

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

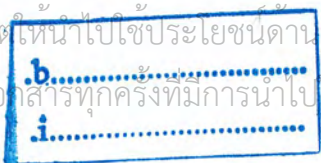
เครื่องผสมแชมพู

SHAMPOO MIXING MACHINE



ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วัน,เดือน,ปี 550103 - 4 เม.ย. 2548



ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2546

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องผสมแชมพู

SHAMPOO MIXING MACHINE

ผู้จัดทำ

1. นาย นิพนธ์ ชีระพรเพิ่มสุข รหัสประจำตัว 43010670
2. นาย บุรณิจจ์ ศรีสมศักดิ์ รหัสประจำตัว 43010679
3. นาย ปุณวิช ไกรทอง รหัสประจำตัว 43010697



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. ฉัตรณี เต็มปาก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เครื่องผสมแชมป์

นาย นิพนธ์ ชีระพรเพิ่มสุข 43010670  
 นาย บวรฉัตร ศรีสมศักดิ์ 43010679  
 นาย ปุณวิช ไกรทอง 43010697  
 ดร. ณัฐวดี เดไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา  
 ปีการศึกษา 2546

### บทคัดย่อ

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบเครื่องผสมแชมป์ซึ่งจะนำมาผลิตเป็นเครื่องจริง เพื่อนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตแชมป์ ดังนั้น จึงต้องศึกษาถึงเรื่องระบบของการผสม, วิเคราะห์กำลังที่ต้องใช้และความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวน เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผสมแชมป์ที่ดีที่สุด

จากการศึกษาและการออกแบบจึงได้เลือกใช้ใบกวน 2 ใบคือใบกวนแบบ Anchor และ ใบกวนแบบ Axial Flow ใส่ในถังผสมเดียวกันแล้วจึงออกแบบการทดลองเพื่อทำการทดลองผสมแชมป์ปริมาตร 20 ลิตร โดยทำการทดลอง 2 การทดลองด้วยกัน คือ

1. การทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวนแต่ละใบ
2. การทดลองเพื่อหาลักษณะของการผสมที่ดีที่สุด โดยทำการผสมแชมป์ โดยใช้
  - ใบกวนแบบ Anchor
  - ใบกวนแบบ Axial Flow
  - ใบกวนแบบ Anchor กับ ใบกวนแบบ Axial Flow พร้อมกัน
 (โดยการใช้ความเร็วรอบที่หามาได้จากการทดลองที่ 1)

ซึ่งจะสรุปผลได้ว่า ใบกวนแบบ Anchor ควรใช้ความเร็วรอบอยู่ในช่วง 62.3 – 73.2 rpm และ ใบกวนแบบ Axial Flow ควรใช้ความเร็วรอบอยู่ในช่วง 485.8 – 541.6 rpm จึงอยู่ในช่วงที่เหมาะสมที่สุด และในการทดลองใช้ในการผสมจริงการใช้ใบกวนแบบ Anchor กับ ใบกวนแบบ Axial Flow พร้อมกันจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้ใบกวนแบบ Anchor หรือ ใบกวนแบบ Axial Flow ผสมเพียงตัวเดียว

## SHAMPOO MIXING MACHINE

Mr. Nipon Teerapornpermsuk 43010670

Mr. Buranit Srisomsak 43010679

Mr. Punnavit Kraitong 43010697

Dr. Nattawoot Depaiwa Advisor

## ABSTRACT

This project is design of Shampoo mixing machine. When will soon be produced to using in Shampoo industries, we have to study about the system of mixing, power analysis, the rotational speed of impellers to indicate the best efficiency of Shampoo mixing machine.

According to the studying, We design to use 2 impellers, Anchor form and Axial flow form, together in mixing tank. And design 2 Experiments that use to mix 20 liters of shampoo.

1. Experiment to find an appropriate rotational speed for each impeller.
2. Experiment to find the best of mixing system from 3 kinds of mixing system.
  - Use 1 impeller in Anchor form
  - Use 1 impeller in Axial flow form
  - Use both of impellers, Anchor form and Axial flow form
 (Use rotational speed from first experiment)

The conclusion is that the suitable of rotational speed for each impeller is, Anchor form is in range of 62.3 – 73.2 rpm and, Axial flow form is in range of 485.8 – 541.6 rpm. The best of mixing system is the systems that use both of impellers.

### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้คงไม่อาจเสร็จลงได้ด้วยดี หากไม่ได้รับความช่วยเหลือ และร่วมมือจากหลายๆ ฝ่ายด้วยกัน บุคคลแรกที่ต้องกล่าวถึงเพราะเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วิทยานิพนธ์นี้เสร็จลงได้ ก็คือ อาจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เดไปวา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้ความเอาใจใส่ แนะนำ และช่วยเหลือเสมอมา ซึ่งต้องขอขอบพระคุณเป็นอย่างมาก

ลำดับที่ 2 ขอบคุณพี่วิศวกรที่ บริษัท เซอร์วิเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่ให้คำแนะนำ, ข้อมูลและความรู้ต่างๆเกี่ยวกับเครื่องผสม

ลำดับที่ 3 เพื่อนๆทุกคนที่คอยช่วยให้คำปรึกษาในด้านต่างๆ , คอยให้กำลังใจ และ ช่วยปฏิบัติงานในบางครั้งคราว

สุดท้ายนี้ต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้



นาย นิพนธ์ ธีระพรเพิ่มสุข  
นาย บุรณิจจ์ ศรีสมศักดิ์  
นาย ปณวิช ไกรทอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

## หน้าที่

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญภาพ	VI
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 จุดประสงค์ของโครงการ	2
1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ	2
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี	3
2.1 การแบ่งเครื่องกวนตามความหนืด	3
2.2 ทฤษฎีใบกวน	6
2.3 ทฤษฎีการไหลของของไหล	8
2.4 การผสม ( Blending and Mixing)	14
2.5 คุณสมบัติของของไหล	14
2.6 การออกแบบกังหันมาตรฐาน (Standard turbine)	19
2.7 กำลังงานที่ต้องการสำหรับการผสมของไหลนิวตัน	20
2.8 กำลังที่ต้องการสำหรับการผสมของไหลที่ไม่ใช่นิวตัน	23
2.9 แรงกระทำบนวัตถุที่จมในกวนไหล	25
2.10 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง	27
2.11 รูปร่างของกั้นถึงผสมที่ดี	31
2.12 การวิเคราะห์มิติและความคล้ายคลึง	36
บทที่ 3 การนำทฤษฎีมาใช้	44
3.1 คุณสมบัติของเชมพู	44
3.2 การเลือกใบพัดที่ใช้ในการผสม	44
3.3 การคำนวณกำลังมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง	45
บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง	50
4.1 อุปกรณ์การทดลอง	50
4.2 การทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบพัดแต่ละชนิด	54
4.3 การทดลองเพื่อคุณลักษณะการผสมของใบพัดแต่ละชนิด	64

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุป	67
5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง	67
5.2 ปัญหาที่พบจากการทดลอง	68
5.3 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง	68
บทที่ 6 แนวทางในการออกแบบเครื่องผสมเชมพูเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม	69
6.1 หลักการออกแบบเบื้องต้น	69
6.2 การคำนวณความเร็วรอบที่ใช้ในการทดลองเพื่อไปใช้ในอุตสาหกรรมจริง	70
6.3 การนำโปรแกรม STAR-CD มาช่วยในการวิเคราะห์	71
ภาคผนวก ก รายละเอียดของเชมพูและความสำคัญทางเศรษฐกิจ	74
ภาคผนวก ข วิธีการวัดค่าความหนืดและความหนาแน่น	83
ภาคผนวก ค การใช้ โปรแกรม STAR-CD	86
ภาคผนวก ง การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์	95
บรรณานุกรม	97



## สารบัญภาพ

	หน้าที่
รูปที่ 2 – 1 รูปแบบทั่วไปของเครื่องกวน	3
รูปที่ 2 – 2 เครื่องกวนสำหรับของเหลวความหนืดต่ำ	4
รูปที่ 2 – 3 เครื่องกวนสำหรับผลิตภัณฑ์ความหนืดปานกลางและสูง	5
รูปที่ 2 – 4 เครื่องกวนของไหลความหนืดสูงมาก	5
รูปที่ 2 – 5 ใบกวนแบบใบพัด	7
รูปที่ 2 – 6 ใบกวนแบบใบพาย	7
รูปที่ 2 – 7 ใบกวนแบบกึ่งหัน	8
รูปที่ 2 – 8 การไหลแนวรัศมี	9
รูปที่ 2 – 9 การไหลตามแนวแกน	9
รูปที่ 2 – 10 การไหลแบบแนวสัมผัสเส้นขอบถัง	9
รูปที่ 2 – 11 การติดใบกวนแนวเฉียงออกจากศูนย์กลาง	10
รูปที่ 2 – 12 การติดใบกวนด้านข้างของถังกวน	11
รูปที่ 2 – 13 รูปแบบการไหลของผลิตภัณฑ์ในถังที่ติดแผ่นกัน	11
รูปที่ 2 – 14 การเพิ่มชุดกึ่งหันในถังกวนขนาดใหญ่	12
รูปที่ 2 – 15 การควบคุมการไหลโดยการติด Draft tube ของกึ่งหันและใบพัด	13
รูปที่ 2 – 16 ลักษณะการไหลของของไหลที่ถูกกวนด้วยใบพัดเกือกม้า	13
รูปที่ 2 – 17 ความเร็วในการไหลเมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือน	15
รูปที่ 2 – 18 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Newtonian	16
รูปที่ 2 – 19 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Bingham plastic	17
รูปที่ 2 – 20 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ pseudoplastic	17
รูปที่ 2 – 21 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Dilatants	17
รูปที่ 2 – 22 แสดงลักษณะการไหลของของไหล Pseudoplastic แบบ power law	18
รูปที่ 2 – 23 แสดงลักษณะการไหลแบบ Time – dependent non – Newtonian	19
รูปที่ 2 – 24 ถังกวนแบบกึ่งหันมาตรฐาน	20
รูปที่ 2 – 25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขกำลัง	22
รูปที่ 2 – 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังเรย์โนลด์สำหรับใบกวนแบบ turbine 6 ใบ	25
รูปที่ 2 – 27 ค่า CD ของระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า	26
รูปที่ 2 – 28 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการการอนุรักษ์มวล	27
รูปที่ 2 – 29 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการพลังงาน พิจารณาในระบบ 2 มิติ $r, x$	29
รูปที่ 2 – 30 ส่วนประกอบของถังมาตรฐานที่มีกั้นเรียบพร้อมครีบก้นภายใน	32
รูปที่ 2 – 31 รูปการไหลในถังแบบกั้นเรียบมีแผ่นครีบก้น	33
รูปที่ 2 – 32 ส่วนประกอบต่างๆของถังผสม	34

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 2 – 33 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้กับระยะห่างของใบพัด (ของทรายละเอียด)	34
รูปที่ 2 – 34 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้กับระยะห่างของใบพัด (ของทรายหยาบ)	35
รูปที่ 2 – 35 ถึงที่พัฒนาจากถึงแบบอื่นๆ และขนาดของใบพัดที่สัมพันธ์กัน	36
รูปที่ 3 – 1 การวางใบกวนแบบ Anchor และ ใบกวนแบบ Axial flow ไว้ในถังผสมใบเดียวกัน	44
รูปที่ 3 – 2 การแบ่งส่วนของใบกวนแบบ Anchor เพื่อนำไปใช้คำนวณ	45
รูปที่ 4 - 1 อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ 1 เฟส และ 3 เฟส ตามลำดับ	50
รูปที่ 4 - 2 มอเตอร์ 1 เฟส และ 3 เฟส ตามลำดับ	50
รูปที่ 4 - 3 ชุดทดเฟือง	51
รูปที่ 4 - 4 ชุดขับปลิง	51
รูปที่ 4 - 5 ภาพใบกวนที่ใช้ในการผสมแฉะหมู	52
รูปที่ 4 - 6 ถังอะคริลิกใส	52
รูปที่ 4 - 7 สารเคมีที่ใช้ในการผสมแฉะหมู	53
รูปที่ 4 - 8 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง	53
รูปที่ 4 - 9 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 51.5 รอบ/นาที	54
รูปที่ 4 - 10 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 62.3 รอบ/นาที	54
รูปที่ 4 - 11 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 73.2 รอบ/นาที	55
รูปที่ 4 - 12 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 83.8 รอบ/นาที	55
รูปที่ 4 - 13 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 94.7 รอบ/นาที	55
รูปที่ 4 - 14 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 105.3 รอบ/นาที	56
รูปที่ 4 - 15 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 115.8 รอบ/นาที	56
รูปที่ 4 - 16 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 110.2 รอบ/นาที	57
รูปที่ 4 - 17 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 138 รอบ/นาที	57
รูปที่ 4 - 18 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 165.9 รอบ/นาที	57
รูปที่ 4 - 19 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 198.1 รอบ/นาที	58
รูปที่ 4 - 20 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 227.6 รอบ/นาที	58
รูปที่ 4 - 21 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 257 รอบ/นาที	58
รูปที่ 4 - 22 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 373.7 รอบ/นาที	59
รูปที่ 4 - 23 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 420.1 รอบ/นาที	59
รูปที่ 4 - 24 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 485.8 รอบ/นาที	59
รูปที่ 4 - 25 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 541.6 รอบ/นาที	60
รูปที่ 4 - 26 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 595.7 รอบ/นาที	60
รูปที่ 4 - 27 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 624.3 รอบ/นาที	60

## สารบัญภาพ (ต่อ)

	หน้าที่
รูปที่ 4 - 28 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 653.2 รอบ/นาที	61
รูปที่ 4 - 29 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 682.3 รอบ/นาที	61
รูปที่ 4 - 30 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 713.3 รอบ/นาที	61
รูปที่ 4 - 31 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 741.2 รอบ/นาที	62
รูปที่ 4 - 32 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 768.6 รอบ/นาที	62
รูปที่ 4 - 33 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 797 รอบ/นาที	62
รูปที่ 4 - 34 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 821.4 รอบ/นาที	63
รูปที่ 4 - 35 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 850.5 รอบ/นาที	63
รูปที่ 4 - 36 แสดงการดูคลื่นสี่ตอนเริ่มใส่ของใบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ	64
รูปที่ 4 - 37 แสดงการดูคลื่นสี่ที่เวลา 5 วินาทีหลังการใส่สี่	64
รูปที่ 4 - 38 แสดงการดูคลื่นสี่ที่เวลา 10 วินาทีหลังการใส่สี่	65
รูปที่ 4 - 39 แสดงการดูคลื่นสี่ที่เวลา 15 วินาทีหลังการใส่สี่	65
รูปที่ 4 - 40 แสดงการดูคลื่นสี่ที่เวลา 1 นาทีหลังการใส่สี่	65
รูปที่ 4 - 41 แสดงการดูคลื่นสี่ที่เวลา 1.5 นาทีหลังการใส่สี่	65
รูปที่ 4 - 42 แสดงการดูคลื่นสี่ในแนวระดับของใบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ	66
รูปที่ 6 - 1 เครื่องผสมแชมพูที่ใช้ในอุตสาหกรรม	69
รูปที่ 6 - 2 วงจรไฮดรอลิกที่ใช้ในเครื่องผสมแชมพู	70
รูปที่ 6 - 3 ภาพแสดงความเร็วของของไหลที่จุดต่างๆภายในถัง	72
รูปที่ 6 - 4 ภาพแสดงความดันของของไหลที่จุดต่างๆภายในถัง	73
รูปที่ 1 กระบวนการการผลิตแชมพู	78
รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง Cannon รุ่น LV2000	83
รูปที่ 2 แสดงลักษณะของหัวสปินเดิล (spindles) L1-L4	83
รูปที่ 1 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม STAR-CD	86
รูปที่ 1 แสดงแบบการเดินเครื่องและแรงบิด	96

## สารบัญตาราง

	หน้าที่
ตารางที่ 2 – 1 มิติของหน่วยของตัวแปรในกลศาสตร์ของไหล	38
ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าของแชมพูในปี 2540	79
ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกของแชมพูในปี 2540	80
ตารางที่ 3 ผลกระทบเบื้องต้นของแชมพูต่อสิ่งแวดล้อม	81
ตารางที่ 1 แสดงค่าที่เหมาะสมกับ Speed และชนิดของ Spindle	84



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการ

แชมพู (Shampoo) เป็นสินค้าอุปโภค-บริโภคที่ทุกๆครัวเรือนจำเป็นต้องใช้ ซึ่งเป็นตลาดที่กว้างมาก และการหมุนเวียนของสินค้าดีมาก จึงมีผู้ผลิตทั้งในประเทศ และต่างประเทศให้ความสนใจในสินค้าประเภทนี้ นอกจากนี้ก็ยังยังมีผู้ผลิตของไทยหลายๆรายที่สามารถขยายตลาดออกไปยังต่างประเทศ ทำให้ต้องมีการขยายกำลังการผลิต และผู้ผลิตหนึ่งในจำนวนนี้ได้ประสบปัญหาในการขยายกำลังการผลิต เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตต้องอาศัยแรงงานคนเป็นหลัก ซึ่งนอกจากจะสิ้นเปลืองแรงงานแล้ว สินค้าที่ผลิตออกมา ยังไม่มีมาตรฐานที่แน่นอนอีกด้วย ทำให้เกิดความเสียเปรียบในการแข่งขันกับผู้ผลิตรายอื่นๆ ผู้ผลิตดังกล่าวจึงได้มาปรึกษากับทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล เพื่อหาทางแก้ปัญหาด้านการผลิต

โดยที่ในการออกแบบเครื่องผสมแชมพูนั้น ทางผู้ผลิตได้มีข้อเสนอแนะไว้ดังนี้

1. เครื่องผสมควรมีการถอดเปลี่ยนได้ง่าย เพื่อการเปลี่ยนกลิ่น-สี ของแชมพูที่ผสม
2. ควรที่จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นได้
3. ควรที่จะทำความสะอาดได้ง่าย เพื่อให้แชมพูที่ผลิตมีมาตรฐานความสะอาดที่ดี

เนื่องจากเครื่องผสมแชมพูในอดีตส่วนมากจะเป็นแบบใช้มอเตอร์ตัวเดียวในการขับใบกวนใบ หรือใบกวนหลายใบที่ติดอยู่บนเพลาดียวกัน ซึ่งในการที่จะผสมแชมพูให้เข้ากันอย่างทั่วถึง จำเป็นต้องใช้ความเร็วรอบที่สูงมาก เพราะแชมพูนั้นมีความหนืดที่ค่อนข้างสูงทำให้มีส่วนที่ติดอยู่บริเวณขอบของภาชนะ โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ไกลจากใบกวนจะไม่มีส่วนผสม หรือมีผสมน้อยมาก แต่การที่กวนด้วยความเร็วรอบสูงทำให้เกิดฟองมาก ซึ่งเป็นผลเสีย ทั้งทางด้านมาตรฐานการผลิต และระยะเวลาในการผลิตที่ต้องเสียเวลาในการรอให้ฟองหายไป

ดังนั้นเราจึงต้องออกแบบเครื่องผสมแชมพูแบบใหม่ให้ตรงกับความต้องการของทางผู้ผลิต ในขั้นตอนการออกแบบเครื่องผสมแชมพูนั้น เราต้องศึกษาถึงเรื่องระบบของการผสม, วิเคราะห์กำลังที่ต้องใช้และความเร็วรอบของใบกวน และเราต้องคำนึงถึงขบวนการการผลิต เราจึงจำเป็นต้องทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของการผสมโดยใช้กำลังในการผสมแชมพู, ลักษณะของใบกวนและความเร็วรอบที่เหมาะสมต่อการกวนมากที่สุดที่สามารถได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการผสมแชมพูที่ดีที่สุด

จากการศึกษาข้อมูล ใบกวนบางชนิดนั้นได้มีการทดสอบและทดลองแล้ว ซึ่งจะเป็นข้อมูลที่ชี้แจงว่าลักษณะของใบกวนชนิดนี้จะต้องอยู่ตรงไหน ขนาดและมิติเป็นเท่าไร เหมาะสมกับสารประเภทใด ซึ่งเราจะใช้ข้อมูลที่ได้อศึกษามานั้นมาออกแบบและสร้างเครื่องทดลองในการผสมแชมพู โดยใช้ใบกวน 2 ใบที่หมุนด้วยความเร็วรอบต่างกัน ตัวแรกใช้ใบกวนชนิด Anchor ซึ่งมีลักษณะคล้ายใบพาย เพื่อ

แก้ปัญหาแชมพูที่ติดอยู่บริเวณขอบถัง ส่วนใบกวนตัวที่ 2 เลือกใช้แบบ Axial Flow แบบเอียง 60° เพื่อให้

เกิดกระแสการไหลในแนวแกน ซึ่งเครื่องทดลองที่เราสร้างนั้นมีปริมาตร 20 ลิตร เพื่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการเก็บผลและนำไปใช้สเกลอัพน้อย

### 1.2 จุดประสงค์ของโครงการ

1. ออกแบบและสร้างชุดทดลองเพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมจริงของใบกวน 2 ใบ
2. เพื่อออกแบบเครื่องผสมเคมีที่ใช้งานในอุตสาหกรรม

### 1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ

1. ศึกษาหาข้อมูลและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องผสม
2. ศึกษากระบวนการในการผสมเคมี, การออกแบบถังผสมและใบกวนในอุตสาหกรรม
3. สร้างชุดทดลองเพื่อทำการทดลองหาลักษณะการกวน และความเร็วรอบในการกวนที่ดี และนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องจริง
4. รวบรวม และวิเคราะห์ผลที่ได้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบเครื่องจริง
5. ออกแบบเครื่องผสมเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง โดยให้ตรงตามเป้าหมายของผู้ผลิต



## บทที่ 2

### หลักการและทฤษฎี

โดยทั่วไปแล้วของเหลวจะถูกกวนในภาชนะซึ่งมักเป็นรูปทรงกระบอกตั้ง ด้านบนของภาชนะอาจเป็นแบบปิดหรือเปิดสู่อากาศก็ได้ ก้นถังทำเป็นแบบมน ไม่มีมุมเพื่อป้องกันกระแสการไหลไม่ทั่วถึง บริเวณมุมอับ สัดส่วนของตัวถังภาชนะจะเปลี่ยนไปตามวัตถุประสงค์ของการกวนความสูงของไหลในถังประมาณเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง ใบกวนจะติดอยู่บนเพลลาซึ่งยึดติดกับตัวถัง ตัวเพลลาถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ โดยส่วนมากมักมีชุดเฟืองลดความเร็วรอบติดอยู่ด้วย นอกจากนี้มักมีส่วนอื่นๆ ได้แก่ ท่อทางเข้า ทางออก ขดลวด ชุดหุ้มตัวถังท่อสำหรับวัดอุณหภูมิรวมอยู่ด้วย รูปแบบทั่วไปของเครื่องกวนดังแสดงในรูปที่ 2 - 1



รูปที่ 2-1 รูปแบบทั่วไปของเครื่องกวน

การเคลื่อนที่ของของไหลในถังกวนขึ้นกับองค์ประกอบหลายประการ ได้แก่

- 1 คุณสมบัติของการไหล
- 2 ชนิดของใบกวน
- 3 รูปร่างและขนาดของถังกวน, แผ่นกั้น และชุดกวน

#### 2.1 การแบ่งเครื่องกวนตามความหนืด

เครื่องกวนแบ่งตามความหนืด จะแบ่งได้ 3 ชนิดคือ

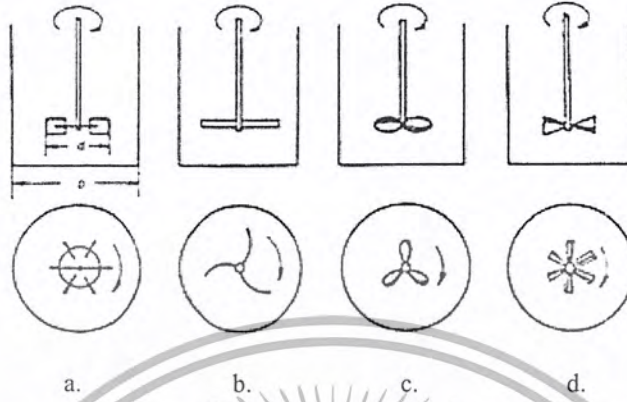
##### 2.1.1 เครื่องกวนสำหรับใช้กับผลิตภัณฑ์ความหนืดต่ำ

ปกติเครื่องกวนชนิดนี้ใช้กับของเหลวที่ค่าความหนืดไม่เกิน 0.5 Pa.s (kg / m.s) ความเร็วรอบของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง การกวนขึ้นอยู่กับเส้นผ่าศูนย์กลางก้นภาชนะความหนืดและความไว (sensitivity) ของผลิตภัณฑ์ที่มี

ไม่ทราบแน่ชัด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเร็ว Peripheral สูงถึง 15 m/s จำนวนรอบของการหมุน(n) สามารถมีค่าสูงถึง 3000 rpm ความเร็ว Peripheral โดยทั่วไปควรมีค่าไม่เกิน 8 m/s



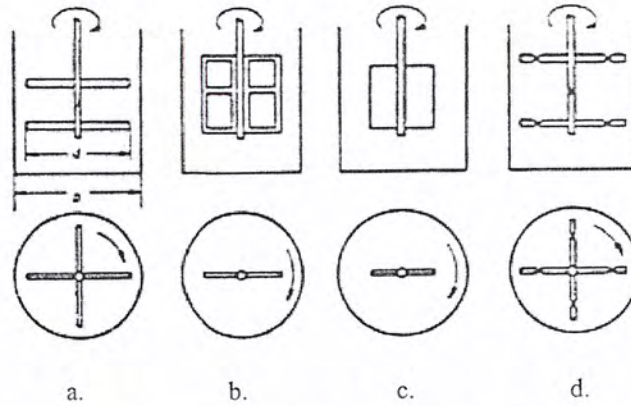
รูปที่ 2- 2 เครื่องกวนสำหรับของเหลวความหนืดต่ำ

- a. Paddle
- b. Impeller
- c. Propeller
- d. Turbine

ชนิดของใบกวนแบบ Paddle และแบบ Impeller ของเหลวจะเคลื่อนที่ในแนวรัศมีจากด้านในสู่ด้านนอก ส่วนแบบ Propeller และแบบ Turbine ของเหลวจะเคลื่อนที่ตามแนวแกน

#### 2.1.2 เครื่องกวนสำหรับใช้กับผลิตภัณฑ์ความหนืดปานกลาง ถึงความหนืดสูง

ปกติเครื่องกวนชนิดนี้ใช้กับของเหลวที่ค่าความหนืด 0.5 - 5 Pa.s (kg / m.s) แท่งกวนแบบกากบาท(cross rod) ประตู(gate) และใบพาย(blade paddle) ขับให้ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ในแนวรัศมีจากด้านในสู่ด้านนอก และเคลื่อนที่ในแนวสัมผัสด้วย (สำหรับแบบ MIG ขับให้ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ในแนวแกนทั้งสองทิศทาง) ในกรณีใบกวนแบบ MIG แท่งกวนกากบาทหลายชุดติดตั้งอยู่บนแกนด้วยมุม 90 องศา ทำให้ผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่ในแนวแกนทั้งภายในและภายนอกในทิศทางตรงข้ามกัน ทำให้เกิด small annular vortices ตลอดปริมาตรทั้งหมดของของเหลว

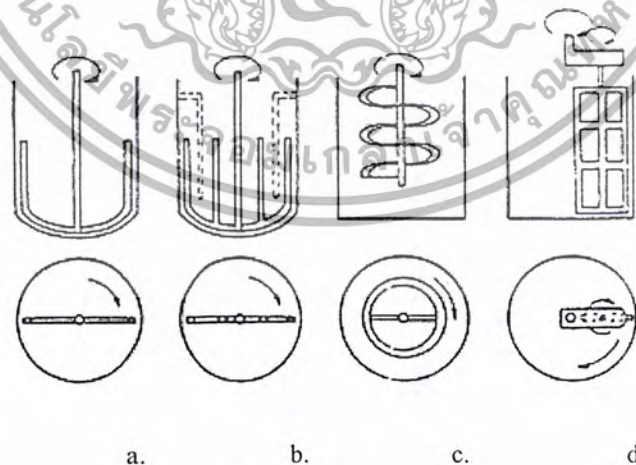


รูปที่ 2-3 เครื่องกวนสำหรับผลิตภัณฑ์ความหนืดปานกลางและสูง

- cross rod stirrer ( $d/D = 0.8 - 0.9$ )
- gate stirrer ( $d/D = 0.5 - 0.7$ )
- blade paddle stirrer ( $d/D = 0.5 - 0.7$ )
- MIG = multistage - impulse - contra - flow stirrer ( $d/D = 0.5 - 0.98$ )

### 2.1.3 เครื่องกวนสำหรับใช้กับผลิตภัณฑ์ความหนืดสูงมาก

เช่น puddings processed cheese ใบกวนแบบเกือกม้า(anchor) และ intermeshing finger ขับเคลื่อนผลิตภัณฑ์ในแนวสัมผัสที่ความเร็วน้อยกว่า 100 รอบต่อนาที สำหรับใบกวนแบบแถบเกลียว (helical ribbon) ขับให้ผลิตภัณฑ์เคลื่อนตามแนวแกน แท่งกวนเหล่านี้โดยปกติจะขับเคลื่อนกับผนังเพื่อผลิตผลออกจากผนังได้ดีขึ้น เครื่องกวนชนิดนี้สามารถถ่ายเทความร้อนสู่หรือจากผนังได้ดี



รูปที่ 2-4 เครื่องกวนของไหลความหนืดสูงมาก

- anchor ( $d/D = 0.9 - 0.98$ )
- finger stirrer with baffle ( $d/D = 0.9 - 0.98$ )
- helical ribbon stirrer ( $d/D = 0.95 - 0.98$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- d. gate stirrer with epicyclic gear turning round two axes (เหมาะสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่างวัตถุดิบและของเหลวเป็น (doughy) หรือ (pasty mass) มักประกอบแท่งกวนแบบประตู (gate) ซึ่งติดอยู่บน (planet wheel) ของเกียร์ (epicyclic) ซึ่งหมุนเร็วอย่างสัมพันธ์ถึงประมาณ 500 รอบต่อนาที รอบแกนของมัน มันหมุนอย่างช้ามาก รอบแกนของภาชนะบรรจุที่น้อยกว่า 100 รอบต่อนาที ดังนั้นใบกวนถึงส่วนต่างๆ ของภาชนะ และมีการผสมกันตลอดทั้งส่วนภายในและภายนอกของผลิตภัณฑ์)

## 2.2 ทฤษฎีใบกวน

ใบกวน (Impellers) ใบกวนแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ เป็นใบกวน ซึ่งให้กระแสการไหลของของไหลขนานกับแกนของใบกวน (axial flow impellers) และ เป็นใบกวนซึ่งให้กระแสการไหลมีทิศทางขนานกับรัศมีของใบกวน (radial flow impeller)

ใบกวนแบ่งออกได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ คือ

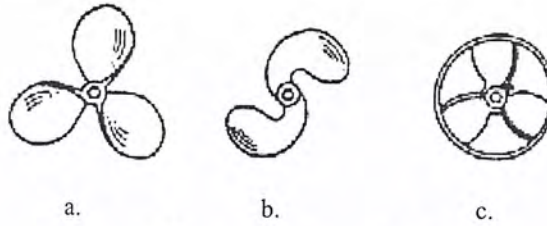
### 2.2.1 ใบพัด (propellers)

ใบพัด (propellers) เป็นใบกวนแบบเกิดการไหลตามแนวแกน (axial flow) ใช้สำหรับของเหลวความหนืดต่ำ ใบพัดขนาดเล็กหมุนด้วยความเร็วรอบตามแนวความเร็วรอบของมอเตอร์ ขณะที่ตัวขนาดใหญ่หมุนด้วยความเร็วรอบประมาณ 400 – 800 รอบต่อนาที กระแสการไหลออกจากใบกวนแบบต่อเนื่องผ่านของเหลวในทิศทางซึ่งกำหนดให้จนกระทั่งกระทบกับผนังหรือก้นของภาชนะ ใบกวนแบบใบพัดนี้ใช้ได้ผลดีกับภาชนะซึ่งใหญ่มากๆ เนื่องจากกระแสการไหลไม่ตก

กรณีไม่มีการลื่นไถลระหว่างของเหลวกับใบพัด การหมุนหนึ่งรอบของใบพัดจะเคลื่อนที่ของเหลวได้ระยะทางคงที่ตามแนวยาว ซึ่งขึ้นอยู่กับมุมเอียงของใบพัด อัตราส่วนระหว่างระยะทางนี้กับเส้นผ่าศูนย์กลางของใบพัด เรียกว่าระยะ pitch ของ propeller โดย pitch เท่ากับ 1 เรียกว่า square pitch

รูปที่ 2 - 5 แสดงแบบต่างๆ ของใบพัด แบบที่ใช้กันมากที่สุดได้แก่ แบบมาตรฐาน 3 ใบ (standard three bladed marine type) เป็น square pitch ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับ propeller ซึ่งใช้ในการขับเคลื่อนเรือ นอกจากนี้ยังมีแบบ 4 ใบ (four-bladed), แบบฟัน (toothed) และแบบอื่นๆ ซึ่งออกแบบสำหรับใช้งานลักษณะเฉพาะ

