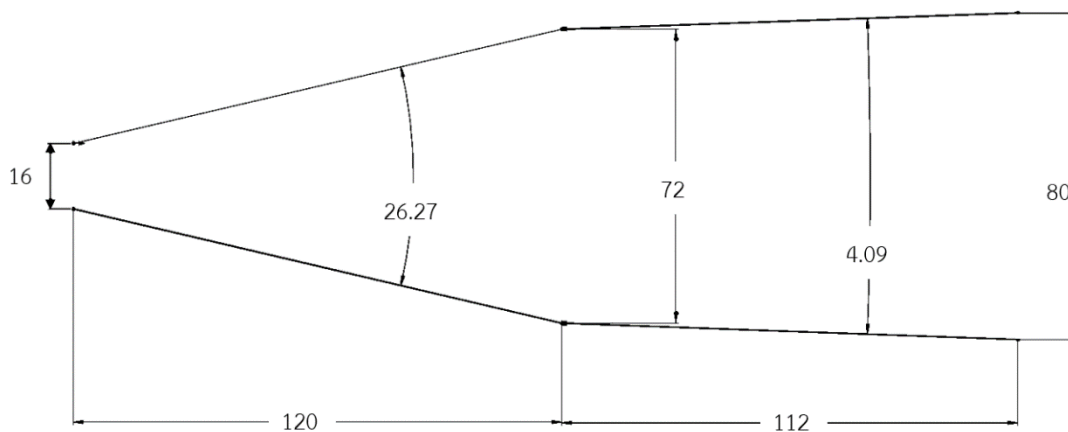


รูปที่ ก.15 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 64 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 8.17 องศาและมุม β เท่ากับ 22.62 องศา

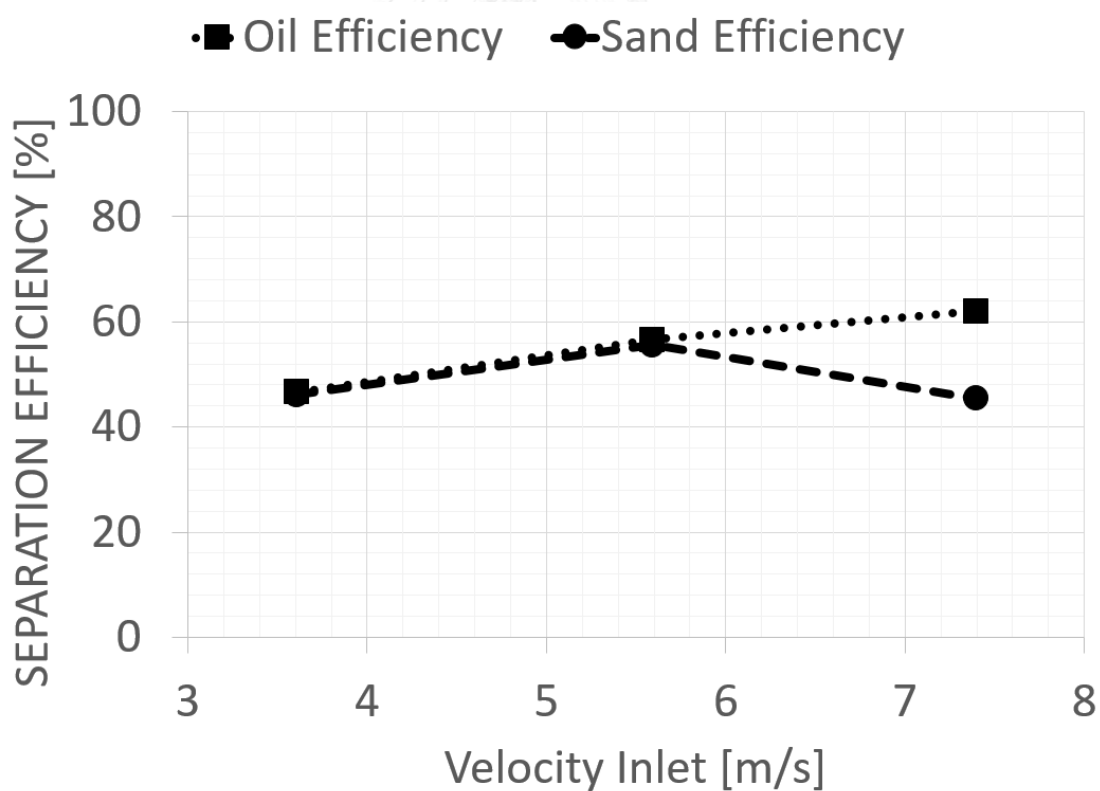


จากรูปที่ ก.16 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.9 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 72 มิลลิเมตร