ปกติแล้วใบพัดมักมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 45 ซม. กรณีถังซึ่งบรรจุของเหลวเล็กๆ อาจใช้ใบพัด 2-3 ตัวติดบนแกนเพลลาเดียวกัน โดยทั่วไปจะติดในทิศทางขับของไหลให้เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน แต่บางกรณีจะติดทิศทางตรงข้ามกันเพื่อให้ระหว่างใบทั้งสองเกิดการหมุนอลวนสูง

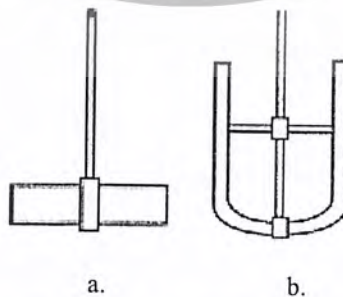


รูปที่ 2 - 5 ใบกวนแบบใบพัด

- a. standard three-blade
- b. weedless
- c. guarded

### 2.2.2 ใบพาย (paddles)

ใบพาย(paddles) เป็นใบกวนแบบแบนๆ ติดอยู่บนเพลาส่วนใหญ่เป็นแบบ 2 ใบ และ 4 ใบ ดังรูปที่ 2 - 6 a บางทีใบอาจบิดเอียง แต่ส่วนมากจะเป็นแบบตั้ง ใบพายหมุนด้วยความเร็วรอบต่ำถึงปานกลาง ประมาณ 20 - 150 รอบต่อนาที ในอุตสาหกรรมความยาวของใบพายส่วนใหญ่ประมาณ 50 - 80 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวน ความกว้างของใบประมาณ 10 - 17 เปอร์เซ็นต์ของความยาว ใบพัดข้างต้นของเหลวให้เคลื่อนที่ในแนวรัศมีและแนวสัมผัส โดยเกือบจะไม่มีเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับใบกวน ถ้าใบกวนไม่เป็นแนวเอียง กระแสการไหลของของเหลวจะเคลื่อนที่ออกข้างนอกตู้ผนังภาชนะ จากนั้นจึงเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงที่ความเร็วรอบต่ำมากๆ จะเกิดการกวนอย่างเบาๆ อ่อนๆ ในภาชนะที่ไม่มีแผ่นกั้น(baffle) ถ้าความเร็วรอบสูงของเหลวจะไหลวนรอบๆ ผนัง แต่มีการผสมกันน้อยมากดังนั้นจำเป็นต้องใช้แผ่นกั้น สำหรับถังเล็กๆอาจใช้ใบพายหลายใบติดบนเพลาดียวกัน การออกแบบใบตามรูปร่างถึงภาชนะเป็นแบบจาน หรือรูปครึ่งซีกภาชนะเพื่อที่จะสามารถกวาดเช็ดผิวหน้าผนังภาชนะ ใบกวนแบบนี้เรียกว่า anchor agitator ดังรูปที่ 2 - 6 b ซึ่งใช้ป้องกันการเก็บสะสมบนผิวถ่ายเทความร้อนที่ผนังภาชนะซึ่งถ่ายเทความร้อนด้วย แต่ใบชนิดนี้ผสมได้ไม่ดี ดังนั้นจึงมักใช้ร่วมกับใบพายความเร็วรอบสูงหรือใบกวนแบบอื่นๆ ปกติแล้วใบจะหมุนในทิศทางตรงข้ามกัน



รูปที่ 2 - 6 ใบกวนแบบใบพาย

- a. Simple paddle
- b. Anchor type

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 กังหัน (turbines)

ใบกวนแบบกังหัน(turbines) ส่วนมากเป็นใบแบบใบพายขนาดสั้นหลายใบประกบกันติดอยู่บนเพลลาที่จุดศูนย์กลางของถัง ใบหมุนด้วยความเร็วรอบสูง อาจเป็นใบตรงหรือใบโค้งติดแบบเอียงหรือแนวตั้งก็ได้ ตัวใบอาจติดตั้งเป็นแบบเปิดกึ่งปิด(semiclosed) หรือมีแผ่น โลหะกันรอบ(shrouded) เส้นผ่าศูนย์กลางของใบจะเล็กกว่าแบบใบพาย คือขนาดประมาณ 30-50 เปอร์เซ็นต์ของเส้นผ่าศูนย์กลางภาชนะ

ใบกวนแบบกังหัน ใช้งานได้ดีกับของไหลซึ่งมีค่าความหนืดต่างๆกันในของไหลความหนืดต่ำ ใบกวนแบบกังหันให้กระแสการไหลแรงตลอดภาชนะ และช่วยกำจัดจุดซึ่งของไหลหยุดนิ่งหรือเคลื่อนที่ช้าๆ บริเวณใกล้ใบกวนเป็นช่วงกระแสการไหลเร็วเกิดการอลวนสูงและแรงเฉือนสูง กระแสการไหลหลักเป็นแนวรัศมีและแนวสัมผัสใบกวน โดยส่วนประกอบการไหลแนวสัมผัส ก่อให้เกิดการไหลวนและดูดลงซึ่งแก้ไขได้โดยใช้แผ่นกั้น(baffle) หรือวงแหวนตัวกระจาย(diffuser ring) รูปที่ 2 - 7 แสดงใบกวนแบบกังหัน



ใบกวนในแต่ละแบบนี้ยังมีส่วนปลีกย่อยซึ่งแตกต่างกันไปอีก นอกจากนี้ใบกวนทั้ง 3 แบบนี้แล้วยังมีใบกวนแบบอื่นๆ ซึ่งออกแบบสำหรับการใช้งานเฉพาะอย่างอื่นด้วย

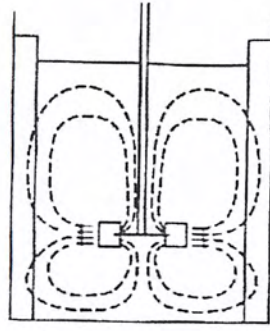
## 2.3 ทฤษฎีการไหลของของไหล

ลักษณะการไหลแบ่งเป็น 3 แบบ

### 2.3.1 การไหลแนวรัศมี (radial flow)

ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากใบกวนแบบ blade (turbine) ลักษณะการไหลจะแบ่งของไหลแนวรัศมีที่ติด

เอกสารนี้เป็นสองส่วน โดยส่วนหนึ่งไหลลงสู่ก้นถังและไหลกลับขึ้นมาสู่ใบกวน ดังรูปที่ 2-8 ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



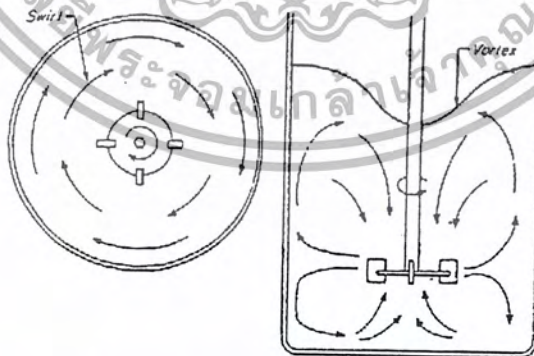
รูปที่ 2 - 8 การไหลแนวรัศมี

2.3.2 การไหลตามแนวแกน (axial flow) โดยใบกวนแบบใบพัด (propeller) ดังรูปที่ 2 - 9



รูปที่ 2 - 9 การไหลตามแนวแกน

2.3.3 การไหลแบบแนวสัมผัสเส้นขอบถัง (tangential) ดังรูปที่ 2 - 10



Top view

Side view

รูปที่ 2 - 10 การไหลแบบแนวสัมผัสเส้นขอบถัง

ปกติเมื่อเฟลาอยู่ในแนวตั้ง การไหลแนวรัศมีและแนวแกนเป็นตัวกระทำให้เกิดการผสมกัน แต่

การไหลตามแนวสัมผัสจะมีข้อเสียเมื่อไหลเร็วมาก(too intensive) รูปทรงการไหลของไหลจะเป็นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรวยหรือไหลวน(funnel or swirling) เกิดผิวหน้าเป็นน้ำวน(vortex) และมีแนวโน้มเกิดแบบต่อเนื่องโดยการไหลวนแบบราบเรียบแบ่งเป็นชั้นๆที่ระดับต่างๆ โดยไม่เกิดการไหลตามแนวแกนระหว่างระดับภายใต้พฤติการณ์ที่เหมาะสม และถ้า vortex ลึกมากจนถึงใบกวนอาจดึงอากาศเข้าไปผสมกับของไหลมาก นอกจากนี้ถ้าผลิตภัณฑ์ที่ถูกกวนมีความหนาแน่นต่างกันเช่น สารละลายแขวนลอย(suspension) หรือ emulsion ของผสมนี้อาจแยกกันเนื่องจากผลของแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง

ปรากฏการณ์การไหลวนของของไหลในถังกวนสามารถป้องกันได้โดย 3 วิธีต่อไปนี้

1. ติดตั้งแกนใบกวนแนวเบี่ยงออกจากศูนย์กลาง(off-center impeller)

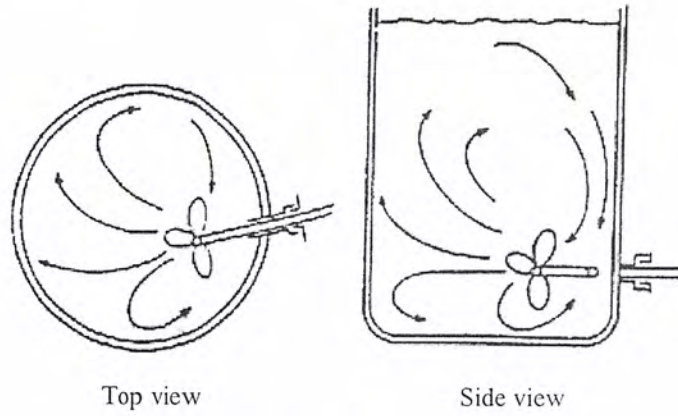
ใช้สำหรับถังกวนขนาดเล็กแกนเพลลาจะติดตั้งเลื่อนจากศูนย์กลางของถังและทำมุมเอียงในแนวตั้งฉากกับแนวเบี่ยงศูนย์กลาง ดังแสดงในรูปที่ 2 - 11 วิธีนี้เหมาะสำหรับถังกวนขนาดเล็ก สำหรับการกวนด้วยความเร็วสูงที่กำลังสูงๆ แรงไม่สมดุลจะรุนแรงมากและเป็นตัวจำกัดการใช้กำลังสูงๆ



รูปที่ 2 - 11 การติดใบกวนแนวเบี่ยงออกจากศูนย์กลาง

2. ติดตั้งตัวกวนด้านข้างของถังกวน

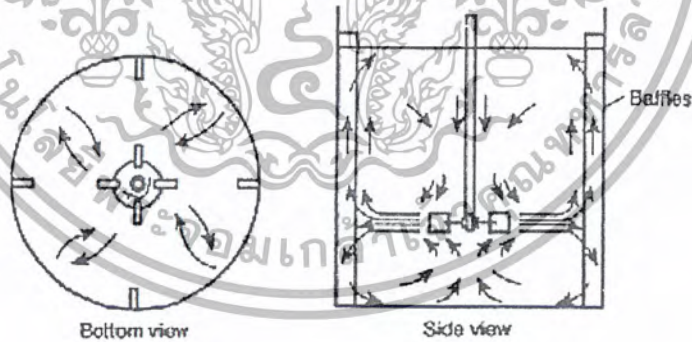
โดยเพลลาทำมุมเอียงหรือขนาดแนวระดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 - 12 วิธีนี้สามารถใช้ได้กับถังกวนขนาดใหญ่



รูปที่ 2 - 12 การตีใบกวนด้านข้างของถังกวน

### 3. ตีแผ่นกั้น(baffles)

วิธีนี้ใช้ได้กับถังใหญ่ซึ่งมีการกวนในแนวตั้ง ตัวแผ่นกั้นช่วยลดการไหลวนของของไหลโดยไม่แทรกแซงการไหลแนวรัศมีและแนวแกนช่วยให้การผสมดีขึ้น ปกติแล้วแผ่นกั้นมักติดตั้งในแนวตั้งและตั้งฉากกับผนังของภาชนะ ลักษณะของแผ่นกั้นและการไหลของของไหลแสดงในรูปที่ 2 - 13 ปกติแล้วถ้าถังไม่ใหญ่มากๆ แผ่นกั้น 4 แผ่นก็เพียงพอสำหรับป้องกันการไหลวนและการเกิดหลุมน้ำวนสำหรับถังกัน ความกว้างของแผ่นกั้นควรจะ ไม่เกิน  $1/12$  ของเส้นผ่าศูนย์กลางถัง สำหรับใบพัดไม่ควรเกิน  $1/18$



รูปที่ 2 - 13 รูปแบบการไหลของผลิตภัณฑ์ในถังที่ตีแผ่นกั้น

ใบกวนแบบ shrouded และ diffuser ring สามารถใช้กับใบกวนแบบกั้นเพื่อป้องกันการไหลวนแทนการใช้แผ่นกั้น อุปกรณ์ชนิดนี้ดัดแปลงมาจากลักษณะการทำงานของปั๊มหอยโข่ง แต่มีจุดประสงค์หลักเพื่อเพิ่มความฝืดและลดการหมุนวน วงแหวนตัวกระจายมีแนวทางป้องกันการกระแสการไหลจากการถึงมุมไกลของถังกวน การติดตั้งและดูแลรักษาทำได้ยาก แต่มีประโยชน์มากถ้าต้องการแรงเฉือนสูง และการไหลวนแบบพิเศษที่ทางออกของใบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

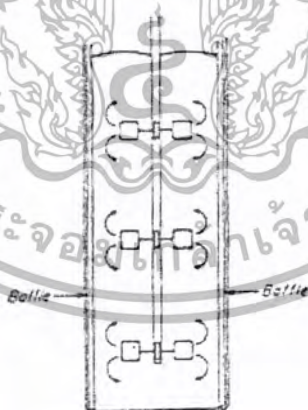
กรณีไม่มีการไหลวน ลักษณะการไหลโดยเฉพาะในถังกวนขึ้นกับชนิดของใบกวน

ใบกวนแบบใบพัด ขับให้ของเหลวเคลื่อนที่ในแนวตรงลงสู่ก้นของถังกวน จากนั้นจึงกระจายในแนวรัศมีทุกทิศทางสู่ผนังแล้วไหลขึ้นตามแนวผนังถังกวน และหมุนกลับลงมาจากส่วนบนด้วยแรงดึงดูดของใบพัด ใบกวนแบบใบพัดเมื่อต้องการกระแสการไหลแรงในแนวแกนเพลลาเช่น กรณีต้องการแขวนลอยอนุภาคของแข็งหนัก ปกติมักใช้ใบพัดกับของไหลซึ่งมีค่าความหนืดไม่เกิน 5 pa.s (kg/m.s)

ใบกวนแบบใบพาย ขับของไหลให้เคลื่อนที่แนวรัศมีในระนาบกับตัวใบกวนได้ดี แต่การเคลื่อนที่ในแนวตั้งจากน้อยมาก ซึ่งทำให้การใช้งานของใบกวนชนิดนี้มีจำกัดและไม่เหมาะสมกับการแขวนลอยของของแข็ง

ใบกวนแบบก้านหัน ใบกวนชนิดนี้ขับของไหลให้เคลื่อนที่แนวรัศมีสู่ด้านนอกจากนั้นจึงแบ่งเส้นทางการไหลแยกเป็นสองส่วน ส่วนหนึ่งไหลขึ้นสู่ผิวหน้าของของไหลแล้วไหลกลับจากด้านบนใบกวน ส่วนที่สองไหลลงยังก้นถังแล้วไหลกลับขึ้นจากด้านล่างเข้าสู่ศูนย์กลางของใบกวน ใบกวนแบบนี้ให้ผลในการไหลแนวรัศมีได้ดีและยังช่วยให้เกิดการไหลในแนวตั้งด้วยโดยเฉพาะเมื่อติดแผ่นกั้น ใบกวนชนิดนี้เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับผสมของเหลว ซึ่งมีค่าความกว้างจำเพาะใกล้เคียงกัน

ในถังกวนทรงกระบอกต้องการความลึกของการไหล ควรมีความเท่ากับหรือมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของถังกวนเล็กน้อย แต่ถ้าต้องการความลึกของของไหลมากกว่าควรใช้วิธีเพิ่มจำนวนชุดใบกวนติดตั้งบนแกนเพลลาเดียวกัน โดยใบกวนแต่ละชุดทำงานเหมือนกันเครื่องกวนแยกกัน โดยการไหลเกิดขึ้น 2 ชุด ในแต่ละชุดใบกวนถึงแสดงในรูปที่ 2 - 14 ชุดกวนล่างสุดไม่ว่าจะเป็นแบบก้านหันหรือใบพัด ควรติดตั้งห่างจากก้นถังประมาณเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของชุดใบกวน

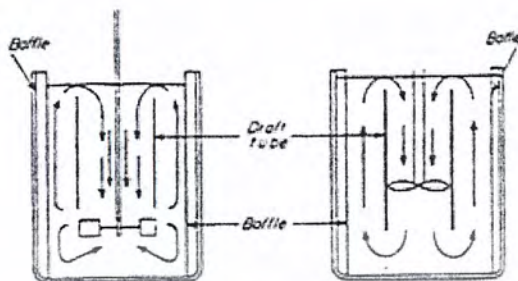


รูปที่ 2 - 14 การเพิ่มชุดก้านหันในถังกวนขนาดสูง

Draft tube ใช้ในกรณีต้องการควบคุมทิศทางและความเร็วของการไหลสู่ช่วงการดูดของใบกวน เครื่องมือนี้มีประโยชน์เมื่อต้องการแรงเคลื่อนสูงในตัวใบกวนเอง เช่น ในโรงงาน หรือการกระจายของอนุภาคของแข็งซึ่งมีแนวโน้มลอยบนผิวของเหลวในของเหลว Draft tube ที่ใช้กับใบพัดมักติดรอบใบ

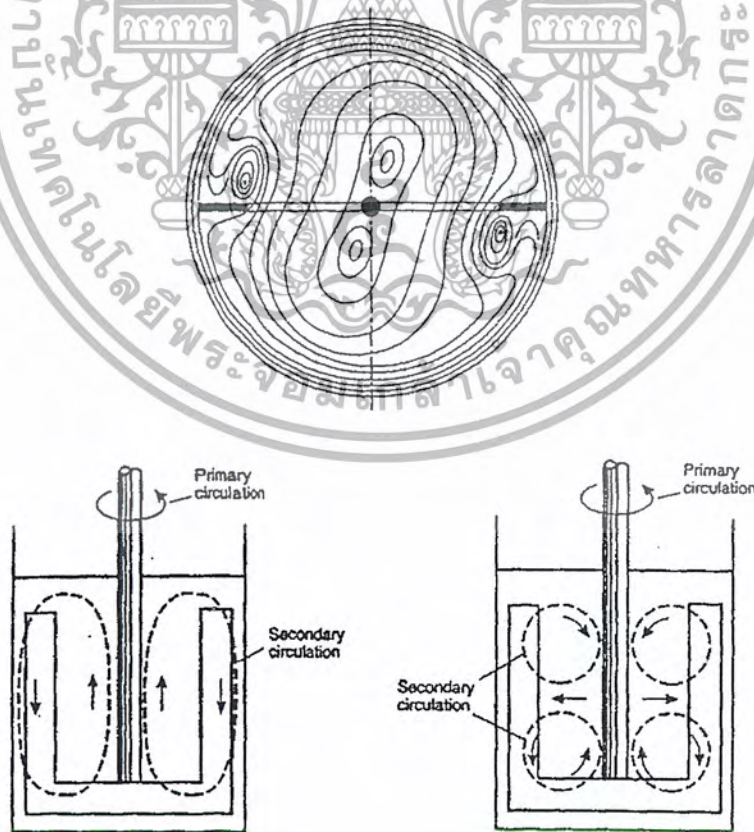
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กวน ส่วนที่ใช้กับก้านหินคิดบริเวณเหนือขึ้นไปจากใบกวนดังแสดงในรูปที่ 2-15 ตัวDraft tube เข้าไปเพิ่มความฝืดให้กับของไหลในระบบทำให้อัตราการไหลลดลง ดังนั้นถ้าไม่มีความจำเป็นจึงไม่ควรใช้



รูปที่ 2-15 การควบคุมการไหลโดยการคิด Draft tube ของก้านหินและใบพัด

ใบกวนแบบเกือกม้า(Anchor) จะเป็นใบพายที่ถูกออกแบบตาม ลักษณะ เพื่อทำหน้าที่กวนสารที่มีความหนืดสูงมากๆ ที่ติดอยู่บริเวณผนังภาชนะ และ การไหลของของไหลที่ถูกใบพัดเกือกม้ากวนจะมีลักษณะดังรูปที่ 2-16



รูปที่ 2-16 ลักษณะการไหลของของไหลที่ถูกกวนด้วยใบพัดเกือกม้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การผสม ( Blending And Mixing )

การผสมมีรายละเอียดที่ซับซ้อนกว่าการกวนมาก สำหรับการกวน แม้ลักษณะความหนืด การใช้กำลังงานจะมีความซับซ้อนแต่ก็สามารถตรวจวัดและจำลองภาพได้ชัดเจนกว่า ในขณะที่การผสมนั้น จำลองภาพได้ยากและมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยมากการวัดค่าการผสมจึงต้องอาศัยผลจากการทดลอง เป็นสำคัญ บ่อยครั้งที่วัดคุณภาพของการผสมได้จากการสังเกตการแทรกตัวของอากาศ และการเปลี่ยนสี Indicator กรด-เบส ของสารนั้นๆ หรืออาจใช้เกณฑ์ตรวจวัดอื่นๆ เช่น การกระจายตัวของสารหรือการเพิ่มขึ้น ลดลงของอุณหภูมิ การละลายของสารหนึ่งเข้ากับอีกสารหนึ่ง หรืออาจสังเกตจากการแขวนลอยของ ส่วนผสม สำหรับสารที่มีของเหลวและของแข็งผสมกัน

### 2.4.1 การผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้ากันได้

การผสมของเหลวที่มีคุณสมบัติเข้ากันได้ มักใช้วิธีผสมด้วยใบกวน โดยติดตั้งใบกวนอยู่ตรง กลางภายในถังผสมขนาดเล็ก แต่สำหรับถังผสมขนาดใหญ่หรือบ่อบำบัดอาจใช้ใบกวนติดตั้งอยู่ด้านข้าง หรือใช้การผสมด้วยการฉีดของผสมเข้าในถังผสม (Jet Mixer) ถ้าหับการผสมภายในถังผสมขนาดเล็กจะ ทำให้ของเหลวสามารถเข้ากันได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ถังผสมขนาดใหญ่อาจต้องใช้เวลานานกว่า หรือ อาจต้องค่อยๆ เติบสารผสมทีละชั้นซึ่งทำให้เสียเวลาอย่างมาก

### 2.4.2 การผสมภายในภาชนะ (Process Vessels)

สำหรับการผสมในภาชนะ ของเหลวจะผสมเข้ากันกับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูงๆ ได้ดีเฉพาะที่ อยู่บริเวณที่อยู่ใกล้กับใบกวนเท่านั้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วน (Turbulence) สูง และเมื่อผลิตภัณฑ์เข้ากับของเหลวบ้างแล้ว การไหลก็จะช้าลงกลายเป็นการไหลวนอยู่รอบๆผนังของถังผสม โดยช่วงนี้ จะเกิดการผสมแบบตามแนวรัศมี (Radial Mixing) บ้างเล็กน้อย จากนั้นจึงหมุนเข้ามายังใบกวนที่เป็นศูนย์กลางอีกครั้ง การผสมแบบดังกล่าวส่วนผสมจะสามารถเข้ากันได้ได้ถึง 99% ในระยะเวลาการผสม 5 ครั้ง

### 2.4.3 การผสมแบบ Stratified Blending ภายในถังบรรจุ

เพื่อให้การผสมภายในถังที่มีขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพมากขึ้น จำเป็นต้องปรับแกนกวนให้ทำมุมเอียงกับผนังถังผสม โดยมุมเอียงที่ได้ผลดีที่สุดคือ  $80^{\circ}$  และ  $83^{\circ}$  ส่วนระยะเวลาการผสมนั้นจะขึ้นอยู่กับ อัตราการไหลเวียน (Circulation Rate) โดยเฉพาะการแทรกปะทะ (Erosion) กันระหว่างชั้นของเหลวที่จะทำการผสม

## 2.5 คุณสมบัติของของไหล

ของไหลมีลักษณะที่สำคัญ คือ สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ตามภาชนะที่บรรจุและเมื่อได้รับแรงกระทำ

สมบัติของของไหลที่มีผลต่อการถ่ายโอนหรือการเคลื่อนย้ายของไหลที่สำคัญ คือ ความหนืดของของไหล ความหนืด คือ ความต้านทานต่อการเคลื่อนที่ของของไหล ความหนืดจะมีผลต่อกำลังที่ต้องการใช้ในการผลักดันให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่

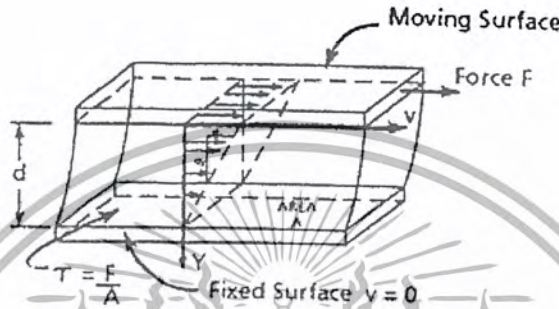
### 2.5.1 ความเค้นและความหนืดของของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลจะไหลได้เมื่อได้รับความเค้น(Stress) ความเค้น คือแรงที่กระทำต่อของไหล ต่อพื้นที่มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวตั้งฉากกับทิศของของไหลจะเรียกว่า ความเค้นปกติ (normal stress) ซึ่งมีค่าเท่ากับความดัน

2.5.2 ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวขนานกับผิวของของไหล

ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวขนานกับผิวของของไหลเรียกว่า ความเค้นเฉือน (shear stress) เมื่อให้ความเค้นเฉือนของไหลจะไหลดังนี้



รูปที่ 2-17 ความเร็วในการไหลเมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือน

ตามนิยาม ความเค้นเฉือน ( $\tau_{yz}$ ) มีค่าเท่ากับ

$$\tau_{yz} = \frac{F}{A} \tag{2-1}$$

โดย

$$F \propto A \frac{\Delta V_z}{\Delta y}$$

ดังนั้น

$$\tau_{yz} \propto \frac{\Delta V_z}{\Delta y} \Rightarrow \tau_{yz} = \mu \frac{\Delta V_z}{\Delta y} \tag{2-2}$$

เมื่อ  $\mu$  คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด หรือ Coefficient of viscosity โดยทั่วไปจะเรียก “ความหนืด” หรือ viscosity มีหน่วยเป็นแรงคูณเวลาต่อพื้นที่ (เช่น  $N.s/m^2$ ) (บางตำราใช้สัญลักษณ์  $\sigma$  แทนความเค้นเฉือน และ  $\eta$  แทนความหนืด) เมื่อให้ค่า  $\Delta y \rightarrow 0$  จะสามารถเขียนสมการ 2-2 ได้เป็น

$$\tau_{yz} = \mu \frac{dV_z}{dy} \quad (SI \text{ unit}) \tag{2-3}$$

โดย  $\frac{dV_z}{dy}$  คือ velocity gradient ในแนวแกน y เรียกว่า “Shear rate” หรืออัตราเฉือนมีลักษณะ

เป็น  $\gamma$  มีหน่วยเป็นส่วนกลับของเวลา โดยปกติคือ  $1/s$

$$\tau_{yz} = \mu \gamma \quad (SI \text{ unit}) \tag{2-4}$$

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน(Shear rate) และความเค้นเฉือน (Shear stress) ตามสมการ (2-4) จัดเป็น Newtonian fluid

เอกสารนี้เป็นเอกสารความหนืดมีหน่วยดังนี้การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$1 \text{ N.s/m}^2 = 1 \text{ Pa.s} = 10 \text{ poise(P)} = 1000 \text{ cP}$$

$$1 \text{ P} = 1 \text{ g/cm.s}$$

$$1 \text{ cP} = 6.7197 \times 10^{-4} \text{ lbm/ft.s}$$

น้ำมีความหนืดประมาณ 1 cP ที่อุณหภูมิ 20°C

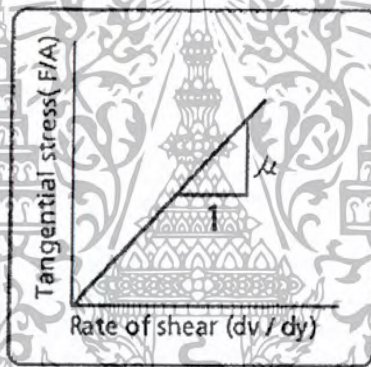
### 2.5.3 การแบ่งประเภทของเหลวตามลักษณะการไหล

การแบ่งประเภทของของเหลวมักจะทำโดยพิจารณาค่าความหนืดเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งของเหลวได้เป็นสองประเภทหลักคือ Newtonian fluid และ Non-Newtonian fluid

#### 2.5.3.1 Newtonian fluid

คือ ของเหลวที่มีความหนืดที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนและประวัติการได้รับแรงเฉือน (Shear history) ความหนืดของของเหลวประเภทนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของเหลวเท่านั้น shear stress และ shear rate มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

$$\tau = \mu \gamma \quad (2-5)$$



รูปที่ 2-18 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Newtonian

#### 2.5.3.2 Non - Newtonian fluid

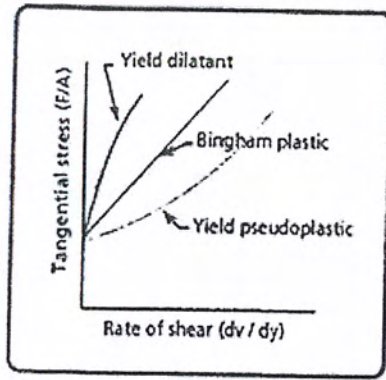
คือของเหลวที่มีความหนืดที่แปรตามอัตราเฉือน สามารถแบ่งได้เป็น

##### 2.5.3.2.1 Time - independen non - Newtonian fluids ได้แก่

1. Bingham plastic มีความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ดังนี้

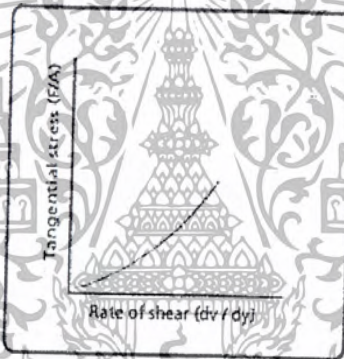
$$\text{Bingham model; } \tau = \tau_0 + \mu \gamma \quad (2-6)$$

เมื่อ  $\tau_0$  คือ yield stress ของเหลวนิดนี้ต้องได้รับความเค้นเฉือนมากกว่า  $\tau_0$  จึงจะเกิดการไหลได้และเมื่อเกิดการไหลแล้ว ความหนืดของของเหลวจะไม่ขึ้นกับ shear rate



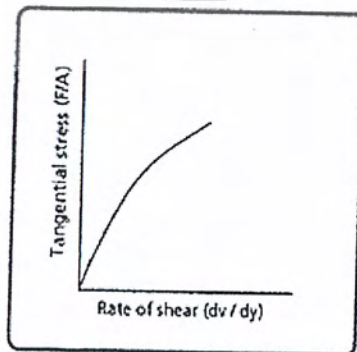
รูปที่ 2 - 19 แสดงลักษณะการไหลของไหลแบบ Bingham plastic

2. Shear-thinning fluid หรือ pseudoplastic fluid มีความหนืดลดลงตาม shearrate



รูปที่ 2 - 20 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ pseudoplastic

3. Shear thickening fluid หรือ Dilatant fluid มีความหนืดเพิ่มขึ้นตาม shear rate



รูปที่ 2 - 21 แสดงลักษณะการไหลของของไหลแบบ Dilatants

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง Pseudoplastic fluid และ Dilatants fluid จะมี shear stress และ shear rate มีความสัมพันธ์กัน ดังนี้

$$\text{Power law model: } \tau = KY^n \quad (2-7)$$

ในกรณีที่ของเหลวมี yield stress จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\text{Herschel - Bulkley model: } \tau = \tau_0 + KY^n \quad (2-8)$$

เมื่อ K คือ CONSISTENCY INDEX มีความสัมพันธ์กับความหนืดของของเหลว และ n คือ flow behavior index เป็นค่าที่บ่งบอกลักษณะการไหลของของเหลว

เมื่อ  $n > 1 \rightarrow$  Dilatants fluid

เมื่อ  $n < 1 \rightarrow$  Pseudoplastic fluid

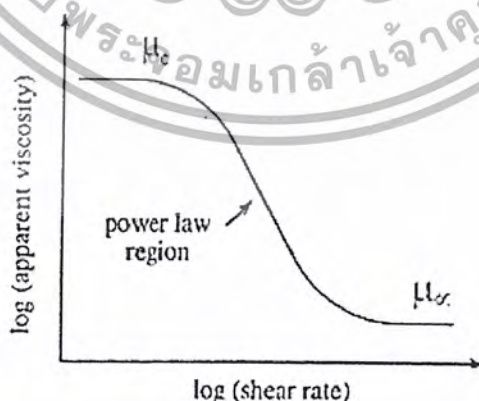
สามารถคำนวณความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity;  $\mu_a$ ) ของของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic และ Dilatant ได้ดังนี้

$$\mu_a = KY^{n-1}$$

ของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic คือยิ่งเกิดการกว่นของเหลวมาก ๆ ความหนืดของของเหลวจะลดลง โดยจะแสดงลักษณะดังรูปที่ 2-21 คือ

- ที่อัตราเฉือนต่ำ จะแสดงลักษณะการไหลแบบ Newtonian โดยที่ค่าความหนืดคงที่ที่ Zero-shear viscosity;  $\mu_0$

- ที่อัตราเฉือนสูง จะแสดงลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic นี้จะเกิดที่ Characteristic time หรือ time constant ( $t_c$ ) โดย  $t_c = \frac{1}{\gamma}$  เมื่ออัตราเฉือนมีค่าสูงมาก ของเหลวจะมีความหนืดที่คงที่ที่  $\mu_\infty$  เรียกว่า infinite - shear viscosity



รูปที่ 2 - 22 แสดงลักษณะการไหลของของไหล Pseudoplastic แบบ power law

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.3.2.2 Time-dependent non-Newtonian fluids

ลักษณะการไหลที่ขึ้นกับเวลาในการให้อัตราเฉือนด้วยสามารถแบ่งของเหลวในกลุ่มนี้ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. Thixotropic fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดลดลงเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาเพิ่มขึ้น
2. Rheopectic fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาเพิ่ม

ขึ้น



รูปที่ 2 - 23 แสดงลักษณะการไหลแบบ Time – dependent non - Newtonian

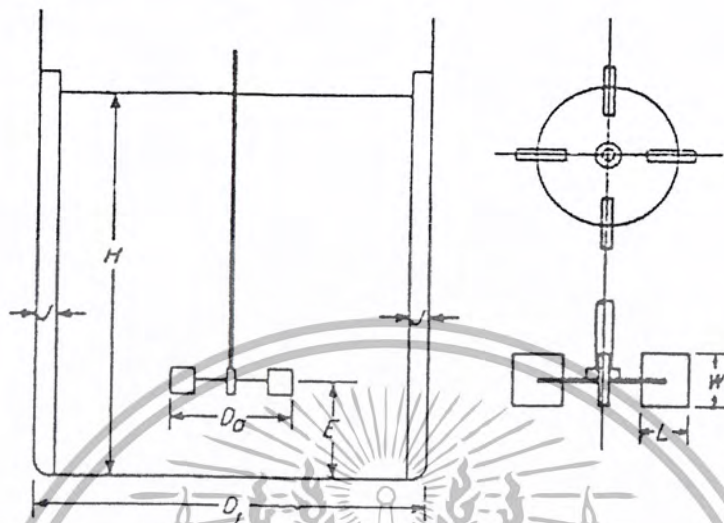
## 2.6 การออกแบบกังหันมาตรฐาน (standard turbine)

ใบกวนแบบกังหันมาตรฐานใช้กันทั่วไปในการกวนและผสมของไหล อัตราส่วนปีกต้อตราส่วนต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2 - 24

ปกติใช้ใบกวนจำนวน 6 - 8 ใบ แต่สามารถเปลี่ยนแปลงระหว่าง 4 - 16 ใบ โดยทั่วไประบบกวนใช้แผ่นกัน 4 ชั้น

$$\frac{D_s}{D_t} = 1 \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_s} = 1 \quad \frac{W}{D_s} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_s} = \frac{1}{4}$$



รูปที่ 2-24 ถึงกวนแบบกึ่งหั่นมาตรฐาน

## 2.7 กำลังงานที่ต้องการสำหรับการผสมของไหลนิวตัน (Power consumption in Newtonian fluids)

การหาค่ากำลังที่ต้องการสำหรับขับเคลื่อนใบกวนตามต้องการ จำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์ของกำลังที่ต้องการ (Empirical correlation) กับตัวแปรอื่นๆของระบบ ตัวแปรซึ่งมีอิทธิพลต่อการต้องการกำลังงานได้แก่

$$P = f(\mu, \rho, N, D_s, g)$$

เมื่อ  $P$  คือ กำลังที่ต้องการสำหรับกวน

$\mu$  คือ ความหนืดของของไหล

$\rho$  คือ ความหนาแน่นของของไหล

$N$  คือ ความเร็วรอบของใบกวน

$D_s$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

$g$  คือ แรงโน้มถ่วงของโลก ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

โดยการวิเคราะห์มิติ ได้กลุ่มไร้มิติต่อไปนี้

$$N_p = f(N_{Re}, N_{Pr})$$

เมื่อ  $N_p$  คือ เลขกำลัง (Power number) =  $\frac{P_r}{\rho N^3 D_s^5}$  (2-9)

$N_{Re}$  คือ เลขเรย์โนลด์ (Reynold number) =  $\frac{\rho N D_s^2}{\mu}$  (2-10)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{Pr} \quad \text{คือ เลขฟรอนด์ ( Froude number )} = \frac{N^2 D_a}{g} \quad (2-11)$$

$$\text{จะได้} \quad \frac{P_r}{\rho N^3 D_a^5} = c \left( \frac{\rho N D_a}{\mu} \right)^j \left( \frac{N^2 D_a}{g} \right)^k \quad (2-12)$$

เมื่อ  $c, j, k$  คือ ค่าคงที่

ถ้าต้องการผสมของเหลวซึ่งผสมกันไม่ได้สองชนิดเข้าด้วยกัน แรงตึงผิวระหว่างผิวทั้งสองจะเป็นตัวแปรที่เพิ่มขึ้นมาและได้กลุ่มไร้มิติเวเบอร์ (weber group) มีค่า  $\rho N D_a$  เมื่อ คือแรงตึงผิวสำหรับรูปร่างของใบกวนและถังกวนที่ต่างกันค่ากลุ่มไร้มิติอาจจะต้องเพิ่มเข้ามาในสมการ(2-12) รูป 2-25 แสดงกราฟจากการ plot สมการ(2-12) สำหรับชนิดต่างๆ ของใบกวน ลักษณะของbaffle และรูปร่างลักษณะของถังกวนรายละเอียดความแตกต่างของแต่ละเส้น แสดงไว้ในตารางด้านบนของรูปที่ 2 - 25

ในระบบการกวนซึ่งติดตั้ง baffle หรือติดตั้งแกนเพลลาออกจากแนวศูนย์กลางถังกวนเพื่อจำกัดการหมุนวน อิทธิพลของแรงโน้มถ่วงสามารถตัดทิ้งได้และเลข Froude สามารถตัดทิ้งได้ จากรูปเห็นได้ว่า อิทธิพลของเลข Froude ปรากฏเมื่อการกวนเกิดการหมุนวนและเมื่อเลขเรย์โนลด์มากกว่า 300 สำหรับถังซึ่งติดตั้ง baffle หรือกรณีที่ติดตั้งแกนเพลลาออกจากแนวศูนย์กลาง หรือด้านข้างของผนังกวน หรือเรย์โนลด์น้อยกว่า 2000 ซึ่งไม่เกิดการหมุนวนนั้นเลข Froude ไม่เป็นตัวแปร

กรณีต้องการขยายสภาวะซึ่งไม่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 2 - 25 สามารถทำได้ด้วยหาค่าตัวประกอบความถูกต้อง (correction factor) จากสมการของ Brown et.al.(1950)

$$\text{Correction factor} = \frac{(D_i / D_a)(Z_i / D_a)}{(d_r / d_a)(z_i / d_a)} = \text{ที่ต้องการ / กราฟ} \quad (2-13)$$

เมื่อ  $D_i$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

$D_a$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

$Z_i$  คือ ความลึกของของไหล

โดยการคูณค่าองค์ประกอบแก้ไขกับค่าทำนายการใช้กำลังงาน ซึ่งหาได้จากรูปที่ 2 - 25 ก็จะได้ค่าการใช้ กำลังงานที่ถูกต้องสำหรับการเปลี่ยนแปลงในการออกแบบ

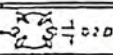
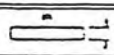








กรณีต้องการให้ได้อัตราการกระจายของของไหล 2 ชนิดหรือของของแข็งในของเหลวคงเดิม Wilkinson (1960) แนะนำว่าระบบซึ่งรูปร่างคล้ายกัน สัดส่วนเท่ากันและวัสดุที่ใช้สร้างเหมือนกัน กำลังที่ให้ต่อหน่วยปริมาตรต้องให้เหมือนกันทั้งแบบจำลองและเครื่องขยายต้นแบบ เพื่อให้ได้สัดส่วนการกระจายเท่ากัน โดย

$$\frac{Pr_L}{Pr_m} = \left( \frac{D_L}{D_m} \right)^a \quad (2-14)$$

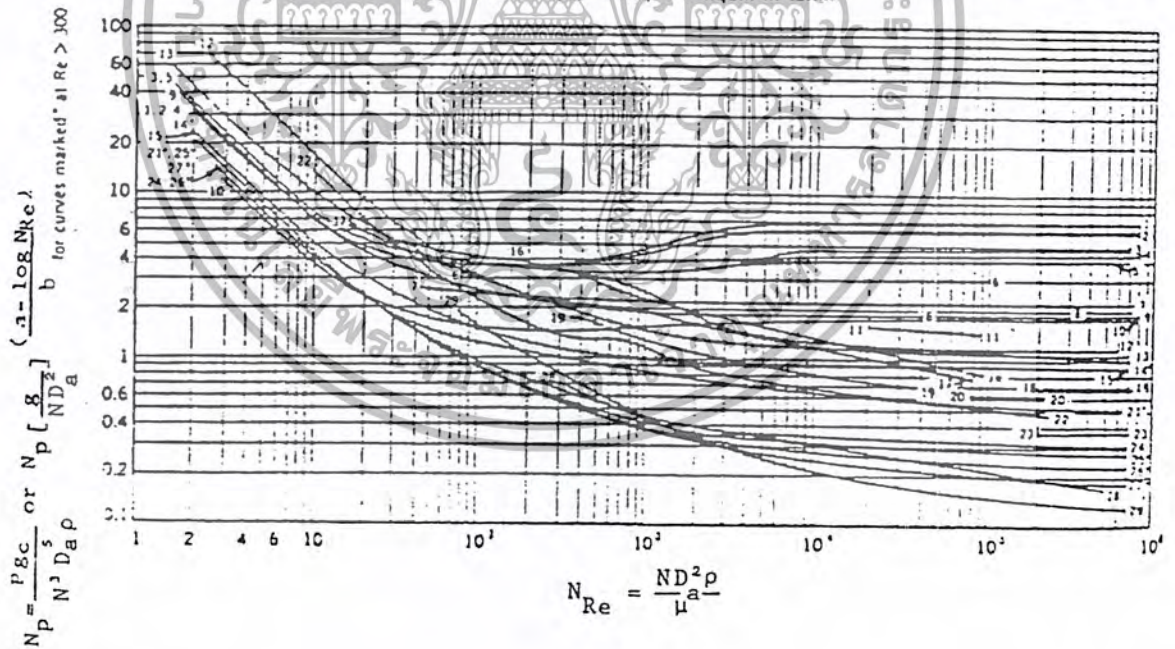
เมื่อ M คือ แบบจำลอง

L คือ เครื่องขยายต้นแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type of Impeller	$\frac{D_t}{D_a}$	$\frac{H}{D_a}$	$\frac{E}{D_a}$	Baffles No. w/D <sub>a</sub>	No.	Ref.	Type of Impeller	$\frac{D_t}{D_a}$	$\frac{H}{D_a}$	$\frac{E}{D_a}$	Baffles inc. w/D <sub>a</sub>	No.	Ref.			
Turbine with 6 flat blades 0.25D →  0.2D	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.17	1	7	Paddle with 2 blades  0.25D	4.25	4.3	0.29	3 0.11	8	3			
Same as No. 1.	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	2	7	Paddle with 4 blades See No. 8.	3	3	0.5	0	16	2			
Same as No. 1	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.04	4	7	Paddle with 2 blades See No. 8	3	3.2	0.33	0	20	4			
Same as No. 1 a = 1, b = 40	3	2.7-10.75-3.9	1.3	0	14	7	Paddle with 2 blades See No. 8	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	10	7			
Turbine with 6 curved blades Blade sizes same as No. 1 	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	3	7	Paddle with 2 blades See No. 8 Blade width = 0.13D	11	0.5	0.19	0	29	10			
Turbine with 6 arrowhead blades Blade sizes same as No. 1 	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	5	7	Paddle with 2 blades See No. 8 Blade width = 0.17D	11	0.4	0.10	0	29	10			
Radial turbine with deflector ring 				0		7	9	Marine propeller with 3 blades Pitch = 2D. 	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	15	7		
Shrouded turbine with 6 blades. 20-blade deflector ring	2.4	0.74	0.9	0	11	6	Same as No. 15 a = 1.7, b = 18	33	12.7-10.75-13.9	1.3	0	21	7			
Similar to No. 11, but not identical	3	2.7-10.75-3.9	1.3	0	12	7	Same as No. 15, but pitch = 1.33D.	15			3 0.06	18	5			
Same as No. 12, but no deflector ring	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	13	7	Same as No. 15, but pitch = 1.05D.	9.5			3 0.06	23	5			
Axial turbine with 8 blades at 45° angle See No. 17 	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	9	7	Same as No. 15, but pitch = 1.05D. a = 2.3, b = 18	2.7	2.7-10.75-3.9	1.3	0	27	7			
Axial turbine with 4 blades at 60° angle 	3	1	0.50	0	17	2	Same as No. 15, but pitch = 1.04D. a = 0, b = 18	4.5	2.7-10.75-3.9	1.3	0	25	7			
Axial turbine with 4 blades at 45° angle See No. 17 	4.2	1.5	0.82	0	19	2	Same as No. 15, but pitch = D.	3	2.7-10.75-3.9	1.3	4 0.10	24	7			
Same as No. 19	2.4	1.4	1.04	0	22	2	Same as No. 15, but pitch = D. a = 2, b = 18	3	2.7-10.75-3.9	1.3	0	26	7			
Disc with 16 vanes 	0.1D	1	0.35D	2.5	2.5	0.75	4 0.25	6	1	Same as No. 15, but pitch = D	3.8	1.5	10	0	28	8

$D_a$  = diameter of impeller,  $D_t$  = diameter of tank,  $N$  = revolutions per second,  $w$  = width of baffle,  $E$  = elevation of impeller above tank bottom,  $H$  = height of liquid in tank



รูปที่ 2-25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์และเลขกำลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 กำลังที่ต้องการสำหรับการผสมของไหลที่ไม่ใช่นิวตัน (Power consumption in non-Newtonian fluids)

สำหรับของเหลวซึ่งไม่ใช่ของเหลวนิวตัน ค่าตัวเลขยกกำลังยังคงใช้เช่นเดียวกับของไหลนิวตัน แต่เลขเรย์โนลด์นั้นไม่แน่นอน เนื่องจากค่าความหนืดของของไหลซึ่งไม่ใช่ของไหลนิวตัน มีค่าไม่คงที่เป็นค่าความหนืดปรากฏและเปลี่ยนไปตามความแตกต่างของชั้นความเร็ว (velocity gradient) ซึ่งมีค่าเปลี่ยนไปจากจุดถึงจุดหนึ่งในถังกวน อย่างไรก็ตามเลขเรย์โนลด์สามารถหาได้จาก การแทนค่าความหนืดด้วยความหนืดปรากฏ ซึ่งคำนวณจากค่าความแตกต่างของชั้นความเร็วเฉลี่ย

$$N_{Rc} = \frac{\rho N D_a^2}{\mu} \tag{2-15}$$

$N_{Rc}$  คือ เลขเรย์โนลด์สำหรับของไหลไม่ใช่นิวตัน

$D_a$  คือ เส้นผ่าศูนย์กลางของใบกวน

หลักวิธีของ Metzner และ Otto's (1957) คือ หาช่วงอัตราการหมุนในเครื่องผสมและความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการหมุนกับความเร็วรอบของถังกวน เขาใช้ค่าความหนืดปรากฏ (apparent viscosity) โดยให้ค่าจำกัดความเป็นความหนืดของของไหลนิวตันซึ่งต้องการกำลังที่ใช้เท่ากันเมื่อเครื่องผสมมีขนาดและความเร็วรอบเท่ากันขณะเคลื่อนที่แบบราบเรียบ จากนั้นหาความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดปรากฏกับค่าตัวแปรอื่นๆ ในระบบ โดยการสมมุติว่าการเคลื่อนที่ของของไหลในช่วงของใบกวนสามารถระบุ โดยอัตราเฉลี่ยซึ่งเป็นอัตราส่วนกับความเร็วรอบของใบกวน

$$\left(\frac{du}{dy}\right)_{av} = KN \tag{2-16}$$

เมื่อ  $K$  คือ ค่าคงที่จากการทดลอง = 11

$N$  คือ ความเร็วรอบของใบกวน, รอบต่อวินาที

จาก  $\mu_a = \left(\frac{du}{dy}\right)_{av}^{-n}$  (2-17)

แทนค่าสมการยกกำลังสำหรับของไหล pseudoplastic และ dilatant ลงในสมการ(9)

$$\mu_a = m \left(\frac{du}{dy}\right)^{n-1} \tag{2-18}$$

แทนค่าสมการ(2-16) ลงในสมการ (2-18) ได้

$$\mu_a = m (11N)^{n-1} \tag{2-19}$$

ของไหลสมการยกกำลัง ซึ่งรู้จักว่า rheological parameters  $m, n$  และ ความเร็วรอบในการหมุนของใบกวน,  $N$  ค่าความหนืดปรากฏสามารถคำนวณได้จากสมการ(2-19) ซึ่งค่าความหนืดปรากฏนี้ใช้คำนวณเลขเรย์โนลด์เพื่อใช้กับรูปที่ 2 - 25 เพื่อหาเลขยกกำลัง (power number) และหากำลังที่ต้องการต่อไป

รูปที่ 2 - 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังเรย์โนลด์สำหรับใบกวนแบบ turbine 6 ใบ (six-bladed turbine) ในของไหล pseudoplastic และนิวตันเหมือนกัน ในช่วงเลขเรย์โนลด์ต่ำกว่า 10 และสูงกว่า 100 แต่ในระหว่างช่วงของเลขเรย์โนลด์ดังกล่าว ของเหลว pseudoplastic ต้องการกำลังน้อยกว่าของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิวตัน ช่วงการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบเป็นไหลอลวน สำหรับของไหล pseudoplastic จะยึดซ้ำออกไปเป็นเลขเรย์โนลด์ 40 แทนที่จะเป็น 10 ดังเช่นของไหลนิวตัน

สำหรับของไหล dilatant Metzner แนะนำให้ใช้เส้นความสัมพันธ์ของของไหลนิวตัน

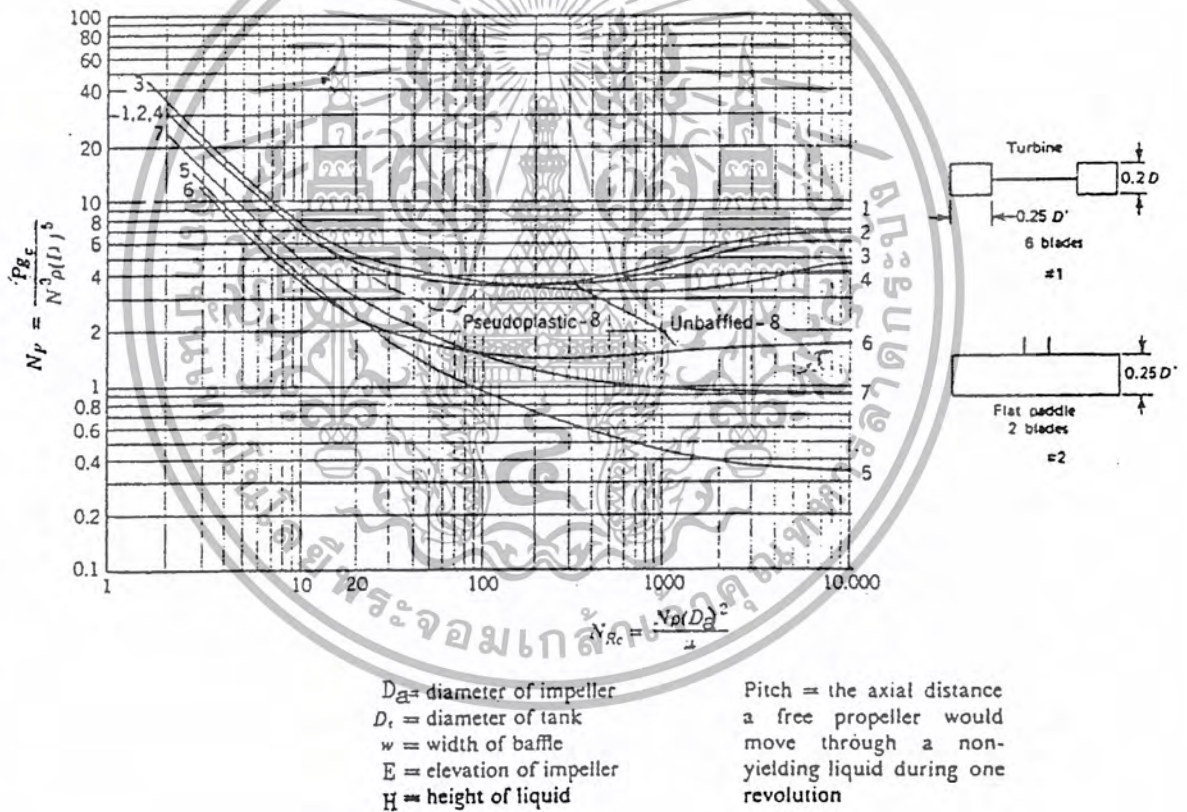
Wilkinson กล่าวว่า เส้นสำหรับของไหลนิวตันและของไหลซึ่งไม่ใช่ของไหลนิวตันซึ่งใกล้เคียงกัน น่าจะใช้ความสัมพันธ์สำหรับของไหลนิวตันกับเครื่องผสมชนิดอื่นๆ เพื่อประมาณค่ากำลังที่ต้องการสำหรับการกวนซึ่งค่าที่ได้นี้น่าจะเป็นค่าที่ปลอดภัยและประมาณค่าไว้สูงกว่าความเป็นจริง เมื่อเส้นของของไหลนิวตันจะมีค่ามากกว่าของไหล pseudoplastic ในช่วงที่เส้นโค้งแยกออกจากกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type of impeller	$\frac{Dt}{D_a}$	$\frac{H}{D_a}$	$\frac{E}{D_a}$	Baffles		No.
				No.	$w/D_t$	
See # 1	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.17	1
See # 1	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	2
See # 1	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.04	4
Same as # 1, curved 2 blades	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	3
Marine propeller 3 blades, pitch = $D'$	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	5
See # 2	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	6
Same as 5 but pitch = $2D'$	3	2.7-3.9	0.75-1.3	4	0.10	7
See # 1*	3	2.7-3.9	0.75-1.3	0	0.04	8.

\*In non-Newtonian fluids (6). In unbaffled tanks (9).



รูปที่ 2 - 26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขกำลังเรย์โนลด์สำหรับใบกวนแบบ turbine 6 ใบ

2.9 แรงกระทำบนวัตถุที่จมในการไหล

วัตถุที่จมอยู่ในการไหลจะมี แรงที่กระทำโดยของไหล 2 แรงด้วยกันคือ แรงเฉือนและแรงดัน ผล

ลัพธ์ของแรงทั้งสองจะแบ่งเป็นแรงย่อยได้ 2 แรงคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แรงในแนวขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่เรียกว่า แรงจุด,  $F_D$
2. แรงในแนวตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่เรียกว่า แรงยก,  $F_L$

2.9.1 การไหลผ่านแผ่นระนาบที่วางขนานกับการไหล

จะเกิดแรงจุดเนื่องจากแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น หากการไหลเป็นแบบราบเรียบ

$$C_F = \frac{T_w}{\frac{1}{2} \rho U^2} \tag{2-20}$$

$$= \frac{0.664}{(\text{Re}_x)^{1/2}} \tag{2-21}$$

สัมประสิทธิ์แรงจุดของการไหลด้วยความเร็ว  $v$  บนแผ่นระนาบยาว  $L$  กว้าง  $b$  คือ

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \tag{2-22}$$

$$= \frac{\int \tau_w dA}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \tag{2-23}$$

$$= 1.328 \left[ \frac{u}{VL} \right]^{0.5} \tag{2-24}$$

$$C_D = \frac{1.328}{\sqrt{\text{Re}_L}} \tag{2-25}$$

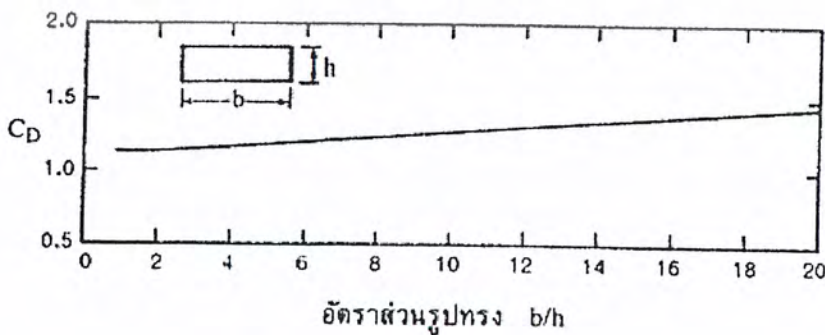
2.9.2 การไหลผ่านแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากกับการไหล

จะเกิดแรงจุดเนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้น ดังนี้

$$F_D = \int^A p dA \tag{2-26}$$

การไหลผ่านแผ่นระนาบนี้จะเกิดการไหลยกตัว (separation) ขึ้น โดยเริ่มจากบริเวณขอบของระนาบ และถึงแม้ความดันทางด้านหลังจะมีค่าคงที่ก็ไม่อาจหาได้โดยการคำนวณ จึงต้องอาศัยการทดลองเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงจุด

สำหรับระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า ค่า  $C_D$  จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนรูปทรง  $\frac{b}{h}$  ดังกราฟในรูปที่ 2 - 27

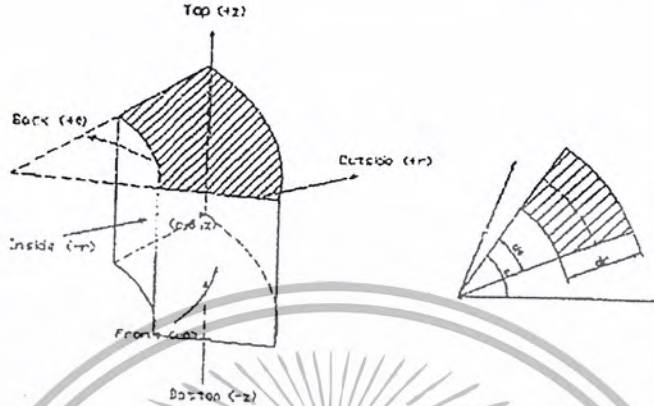


รูปที่ 2 - 27 ค่า  $C_D$  ของระนาบสี่เหลี่ยมผืนผ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง

2.10.1 สมการอนุรักษ์มวล สำหรับพิกัดทรงกระบอก (Mass Conservation in Cylindrical Coordinate System)



รูปที่ 2-28 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการการอนุรักษ์มวล

พิจารณา Mass flux ผ่านพื้นผิวด้านของ Control Surface  $\int_{CS} \rho V dA$  คุณสมบัติของแต่ละด้านของ Control Surface ถูกอธิบายด้วย Taylor Series Expansion รอบจุด 0 ดังชุดสมการ (2-30 ถึง 2-35)

$$\text{ได้ } \int_{CS} \rho V dA = \left[ \rho V_r + \frac{r \partial \rho V_r}{\partial r} + \frac{\partial \rho V_\theta}{\partial \theta} + \frac{r \partial \rho V_z}{\partial z} \right] dr d\theta dz \quad (2-27)$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของมวลใน Control Volume คือ  $\left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) dr d\theta dz$

$$\text{รวมได้ } \frac{\partial(\rho V_r)}{r \partial r} + \frac{\partial(\rho V_\theta)}{r \partial \theta} + \frac{\partial(\rho V_z)}{r \partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2-28)$$

$$\text{เขียนรูปเวกเตอร์จะได้ } \nabla \cdot \rho V + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (2-29)$$

ใน project พิจารณาในระบบ 2 มิติ r, x โดยให้ z = x,  $V_r = V_r$ ,  $V_x = U$

$$\text{ได้ } \frac{\partial r \rho V}{r \partial r} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

การพิจารณา Mass flux through Control Surface of a Cylindrical Differential Control Volume

Surface  $\int_{CS} \rho V dA$

Inside =

$$\begin{aligned} & - \left[ \rho - \left( \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) \left( \frac{dr}{2} \right) \right] \left[ V_r - \left( \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) \left( \frac{dr}{2} \right) \right] \left( r - \frac{dr}{2} \right) d\theta dz = \\ & - \rho V_r r d\theta dz + \rho V_r \frac{dr}{2} d\theta dz + \rho \left( \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) r \frac{dr}{2} d\theta dz + V_r \left( \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) r \frac{dr}{2} d\theta dz \end{aligned} \quad (2-30)$$

Outside =

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[ \rho + \left( \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) \left( \frac{dr}{2} \right) \right] \left[ V_r - \left( \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) \left( \frac{dr}{2} \right) \right] \left( r - \frac{dr}{2} \right) d\theta dz =$$

$$\rho V_r r d\theta dz + \rho V_r \frac{dr}{2} d\theta dz + \rho \left( \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) r \frac{dr}{2} d\theta dz + V_r \left( \frac{\partial \rho}{\partial r} \right) r \frac{dr}{2} d\theta dz$$
(2-31)

Front =

$$- \left[ \rho - \left( \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right) \left( \frac{d\theta}{2} \right) \right] \left[ V_\theta - \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) \left( \frac{d\theta}{2} \right) \right] dr dz =$$

$$- \rho V_\theta r dr dz + \rho \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) \frac{d\theta}{2} dr dz + V_\theta \left( \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right) \frac{d\theta}{2} dr dz$$
(2-32)

Back =

$$\left[ \rho + \left( \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right) \left( \frac{d\theta}{2} \right) \right] \left[ V_\theta - \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) \left( \frac{d\theta}{2} \right) \right] dr dz =$$

$$\rho V_\theta r dr dz + \rho \left( \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right) \frac{d\theta}{2} dr dz + V_\theta \left( \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right) \frac{d\theta}{2} dr dz$$
(2-33)

Bottom =

$$- \left[ \rho - \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \left( \frac{dz}{2} \right) \right] \left[ V_z - \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \left( \frac{dz}{2} \right) \right] r d\theta dr =$$

$$- \rho V_z r d\theta dr + \rho \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \frac{dz}{2} r d\theta dr + V_z \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \frac{dz}{2} r d\theta dr$$
(2-34)

Top =

$$\left[ \rho + \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \left( \frac{dz}{2} \right) \right] \left[ V_z + \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \left( \frac{dz}{2} \right) \right] r d\theta dr =$$

$$\rho V_z r d\theta dr + \rho \left( \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \frac{dz}{2} r d\theta dr + V_z \left( \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \frac{dz}{2} r d\theta dr$$
(2-35)

จากข้างบนจะได้

$$\int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = \left[ \rho V_r + \frac{r \partial(\rho V_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V_\theta)}{\partial \theta} + \frac{r \partial(\rho V_z)}{\partial z} \right] dr d\theta dz$$
(2-36)

### 2.10.2 สมการ โมเมนตัม (Momentum Equation)

โดยทำการประยุกต์จาก Newton's second law ซึ่งโมเมนตัมเชิงเส้นของ  $\rho$  ของระบบคือ

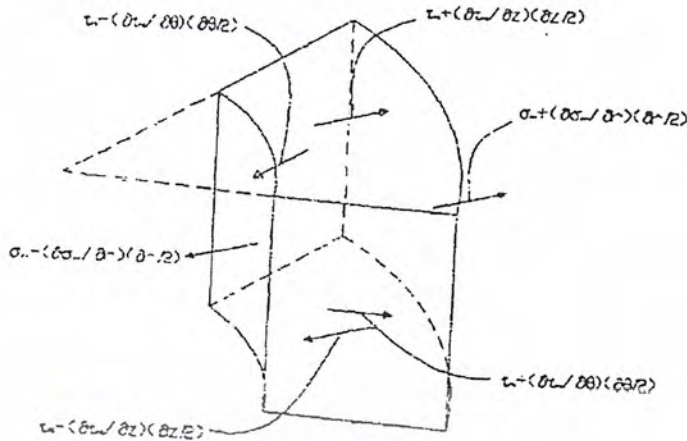
$$\rho = \int_{mass\ system} V dm \quad \left( \text{For infinite /system ; } dF = dm \frac{dV}{dt} \right)$$
(2-37)