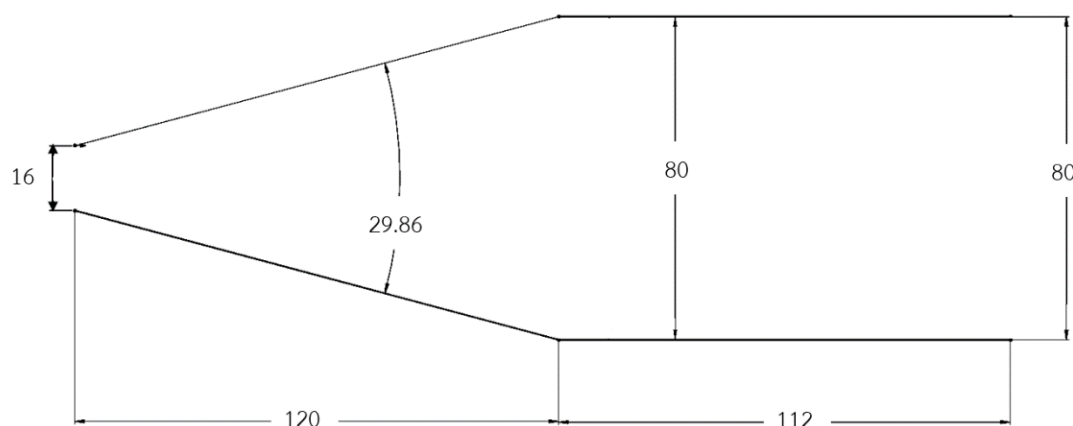


รูปที่ ก.17 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของกรวยเท่ากับ 72 มิลลิเมตรทำให้มี α เท่ากับ 4.09 องศาและมุม β เท่ากับ 29.86 องศา

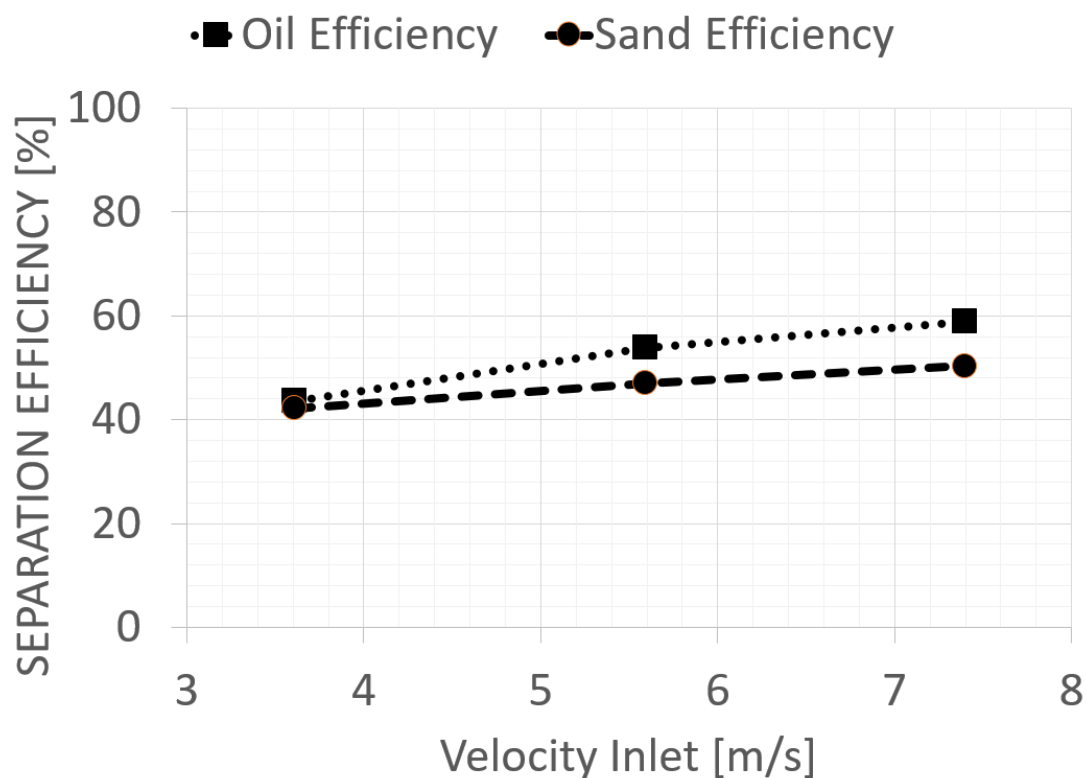


รูปที่ ก.18 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ก.10 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันระยะกลางกรวยเท่ากับ 80 มิลลิเมตร