เขียนเป็นสมการ vector ได้คือ

$$dF = dm \frac{dV}{dt} = dm \left[ u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial V}{\partial t} \right]$$
(2-38)

แรงที่กระทำบนอนุภาคของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 – 29 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการพลังงาน พิจารณาในระบบ 2 มิติ r, x

Continuity Equation

$$-\left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2-39)$$

สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลที่เข้าไปในปริมาตรควบคุม

อัตราการเพิ่มของมวลในปริมาตรควบคุม  $\frac{\partial \rho}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$

จากกฎทรงมวล  $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$

สมการนี้เราเรียกว่า Continuity Equation เขียนได้เป็น

$$\nabla(\rho V) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \quad (2-40)$$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + V \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z} \quad (2-41)$$

สำหรับสมการ Continuity Equation ในพิกัดทรงกระบอก (r, θ, z) สำหรับกรไหลแบบอัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2-42)$$

Equation of Motion หรือเรียกว่า Momentum Equation

$$F = \frac{dM}{dt} = \frac{d(mV)}{dt} = ma \quad (2-43)$$

โดยที่ F คือ แรงสุทธิที่กระทำบนอนุภาคของของไหล

ที่เวลาใดๆผลรวมของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอนุภาค แสดงดังสมการ

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial V}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial V}{\partial z} \Delta z \quad (2-44)$$

ความเร่งของอนุภาค  $a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{DV}{Dt}$  (2-45)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่แรงบนอนุภาค แบ่งได้เป็น 2 ชนิด

1. Body force ให้  $f = f'_x i + f'_y j + f'_z k$  แทน Body force พิกัด  $(x,y,z)$

2. Surface force

สำหรับแรงที่ผิวจะได้แรงที่เกิดจาก ความเค้น และ ความเค้นเฉือน

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yz} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

สำหรับแรงสุทธิที่กระทำบนอนุภาคในทิศทาง x

$$F_x = \left[ \rho f'_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right] \Delta x \Delta y \Delta z \tag{2-46}$$

ใช้ Newton's second law of motion

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho f'_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \tag{2-47}$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f'_y + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \tag{2-48}$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho f'_z + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \tag{2-49}$$

สำหรับ Newton Fluid จะใช้ Navier-Stokes equation

โดยที่  $\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด และ  $p$  คือ ความดัน

$$\sigma_{xx} = -p + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot V \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\sigma_{yy} = -p + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot V \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\sigma_{zz} = -p + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu \nabla \cdot V \quad \tau_{zx} = \tau_{xz} = \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \rho f'_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right]$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \rho f'_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right]$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \rho f'_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( 2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \cdot V \right) \right]$$

สำหรับพิกัดทรงกระบอก

R component

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + w \frac{\partial v_r}{\partial z} =$$

$$f_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right\} \tag{2-50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เท่านั้นเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 'ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น' อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\theta$  component

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} - \frac{v_r v_\theta}{r} + w \frac{\partial v_\theta}{\partial z} = f_\theta - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + v \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \quad (2-51)$$

Z component

$$\frac{\partial w}{\partial t} + v_r \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + w \frac{\partial w}{\partial z} = f_z - \frac{1}{\rho r} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_\theta) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} \right\} \quad (2-52)$$

จัดรูปแบบใหม่ 2 มิติ ได้

ทิศทาง X

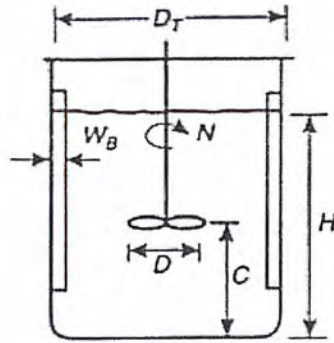
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u u)}{\partial x} + \frac{\partial(r \rho u v)}{r \partial r} = \frac{\partial \left[ 2\mu \left( \frac{u}{x} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[ r \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]}{r \partial r} - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g \beta \Delta t \quad (2-53)$$

ทิศทาง R

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(r \rho v v)}{r \partial r} = \frac{\partial \left[ 2r \mu \left( \frac{\partial v}{\partial r} \right) \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]}{r \partial r} - \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{2\mu v}{r^2} \quad (2-54)$$

## 2.11 รูปร่างของก้นถังผสมที่ดี

โดยทั่วไปถังผสมที่ใช้กันมาก จะมีรูปทรงของก้นถังแบบก้นเรียบและมีคิริบอยู่ภายใน (flat-bottom baffled tank) ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2-30 คุณสมบัติการใช้พลังงานในการกวนของถังแบบนี้จะสูงมากกว่าตัวถังแบบอื่นๆ หลักการทำงานของถัง เมื่อสารที่ต้องการผสมกับของเหลวภายในถังถูกเติมลงไปแล้ว จะไหลมารวมอยู่ที่บริเวณกึ่งกลางถังแล้วถูกใบพัดตีไปรอบๆ เส้นรอบวงของถังทำให้เกิดการปั่นป่วนอย่างรุนแรง สารที่ต้องการผสมเกิดการกระจายอย่างรวดเร็ว ทำให้ระบบการผสมไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่อปริมาตรของสารที่ผสมเสร็จดีแล้ว เกือบดี และมีสารผสมแขวนลอยอยู่มากจนเกินไป



รูปที่ 2-30 ส่วนประกอบของถังมาตรฐานที่มีก้นเรียบพร้อมครีบก้นภายใน

การออกแบบถังที่ดีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้แม้ว่าจะใช้ความเร็วรอบในการกวนที่ต่ำ นอกจากจะเป็นการประหยัดพลังงานที่ใช้แล้วยังมีประโยชน์ทางด้านอื่นๆอีก คือ

1. ช่วยลดค่าใช้จ่ายเพราะใช้อุปกรณ์ในการขับและส่งถ่ายกำลังขนาดเล็กลง เนื่องจากต้องการพลังงานที่ใช้ทำงานน้อยกว่านั่นเอง
2. เกิดการสึกหรอของใบพัดน้อยกว่า ซึ่งเป็นไปตามความเปลี่ยนแปลงของความเร็วรอบที่ปลายใบพัดถึงของผสม
3. ความเสียหายที่เกิดจากผลึกรวมตัวกันมีน้อยลง เนื่องจากเกิดการชนกันเองเมื่อใช้ความเร็วรอบของใบพัดที่ต่ำกว่า

#### 2.11.1 วิเคราะห์การรวมกัน

องค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งที่จะช่วยให้รูปร่างของถังและการควบคุมการผสมของสารภายในถังเป็นไปได้ด้วยดีก็คือเรื่องของใบพัด ใบพัดที่ใช้กันอยู่มีอยู่หลายแบบ แต่ที่นิยมคือแบบที่มีลักษณะเหมือนกับใบจักรของเรือหางยาว ซึ่งยังแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือแบบที่ทำให้เกิดการหมุนวนภายในแนวรัศมี และแบบที่ทำให้เกิดการหมุนตามแนวแกนเพลลาของเครื่องกวน นอกจากนี้ยังแบ่งเป็นประเภทได้ตามอัตราส่วนของพลังงานที่ใช้ต่ออัตราการไหล ( $N_p / N_{Qd}$ ) ซึ่งเป็นไปตามสมการดังนี้

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (2-55)$$

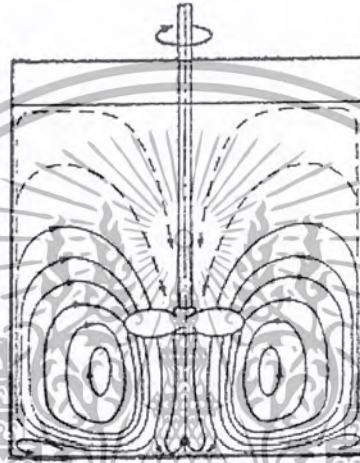
$$N_{Qd} = \frac{Q_d}{ND^3} \quad (2-56)$$

- เมื่อ
- $N_{Qd}$  คือ ตัวเลขอัตราการไหลออก(1/รอบ)
  - $N$  คือ ความเร็วรอบของใบพัด(รอบ/วินาที)
  - $P$  คือ พลังงานที่จ่ายให้กับเพลลาของเครื่องกวน(วัตต์)
  - $Q_d$  คือ อัตราการไหลออกจากใบพัด(ลูกบาศก์เมตร/วินาที)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบพัดที่มีอัตราส่วนของ ( $N_p / N_{Qd}$ ) สูงจะเป็นใบพัดแบบใช้แรงตัดเฉือน (shear type) ส่วนใบพัดที่มีอัตราส่วนต่ำจะเป็นแบบให้อัตราการไหลได้ตามต้องการ ใบพัดที่ทำให้เกิดการไหลวนตามแนวแกนเพล่าจะมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบแนวรัศมี

เมื่อมาพิจารณาถึงที่นิยมใช้กันมากคือถังผสมที่มีก้นถังเรียบใช้ใบพัดแบบที่ทำให้เกิดการไหลวนตามแนวแกนเพล่า รูปแบบการกวนเป็นไปตามรูปที่ 2 – 31 โดยแบ่งวงจรรกวนออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ คือ ส่วนแรกจะไหลวนอยู่ใต้ใบพัด อีกส่วนหนึ่งจะไหลวนอยู่ก้นถังไปยังผนังของก้นถังแล้วกลับมาที่ใบพัดอีกที่หนึ่ง

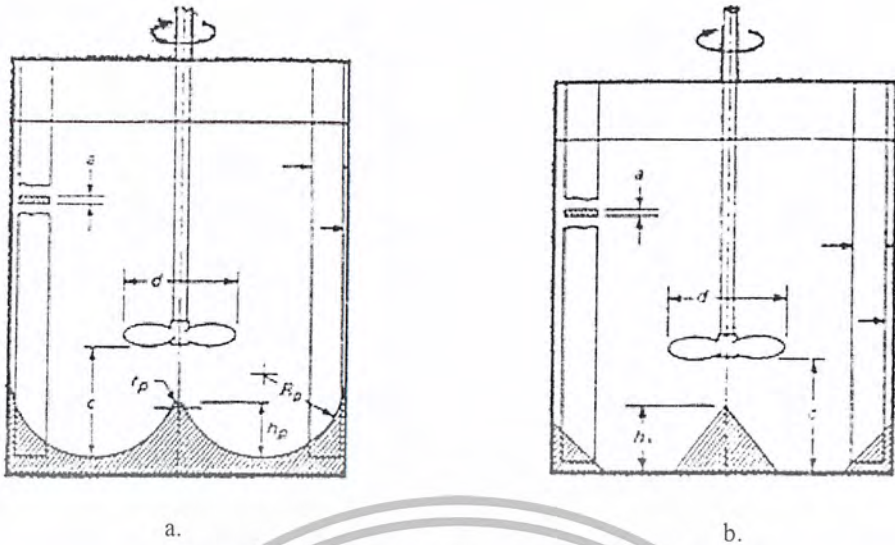


รูปที่ 2 – 31 รูปการไหลในถังแบบก้นเรียบมีแผ่นกั้น

เนื่องจากความเร็วของของไหลส่วนใต้ใบพัดจะช้ากว่าความเร็วของของไหลส่วนอื่นๆ จึงทำให้สารที่ต้องการผสมที่มีขนาดเล็ก ผสมได้ช้ากว่าส่วนอื่นๆ ของถังนอกเสียจากว่าจะมีการเพิ่มความเร็วของของไหลในส่วนนี้เป็นพิเศษจึงจะทำให้เกิดการผสมได้เร็วขึ้น

การแก้ปัญหาเพื่อทำให้ประสิทธิภาพในการผสมดีขึ้นก็คือเปลี่ยนทิศทางการไหลของของไหลให้เกิดขึ้นแบบทันทีทันใด โดยใช้ถังที่มีก้นถังแบบรูปครึ่งวงกลม 2 วง หรือรูปร่างคล้ายตัว w (fully profiled) ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2 – 32a อย่างไรก็ตามการออกแบบถังแบบนี้ค่อนข้างจะง่ายแต่การทำค่อนข้างจะยาก ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาคำทำถังจึงขอแนะนำถังอีกแบบหนึ่งที่ใช้การทำที่ง่ายกว่าคือถังที่มีก้นถังแบบรูปกรวยตัด (cone and fillet) ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2 – 32b นอกจากนี้จะออกแบบได้ง่ายแล้วค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่แพง การดัดแปลงจากก้นเรียบที่มีอยู่แล้วให้เป็นแบบกรวยตัดนี้ก็ทำได้ง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2-32 ส่วนประกอบต่างๆของถังผสม

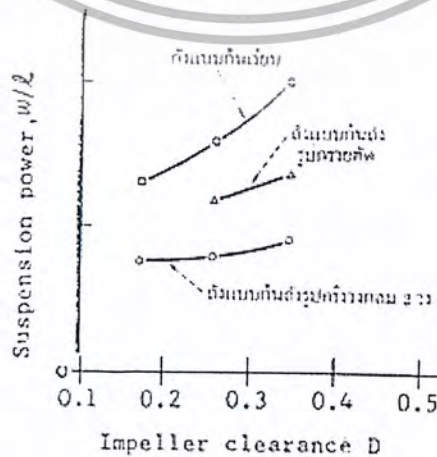
a. แบบก้นรูปครึ่งวงกลม

b. แบบก้นรูปกรวยตัด

2.11.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผสม

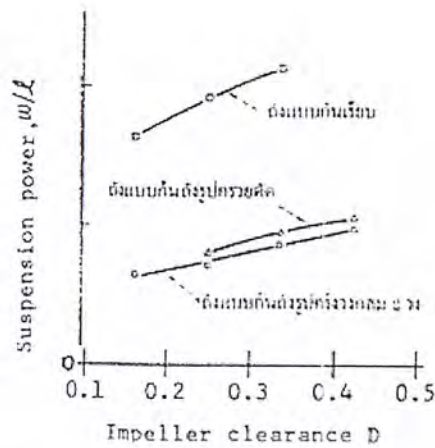
ข้อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการผสมระหว่างถังแบบก้นเรียบ ถึงแบบก้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง และถังแบบก้นรูปกรวยตัดที่มีขนาด 0.5 เมตร โดยถังทั้งหมดใช้ใบพัดแบบใบจักรที่มีลักษณะแบน 3 ครีบ ในการกวนและใช้สารผสมตัวอย่างเป็นทรายซิลิกา (silica-sand) ที่มีขนาด 0.116 และ 0.290 มิลลิเมตร จะเกิดความสามารถในการรวมตัว (concentrations) เป็น 6.1%, 12.2% และ 24.4% โดยปริมาตรตามลำดับ จะเห็นว่าความสามารถในการรวมตัวจะใกล้เคียงกันนอกจากค่า 6.1% เท่านั้นที่เป็นของถังแบบก้นเรียบที่มี ความสามารถในการรวมตัวที่ต่ำที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการผสมกับ รูปร่างของถังได้อย่างชัดเจน

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานที่ต้องใช้ต่อการผสมที่สมบูรณ์ 1 หน่วยปริมาตรกับช่วงห่างของ ใบพัดกับก้นถังของถังทั้ง 3 แบบ ได้แสดงเอาไว้ในรูปที่ 2-33 และ 2-34



รูปที่ 2-33 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้กับระยะห่างของใบพัด (ของทรายละเอียด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 - 34 แสดงความสัมพันธ์ของพลังงานที่ใช้กับระยะห่างของใบพัด (ของทรายหยาบ)

จะเห็นได้ว่าเมื่อให้ระยะห่างของใบพัดกับก้นถังน้อย ประสิทธิภาพในการผสมก็จะสูง ดังนั้น การวางตำแหน่งของใบพัดจะต้องทำให้ถูกต้อง โดยพิจารณาจากค่าระยะห่างต่ำสุดที่ยอมให้ได้เป็นดังนี้ ดั่งแบบรูปครึ่งวงกลมเป็น  $0.167D$  ดั่งก้นรูปกรวยตัดเป็น  $0.25D$  แต่ถ้าหากใช้กับการผสมสารที่มีขนาดเล็กมากควรจะมีระยะห่างเป็น  $0.333D$  อย่างไรก็ตามระยะห่างเหล่านี้ยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบอื่นๆ อีก เช่น ความเร็วรอบและชนิดของใบพัดที่ใช้ในการกวน

จากรูปที่ 2 - 33 เป็นการผสมทรายละเอียดจะเห็นว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานในการผสมที่ดีที่สุดคือดั่งแบบก้นถึงรูปครึ่งวงกลม 2 วง และที่แย่ที่สุดคือดั่งแบบก้นเรียบที่มีการใช้พลังงานอย่างสิ้นเปลืองมาก ช่วงห่างระหว่างก้นถึงกับใบพัดที่จะทำให้เกิดการผสมกันอย่างสมบูรณ์ของดั่งทั้งแบบก้นถึงรูปครึ่งวงกลม 2 วงและก้นถึงรูปกรวยตัดควรจะเป็นที่จุด  $0.333D$  ( $0.333$  ของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง) เมื่อเปรียบเทียบความต้องการพลังงานโดยให้พลังงานที่ต้องการใช้กับดั่งแบบก้นเรียบเป็น 100% แล้ว ดั่งแบบก้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง ต้องการพลังงานเพียง 45% และดั่งแบบก้นถึงรูปกรวยตัดต้องการพลังงาน 67%

ส่วนในรูปที่ 2 - 34 เป็นการผสมทรายที่มีความหยาบกว่าทรายในรูปที่ 2 - 33 แสดงการเปรียบเทียบความต้องการพลังงานในการผสม จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพภายในการใช้พลังงานในการผสมจะใกล้เคียงกันระหว่างดั่งแบบก้นถึงรูปครึ่งวงกลม 2 วงกับดั่งแบบก้นรูปกรวยตัด ส่วนดั่งแบบก้นเรียบก็ยังไม่เปลี่ยนแปลงยังต้องการพลังงานในการผสมสูง ตัวอย่างเช่น เมื่อวางตำแหน่งของใบพัดให้ห่างจากก้นถึงที่จุด  $0.333D$  เมื่อเปรียบเทียบกันจะได้ค่าความต้องการพลังงาน เมื่อให้พลังงานที่ต้องการใช้กับดั่งแบบก้นเรียบเป็น 100% ดั่งแบบก้นรูปครึ่งวงกลม 2 วงต้องการพลังงาน 41% และดั่งแบบก้นถึงรูปกรวยตัดต้องการพลังงานเพียง 43%

จากตัวอย่างที่กล่าวมานี้ จะเห็นได้ว่าสมรรถนะของดั่งแบบก้นรูปครึ่งวงกลม 2 วงกับดั่งที่มีก้นแบบกรวยตัดมีประสิทธิภาพดีกว่าดั่งแบบก้นเรียบ ยิ่งใช้กับทรายหยาบจะทำให้การผสมยิ่งยากกว่าทรายละเอียด และนี่ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานเมื่อต้องการผสมทรายละเอียดทำ

ได้อย่างดี เอกสารนี้เปิดเผยต่อสาธารณชนที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแบบก้นรูปกรวยตัดเป็นดังที่พิเศษกว่าถึงแบบอื่นๆเนื่องจากคุณสมบัติของกรวยที่ก้นถึงก่อให้เกิดมีรูปทรงอื่นๆอีกคือทรงกลมแบบคล้ายจาน (dish) และรูปกรวยจึงช่วยทำให้ประสิทธิภาพของการไหลวนของของเหลวที่จุดกึ่งกลางของกรวยที่ก้นถึงมีมุม 45 องศาและ 135 องศาอยู่ภายในถึงเกิดการไหลด้วยความเร็วสูง เมื่อใบพัดหมุนการสูญเสียพลังงานก็น้อยกว่าด้วย

ถึงในรูปที่ 2 - 35 เป็นถึงที่พัฒนาจากถึงแบบก้นรูปกรวยตัด ก้นถึงแบบนี้จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการไหลวนของของเหลวสูงขึ้นและวงจรการหมุนเป็นไปได้อย่างราบเรียบกว่าถึงแบบก้นรูปครึ่งวงกลม 2 วง อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายในการสร้างถึงแบบผสมนี้จะสูงกว่าถึงแบบก้นถึงรูปกรวยตัด แต่ก็ยังน้อยกว่าถึงแบบก้นรูปครึ่งวงกลม 2 วงและเมื่อเปรียบด้านประสิทธิภาพแล้วถึงผสมแบบนี้จะดีกว่าทั้งสองแบบ



รูปที่ 2 - 35 ถึงที่พัฒนาจากถึงแบบอื่นๆ และขนาดของใบพัดที่สัมพันธ์กัน

สำหรับในกรณีพิเศษเช่น สารผสมเป็นก้อนๆหรือผลึก (crystallizers) จะต้องมีระมัดระวังการตกตะกอนการนอนก้นของสารผสมเนื่องจากให้ความเร็วรอบของใบพัดต่ำไป ดังนั้นขนาดของกรวยที่จะทำให้เกิดการไหลที่ววนจะต้องเหมาะสมกับขนาดของใบพัดด้วย ซึ่งขนาดของใบพัดควรอยู่ในช่วง 0.333D ถึง 0.5D ดังแสดงเอาไว้ในรูปที่ 2 - 35 แล้ว

การออกแบบถึงผสมนั้นนับได้ว่าเป็นเรื่องที่ค่อนข้างจะซับซ้อน หลังจากที่ใช้งานถึงแล้ว อาจจะมีปัญหาอื่นๆซึ่งก็ต้องคอยแก้ปัญหาหรือปรับปรุงอยู่ตลอดเวลา

## 2.12 การวิเคราะห์มิติและความคล้ายคลึง

ในการวิเคราะห์ปัญหาเชิงคณิตศาสตร์เกี่ยวกับการไหล เรามักมีข้อสมมติบางประการ เช่น สมมติว่าของไหลไม่มีความหนืด ทั้งนี้เพื่อให้การวิเคราะห์ปัญหานั้นง่ายขึ้นและยังคงได้ผลที่ถูกต้องใกล้เคียงกับความเป็นจริงและยอมรับได้ การที่จะกำหนดว่าข้อสมมติสำหรับปัญหาหนึ่งๆนั้นจะมีอะไรได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บ้างจำเป็นต้องอาศัยการวิเคราะห์และศึกษาจากการทดลอง ดังนั้นการวิเคราะห์ปัญหาจึงประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

ส่วนที่ 1 เป็นการจำลองลักษณะที่แท้จริงของปัญหา เป็นสมการทางคณิตศาสตร์

ส่วนที่ 2 เป็นการทดลองเพื่อตรวจสอบผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยสมการทางคณิตศาสตร์นั้น การทดลองและตรวจสอบนั้นมักจะต้องใช้เวลาและค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ได้ข้อมูลต่างๆตามที่ต้องการจากผลการทดลองเพียงไม่กี่ครั้ง ตัวอย่างเช่น ในการหาแรงจุด (F) ที่กระทำต่อทรงกลมซึ่งเคลื่อนที่ไปในของไหล แรงจุดนี้จะขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ 4 ตัวคือ ขนาดของทรงกลม (D) ความเร็วของทรงกลม (V) ความหนืดของไหล ( $\mu$ ) และความหนาแน่นของของไหล ( $\rho$ ) ซึ่งเขียนในสมการที่ 2-55 ได้ดังนี้

$$F = f[D, V, \mu, \rho] \quad (2-57)$$

การทดลอง สามารถทำได้โดยขั้นแรก กำหนดแปรอิสระ 3 ตัวแรกมีค่าคงที่และให้ตัวแปรอิสระตัวที่ 4 มีค่าเปลี่ยนแปลงไป สมมติว่าเป็น 10 ค่า ก็จะต้องทำการทดลอง 10 การทดลองได้ความสัมพันธ์ระหว่าง F และ p ที่ D, V, P คงที่จุดหนึ่ง ขั้นต่อไปก็ทำการสลับตัวแปรอิสระที่จะให้มีค่าเปลี่ยนแปลง เช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนครบ ซึ่งจะต้องทำการทดลองทั้งหมด  $10^4$  การทดลอง ถ้าหากแต่ละการทดลองใช้เวลา  $\frac{1}{2}$  ชั่วโมงและทำการทดลองวันละ 8 ชั่วโมง จะต้องใช้เวลาดังกล่าวถึง 1 ปี 8 เดือน จำนวนการทดลองนี้จะสามารถลดลงได้โดยใช้การวิเคราะห์มิติหากกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ จะอยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ ดังสมการที่ 2-58

$$\frac{F}{\rho V^2 D^2} = f\left(\frac{\rho V D}{\mu}\right) \quad (2-58)$$

จากสมการที่ 2-58 การทดลองอาจลดลงเหลือเพียง 10 การทดลองเพื่อให้ได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $\frac{F}{\rho V^2 D^2}$  และ  $\frac{\rho V D}{\mu}$  การแปรเปลี่ยนของตัวแปรอิสระต่างๆ จะรวมออกมาในรูปค่าของกลุ่มตัวแปรไร้มิติ

ในการทดลองนั้นบางครั้งอาจไม่สามารถสร้างชิ้นงานทดลองให้มีขนาดเท่าแบบจริง (prototype) หรือไม่สามารถทดลองในสภาวะเดียวกับแบบจริงได้ จึงจำเป็นต้องสร้างแบบจำลอง (model) ซึ่งอาจมีขนาดเล็กกว่าหรือใหญ่กว่าแบบจริงก็ได้ เพื่อใช้ในการทดลอง การจำลองแบบนั้นจะต้องมีความคล้ายคลึง (similarity) กับแบบจริงให้มากที่สุด เพื่อจะได้นำเอาผลการทดลองกับแบบจำลองไปคาดคะเนกับแบบจริงได้ถูกต้อง

### 2.12.1 มิติของหน่วย (Units dimension)

ก่อนการวิเคราะห์มิติเราจำเป็นต้องทราบถึงมิติของหน่วยของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับปัญหา มิติของหน่วยสามารถจัดกลุ่มได้ตามระบบ แรง ความยาว และเวลา (FLT) หรือระบบ มวล ความยาว และเวลา (MLT) โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างแรงและมวล ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตันที่ว่า  $F = ma$  คือ  $MLT^{-2}$  ดังนั้นระบบ FLT และ MLT จึงสามารถเปลี่ยนกลับกันตามความสัมพันธ์ข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแปร (หน่วย SI)	สัญลักษณ์	กลุ่มมิติ	
		FLT	MLT
ความยาว ( $m$ )	$l$	$L$	$L$
พื้นที่ ( $m^2$ )	$A$	$L^2$	$L^2$
ปริมาตร ( $m^3$ )	$V$	$L^3$	$L^3$
เวลา ( $s$ )	$t$	$T$	$T$
ความเร็ว ( $m/s$ )	$v$	$LT^{-1}$	$LT^{-1}$
ความเร่ง ( $m/s^2$ )	$a$	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$
อัตราการไหล ( $m^3/s$ )	$Q$	$L^3T^{-1}$	$L^3T^{-1}$
มวล ( $kg$ )	$m$	$FL^{-1}T^2$	$M$
แรง ( $N$ )	$F$	$F$	$MLT^{-2}$
ความดัน ( $N/m^2, Pa$ )	$p$	$FL^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
ความโน้มถ่วง ( $m/s^2$ )	$g$	$LT^{-2}$	$LT^{-2}$
ความหนาแน่น ( $kg/m^3$ )	$\rho$	$FL^{-4}T^2$	$ML^{-3}$
น้ำหนักจำเพาะ ( $N/m^3$ )	$\gamma$	$FL^{-3}$	$ML^{-2}T^{-2}$
ความหนืดสัมบูรณ์ ( $N \cdot s/m^2, kg/m \cdot s$ )	$\mu$	$FL^{-2}T$	$ML^{-1}T^{-1}$
ความหนืดเชิงจลน์ ( $m^2/s$ )	$\nu$	$L^2T^{-1}$	$L^2T^{-1}$
ความตึงผิว ( $N/m$ )	$\sigma$	$FL^{-1}$	$MT^{-2}$
โมดูลัสยืดหยุ่นเชิงปริมาตร ( $N/m^2$ )	$K$	$FL^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
อิมพัลส์และโมเมนตัม ( $kg \cdot m/s$ )	$G$	$FT$	$MLT^{-1}$
งานและพลังงาน ( $N \cdot m$ )	$E$	$FL$	$ML^2T^{-2}$
กำลัง ( $N \cdot m/s$ )	$P$	$FLT$	$ML^2T^{-3}$

ตารางที่ 2 – 1 มิติของหน่วยของตัวแปรในกลศาสตร์ของไหล

### 2.12.2 การวิเคราะห์มิติ (Dimensional analysis)

ทฤษฎีของ Buckingham ได้กล่าวไว้ว่าในปัญหาทางกายภาพที่มีตัวแปร  $n$  ตัวจะสามารถรวมตัวแปรเข้าเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติจำนวน  $n-m$  กลุ่ม โดย  $m$  คือจำนวนน้อยสุดของมิติพื้นฐานอิสระที่ใช้กำหนดมิติของตัวแปรทั้งหมด หากเขียนในรูปสมการจะเป็นดังนี้

$$q_1 = f(q_2, q_3, \dots, q_n) \quad (2-59)$$

หรือ  $q(q_1, q_2, q_3, \dots, q_n) = 0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย  $q_1$  คือตัวแปรหลักของปัญหาซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับตัวแปรอิสระ  $q_2, q_3, \dots, q_n$  และเมื่อจัดเป็นกลุ่มตัวแปรไร้มิติหรือเทอม  $\pi$  แล้วจะได้

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{n-m}) = 0 \quad (2-60)$$

หรือ  $\pi_1 = G_1(\pi_2, \dots, \pi_{n-m})$

ขั้นตอนการหากลุ่มตัวแปรไร้มิติหรือเทอม  $\pi$  มีดังนี้

ขั้นที่ 1 กำหนดตัวแปรต่าง ๆ ในปัญหา (สมมติให้มี  $n$  ตัว) หากกำหนดตัวแปรไม่ครบ ความสัมพันธ์ระหว่างเทอม  $\pi$  จะไม่มีความแน่นอน หากกำหนดตัวแปรมากเกินไป ตัวแปรที่เกินมานั้นจะยังคงปรากฏอยู่ แต่ผลจากการทดลองจะแสดงให้เห็นว่าตัวแปรนั้นไม่มีผลเกี่ยวข้องกับปัญหา

ขั้นที่ 2 เลือกกลุ่มของมิติพื้นฐานอิสระคือ MLT หรือ FLT ที่จะใช้กำหนดมิติของตัวแปรต่าง ๆ

ขั้นที่ 3 เขียนมิติของตัวแปรต่าง ๆ ในขั้นที่ 1 ให้อยู่ในกลุ่มของมิติพื้นฐานอิสระที่เลือกใช้ในขั้นที่ 2 (สมมติให้มีจำนวนมิติพื้นฐานอิสระที่ปรากฏเท่ากับ  $r$ )

ขั้นที่ 4 เลือกตัวแปรอิสระมาจำนวน  $r$  ตัวเพื่อใช้เป็นตัวแปรซ้ำ (repeating variables) ตัวแปรซ้ำจะต้องไม่มีมิติสุทธิที่เหมือนกัน เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางมีมิติเป็น  $L$  และ โมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่มีมิติเป็น  $L^4$  เราจะใช้ตัวแปรทั้งสองนี้เป็นตัวแปรซ้ำพร้อมกันไม่ได้เนื่องจากมีมิติสุทธิคือ  $L$  เหมือนกัน โดยทั่วไปแล้วตัวแปรซ้ำที่เหมาะสมจะประกอบด้วย

1. ตัวแปรที่แสดงถึงรูปร่างของวัตถุ เช่น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง
2. ตัวแปรที่แสดงถึงลักษณะของสนามการไหล เช่น ความเร็ว
3. ตัวแปรที่แสดงถึงคุณสมบัติของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความหนืด

ขั้นที่ 5 เขียนเทอม  $\pi$  จำนวน  $n - m$  เทอม ( $m = r$ ) โดยแต่ละเทอม  $\pi$  จะประกอบด้วยตัวแปรซ้ำ ยกกำลังที่ไม่ทราบคูณกับตัวแปรอื่นหนึ่งตัว เมื่อแก้สมการของเลขยกกำลังของแต่ละเทอม  $\pi$  ก็จะได้เทอม  $\pi$  จำนวน  $n - m$  เทอม

ในบางกรณี จำนวนมิติพื้นฐานอิสระที่ปรากฏในขั้นที่ 3 จะไม่เท่ากันเมื่อเลือกใช้กลุ่มของมิติพื้นฐานอิสระที่แตกต่างกัน ในกรณีเช่นนี้ ค่า  $m$  ที่ใช้จะเป็นค่าของ rank ของเมตริกซ์มิติ

ขั้นที่ 6 ตรวจสอบมิติของเทอม  $\pi$  ที่ได้โดยใช้กลุ่มของมิติพื้นฐานอิสระที่ไม่ได้เลือกใช้

### 2.12.3 วิธีสเกล (Method of scale)

ในปัญหาที่ไม่ซับซ้อนนัก การสร้างเทอม  $\pi$  อาจทำได้ด้วยวิธีสเกล โดยการเขียนมิติพื้นฐานอิสระในเทอมของตัวแปรซ้ำ เช่น ปัญหาของทรงกลมที่เคลื่อนที่ไปในของไหล

$$\text{มิติพื้นฐานความยาว} \quad L = D \quad (2-61)$$

$$\text{มิติพื้นฐานมวล} \quad M = \rho D^3 \quad (2-62)$$

$$\text{มิติพื้นฐานเวลา} \quad T = D/V \quad (2-63)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงพิจารณามิติของตัวแปรอื่นเพื่อจัดเป็นเทอม  $\pi$  คือ

$$\text{แรง } F \text{ มีมิติเป็น } \frac{ML}{T^2}$$

$$\pi_1 = F \cdot \frac{(D/V)^2}{(\rho D^2)(D)} = \frac{F}{\rho V^2 D^2} \quad (2-64)$$

$$\text{ความหนืด } \mu \text{ มีมิติเป็น } \frac{M}{LT}$$

$$\pi_2 = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\rho D^3}{D(D/V)} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2-65)$$

จะเห็นได้ว่าวิธีนี้ผู้จะใช้จะต้องรู้สภาพการไหลอย่างดี และรู้จักการจัดตัวแปรเข้าเพื่อให้ได้เทอม  $\pi$  ตามต้องการ

#### 2.12.4 เทอม $\pi$ ที่สำคัญทางกลศาสตร์ของไหล

เทอม  $\pi$  ที่สำคัญทางกลศาสตร์ของไหลโดยส่วนใหญ่จะได้จากอัตราส่วนของแรงที่เกิดขึ้น ได้แก่ แรง ความเฉื่อย แรงความหนืด แรงดัน แรงโน้มถ่วง แรงตึงผิว และแรงหยุ่นตัว แรงเหล่านี้เขียนในเทอมของตัวแปรได้เป็น

$$\text{แรงความเฉื่อย} = Ma \propto \rho L^3 \left( \frac{L}{T^2} \right) \propto \rho V^2 L^2 \quad (2-66)$$

$$\text{แรงความหนืด} = \mu \frac{du}{dy} \propto \mu \frac{V}{L} \propto \mu V L \quad (2-67)$$

$$\text{แรงดัน} = \Delta P A \propto \Delta P L^2 \quad (2-68)$$

$$\text{แรงโน้มถ่วง} = Mg \propto \rho L^3 g \propto \rho g L^3 \quad (2-69)$$

$$\text{แรงตึงผิว} = \sigma L \quad (2-70)$$

$$\text{แรงหยุ่นตัว} = E_v A \propto E_v L^2 \quad (2-71)$$

แรงความเฉื่อยจะมีความสำคัญในเกือบทุกปัญหาทางกลศาสตร์ของไหล อัตราส่วนระหว่างแรงความเฉื่อยกับแรงอื่น ๆ ในรูปของเทอม  $\pi$  มีดังนี้

$$\begin{aligned} \text{Reynold number, Re} &= \frac{\text{แรงความเฉื่อย}}{\text{แรงความหนืด}} \\ &= \frac{\rho V^2 L^2}{\mu V L} \\ &= \frac{\rho V L}{\mu} \end{aligned} \quad (2-72)$$

$$\begin{aligned} \text{Euler number, Eu} &= \frac{\text{แรงดัน}}{\text{แรงความเฉื่อย}} \\ &= \frac{\Delta P L^2}{\rho V^2 L^2} \\ &= \frac{\Delta p}{\rho V^2} \end{aligned} \quad (2-73)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{Froude number, } Fr^2 &= \text{แรงความเฉื่อย / แรงโน้มถ่วง} \\ &= \frac{\rho V^2 L^2}{\rho g L} \\ Fr &= \frac{V}{\sqrt{gL}} \end{aligned} \quad (2-74)$$

$$\begin{aligned} \text{Weber number, } We &= \text{แรงความเฉื่อย / แรงตึงผิว} \\ &= \frac{\rho V^2 L^2}{\sigma} \end{aligned} \quad (2-75)$$

$$\begin{aligned} \text{Much number, } M^2 &= \text{แรงความเฉื่อย / แรงหยุ่นตัว} \\ &= \frac{\rho V^2 L^2}{E_y L^2} \\ M &= \frac{V}{C} \end{aligned} \quad (2-76)$$

ข้อสังเกตเกี่ยวกับเทอม  $\pi$  มีดังนี้

1. ตัวแปรใดที่ไม่มีมิติ ตัวแปรนั้นถือเป็นเทอม  $\pi$  เทอมหนึ่ง
2. อัตราส่วนของตัวแปรที่มีมิติเหมือนกัน จะเป็นเทอม  $\pi$  เทอมหนึ่ง
3. เทอม  $\pi$  ที่นำไปบวก ลบ คูณ หาร หรือยกกำลังด้วยตัวเลขตัวหนึ่งจะได้เป็นเทอม  $\pi$  อีกเทอมหนึ่ง
4. เทอม  $\pi$  ต่าง ๆ ที่นำมาคูณหรือหารกัน จะได้เป็นเทอม  $\pi$  อีกเทอมหนึ่ง

#### 2.12.5 ความคล้ายคลึง

การสร้างแบบจำลองเพื่อการทดลองและนำผลที่ได้ไปใช้คาดคะเนกับแบบจริงนั้น เราต้องให้แบบจำลองมีความคล้ายคลึงกับแบบจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ความคล้ายคลึงดังกล่าวแบ่งออกได้เป็น 3 อย่างคือ

##### 2.12.5.1 ความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต (Geometric similarity)

มิติเชิงเส้นของแบบจำลองและแบบจริงจะต้องเป็นอัตราส่วนคงที่ค่าหนึ่ง ถ้าให้  $L_r$  เป็นอัตราส่วนของมิติเชิงเส้นของแบบจริงต่อแบบจำลอง จะเป็นผลให้อัตราส่วนพื้นที่เป็น  $L_r^2$  และอัตราส่วนปริมาตรเป็น  $L_r^3$  แต่ในบางกรณีอาจไม่สามารถทำให้เกิดความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตโดยสมบูรณ์ได้ เช่น

ในกรณีของการจำลองแม่น้ำ อัตราส่วนในแนวระดับมักจะถูกจำกัดโดยพื้นที่ห้องทดลอง ระยะความลึกทางด้านแนวตั้งจะใช้อัตราส่วนเดียวกับแนวระดับไม่ได้ เนื่องจากจะทำให้แบบจำลองตื้นมากจนผลของความตึงผิวเกิดเป็นนัยสำคัญ และทำให้การไหลกลายเป็นแบบราบเรียบ ดังนั้นจึงต้องใช้อัตราส่วนที่แตกต่างกัน หรือในส่วนของความหยาบของพื้นน้ำที่ไม่สามารถลดลงตามอัตราส่วนที่ใช้ วัสดุนั้นจะต้องมีความละเอียดมาก ซึ่งไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติอีกทั้งไม่สามารถเทียบเคียงได้กับแบบจริง เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเนื้อวัสดุที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งเหล่านี้ล้วนแต่เป็นผลให้แบบจำลองมีความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตที่ไม่สมบูรณ์ เราเรียกว่าแบบจำลองผิดส่วน (distorted model)

### 2.12.5.2 ความคล้ายคลึงเชิงจลน์ (Kinematics similarity)

อัตราส่วนของความเร็วที่จุดเดียวกันในแบบจำลองและแบบจริงตลอดทั้งสนามการไหลจะมีค่าเท่ากัน ทำให้ลักษณะเส้นสายธารมีความคล้ายคลึงกัน ถ้าให้  $V_r$  เป็นอัตราส่วนความเร็วดังสมการที่ 2-77

$$V_r = \frac{V_p}{V_m} \quad (2-77)$$

โดยที่  $V_m$  และ  $V_p$  คือความเร็วในแบบจำลองและแบบจริง ตามลำดับ และเนื่องจากมิติของเวลา  $T$  คือ  $\frac{L}{V}$  ดังนั้นอัตราส่วนของเวลาจึงเป็น

$$T_r = \frac{L_r}{V_r} \quad (2-78)$$

ในทำนองเดียวกัน อัตราส่วนของความเร่งจะเป็น

$$a_r = \frac{L_r}{T_r^2} = \frac{V_r^2}{L_r} \quad (2-79)$$

### 2.12.5.3 ความคล้ายคลึงเชิงพลวัต (Dynamic similarity)

อัตราส่วนของแรงที่จุดเดียวกันในแบบจำลองและแบบจริงตลอดทั้งสนามการไหลจะมีค่าเท่ากัน ความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิตและเชิงจลน์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดความคล้ายคลึงเชิงพลวัตด้วย

### 2.12.6 การศึกษาแบบจำลอง

การศึกษาแบบจำลองจะช่วยในการตรวจสอบการออกแบบและงานวิจัยอื่นๆ ทำให้คาดคะเนถึงสภาพจริงที่จะเกิดขึ้น แบบจำลองที่ศึกษาจะต้องมีความคล้ายคลึงกับแบบจริง แต่ในสนามการไหลทั่วไปมักมีแรงที่เกี่ยวข้องอยู่หลายชนิด การทำให้อัตราส่วนของแรงชนิดต่างๆ ที่กระทำต่อแบบจำลองและแบบจริงเท่ากันทุกชนิดที่ทุกจุดจึงเป็นไปได้ยาก นอกเสียจากแบบจำลองจะมีขนาดเท่ากับแบบจริง ดังนั้นการศึกษาแบบจำลองจึงต้องทราบว่ามีผลเป็นนัยสำคัญต่อการไหลในปัญหา และความคล้ายคลึงเชิงพลวัตที่ต้องการจะต้องใช้แบบจำลองขนาดใด

อัตราส่วนของแรงชนิดต่าง ๆ คือ  $Re$ ,  $Eu$ ,  $We$  และ  $M$  ที่มีผลเป็นนัยสำคัญต่อปัญหาต่างๆ มีดังนี้

1. การทดสอบในอุโมงค์ลมหรืออุโมงค์น้ำ  $Re$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญ ในกรณีที่ใช้อุโมงค์ลมที่ความเร็วสูงๆ การยุบตัวจะมีผลต่อปัญหา ดังนั้นอาจจะต้องพิจารณาถึง  $M$  ร่วมด้วย
2. การไหลในท่อ  $Re$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญ โครงสร้างทางชลศาสตร์ เช่น ฝาย (weir) ทางน้ำล้น (spillways)  $Fr$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญ
3. แรงต้านทานของเรือ ในส่วนของเรือที่จมอยู่ในน้ำ  $Re$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญ
4. ในส่วนของเรือ บริเวณผิวน้ำ  $Fr$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เครื่องกลของไหล  $Re$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญ ในกรณีเครื่องอัดไหลตามแนวแกน
6. เครื่องกังหันก๊าซ  $M$  จะเป็นอัตราส่วนของแรงที่เป็นนัยสำคัญร่วมด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การนำทฤษฎีมาใช้

จากทฤษฎีที่กล่าวข้างต้นการนำทฤษฎีมาใช้ต้องคำนึงถึงองค์ประกอบต่างๆดังนี้

#### 3.1 คุณสมบัติของแฉก

คุณสมบัติของสารที่มี เช่น ความหนาแน่น( $\rho$ ), ความหนืด( $\mu$ ), ความจุความร้อน( $C$ ), การนำความร้อน( $R$ ) ฯลฯ ในการผสมแฉกนั้น บางครั้งอาจจะต้องมีการให้ความร้อนด้วยเนื่องจากส่วนผสมบางชนิดต้องการความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา แต่ในที่นี้เป็นกรณีการผสมแฉกที่ไม่ต้องให้ความร้อน ดังนั้นเราจึงต้องคำนึงถึงค่าเพียง 2 ค่า คือ ความหนาแน่น และ ความหนืด

#### 3.2 การเลือกใบพัดที่ใช้ในการผสม

เนื่องจากแฉก ที่ใช้มีความหนืดสูงและมีส่วนผสมที่เป็นสารแขวนลอย จากทฤษฎีเราจึงเลือกใบพัด 2 ใบซึ่งหมุนด้วยความเร็วรอบต่างกัน ไว้ในถังผสมใบเดียวกันดังรูปที่ 3 - 1 เพื่อให้เกิดการไหลตามที่ต้องการ



รูปที่ 3 - 1 การวางใบกวนแบบ Anchor และ ใบกวนแบบ Axial flow ไว้ในถังผสมใบเดียวกัน

ใบกวนแบบแรกที่เราเลือกใช้ใบกวนแบบใบพาย ในที่นี้เราเลือกใช้ใบกวนแบบ Anchor ซึ่งใบกวนชนิดนี้จะออกแบบตามรูปร่างของภาชนะ เนื่องจากสารที่ทำกรผสมนั้นมีความหนืดสูงมากและติดอยู่บริเวณขอบของภาชนะ จึงไม่เกิดการผสมหรือเกิดการผสมน้อยมากที่บริเวณผนังภาชนะ เราจึงต้องใช้ใบกวนแบบ Anchor เพื่อทำหน้าที่กวาดสารเหล่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบกวนใบที่สองเนื่องจากใบกวนแบบ Anchor จะให้การไหลในแนวรัศมีเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ส่วนผสมที่สารแขวนลอยไม่ถูกดูดลงไป และส่วนผสมบางตัวที่มีความหนาแน่นมากจะตกตะกอนอยู่ที่ก้นถังเราจึงต้องใช้ใบกวนแบบ Axial Turbine 4 blades at  $60^\circ$  angle เพื่อเพิ่มการไหลในแนวแกนให้สูงขึ้น

### 3.3 การคำนวณกำลังมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ในตอนแรกนั้นเรายังไม่สามารถรู้ได้ว่ากำลังของมอเตอร์ต้องใช้เท่าไร เนื่องจากเรายังไม่ทราบค่าความเร็วรอบที่แน่นอนของใบพัด เราจึงต้องประมาณค่าความเร็วรอบในช่วงที่ใช้งาน โดยใช้ข้อมูลจากทฤษฎี และบริษัทที่ทำการผลิตเครื่องผสม (หมายเหตุ บริษัท เซอร์วิเทค เอ็นจิเนียริง จำกัด ( 102/124-125 หมู่ที่ 3 ถนนเสรีไทย แขวงคันนายาว เขตคันนายาว กรุงเทพฯ 10230 โทรศัพท์ (02) 919-8240, 517-4832) ซึ่งเราจะประมาณได้ว่าใบกวนแบบ Anchor จะใช้ความเร็วรอบอยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 200 rpm และใบกวนแบบ Axial flow จะใช้ความเร็วรอบอยู่ในช่วงประมาณ 500 – 1200 rpm

ในการคำนวณเราจึงใช้ความเร็วรอบที่สูงที่สุดมาใช้ในการคำนวณ คือ 200 rpm สำหรับใบกวนแบบ Anchor และ 1200 rpm สำหรับใบกวนแบบ Axial flow

#### 3.3.1 กำลังที่ใช้ในการขับใบกวนแบบ Anchor

ในขั้นแรกเราต้องหาขนาดของใบกวน

ขนาดของใบกวนแบบ Anchor = เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง  $\times 0.9$

เนื่องจากเราใช้ถังที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 32 cm.

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น} \quad \text{ขนาดของใบกวนแบบ Anchor} &= 32 \times 0.9 \\ &= 28.8 \text{ cm.} \approx 29 \text{ cm.} \end{aligned}$$

ในการคำนวณกำลังที่ใช้ในการขับใบกวนแบบ Anchor เราจะใช้ทฤษฎีวิชากลศาสตร์ของไหลในเรื่อง แรงกระทำบนวัตถุที่จมในของไหล โดยคิดแบบกรไหลผ่านแผ่นระนาบที่วางตั้งฉากการไหล โดยเราถือว่าแรงกระทำที่ใบพัดเคลื่อนที่ไปในของเหลวเท่ากับแรงกระทำที่ของเหลวทำกับใบพัด



รูปที่ 3 – 2 การแบ่งส่วนของใบกวนแบบ Anchor เพื่อนำไปใช้คำนวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การแบ่งใบกวนแบบ Anchor โดยใช้แนวตั้งเป็นหลัก
- การแบ่งใบกวนแบบ Anchor โดยใช้แนวนอนเป็นหลัก

จากรูปเราแบ่งคิดเป็น 2 แผ่น คือ แผ่น A และแผ่น B โดยเราจะคิดการแบ่งที่ให้แรงมากที่สุด คือ รูป 3 - 2a การแบ่งใบกวนแบบ Anchor โดยใช้แนวตั้งเป็นหลัก

โดยใช้สูตร  $F = C_D \frac{1}{2} \rho v^2 A$

A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับแรงกระทำ

V คือ ความเร็วเชิงเส้นของใบพัดที่รัศมี r

ถ้าเราเลือก  $\omega = 200 \text{ rpm}$

แผ่น A

$$V_{Aavg} = \omega r_A$$

$$= 200 \times \frac{2\pi}{60} \times r_A$$

$$r_{Aavg} = \frac{13}{2}$$

$$= 13 \text{ cm.}$$

$$V_{Aavg} = 200 \times \frac{2\pi}{60} \times 0.13$$

$$= 2.72 \text{ m/s}$$

$$A_A = 8.7 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

จากตาราง

จะได้

$$C_D = 1.3$$

จากการวัดค่า

จะได้

$$\rho = 1035 \text{ kg/m}^3$$

$$F_A = 1.3 \times \frac{1}{2} \times 1035 \times 2.72^2 \times 8.7 \times 10^{-3}$$

$$= 43.3 \text{ N}$$

$$T_A = F(2r_{Aavg})$$

$$= 43.3 \times 2 \times 0.13$$

$$= 11.258 \text{ N.m}$$

กำลัง

$$P_A = 2\pi NT$$

$$= 2 \times \pi \times \frac{200}{60} \times 11.258$$

$$= 235.78 \text{ watt}$$

แผ่น B

$$V_{Bavg} = \omega r_B$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 &= 200 \times \frac{2\pi}{60} \times r_B \\
 r_{Bavg} &= \frac{11.5}{2} \\
 &= 5.75 \text{ cm.} \\
 V_{Bavg} &= 200 \times \frac{2\pi}{60} \times 0.0575 \text{ m/s} \\
 &= 1.2 \text{ m/s} \\
 A_B &= 3.45 \times 10^{-3} \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

จากตาราง

จะได้ค่า  $C_D = 1.25$

จากการวัดค่า

จะได้

$$\begin{aligned}
 \rho &= 1035 \text{ kg/m}^3 \\
 F_B &= 1.25 \times \frac{1}{2} \times 1035 \times 1.2^2 \times 3.45 \times 10^{-3} \\
 &= 3.21 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_B &= F(2r_{Avg}) \\
 &= 3.21 \times 2 \times 0.0575 \\
 &= 0.37 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

กำลัง

$$\begin{aligned}
 P_B &= 2\pi NT \\
 &= 2 \times \pi \times \frac{200}{60} \times 0.37 \\
 &= 7.75 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 P_{รวม} &= P_A + P_B \\
 &= 7.75 + 235.787 \\
 &= 243.537 \text{ watt}
 \end{aligned}$$

แต่เนื่องจากว่าเป็นการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีวิชากลศาสตร์ของไหลในเรื่อง แรงกระทำบนวัตถุที่จมในของไหลมาทำการคำนวณกำลังของมอเตอร์ โดยไม่ได้มีการคิดแฟคเตอร์ต่างๆ ( ความหนืดและความเสียดทาน ) ดังนั้นการเลือกใช้มอเตอร์ทำให้เราต้องเผื่อค่าความปลอดภัยไว้สำหรับการคิดขนาดมอเตอร์ด้วย

$$243.537 \times 3 = 730.611 \text{ watt}$$

จึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1 แรงม้า ( 746 watt ) มาใช้ในการทดลองขับใบกวนแบบ Anchor

### 3.3.2 กำลังที่ใช้ในการขับใบกวนแบบ Axial flow

ในการคำนวณกำลังที่ใช้ในการขับใบกวนแบบ Anchor เราจะใช้ทฤษฎีการออกแบบกังหันมาตรฐานและ ทฤษฎีกำลังงานที่ต้องการสำหรับการผสมของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากว่าตั้งที่เราใช้ในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ( $D_t$ ) เท่ากับ 320 mm. และใช้ใบ  
กวนแบบ Axial Turbine 4 blades at  $60^\circ$  angle

จากรูปที่ 2 – 25 ใบกวนแบบ Axial Turbine 4 blades at  $60^\circ$  angle จะใช้กราฟ No. 17  
จึงจะได้ว่า

เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของใบกวน

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{D_t}{D_a} &= 3 \\ D_a &= \frac{320}{3} \\ &= 106.66 \text{ mm.} \\ &\approx 100 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ความกว้างใบกวน

$$\begin{aligned} \text{จาก } P &= 0.25 D_a \\ &= 0.25 \times 100 \\ &= 25 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ความสูงจากก้นถึง

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{E}{D_a} &= 0.5 \\ E &= 0.5 \times 100 \\ &= 50 \text{ mm.} \end{aligned}$$

ความสูงในการใส่สาร

$$\begin{aligned} \text{จาก } \frac{H}{D_a} &= 3 \\ H &= 3 \times 100 \\ &= 300 \text{ mm.} \end{aligned}$$

จากการวัดค่า

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \rho &= 1035 \text{ kg/m}^3 \\ \mu &= 7 \text{ Pa.s} \\ \text{จาก } N_{Re} &= \frac{\rho N D^2}{\mu} \\ &= \frac{1035 \times \frac{1000}{60} \times 0.1^2}{7} \\ &= 24.64 \end{aligned}$$

$$\text{จากรูปที่ 2 – 26 จะได้ } N_p = 5$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จาก } N_p &= \frac{P}{\rho N^3 D_a^5} \\ 5 &= \frac{P}{1035 \times \left(\frac{1000}{60}\right)^3 \times 0.1^5} \\ P &= 239 \text{ watt} \end{aligned}$$

เนื่องจากว่าเป็นการคำนวณกำลังที่ใช้ในการขับใบกวนแบบ Axial flow เราจะใช้ทฤษฎีการออกแบบก้นมาตรฐานและ ทฤษฎีกำลังงานที่ต้องการสำหรับการผสมของไหล ซึ่งเป็นการเพื่อค่าแฟคเตอร์ต่างๆมาให้แล้วเราจึงสามารถนำค่ากำลังที่คำนวณออกมาได้ไปใช้ได้เลย

จึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด  $\frac{1}{3}$  แรงม้า ( 248.66 watt ) มาใช้ในการทดลองขับใบกวนแบบ Axial flow



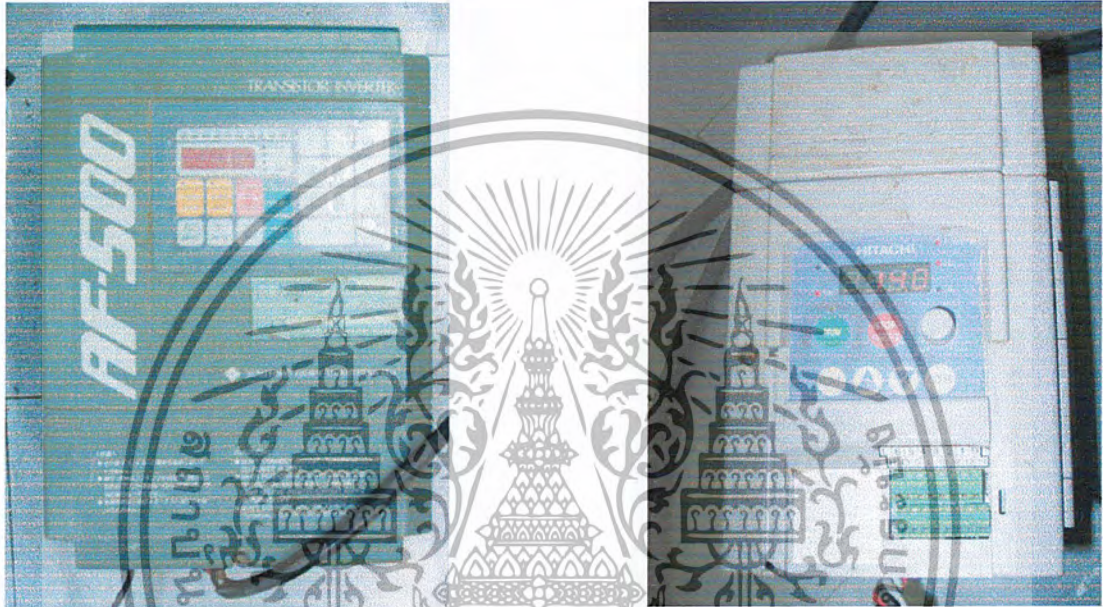
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

#### 4.1 อุปกรณ์การทดลอง

1. อินเวอร์เตอร์ที่ใช้ควบคุมมอเตอร์ 1 เฟส และ 3 เฟส



รูปที่ 4 -1 อินเวอร์เตอร์ควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ 1 เฟส และ 3 เฟส ตามลำดับ

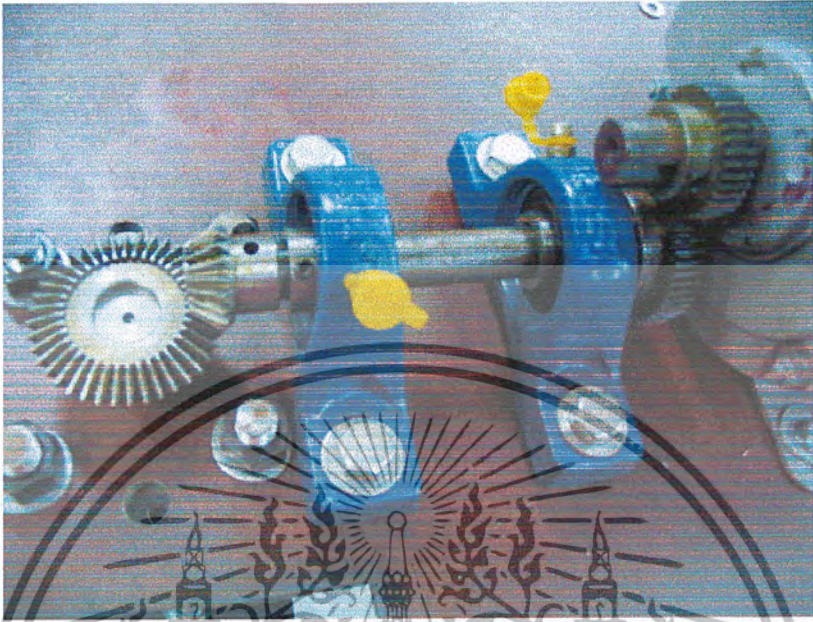
2. มอเตอร์ 1 เฟส ขนาด 1/3 แรงม้า และ มอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 1 แรงม้า



รูปที่ 4 -2 มอเตอร์ 1 เฟส และ 3 เฟส ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุดทดเฟืองเพื่อเปลี่ยนแกน ( อัตราทดรวม 3 : 8 โดย เฟืองตรงอัตราทด 3 : 4 และ เฟืองดอกจอกอัตราทด 1 : 2 )



รูปที่ 4 - 3 ชุดทดเฟือง

4. ชุดคัปปลิง (Coupling) (ช่วยไม่ให้เพลาตาย)

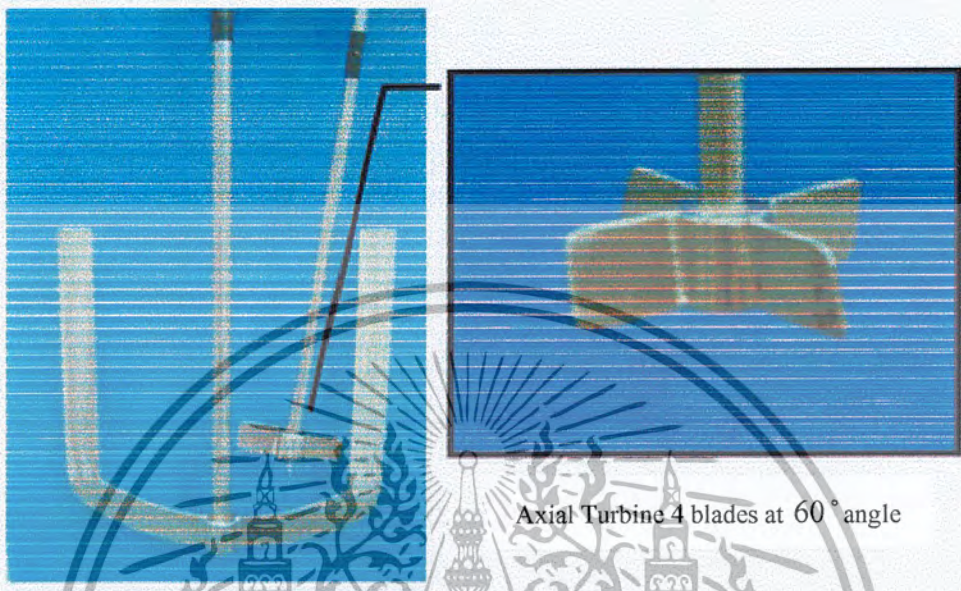


รูปที่ 4 - 4 ชุดคัปปลิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใบกวนแฉมพู ประกอบด้วย

- ใบกวนแบบ Anchor
- ใบกวนแบบ Axial Turbine 4 blades at 60° angle



รูปที่ 4-5 ภาพใบกวนที่ใช้ในการผสมแฉมพู

6. ถังอะคริลิกใส



รูปที่ 4-6 ถังอะคริลิกใส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

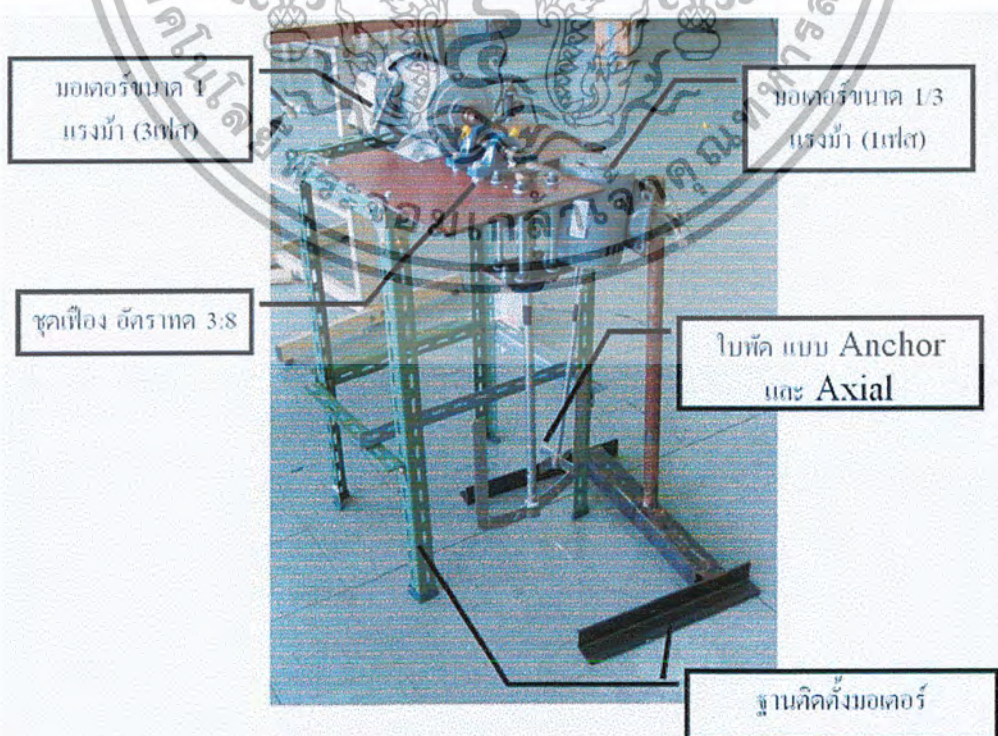
7. สารเคมีที่ใช้ในการผสมเชมพู ประกอบด้วย

- SODIUM LAURYL ETHER SULPHATE ( $\rho = 1034.55 \text{ Kg / m}^3$ ,  $\mu = 9.230 \text{ Pa.s}$ )
- SODIUM CHLORIDE ( $\rho = 2200 \text{ Kg / m}^3$ )
- EUPERLAN PK 771 ( $\rho = 1051.9 \text{ Kg / m}^3$ ,  $\mu = 31.53 \text{ Pa.s}$ )
- COMPERLAN KD T ( $\rho = 920.6 \text{ Kg / m}^3$ ,  $\mu = 0.588 \text{ Pa.s}$ )



รูปที่ 4-7 สารเคมีที่ใช้ในการผสมเชมพู

8. ฐานวางมอเตอร์ตัวใหญ่และตัวเล็ก



รูปที่ 4-8 เครื่องที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวและเพื่อวัตถุประสงค์ในการสอนเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวนแต่ละชนิด

### จุดประสงค์ของการทดลอง

เพื่อหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวนแบบ Anchor และ Axial

### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการผสมแขมพูด้วยใบกวนแบบ Anchor ที่ความเร็วรอบต่างๆกัน ( 50 – 115 rpm )
2. สังเกตลักษณะการหมุนวน และปริมาณฟองในแขมพูด และถ่ายรูปเก็บผลในแต่ละความเร็ว

รอบ

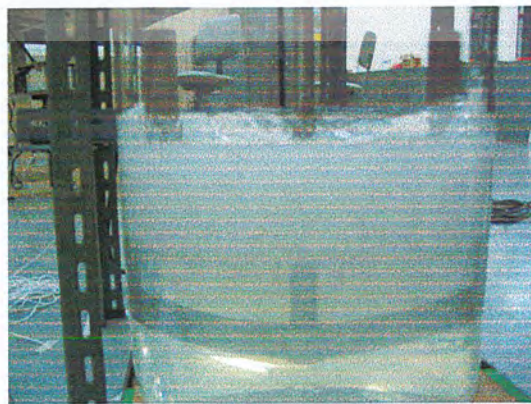
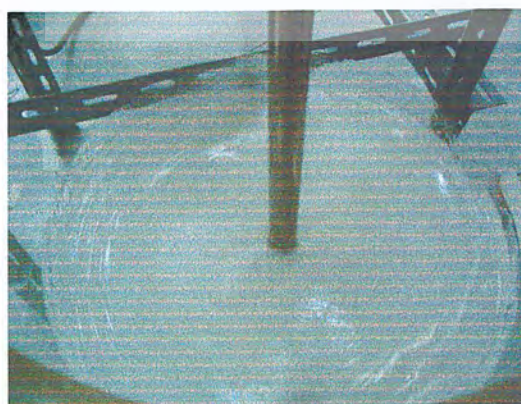
3. ทำตามขั้นตอนที่ 1 และ 2 ด้วยใบกวนแบบ Axial Turbine 4 blades at  $60^\circ$  angle ที่ความเร็วรอบต่างๆกัน ( 150 – 850 rpm )

### ผลการทดลอง

1. ใบกวนแบบ Anchor

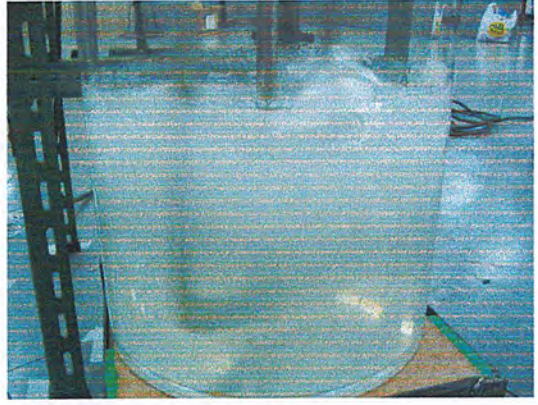
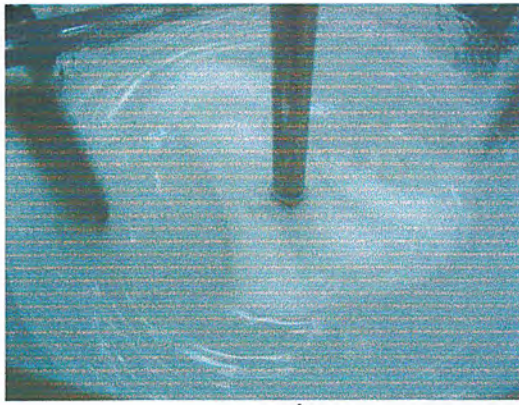


รูปที่ 4 - 9 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 51.5 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 10 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 62.3 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 11 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 73.2 รอบ/นาที

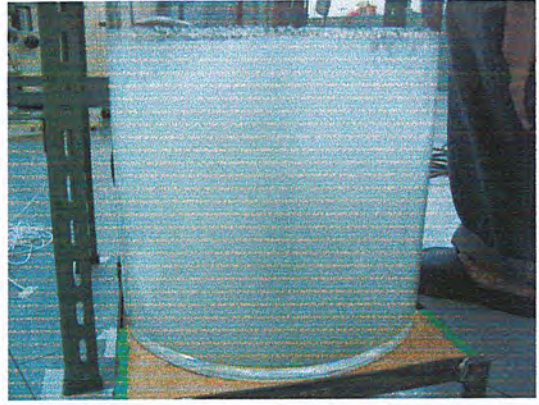
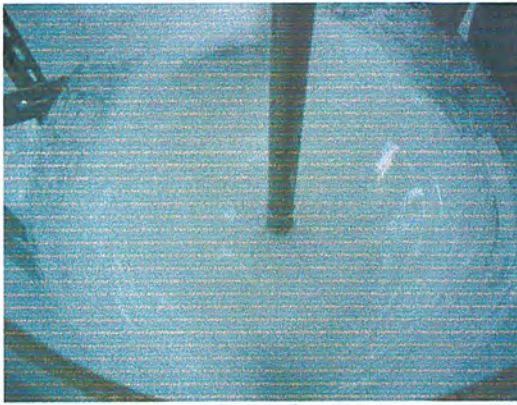


รูปที่ 4 - 12 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 83.8 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 13 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 94.7 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4-14 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 105.3 รอบ/นาที

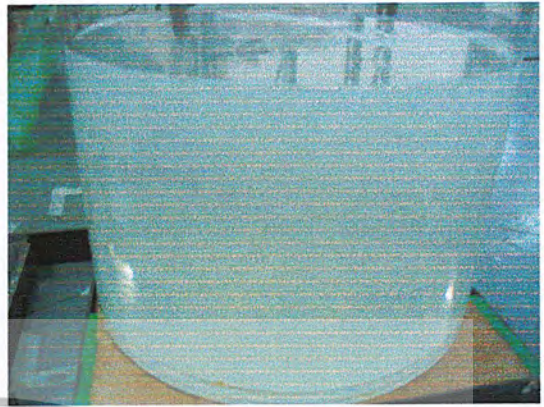
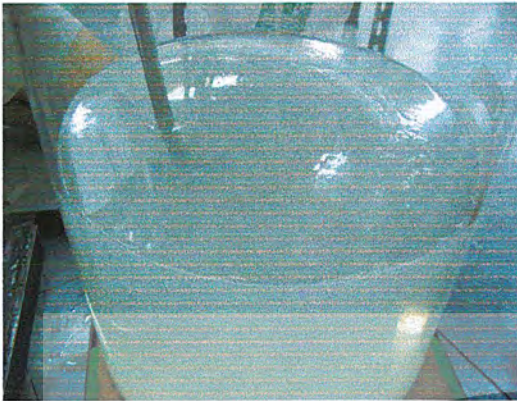


รูปที่ 4-15 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 115.8 รอบ/นาที

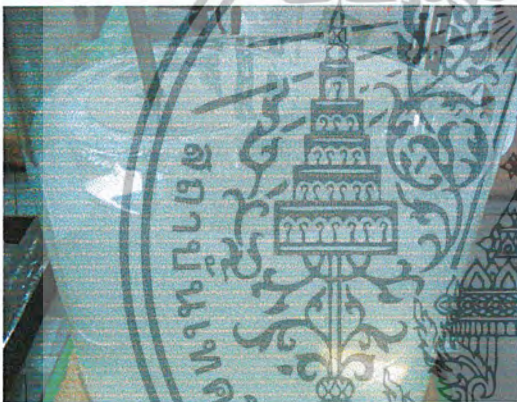
จากการทดลองโดยใช้โอบกวนแบบ Anchor พบว่า

- หากใช้ความเร็วรอบที่ต่ำเกินไป ของเหลวส่วนที่ไม่ติดกับโอบกวนจะไม่เกิดการผสม หรือเกิดการผสมช้ามาก (รูปที่ 4-9) ซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการผลิตมาก
- ช่วงช่วงของความเร็วรอบที่ของเหลวเกิดการผสมกันได้ดี คือ 62.3 – 73.2 rpm จะสังเกตได้ว่าของเหลวภายในถังกวนเริ่มเกิดการปั่นป่วน ทำให้มีการผสมที่ดี (รูปที่ 4 – 10,11)
- แต่ถ้าหากใช้ความเร็วรอบที่มากเกินไปก็ไม่ใช่เป็นกรณี เนื่องจากจะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่มากเกินไป (ดังรูปที่ 4 – 12,13,14,15) ถึงแม้จะช่วยให้ใช้เวลาในการผสมน้อยลง แต่จะทำให้แฉมพูเกิดฟองมาก ซึ่งส่งผลเสียในด้านคุณภาพ และมาตรฐานของแฉมพู

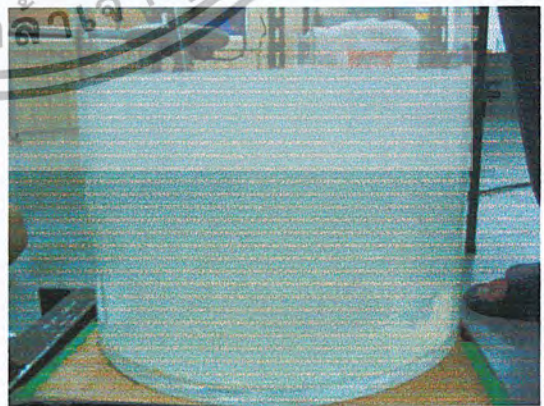
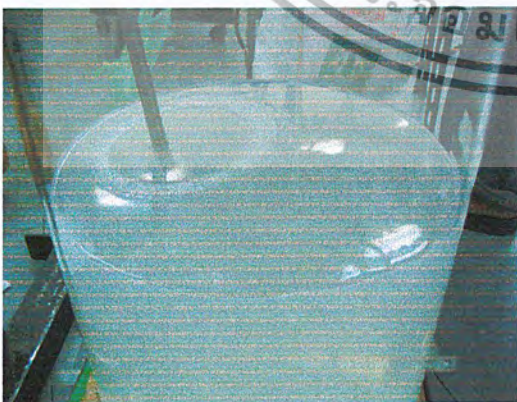
2. ใบกวนแบบ Axial Turbine 4 blades at  $60^\circ$  angle



รูปที่ 4 - 16 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 110.2 รอบ/นาที

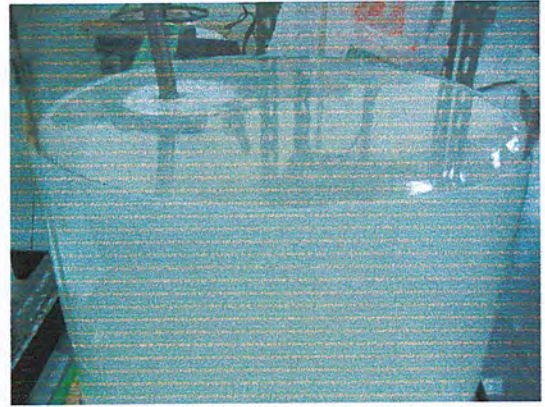
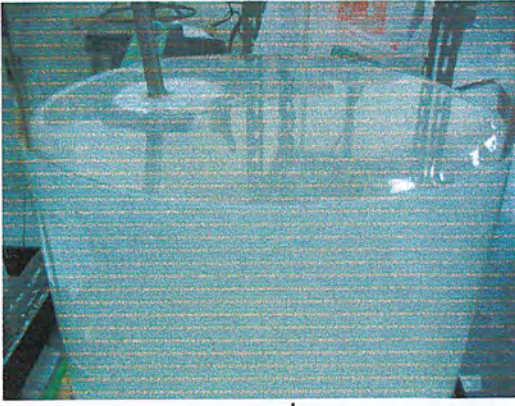


รูปที่ 4 - 17 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 138 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 18 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 165.9 รอบ/นาที

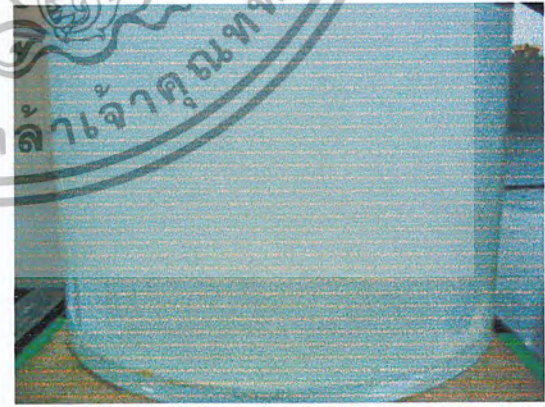
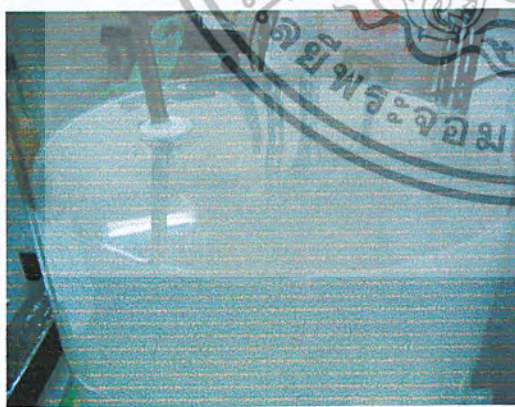
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 19 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 198.1 รอบ/นาที

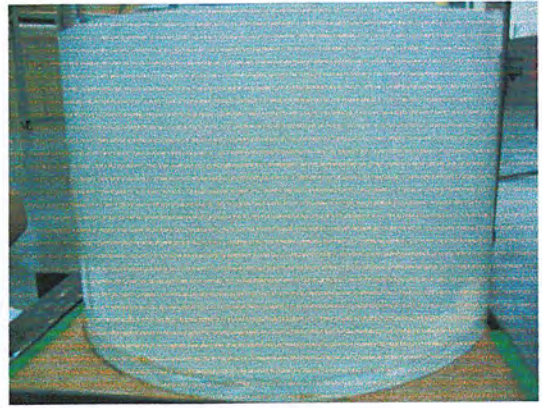
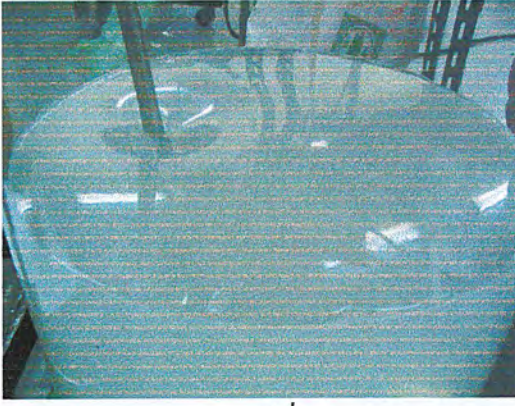


รูปที่ 4 - 20 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 227.6 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 21 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 257 รอบ/นาที

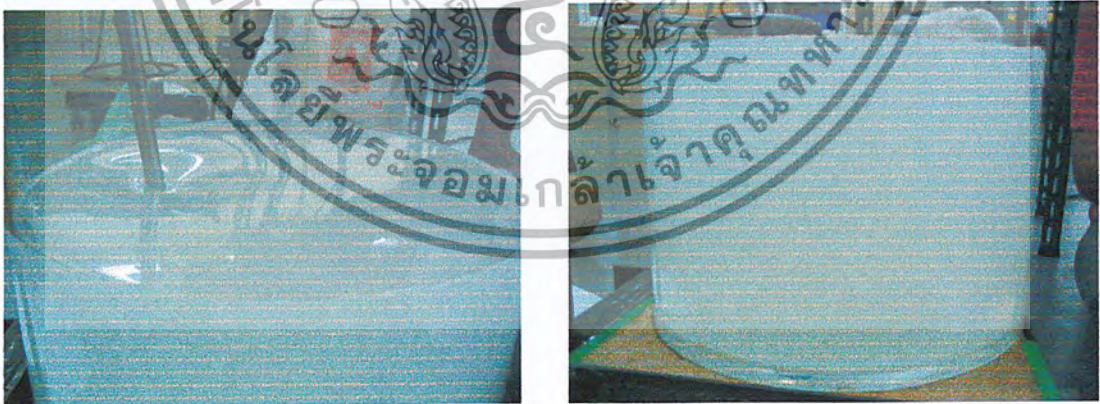
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 22 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 373.7 รอบ/นาที

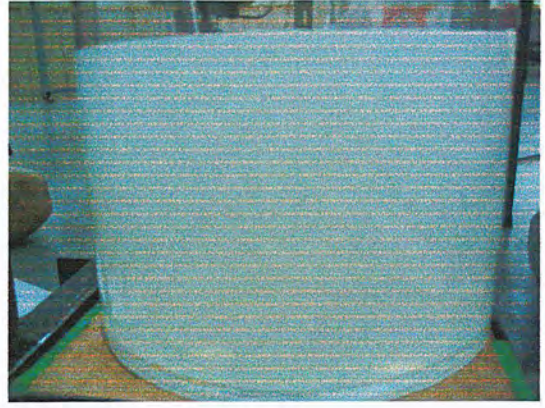
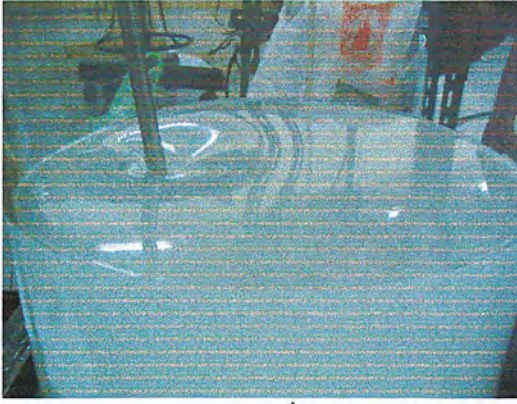


รูปที่ 4 - 23 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 420.1 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 24 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 485.8 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 25 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 541.6 รอบ/นาที

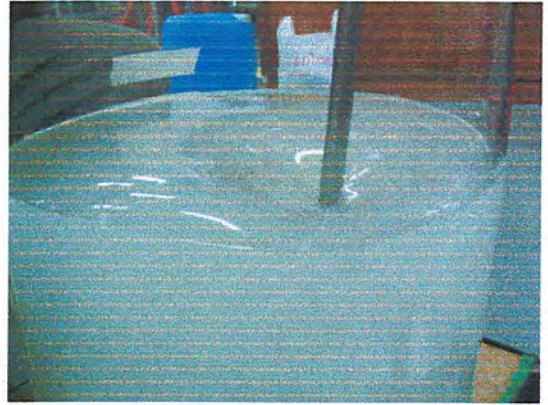
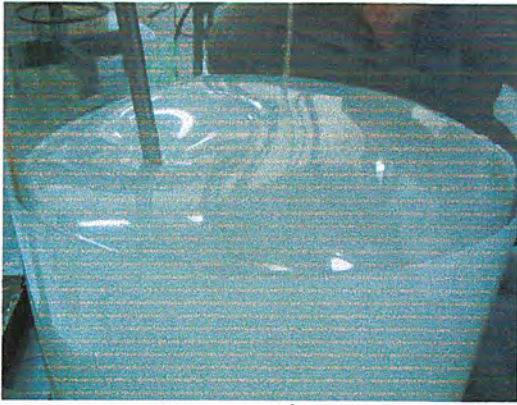


รูปที่ 4 - 26 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 595.7 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 27 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 624.3 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 28 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 653.2 รอบ/นาที

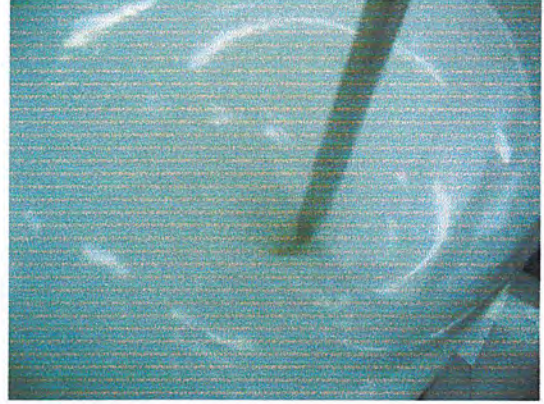
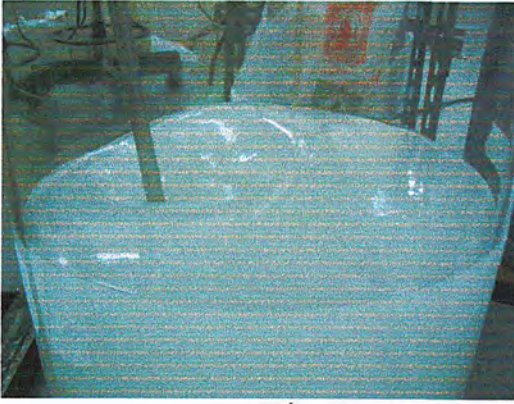


รูปที่ 4 - 29 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 682.3 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 30 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 713.3 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 31 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 741.2 รอบ/นาที

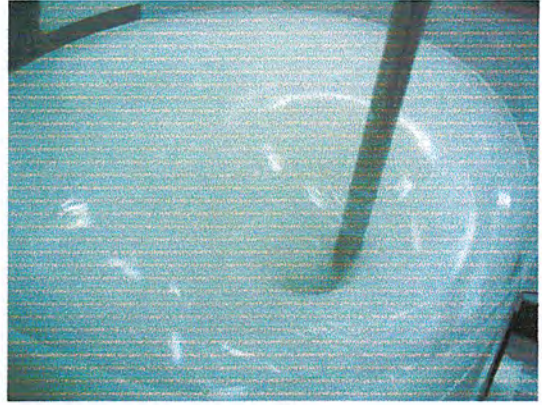
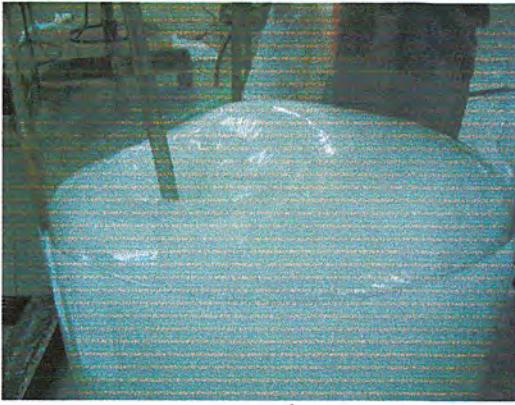


รูปที่ 4 - 32 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 768.6 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 33 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 797 รอบ/นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 34 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 821.4 รอบ/นาที



รูปที่ 4 - 35 แสดงการผสมที่ความเร็วรอบ 850.5 รอบ/นาที

จากการทดลองโดยใช้ใบกวนแบบ Axial พบว่า

- หากใช้ความเร็วรอบที่ต่ำเกินไป ของเหลวส่วนที่ไม่ติดกับใบกวนจะไม่เกิดการผสม หรือเกิดการผสมช้ามาก (รูปที่ 4 - 16 ถึง 4 - 23) ซึ่งจะทำให้เสียเวลาในการผลิตมาก
- ช่วงช่วงของความเร็วรอบที่ของเหลวเกิดการผสมกันได้ดี คือ 485.8 – 541.6 rpm จะสังเกตได้ว่าของเหลวภายในถังกวนเริ่มเกิดการปั่นป่วน ทำให้มีการผสมที่ดี (รูปที่ 4 - 24,25)
- แต่ถ้าหากใช้ความเร็วรอบที่มากเกินไปก็ไม่ใช่การดี เนื่องจากจะทำให้เกิดการปั่นป่วนที่มากเกินไป (รูปที่ 4 - 26 ถึง 4 - 35) ทำให้เกิดฟองจำนวนมากเกินไป และยังทำให้แฉมฟูเกิดฟองมากเกินไป ซึ่งส่งผลเสียในด้านคุณภาพ และมาตรฐานของแฉมฟู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2 การทดลองเพื่อดูลักษณะการผสมของไบกวนแต่ละชนิด

##### จุดประสงค์การทดลอง

เพื่อดูลักษณะการผสมของผสมของไบกวนแบบ Anchor, axial, รวม 2 ไบ

##### ขั้นตอนการทดลอง

1. ทดลองผสมแชมพู โดยใช้ไบกวนแบบ Anchor ขั้นตอนดังนี้

1.1) ใส่ SODIUM LAURYL ETHER SULPHATE และ SODIUM CHLORIDE เริ่มการผสม

1.2) เมื่อเข้ากันแล้วจึงเติมน้ำลงไป

1.3) เติม EUPERLAN PK 771 กวนจนเข้ากัน

1.4) เติม COMPERLAN KD T เมื่อเข้ากันดีแล้วก็ทำการเติมสีลงไป

\* จับเวลาถ่ายรูปลักษณะผลทุกขั้นตอน

2. ทำซ้ำในขั้นตอนที่ 1 ด้วยไบกวนแบบ Axial และแบบ Anchor ร่วมกับ Axial

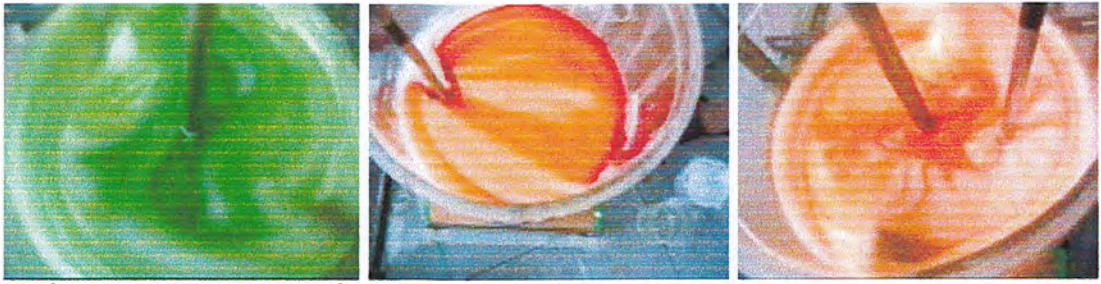
##### ผลการทดลอง



รูปที่ 4 – 36 แสดงการดูกลิ่นสีตอนเริ่มใส่ของไบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ



รูปที่ 4 – 37 แสดงการดูกลิ่นสีที่เวลา 5 วินาทีหลังการใส่สี ของไบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ



รูปที่ 4 - 38 แสดงการดูดกลืนสีที่เวลา 10 วินาทีหลังการใส่สี ของใบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ



รูปที่ 4 - 39 แสดงการดูดกลืนสีที่เวลา 15 วินาทีหลังการใส่สี ของใบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ



รูปที่ 4 - 40 แสดงการดูดกลืนสีที่เวลา 1 นาทีหลังการใส่สี ของใบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ



รูปที่ 4 - 41 แสดงการดูดกลืนสีที่เวลา 1.5 นาทีหลังการใส่สี ของใบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4 - 42 แสดงการคูดกลืนสีในแนวระดับ ของไบกวน Anchor, Axial, Anchor+Axial ตามลำดับ

จากการทดลองโดยใช้ไบกวนทั้ง 3 แบบ พบว่า

ไบกวนแบบ Anchor มีจุดอ่อน คือ

- จะเกิด Dead Point (จุดที่ไม่เกิดการผสม หรือเกิดการผสมน้อยมาก)(สังเกตได้จากความเข้มของสี ถ้าสีเข้มมาก = เกิดการผสมน้อย) ที่บริเวณใกล้กับแกนเพลลา และด้านใต้ของไบกวน
- เกิดการผสมในแนวแกนน้อยมาก ทำให้ส่วนผสมที่มีความหนาแน่นไม่เท่ากันเกิดการแบ่งชั้นของของเหลว ดังรูปที่ 4 -42

ไบกวนแบบ Axial มีจุดอ่อน คือ

- จะเกิด Dead Point ที่บริเวณใกล้กับขอบของภาชนะ เนื่องจากของเหลวมีความหนืดสูง
- จากการที่ใช้ความเร็วรอบต่ำเพื่อป้องกันการเกิดฟอง ทำให้การหมุนเวียนของของเหลวภายในภาชนะเกิดขึ้นไม่ทั่วถึง โดยเฉพาะด้านตรงข้ามกับไบกวน ดังรูปที่ 4 -42

ไบกวนแบบรวม Anchor + Axial มีข้อดี คือ

- ช่วยกำจัดข้อด้อยของไบกวนแต่ละตัว โดยการนำข้อดีของไบกวนแต่ละตัวมาลบข้อด้อยของไบกวนอีกตัว เพื่อป้องกันการเกิด Dead Point ที่บริเวณต่างๆ
- เกิดการผสมได้ดีทั้งในแนวแกน และแนวรัศมี ซึ่งช่วยให้เกิดการผสมที่ทั่วถึง และยังช่วยลดระยะเวลาที่ใช้ในการผสมอีกด้วย

## บทที่ 5

### บทวิจารณ์และสรุป

#### 5.1 สรุปผลที่ได้จากการทดลอง

1. จากการทดลองหาความเร็วรอบที่เหมาะสมของใบกวนแต่ละชนิดที่ใช้ในการผสม Shampoo
  - ใบกวนแบบ Anchor จะเกิดการหมุนวนที่เริ่มเกิดการผสมกันได้ดีที่ความเร็วรอบ 62.3 rpm และจะเริ่มเกิดฟองจนมากเกินไปที่ความเร็วรอบ 73.2 rpm ดังนั้นเราจึงใช้ความเร็วรอบอยู่ในช่วง 62.3 – 73.2 rpm ในการผสม shampoo
  - ใบกวนแบบ Axial Flow จะเกิดการหมุนวนที่เริ่มเกิดการผสมกันได้ดีที่ความเร็วรอบ 485.8 rpm และจะเริ่มเกิดหลุมน้ำวนจนมากเกินไปที่ความเร็วรอบ 541.6 rpm ดังนั้นเราจึงใช้ความเร็วรอบอยู่ในช่วง 485.8 – 541.6 rpm ในการผสม shampoo
2. จากการทดลองการผสมแชมพูของใบพัดแต่ละตัวที่ความเร็วรอบที่เหมาะสมจะเห็นว่า
  - ใบกวนแบบ Anchor นั้นทิศทางของการผสมจะเป็นการผสมในแนวรัศมี และจะเกิดการผสมที่บริเวณขอบดังมากกว่า ซึ่งถ้าเกิดมีสารแขวนลอยมาผสมในถังนั้น สารที่แขวนลอยหรือสารที่มีความหนาแน่นน้อยจะเกิดการผสมน้อยมาก และจะเกิดจุดที่สารไม่เกิดการผสมบริเวณใต้ใบกวน เพราะใบกวนแบบ Anchor ให้ทิศทางที่ไหลในแนวแกนน้อยมาก
  - ใบกวนแบบ Axial flow ถ้าใช้ในถังเดียวจะเกิดการผสมที่ไม่ทั่วถึง เนื่องจากว่าแชมพูที่ใช้ในการผสมนั้นมีความหนืดสูงมาก ดังนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าตรงบริเวณขอบดังนั้นจะเกิดการผสมกันน้อยมาก เพราะแชมพูจะเกาะติดที่บริเวณผนังของถังผสม ส่วนใหญ่จะเป็นการผสมกันเนื่องจากการหมุนวนในแนวแกน และบริเวณขอบดังที่อยู่ใกล้ๆใบพัด
  - การใช้ใบกวน 2 ตัวพร้อมกันนั้น จะเกิดการผสมที่ดีกว่าการใช้ใบกวนตัวเดียว เพราะการใช้ใบกวนตัวเดียวมันจะมีจุดอ่อนของมันในแต่ละตัวซึ่งการที่เราใช้ใบกวน 2 ตัวนั้นก็เพื่อเป็นการลบจุดอ่อนของใบกวนแต่ละตัว โดยเอาจุดแข็งของใบกวนอีกตัวมาลบจุดอ่อนของใบกวนอีกตัวหนึ่งซึ่งทำให้ได้ผลที่ดีขึ้น ดังนั้นมันจึงใช้เวลาที่ผสมน้อยกว่าการแยกใบกวนออกตัวเดียว

เวลาที่ใช้ในการผสมแชมพูของใบกวนแต่ละตัว

	Anchor	Axial	Anchor + Axial
เวลาที่ใช้ในการผสม (นาที)	24	>30	15

## 5.2 ปัญหาที่พบจากการทดลอง

1. ขนาดของถังที่ใช้ในการทดลองใช้ปริมาตร 20 ลิตร ในการทดลองซึ่งมีปริมาตรสูงซึ่งการเตรียมสารเคมีที่ใช้ในการผสมแชมพูค่อนข้างจะยุ่งยาก และสิ้นเปลืองมากทำให้ทดลองได้ไม่หลากหลายเท่าที่ควร แต่ถ้าเราใช้ถังขนาดเล็กมากจนเกินไปก็จะทำให้การสเกลอัพได้ไม่ตรงกับความเป็นจริง
2. ค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อค่า  $N_p$  และ  $Re$  คือ  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $N$  (rpm) ต้องการเครื่องมือวัดที่ได้ค่าถูกต้องเที่ยงตรง เพื่อให้ค่า  $N_p$  และ  $Re$  ถูกต้องยิ่งขึ้น ทำให้การคิดค่ากำลังของมอเตอร์เที่ยงตรงมากขึ้น
3. เครื่องมือบางชนิดหาใช้ได้ยากในการเก็บค่า เช่น เครื่องวัดความหนืด, เครื่องวัดความเร็วรอบ, Inverter