รูปที่ ก.19 โครงสร้างของไฮโดรไซโคลนแบบทรงกรวยสองชั้นต่อกันโดยทำการเปลี่ยนค่าเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของกรวยเท่ากับ 80 มิลลิเมตรทำให้มีเฉพามุม beta เท่ากับ 29.86 องศา



รูปที่ ก.20 กราฟแสดงผลของประสิทธิภาพการแยกของหยดน้ำมันและเม็ดทรายต่อค่าความเร็วที่ช่องทางขาเข้าของสารผสม

ภาคผนวก ข

การสร้างและตั้งค่าแบบจำลองการไหลไฮโดรไฮโคลนชนิดแยก ของเหลว-ของเหลว-ของแข็ง แบบปั่นป่วนในไฮโดรไฮโคลนแบบสามวัฏภาคของ ANSYS Fluent

สำหรับการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณการศึกษาพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของผลของขนาดมุมกรวยต่อประสิทธิภาพการแยกของไฮโดรไฮโคลนของเหลว-ของเหลว-ของแข็งแบบทรงกรวยสองชิ้นต่อกันโดยใช้ต้นแบบงานวิจัยของ Changirwa [1] โดยงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม ANSYS Fluent ซึ่งเป็นโปรแกรมเชิงพาณิชย์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยการหาผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (Numerical Method) ที่ประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method) เข้าช่วยในการแก้ปัญหาในการไหล

ตารางที่ ข.1 การตั้งค่าทั่วไป (General)

Solver type:	Pressure-base
Time:	Transient
Dimension:	3D

ตารางที่ ข.2 แสดงการตั้งค่าแบบจำลอง (Models)

Multiphase:	Eulerian
No. of Eulerian Phase:	3
Vol Fraction parameters:	Implicit scheme
Viscous:	Reynolds Stress Model
Energy:	off

ตารางที่ ข.3 คุณสมบัติสารและวัสดุภาค

Properties	Sand	Oil	Water
Density	2650 kg/m ³	830 kg/m ³	998.2 kg/m ³
Viscosity	0 kg/m-s	0.00332 kg/m-s	0.001003 kg/m-s
Diameter	0.000075 m	0.00014 m	
Volume fraction	0.001	0.001	0.998
Granular Viscosity (kg/m-s)	Gidaspow		
Granular Bulk viscosity (kg/m-s)	Lun et.al		
Friction viscosity (kg/m-s)	Lun et.al		
Granular Temperature (m ² /s ²)	none		
Solid Pressure (Pascal)	algebraic		
Radial Distribution	Lun et.al		
Elasticity Modulus (Pascal)	Lun et.al		
Packing Limit	0.6		

ตารางที่ ข.4 Spatial Discretization:

Pressure-velocity coupling scheme:	Phase coupled SIMPLE
Gradient:	Least squares cell based
Momentum:	Second order upwind
Volume fraction:	First order upwind
Turbulent kinetic energy:	First order upwind
Turbulent dissipation Rate:	First order upwind
Reynolds Stresses:	First order upwind
Transient Formulation:	First Order Implicit

ตารางที่ ข.5 Under-relaxation factors:

Pressure:	0.3
Density:	1
Body forces:	1
Momentum:	0.7
Volume fraction:	0.5
Granular temperature:	0.2
Turbulent kinetic energy:	0.8
Turbulent dissipation rate:	0.8
Turbulent Viscosity:	1
Reynolds Stresses:	0.5

ตารางที่ ข.6 การตั้งค่าการคำนวณ:

Time Step Size:	0.001 s
Number of time Steps:	20,000
Max iteration per time step:	40

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย สุทธิศักดิ์ พรหมทอง เกิดวันที่ 19 ตุลาคม พ.ศ. 2533 ที่โรงพยาบาลจังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปีการศึกษา 2555 ได้เข้าทำงานที่บริษัท ซิโน-ไทย เอ็นจีเนียริ่งแอนด์คอนสตรัคชั่น จำกัด (มหาชน) ในตำแหน่งวิศวกรงานท่อ (Piping Engineer) ในโครงการ ICHTHYS Onshore LNG Facilities เป็นเวลาดังแต่ 16 สิงหาคม 2556 ถึง 16 มกราคม 2558 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2559