## 5.3 ข้อเสนอแนะในการปรับปรุง

1. ควรมีสารเคมีที่ใช้ในการผสมแชมพูมากเพียงพอ ที่จะทำการทดลองได้หลายๆเที่ยวเพื่อที่จะได้ค่าที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น และอาจจะทำให้ทดลองในกรณีอื่นได้มากขึ้น เช่น ทดลองเปลี่ยนกรรมวิธีการใส่สารเคมี, ลำดับในการเปิดใบกวนแต่ละตัว
2. ควรมีการใส่ฮีตเตอร์เพื่อทดลองผสมแชมพูที่อุณหภูมิต่างๆกัน
3. ควรจะหาเครื่องมือที่ใช้ในการวัดค่าต่างๆ ที่มีความถูกต้องเที่ยงตรงสูง

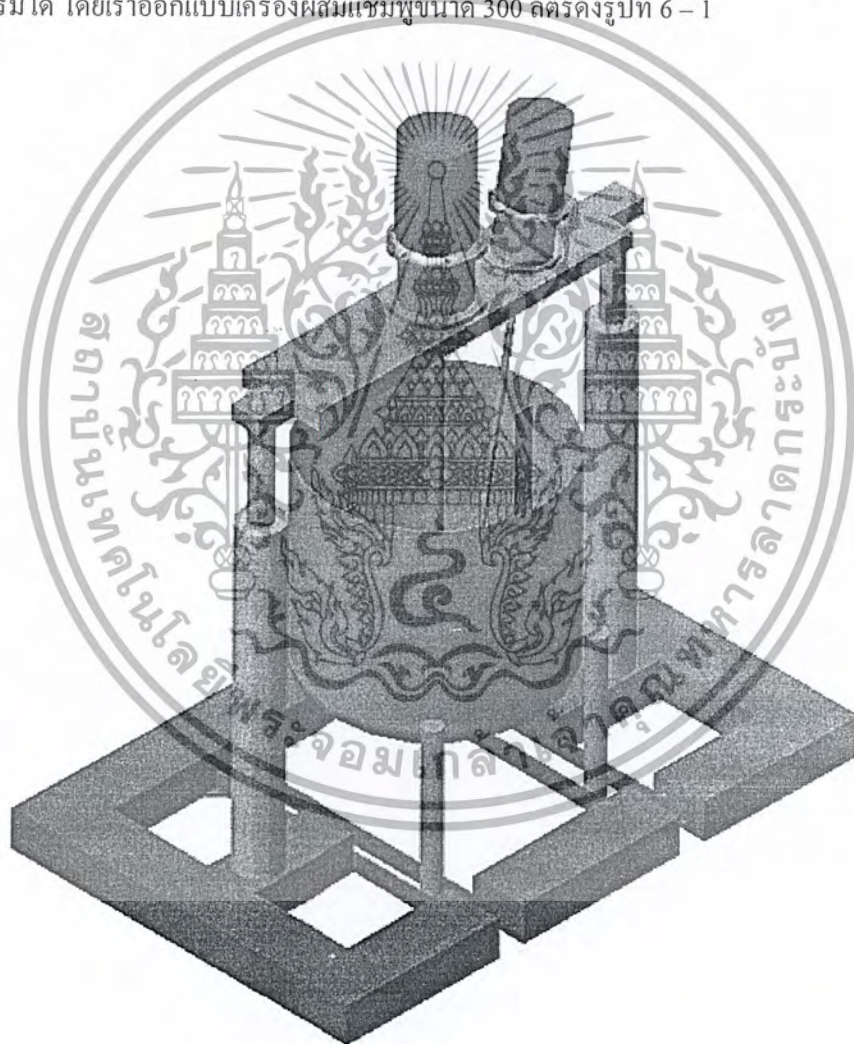


## บทที่ 6

### แนวทางในการออกแบบเครื่องผสมเชมพู เพื่อใช้ในอุตสาหกรรม

#### 6.1 หลักการออกแบบเบื้องต้น

จากการทดลองหาความเร็วรอบของใบพัด และการทดลองหาลักษณะการผสมที่เหมาะสม สำหรับการผสมเชมพู เราสามารถนำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการสร้างเครื่องผสมเชมพูที่ใช้จริงในงาน อุตสาหกรรมได้ โดยเราออกแบบเครื่องผสมเชมพูขนาด 300 ลิตรดังรูปที่ 6-1



รูปที่ 6-1 เครื่องผสมเชมพูที่ใช้ในอุตสาหกรรม

รูปที่ 6-1 เป็นรูปเครื่องผสมเชมพูที่สามารถเปลี่ยนชนิดและ ส่วนผสมต่างๆของเชมพู เป็น

เอกสารนี้จัดทำขึ้นโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ภายใต้การดำเนินงานของศูนย์บริการข้อมูลข่าวสารทางเทคโนโลยีสารสนเทศแห่งชาติ (NIC) กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคม โดยไม่หวังผลตอบแทนใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$\mu = ML^{-1}T^{-3}$$

$$V = LT^{-1}$$

$$R = L$$

$$D = L$$

$$\omega = T^{-1}$$

เลือกใช้กลุ่มมิติ  $MLT$

เลือก  $\rho, D, \omega$  เป็นตัวแปรซ้ำ ดังนั้น  $r = 3$

ดังนั้น  $7 - 3 = 4$  จึงมีเทอม  $\pi = 4$  จะได้

$$L = D$$

$$M = \rho D^3$$

$$T = \omega^{-1}$$

จัดเป็นเทอม  $\pi$  จะได้

$$\pi_1 = FM^{-1}L^{-1} = \frac{FT^2}{ML} = \frac{F}{\rho D^3 D \omega^2} = \frac{F}{\rho D^4 \omega^2}$$

$$\pi_2 = \mu M^{-1}LT = \frac{\mu D}{\rho D^3 \omega} = \frac{\mu}{\rho D^2 \omega}$$

$$\pi_3 = VL^{-1}T = \frac{V}{D\omega}$$

$$\pi_4 = RL^{-1} = \frac{R}{D}$$

ซึ่งเรานำเทอม  $\pi_3$  มาใช้คิดดังนี้

$$\begin{aligned} \text{สภาวะที่ 1} &= \text{สภาวะที่ 2} \\ \frac{V_1}{D_1 \omega_1} &= \frac{V_2}{D_2 \omega_2} \quad \text{เนื่องจาก } V_1 = V_2 \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } \frac{D_1}{D_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

ซึ่งจะนำสมการที่ได้ไปคิดความเร็วจากเครื่องเล็กไปเครื่องใหญ่

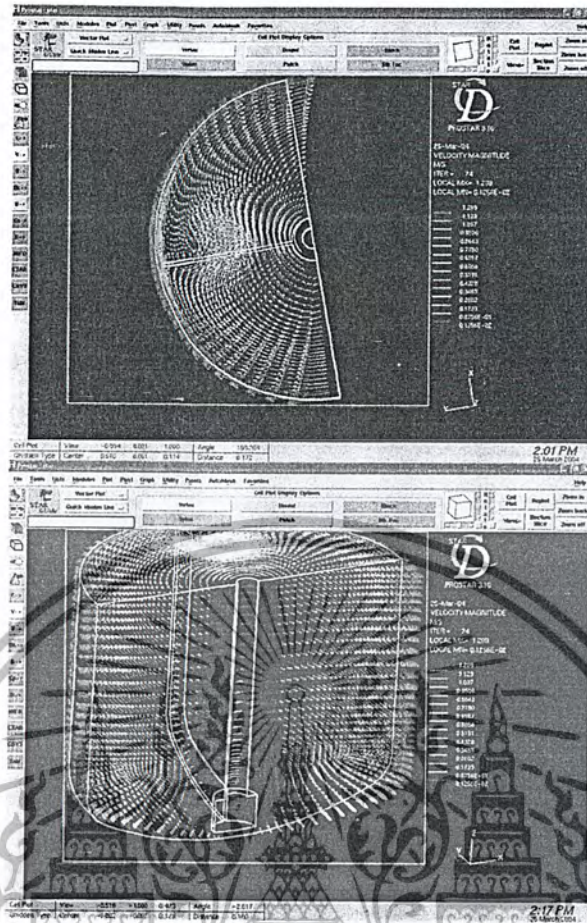
### 6.3 การนำโปรแกรม STAR-CD มาช่วยในการวิเคราะห์

#### 6.3.1 การวิเคราะห์ความเร็ว

การวิเคราะห์ความเร็วจะช่วยสังเกต

1. ทิศทางและเวกเตอร์ของความเร็ว

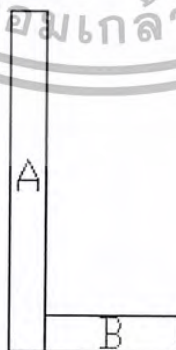
2. จุดที่ความเร็วต่ำ จะเป็นจุดที่มีการผสมน้อยหรือไม่เกิดการผสม ( Dead point )



รูปที่ 6-3 ภาพแสดงความเร็วของของไหลที่จุดต่างๆภายในถัง

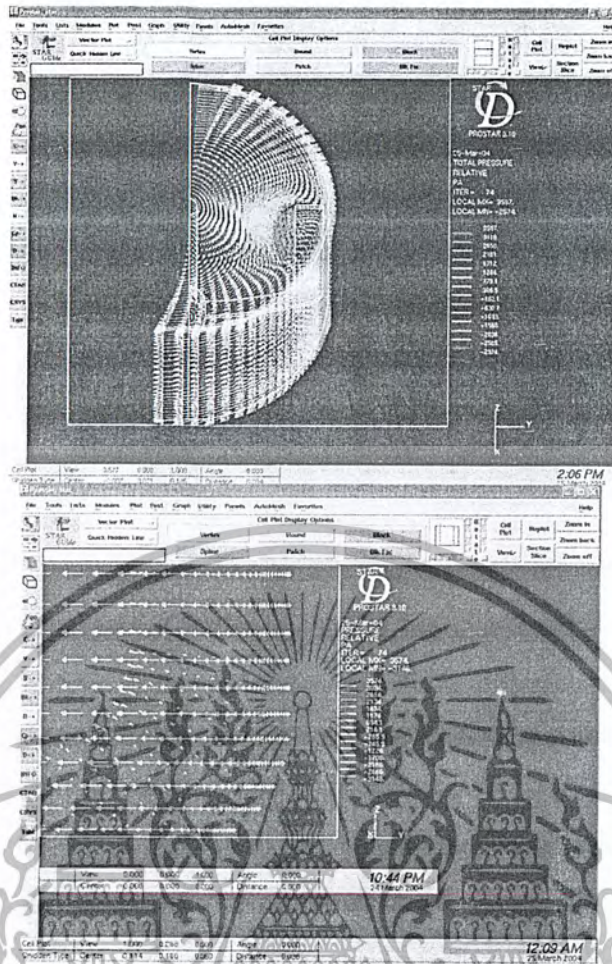
### 6.3.2 การวิเคราะห์ความดัน

การวิเคราะห์ความดันจะนำมาใช้คำนวณกำลังของมอเตอร์ได้โดยทำการคำนวณดังนี้  
ขั้นที่ 1 ทำการแบ่ง Part ของใบพัดออกเป็นดังนี้



ขั้นที่ 2 ความดันที่จะใช้คำนวณจาก โปรแกรม ( ควรใช้ Pmax เป็นการเพื่อความปลอดภัย)  
จากโปรแกรม STAR-CCM ดังรูปที่ 6-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6-4 ภาพแสดงความดันของของไหลที่จุดต่างๆในถัง

ขั้นที่ 3 หาแรงที่กระทำในแต่ละ Part ไปหาค่าสูตร

$$P = \frac{F}{A}$$

A คือ พื้นที่ของใบกวนในแต่ละ Part

ขั้นที่ 3 เมื่อได้แรงออกมานำไปหาทอร์กในแต่ละ Part จากสูตร

$$T = F \cdot R$$

R คือ รัศมีเฉลี่ยของใบกวนในแต่ละ Part

ขั้นที่ 4 หากำลังในแต่ละ Part จากสูตร

$$P = 2\pi NT$$

N คือ ความเร็วรอบที่ใช้ในการกวน (rev/s)

ขั้นที่ 5 นำกำลังที่คิดได้ในแต่ละ Part มาคิดจะได้กำลังที่ใช้ในการผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

### รายละเอียดของแชมพูและความสำคัญทางเศรษฐกิจ

#### 1. ประเภทของแชมพู

แชมพู สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ตามรูปแบบ การใช้งาน และการตลาดดังนี้

##### 1.1 แบ่งตามรูปแบบ (Product forms) มี 6 ประเภท ดังนี้

- แชมพูชนิดเหลว (liquid shampoos) เป็นที่นิยมและแพร่หลายมากที่สุดมีลักษณะเป็นของเหลวใสโปร่งแสงมีความหนืดพอสมควร

- แชมพูชนิดครีม (cream shampoos) มีลักษณะเป็นครีมกึ่งแข็งมีความหนืดและทึบแสงสูง

- แชมพูชนิดเจล (gel shampoos) เป็นแชมพูที่มีความเข้มข้นและเหนียวกว่าแชมพูชนิดเหลว มีลักษณะใสเป็นเนื้อเดียวกัน

- แชมพูชนิดผงและเม็ด (powder and granular shampoos) มีลักษณะเป็นผงหยาบๆ เม็ดเล็กๆ เหมือนผงซักฟอก

- แชมพูชนิดก้อน (cake shampoos)

- แชมพูชนิดฟอง (aerosol shampoos) มี ลักษณะเป็น โฟม (foam)

##### 1.2 แบ่งตามการใช้งาน มี 5 ประเภท ดังนี้

- แชมพูสำหรับผมธรรมดา

- แชมพูสำหรับผมมัน

- แชมพูสำหรับผมแห้ง

- แชมพูจัดรังแคมีสารที่ช่วยลดการหลุดลอกของหนังศีรษะและ ยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราและแบคทีเรีย

- แชมพูสำหรับเด็ก (mild/baby shampoo)

##### 1.3 แบ่งตามการตลาด มี 4 ประเภท ดังนี้

- แชมพูทั่วไป

- แชมพูผสมสารปรับสภาพเส้นผม

- แชมพูยามีสมบัติในการรักษาเส้นผม เช่น สารขจัดรังแค

- แชมพูสำหรับเด็ก

#### 2. วัตถุประสงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปัจจุบันแชมพูที่ขายอยู่ทั่วไปในท้องตลาดมีหลายแบบและมีส่วนประกอบประมาณ 10 - 20 ชนิด ซึ่งแตกต่างกันไปตามเครื่องหมายการค้า อย่างไรก็ตามส่วนประกอบของแชมพูสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ ส่วนประกอบหลัก และส่วนประกอบที่อาจมีได้

## 2.1 ส่วนประกอบหลัก

ได้แก่สารลดแรงตึงผิว ทำหน้าที่ทำความสะอาดเส้นผมและหนังศีรษะโดยทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปและแขวนลอยอยู่ในน้ำสารลดแรงตึงผิวแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นกับประจุไฟฟ้าบนส่วนประกอบที่ละลายน้ำเช่นชนิดประจุลบ(anionic) ประจุบวก(cationic) ไม่มีประจุ(nonionic) และสองประจุ(amphoteric)ซึ่งมีความเหมาะสมในการใช้งานต่างๆกันตัวอย่าง เช่น

2.1.1 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ นิยมใช้มากในประเทศไทยมีฟองมากตัวอย่าง เช่น

- fatty alcohol ether sulphate เช่น sodium lauryl ether sulphate

- soap (salts of fatty acids)

2.1.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ใช้เป็น antistatic agent และสารปรับสภาพเส้นผมในแชมพูตัวอย่าง เช่น

- quaternary ammonium compound เช่น polyquaternium-6, -7, -10, -16, alkyltrimethyl ammoniumchloride

2.1.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ช่วยทำให้ฟองคงสภาพตัวอย่าง เช่น

- alcohol ethoxylates

- alkanolamides รวมถึงethoxylated เช่น fatty acid monoethanolamide, lauramideisopropanolamide

- ethoxylated sorbitan-fatty acid esters เช่น polysorbates

2.1.4 สารลดแรงตึงผิวชนิดมีสองประจุ เป็นสารทำความสะอาดอย่างอ่อนนุ่มใช้ผสมกับสารลดแรงตึงผิวแบบประจุลบเพื่อลดความแรงของสารและยังช่วยให้ฟองคงสภาพอีกด้วย ตัวอย่าง เช่น

- alkylamphoglycianates/propianates เช่น lauramphoglycinate

- fatty acid amidealkylhydroxysultain เช่น cocoamidopropyl hydroxysultain

- imidazoline derivatives เช่น coconut fatty acid carboxylated imidazolium, cocoamphodiacetate

## 2.2 ส่วนประกอบที่อาจมีได้

2.2.1 สารเพิ่มฟอง (foam booster) ใช้ปรับและรักษาความคงทนของฟองให้ เป็นไปตามความต้องการของผู้บริโภคตัวอย่าง เช่น

- non-ionic surfactants

- fatty alcohols

- cellulose derivatives, ethers ของ polyethyleneglycol, fatty alcohol ethers และ fatty acid glycolesters

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 สารปรับสภาพเส้นผม (conditioning agent) ใช้ป้องกันการพันกันของเส้นผมจากการหวีลดการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ซึ่งทำให้ผมพองฟูและบำรุงเส้นผมในลักษณะอื่นๆ ตัวอย่าง เช่น

- lanolin
- coconut oil
- polydimethylsiloxane

2.2.3 สารช่วยให้ทึบแสง (opacifying agent) มีลักษณะคล้ายขี้ผึ้ง ไม่ละลายน้ำช่วยทำให้แชมพูข้น ตัวอย่าง เช่น

- magnesium
- calciumstearate
- wax

2.2.4 สารช่วยให้ใส (clarifying agent) ตัวอย่าง เช่น

- ethanol
- propylene glycol
- polyethoxylated alcohols และ esters

2.2.5 สารกันการรวมตัวและช่วยการละลาย (sequestering agent) มีหน้าที่ป้องกันการรวมตัวและการตกค้างของแชมพู บนเส้นผม เมื่อล้างด้วยน้ำกระด้าง ตัวอย่างเช่น ethylene diamine tetraacetic acid (EDTA)

2.2.6 สารช่วยทำให้ข้น (thickening agent) ใช้ในสารละลายของสารลดแรงตึงผิวเพื่อป้องกันการไหลลื่นของแชมพู ตัวอย่าง เช่น

- emulsifying agents
- sodium chloride
- ammonium chloride

2.2.7 สารลดความข้น (thinning agent) ตัวอย่าง เช่น

- alcohol หรือ polyoxyalkylene compound
- sodium xylene sulphonate

2.2.8 ตัวทำละลาย (solvent) จะใส่เพียงปริมาณเล็กน้อยเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายของส่วนประกอบที่ไม่ละลายน้ำตัวทำละลายส่วนมากจะเป็นสารจำพวกแอลกอฮอล์ซึ่งที่ความเข้มข้นสูงนอกจากเป็นตัวทำละลายแล้วยังใช้เป็นสารกันเสียอีกด้วยตัวอย่าง เช่น

- ethanol
- diethanolamine
- propylene glycol

2.2.9 สารกันเสีย (preservative) ใส่เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราแบคทีเรียและจุลินทรีย์อื่นๆ ปริมาณที่ใส่ขึ้นกับปริมาณสารอาหารในผลิตภัณฑ์แชมพูบางชนิดมีส่วนผสมของโปรตีนซึ่งเป็นสาร

อาหารจึงต้องใส่ปริมาณสารกันเสียมากกว่าแชมพู ปกติตัวอย่าง เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- p-hydroxybenzoic acid ester
- propylparaben
- sodium benzoate

2.2.10 สารทำอิมัลชัน (emulsifier) ใส่เพื่อทำให้ส่วนผสมอื่นๆ ที่ไม่ละลายน้ำสามารถเข้ากันได้ดี ตัวอย่าง เช่น

- fatty alcohols เช่น lauryl alcohol
- lanolin alcohols
- lecithin

2.2.11 สารช่วยให้คงสภาพ (stabilizer) ได้แก่ สารปรับสภาพความเป็นกรด – เบส ตัวอย่าง เช่น

- citric acid
- formic acid
- almond acid
- salicylic acid

2.2.12 สารต้านอนุมูลอิสระและกันแดด เช่น สารขจัดรังแค (antidandruff) และสารป้องกันผมร่วง

2.2.13 สารลดความกระด้างของน้ำ (builder หรือ complexing agent) ใส่เพื่อจับกับอนุภาคโลหะในน้ำกระด้างและสิ่งสกปรกซึ่งจะไปลดความสามารถในการทำความสะอาดของสารลดแรงตึงผิวโดยที่เมื่อสารลดความกระด้างของน้ำจับกับอนุภาคโลหะจะเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนนอกจากนี้ยังป้องกันการเสื่อมของผลิตภัณฑ์ เช่น สีกลิ่นและส่วนประกอบเปลี่ยนไปเนื่องจากการปฏิกิริยาเคมีในขณะเก็บไว้ ตัวอย่าง เช่น

- EDTA
- citrate จาก added citric acid

2.2.14 สารเพิ่มความชุ่มชื้น (moisturizer) ตัวอย่าง เช่น

- sorbitol
- glycerol
- cetyl alcohol

2.2.15 สารเพิ่มความเงางาม (lustre agent) เพื่อเพิ่มความเงางามให้กับเส้นผมตัวอย่าง เช่น

- esters of ethylene glycol and fatty acid เช่น glycolstearate
- esters of polyethyleneglycol and fatty acid เช่น polyethyleneglycolstearate
- EO (PEG-4 stearate)

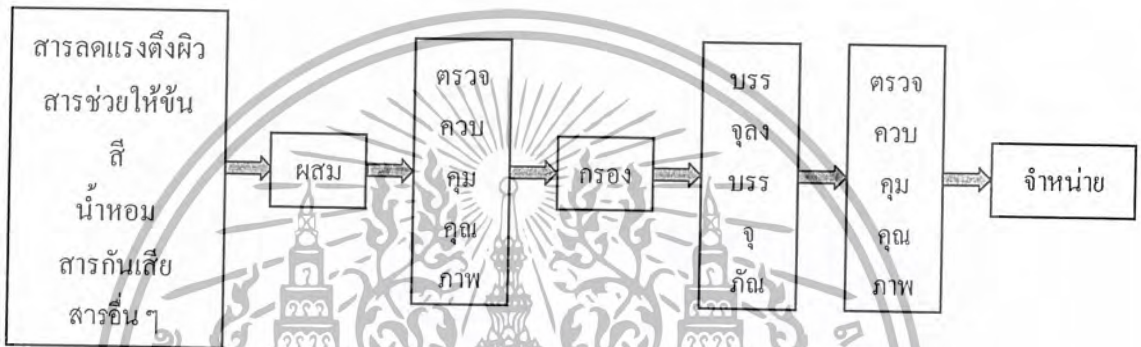
2.2.16 น้ำ

2.2.17 สารประกอบอื่นๆ เช่น สีน้ำหอม สารป้องกันรังสีอัลตราไวโอเล็ต สารขับเคลื่อน (propellant) ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. กรรมวิธีผลิต

การผลิตแชมพูจะมีทั้งกระบวนการผสมส่วนประกอบต่างๆในอุณหภูมิสูง และอุณหภูมิห้องแล้ว คนจนส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน วัตถุดิบที่เป็นของแข็งจะถูกหลอมหรือ ทำให้ละลายก่อนนำมาผสมสาร โพลีเมอร์บางชนิดหรือสารที่มีความเหนียวต้องนำมาละลายในน้ำอุ่นก่อนนำมาผสม และหลังจากที่ใส่น้ำหอมและสารกันเสียแล้ว อุณหภูมิไม่ควรเกิน 35 องศาเซลเซียสจากนั้นจึงวัดค่าความเป็นกรด - เบส และปรับค่าความเป็นกรด - เบส ให้อยู่ระหว่าง 5 - 8 โดยกรดหรือเบสตามความเหมาะสมปรับความหนืดและค่าต่างๆให้เป็นไปตามความต้องการแล้วนำส่วนผสมมาบรรจุลงในบรรจุภัณฑ์ (รูปที่ 1) กรรมวิธีผลิตอาจเปลี่ยนแปลงไปตามองค์ประกอบทางเคมี และเทคโนโลยีของผู้ผลิต



รูปที่ 1 กระบวนการการผลิตแชมพู

### 4. อุตสาหกรรม

#### 4.1 การตลาด

แชมพูเป็นผลิตภัณฑ์อุปโภคบริโภคที่จำเป็นในชีวิตประจำวันใช้ทำความสะอาดเส้นผมและหนังศีรษะ ในปี 2540 ตลาดแชมพูมีมูลค่าถึง 6,100 ล้านบาท และอัตราขยายตัวกว่าร้อยละ 4.1 โดยแชมพูที่ผลิตในประเทศครองส่วนแบ่งทางการตลาดเป็นส่วนใหญ่มี เพียงปริมาณเล็กน้อยที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยผ่านตัวแทนจำหน่าย การแข่งขันในตลาดแชมพู ส่วนใหญ่จะอยู่ที่แชมพูเพิ่มความสวยงาม (beauty shampoos) มีสัดส่วนถึงร้อยละ 60 และมูลค่าตลาดกว่า 4,000 ล้านบาท สำหรับตลาดแชมพูจัดเรียงแค มีส่วนแบ่งตลาดร้อยละ 15 หรือมูลค่ากว่า 1,000 ล้านบาท และมีอัตราการขยายตัวปีละประมาณร้อยละ 10 แชมพูอินวันมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 14 ของตลาดแชมพู มีมูลค่า 980 ล้านบาท แต่มีอัตราการขยายตัวลดลง ส่วนตลาดแชมพูสำหรับเด็กเป็นตลาดค่อนข้างเล็กคือ สัดส่วนประมาณร้อยละ 5 ของตลาดแชมพูรวม สำหรับกลยุทธ์ ที่ใช้ในการชิงส่วนแบ่งการตลาดคือ การโฆษณาและการแจกตัวอย่างสินค้า

#### 4.2 การผลิตและการจำหน่าย

การจำหน่ายจะใช้ซูเปอร์มาร์เก็ต, คอนเวเนียนสโตร์และร้านค้าทั่วไปเป็นช่องทางจำหน่ายหลัก นอกจากนี้ร้านเสริมสวยก็เป็นอีกช่องทางหนึ่งที่หลายค่ายต่างนำมาใช้จำหน่ายสินค้าของตน และแม้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตลาดชมพู ในร้านเสริมสวย จะเป็นตลาดค่อนข้างเล็กมีมูลค่า 500 ล้านบาท แต่ก็เป็ตลาดที่มีแนวโน้มการเติบโตที่สูงมาก

#### 4.3 การนำเข้าและการส่งออก

ด้านตลาดต่างประเทศ ในปี 2540 ได้มีการนำเข้าผลิตภัณฑ์จากสหรัฐอเมริกามากที่สุดรองลงมาคือจากสหราชอาณาจักร (ตารางที่ 1) ส่วนด้านตลาดการส่งออกได้มีการส่งออกไปยังประเทศใกล้เคียงโดยมีฟิลิปปินส์เป็นตลาดส่งออกที่สำคัญ ส่วนตลาดที่รองลงมาคืออินโดนีเซีย (ตารางที่ 2)

#### 4.4 แนวโน้มของตลาดในอนาคต

ในอนาคตข้างหน้าคาดว่าจะมีชมพูยี่ห้อใหม่ๆ เข้ามาซึ่งส่วนใหญ่ยังคงเป็นค่ายหลักในตลาดชมพูในด้านการแข่งขันจะมีความรุนแรงยิ่งขึ้น โดยจะเป็นการขายนวัตกรรมใหม่ๆ โดยใช้เทคโนโลยีขั้นสูงนอกจากนี้ จะเกิดการแข่งขันผลิตภัณฑ์ใหม่ๆ ที่อยู่ใประภทบำรุงรักษาเส้นผมเพิ่มขึ้น

ประเทศ	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)	ประเทศ	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
อาร์เจนตินา	12	6,959	อิตาลี	622	144,855
ออสเตรเลีย	32,998	3,070,648	ญี่ปุ่น	17,442	2,661,874
เบงกอล	32,886	2,972,188	เกาหลี	6	3,919
แคนาดา	29	5,545	ไต้หวัน	1,400	97,796
ฝรั่งเศสแอฟริกา	32	12,788	เกาหลี	73,440	7,657,872
จีน	72,534	7,004,249	เยอรมัน	4	1,914
เยอรมัน	31,285	2,744,846	นิวซีแลนด์	4,187	629,813
สเปน	2,929	234,835	นิวซีแลนด์	173	32,448
สวีเดน	29,685	3,713,074	สิงคโปร์	10,609	3,608,600
สหราชอาณาจักร	172,834	8,944,587	ไต้หวัน	1,762	252,360
ฮ่องกง	1,824	91,631	สหรัฐอเมริกา	291,947	38,700,877
อินโดนีเซีย	67,167	7,658,402	อัฟริกาใต้	25	2,379
อิสราเอล	4,153	709,210	รวม	849,714	91,871,469
อินเดีย	346	106,300			

ที่มา: กรมศุลกากร

ตารางที่ 1 ปริมาณและมูลค่าการนำเข้าของชมพูในปี 2540

ประเทศ	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)	ประเทศ	ปริมาณ (กิโลกรัม)	มูลค่า (บาท)
อัฟกานิสถาน	1,250	166,464	โยซันแทนด์	14,111	1,959,122
แอลจีเรีย	418	383,211	อิตาลี	465	31,018
ออสเตรเลีย	831,249	57,699,835	จอร์แดน	86	5,813
บราซิล	320	545,160	ญี่ปุ่น	380,660	17,809,544
เบลเยียม	1,599	118,831	เคนยา	470	39,928
บราซิล	1,177	109,765	กัมพูชา	1,346,275	101,282,463
บรูไน	74,804	6,782,720	โคโมโรส	294	50,888
โบลิเวีย	816	34,277	เกาหลีใต้	470	39,200
บราซิล	607	88,524	เกาหลีเหนือ	35,651	2,555,515
ภูฏาน	130	72,868	ลาว	285,009	21,751,459
แคนาดา	6,533	705,032	พม่า	504,653	47,286,868
กรีซ	4,125	570,716	มาเก๊า	25,647	6,103,456
จีน	1,320	236,226	มอริเชียส	1,750	226,738
เยอรมนี	15,014	759,388	มอลดีฟ	2,720	306,155
เดนมาร์ก	66,048	3,452,108	เม็กซิโก	10,616	1,613,764
อินเดีย	17,755	1,777,492	มาเลเซีย	2,654,616	179,368,596
สเปน	257	24,975	นิวซีแลนด์	4,316	492,678
ฟิลิปปินส์	72	7,520	เนเธอร์แลนด์	8,861	653,910
ฝรั่งเศส	7,241	526,732	นอร์เวย์	1,365	103,621
กาบอง	620	50,634	นิวซีแลนด์	244	16,608
สาธารณรัฐประชาธิปไตย	373	18,461	ปากีสถาน	2,466	98,620
Guadeloupe	292	18,640	ฟิลิปปินส์	8,220,258	654,546,906
กรีซ	927	35,154	สิงคโปร์	1,264,692	102,851,319
ฮาวาย	216	33,242	ไต้หวัน	51,283	6,415,483
ฮ่องกง	272,714	36,120,727	เวียดนาม	28,430	3,629,054
อินเดีย	1,793,858	234,709,078	เวียดนาม	239,963	29,121,462
อินเดีย	150	13,229	รวม	18,384,876	1,524,121,597

ที่มา: กรมศุลกากร

## ตารางที่ 2 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกของชมพูในปี 2540

### 5. ผลกระทบของชมพูต่อสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบของชมพูต่อสิ่งแวดล้อม เมื่อพิจารณาตลอดช่วงชีวิตของผลิตภัณฑ์ (ตารางที่ 3) สามารถแบ่งได้เป็น 3 ระยะ ในขณะที่ผลิตในขณะที่ใช้งานและเมื่อทิ้งหลังการใช้งานแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อทางสิ่งแวดล้อม (environmental aspect)	วัฏจักรชีวิตของแชมพู				
	ก่อนผลิต	ขณะผลิต	ขณะขนส่ง	ขณะใช้	ทิ้งหลังใช้
การใช้ทรัพยากร (resource use) เช่น วัสดุ ดิน พลังงาน น้ำ		○		○	×
การเกิดวัตถุอันตราย (hazardous substance)		×		×	×
การปล่อยมลสารไปสู่ (emission/release of pollutant into)					
- อากาศ		○ <sup>ii</sup>		×	×
- น้ำ		○ <sup>ii</sup>		● <sup>iii</sup>	● <sup>iii</sup>
- ดิน		○ <sup>ii</sup>		● <sup>iii</sup>	● <sup>iii</sup>
ขยะมูลฝอย/ของเสีย (waste)		○ <sup>ii</sup>		×	● <sup>iii</sup>
ผลกระทบต่ออื่นๆ (other impacts)		● <sup>iii</sup>		×	×
ความเหมาะสมสำหรับการใช้ (fitness for use)				● <sup>iii</sup>	
ความปลอดภัย (safety)				● <sup>iii</sup>	

- หมายเหตุ
- มีผลกระทบ ต้องพิจารณาในตารางแยกต่างหาก
  - มีผลกระทบ แต่ไม่รวมอยู่ในสื่อข้างต้น
  - × ไม่เกี่ยวข้อง
  - มีข้อบังคับตามกฎหมาย
  - - มีข้อกำหนดตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม
  - ii ไอโซโทป มีน
  - iii สารตกค้างในกระบวนการผลิต
  - ขยะบรรจุภัณฑ์
  - เสียงดัง กลิ่นเหม็น
  - แชมพูที่ตกค้างในขวด

ตารางที่ 3 ผลกระทบเบื้องต้นของแชมพูต่อสิ่งแวดล้อม

5.1 ในระหว่างการผลิต

มีการใช้ทรัพยากร เช่น น้ำ วัสดุ ดิน ไฟฟ้า และพลังงาน

5.2 ในระหว่างการใช้งาน

ในระหว่างการใช้งานอาจมีการสะสมของสารเคมีที่เป็นองค์ประกอบของแชมพูแต่ละชนิดบนเส้นผมและหนังศีรษะ ทั้งนี้ปริมาณการสะสมยังขึ้นกับชนิดของแชมพู และการใช้งานที่ถูกต้องของผู้บริโภคด้วย

5.3 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวโดยทั่วไปประกอบด้วยส่วนที่ละลายในน้ำ และส่วนที่ละลายในไขมันซึ่งส่วนที่ละลายในไขมันจะซึมผ่านเข้าไปในเหงื่ออกปลา ทำให้ความสามารถในการควบคุมปริมาณเกลือเสียไป นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดย่อยสลายทางชีวภาพได้แตกต่างกัน บางชนิดสลายตัวได้ยากและเกิดการสะสมและตกค้างในแหล่งน้ำ ทำให้สมดุลในสภาวะแวดล้อมทางน้ำเปลี่ยนแปลง และอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำได้ อย่างไรก็ตามการย่อยสลายทางชีวภาพของสารลดแรงตึงผิวจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ปริมาณจุลินทรีย์ในแหล่งน้ำหรือ ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย หากปัจจัยเหล่านี้มีจำกัดจะทำให้การสลายตัวช้าลง

5.4 สารลดความกระด้างของน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารลดความกระด้างบางชนิดเช่น ฟอสเฟต และ โพลีฟอสเฟต ประกอบด้วยฟอสฟอรัสซึ่งเป็นธาตุอาหารเมื่อปล่อยสู่แหล่งน้ำในปริมาณที่มากจะทำให้เกิดความอุดมสมบูรณ์ของแหล่งน้ำมากเกินไป พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว และเมื่อตายลงก่อให้เกิดปัญหาการเน่าเสียของแหล่งน้ำ

สารลดความกระด้างของน้ำชนิดอื่น เช่น zeolite, polyacrylates, NTA, EDTA และ phosphonate สลายตัวได้ค่อนข้างช้า ส่วน EDTA และ phosphonate เชื่อว่าทำให้เกิด mobility ของโลหะหนักเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ NTA ยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

### 5.5 สารกันเสีย

สารกันเสียบางชนิดย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก และบางชนิดมีความเป็นพิษเป็นอันตรายต่อสุขภาพ เช่น ฟอร์มัลดีไฮด์ และ isothiazolinones สามารถทำให้เกิดอาการแพ้ได้ นอกจากนี้สารกันเสียยังทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดของเสียลดลงโดยฆ่าแบคทีเรียที่มีความจำเป็นในกระบวนการบำบัด

### 5.6 สารทำอิมัลชัน

สารทำอิมัลชันบางชนิดย่อยสลายได้ยากหรือไม่ย่อยสลายทำให้เกิดการตกค้าง และสะสมในสิ่งแวดล้อมบางชนิดมีความเป็นพิษทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในห่วงโซ่อาหาร

### 5.7 ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายบางชนิดใช้ mineral oil เป็นวัตถุดิบ และใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตซึ่ง mineral oil เป็นทรัพยากรที่ไม่สามารถกลับมาใช้ใหม่ได้อีก (non-renewable resource) นอกจากนี้การปลดปล่อยตัวทำละลายสู่อากาศทำให้เกิดโอโซนในบรรยากาศชั้นล่างซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

### 5.8 การทิ้งหลังการใช้งาน

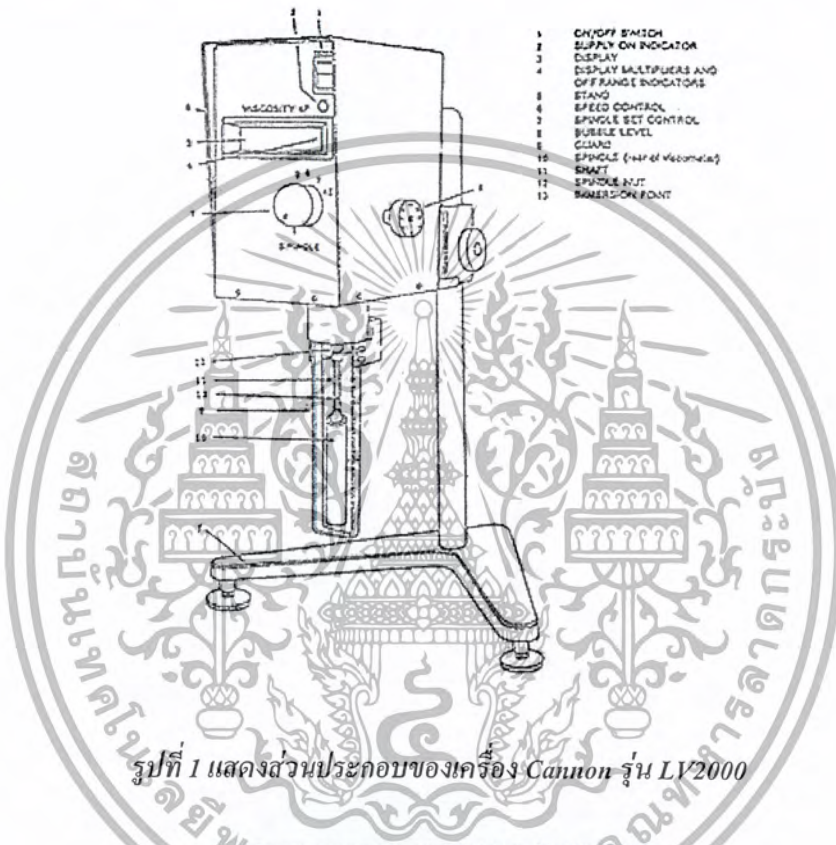
ภาชนะที่ใช้บรรจุภัณฑ์จากพลาสติกหรือวัสดุกันน้ำ เมื่อใช้ผลิตภัณฑ์หมดแล้ว บรรจุภัณฑ์เหล่านี้จะกลายเป็นขยะมูลฝอยก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

## ภาคผนวก ข

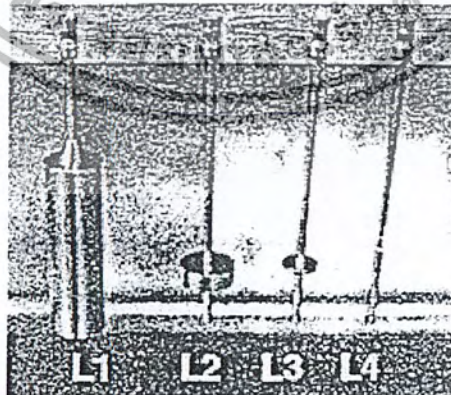
### วิธีการวัดค่าความหนืดและความหนาแน่น

#### 1. การวัดค่าความหนืด

การหาค่าความหนืดในการทดลองนี้ ใช้เครื่องวัดค่าความหนืดของCannon รุ่น LV2000 ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของเครื่อง Cannon รุ่น LV2000



รูปที่ 2 แสดงลักษณะของหัวสปินเดิล (spindles) L1 - L4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SPEED	VISCOSITY RANGE (In cP) FOR SPINDLE NUMBER:							
	L1	L2	L3	L4	L4E	L5	L6	L7
60 RPM	0-100	0-500	0-2k	0-10k	0-10k	See LV 2000 spindle/speed selector table		
30 RPM	0-200	0-1k	0-4k	0-20k	0-20k			
12 RPM	0-500	0-2.5k	0-10k	0-50k	0-50k			
6.0 RPM	0-1k	0-5k	0-20k	0-100k	0-100k			
3.0 RPM	0-2k	0-10k	0-40k	0-100k	0-200k			
1.5 RPM	0-4k	0-10k	0-50k	0-100k	0-400k			
0.6 RPM	0-10k	0-10k	0-100k	0-100k	0-1M			
0.3 RPM	0-10k	0-10k	0-100k	0-100k	0-1M			
Increments:	1 cP		10 cP		100 cP			

In this table, k = 1,000 and M = 1,000,000.

### ตารางที่ 1 แสดงค่าที่เหมาะสมกับ Speed และชนิดของ Spindle

โดยมีขั้นตอนการวัดความหนืดดังนี้

1. วางเครื่อง Cannon LV2000 บนพื้นเรียบและสะดวกในการทดสอบหมุนป้อนปรับระดับของฐานทั้งสามด้านจนฟองอากาศของ bulble level ที่อยู่ด้านบนของเครื่องขยับมาอยู่ตรงกลางพอดี
2. จากตารางที่ 3 เลือกลักษณะของ spindle และ speed ที่เหมาะสมกับการทดสอบสาร ทั้งนี้เพื่อให้วัดค่าความหนืดได้ถูกต้องที่สุด
3. ต่อ guard และ spindle ที่เลือกไว้เข้ากับ spindle nut ตามลำดับอย่างระมัดระวัง
4. หมุนป้อนปรับ speed และ spindle เพื่อใช้ speed และ spindle ตามที่ได้เลือกไว้ในข้อ 2
5. เลื่อน spindle พร้อมทั้ง guard ลงไปในบีกเกอร์ขนาด 250 ml
6. เทสารที่ต้องการวัดค่าความหนืดลงไปในบีกเกอร์อย่างช้าๆ จนระดับของสารมาตรฐานพอดีกับรอยหยักหรือขีดบอกระดับ (Immersion point) ที่ตัว spindle ระวังอย่าให้เกิดฟองอากาศในสารและบริเวณผิวของ spindle เพราะจะทำให้ค่าความหนืดที่เครื่องอ่านได้คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง
7. กดปุ่มเปิดสวิทช์เครื่อง สังเกตไฟแดงจะติดขึ้นและ spindle จะเริ่มหมุน
8. หลังจากการหมุน 1 - 2 รอบ ให้สังเกตที่ด้านข้างมือของหน้าจอ display หากมีเครื่องหมาย (-) ปรากฏอยู่ แสดงว่าค่าความหนืดออกนอกช่วงของ spindle และ speed ที่ใช้ ให้ปิดเครื่องแล้วทำการเปลี่ยน spindle และ speed ใหม่จึงทำการทดลองต่อไป
9. รอนค่าที่อ่านได้จากจอ display คงที่บันทึกค่าความหนืดในหน่วย Centipoise(cP)
10. หมุนปรับระดับ spindle ขึ้นจากบีกเกอร์

11. ทำการทดลองใหม่อีก 2-3 ครั้ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยหน่วยของความหนืดที่อ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 12. ทำความสะอาด spindle และบีกเกอร์

## 2. การวัดหาค่าความหนาแน่น

การหาค่าความหนาแน่นทำโดยการเตรียมสารใส่ลงใน กระจกตวงขนาด 100CC ให้ได้ปริมาณ 100 CC นำไปชั่งน้ำหนักที่ได้ แล้วนำไปลบด้วยน้ำหนักของกระจกตวงเปล่าที่ชั่งน้ำหนักได้ ค่าที่ได้ก็จะเป็นน้ำหนักของสารตัวอย่างในปริมาตร 100 CC นำไปแทนค่าหาความหนาแน่นได้ในสูตร

$$\rho = \frac{M}{V}$$

โดยที่  $\rho$  คือ ค่าความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )

$M$  คือ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่หาได้ (g)

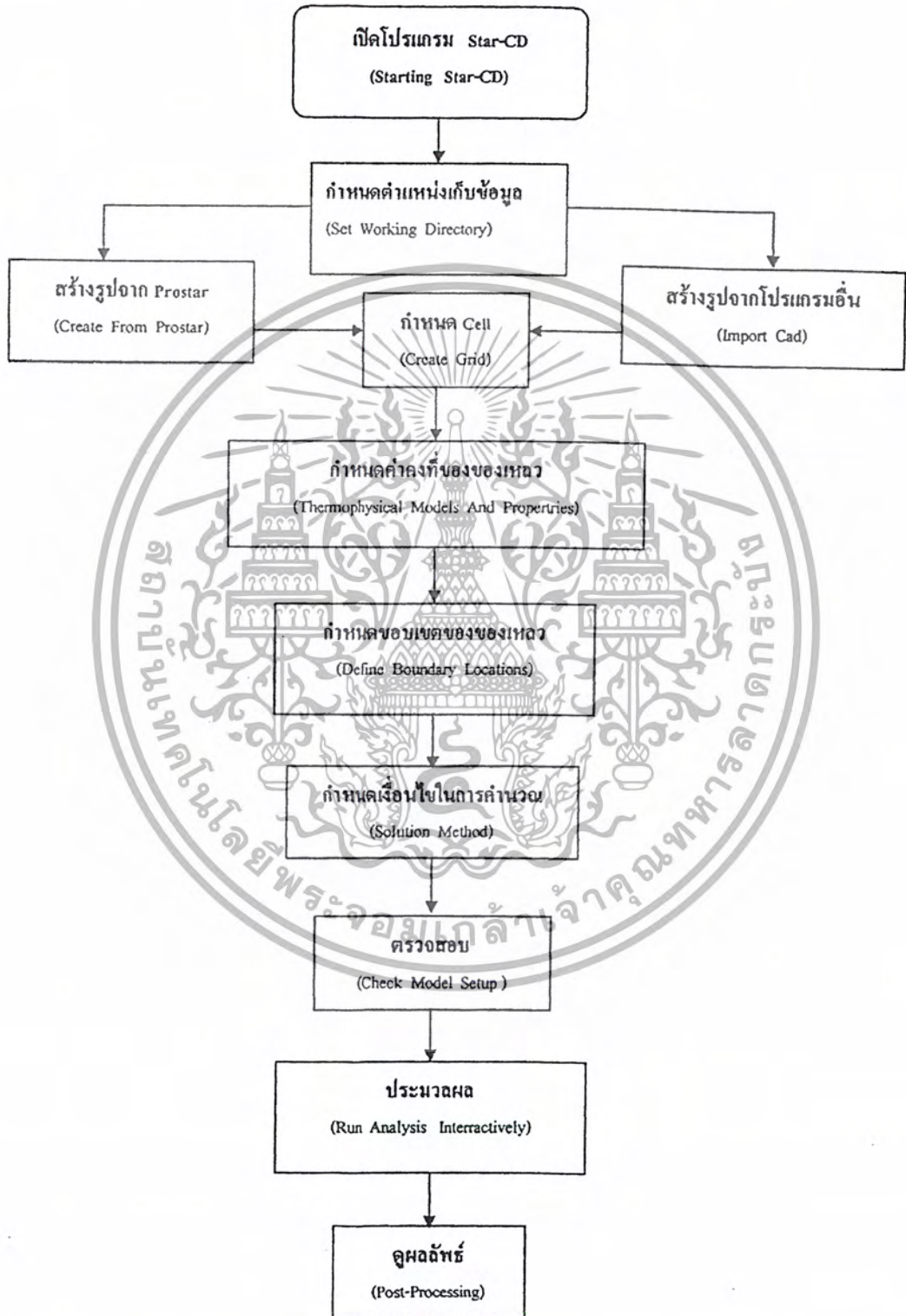
$V$  คือ ปริมาตรของสารตัวอย่าง ( $\text{cm}^3$ )

ทำการทดลองใหม่อีก 2-3 ครั้ง นำค่าที่ได้มาหาค่าเฉลี่ย



## ภาคผนวก ค

## การใช้ โปรแกรม STAR-CD



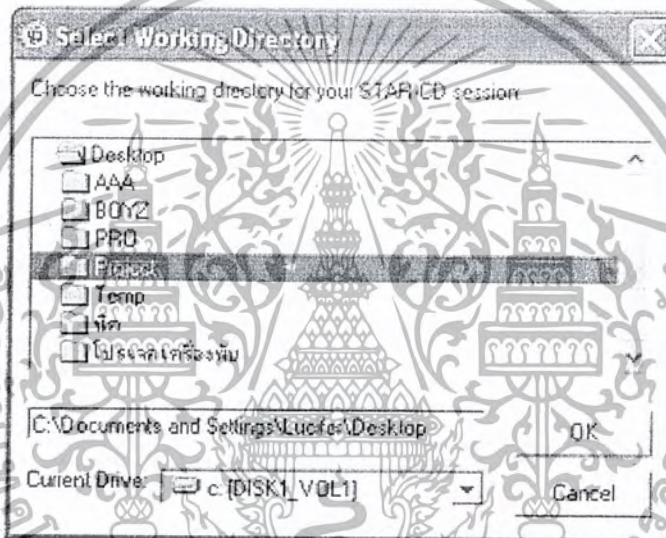
## ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม STAR-CD

### 1. การเปิดโปรแกรม STAR-CD Lecher

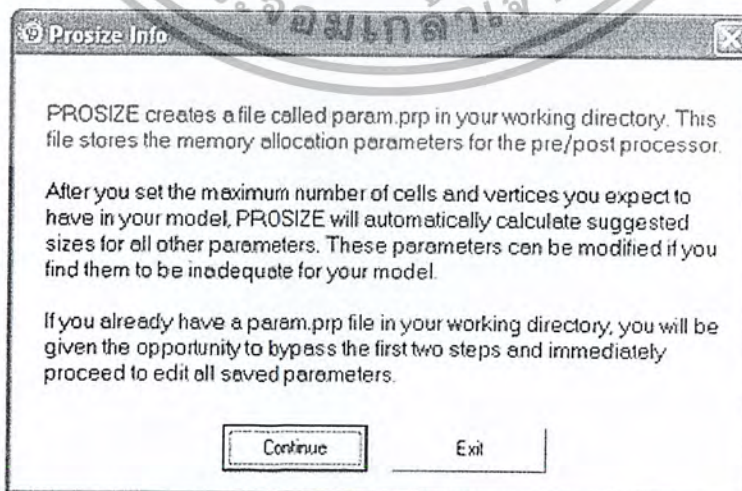
- จากเมนูโปรแกรมของ Window เลือก Program > STAR-CD ดังรูป



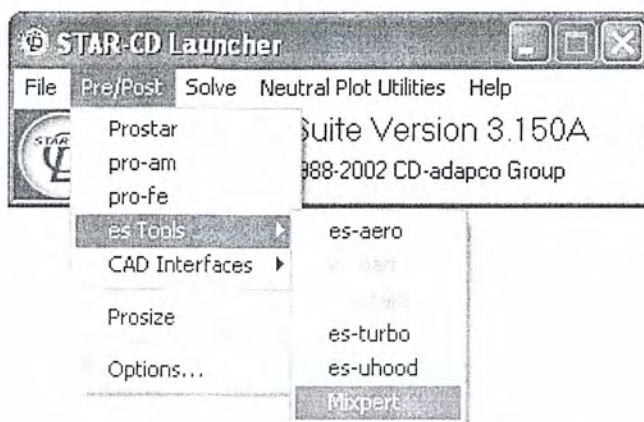
- เลือก File>Set Working Directory
- กำหนดค่าตำแหน่งที่เก็บข้อมูลของการทำงานในหัวข้อ Working directory



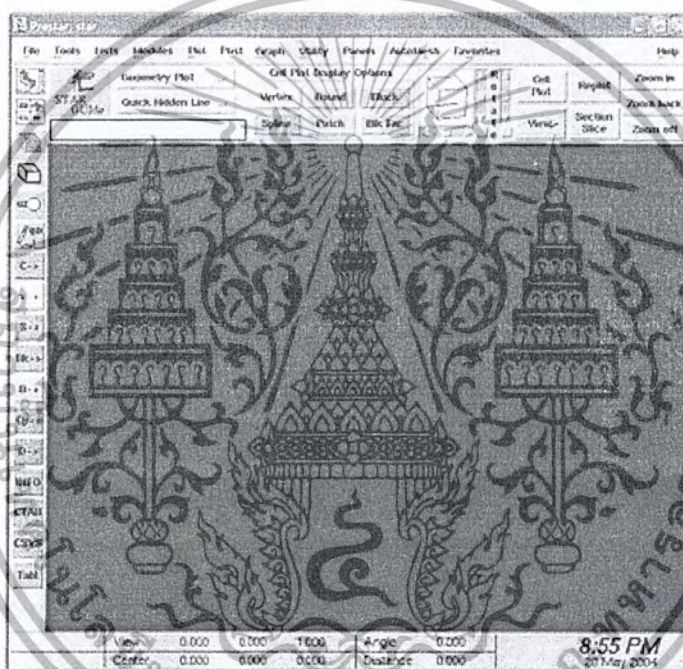
- เลือก pre/post>prosize กด continue เพื่อดังค่าการทำงานของ prostar



- เลือก Pre/Post > es Tool > Mixpert เพื่อเข้าสู่หน้าจอใช้แสดงผลดั่งรูป



- จะปรากฏหน้าจอดังรูป



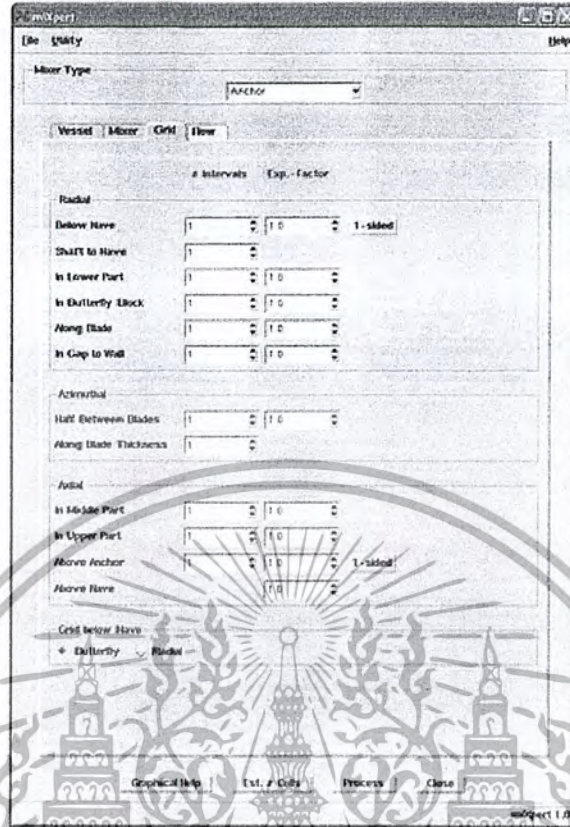
## 2. ขั้นตอนการสร้างแบบจำลอง (preprocess)

- ใส่รายละเอียดของถังกวนและกำหนด Mash โดยเข้า Prostar > Automash > Mixpert

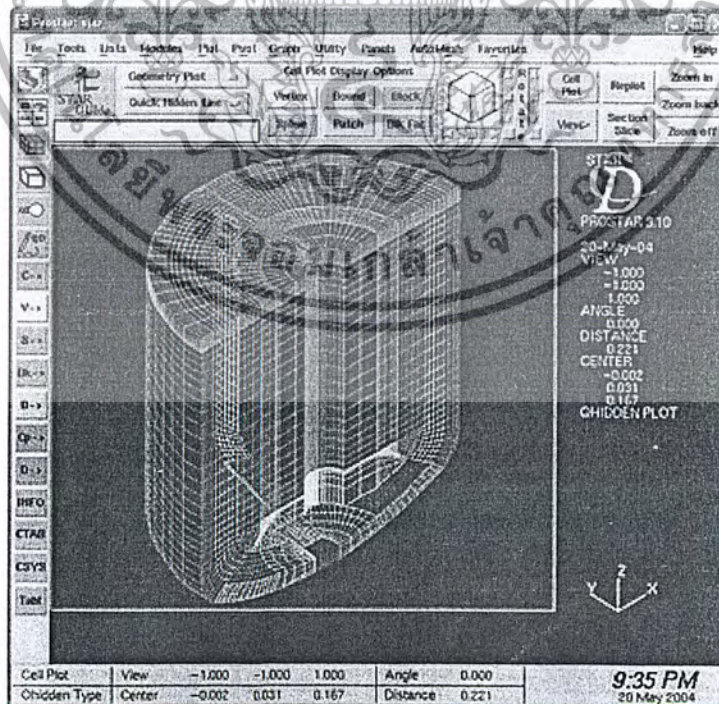


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ได้ค่ารายละเอียดของถัง พร้อมทั้งกำหนด Mash ใน Mixpert



- กด Process เป็นกรหน้าแบบจำลองที่เรากำหนดเข้าสู่ Prostar และแสดงผลดังนี้

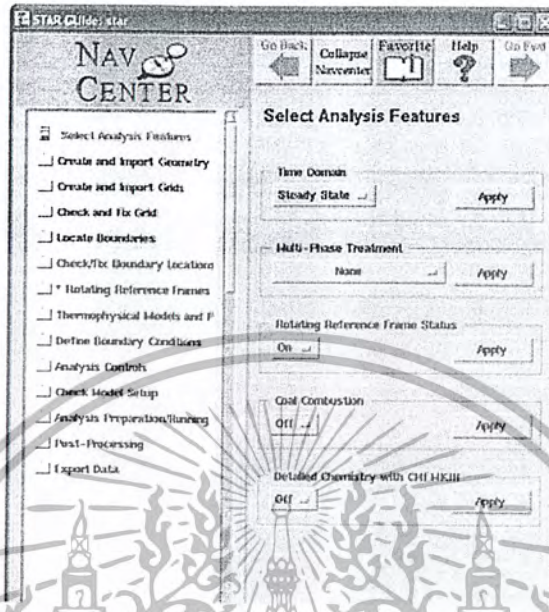


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัตถุต่างๆ

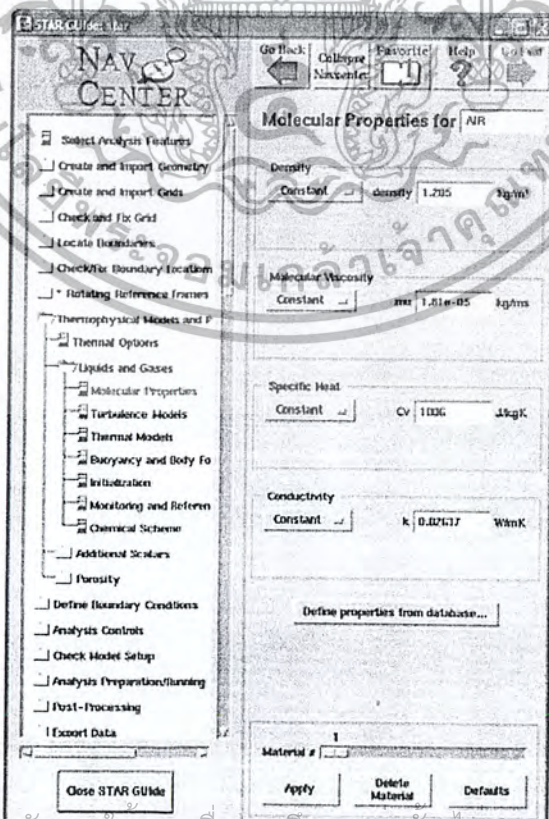
- กำหนดค่าการทำงานให้เป็นแบบ Steady state

Star Guide>Select Analysis Features>Time Domain เลือก Steady state กด Apply



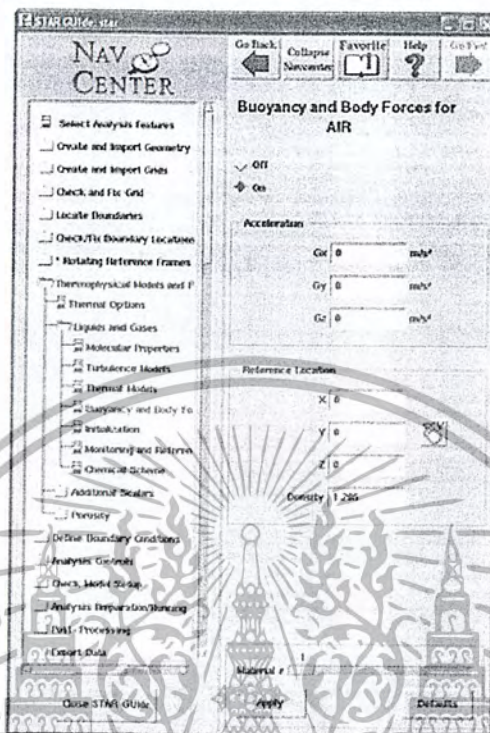
- กำหนดคุณสมบัติของเหลวจาก

Star Guide>Thermophysical Models>Liquid and Gas>Molecular Properties ได้ค่าความหนาแน่นและความหนืดของของเหลว



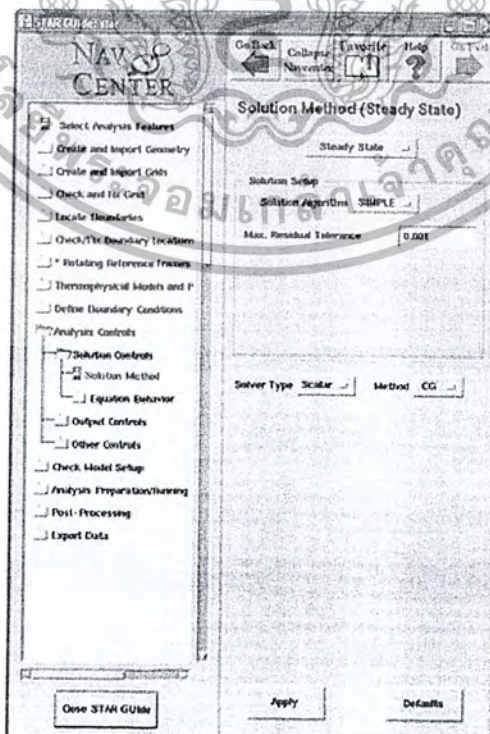
- กำหนดแรงลอยตัวของของเหลวจาก

Star Guide>Thermophysical Models>Liquid and Gas>Buoyancy and Body Forces on



- กำหนดกระบวนการทำ

Star Guide>Analysis Control>Solution Control>Solution Method

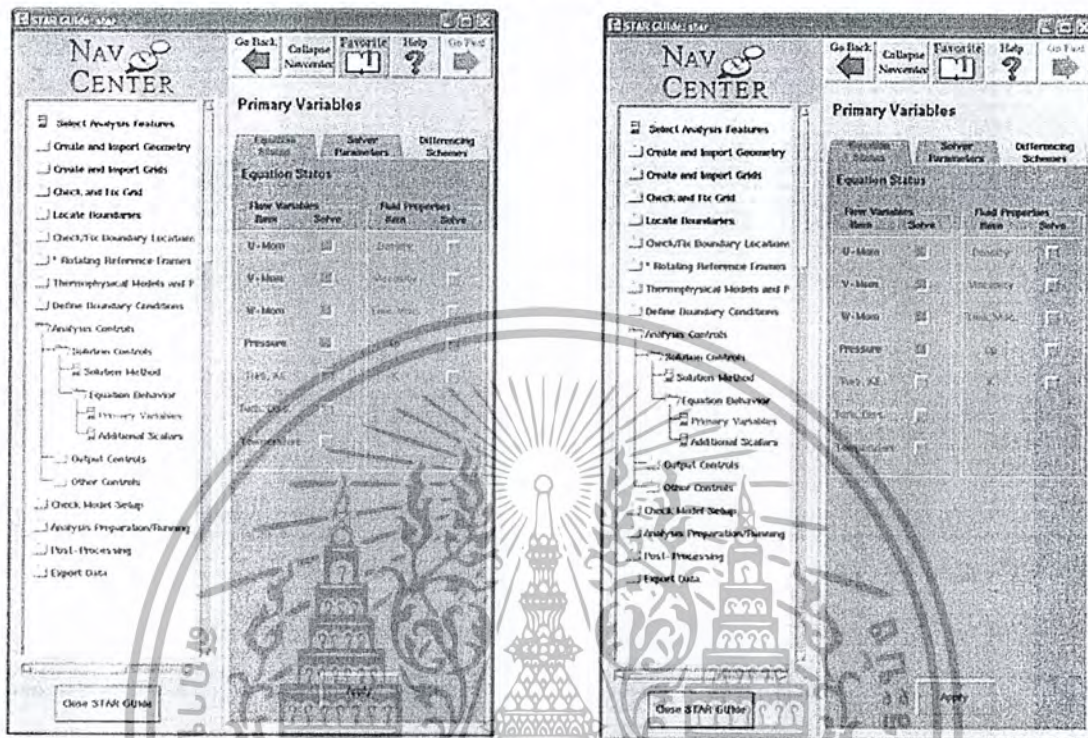


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือกสมการที่จะใช้ในการคำนวณด้วยโปรแกรม โดยใช้สมการความเร็ว 3 มิติ และสมการที่เกี่ยวข้องกับความหนืด

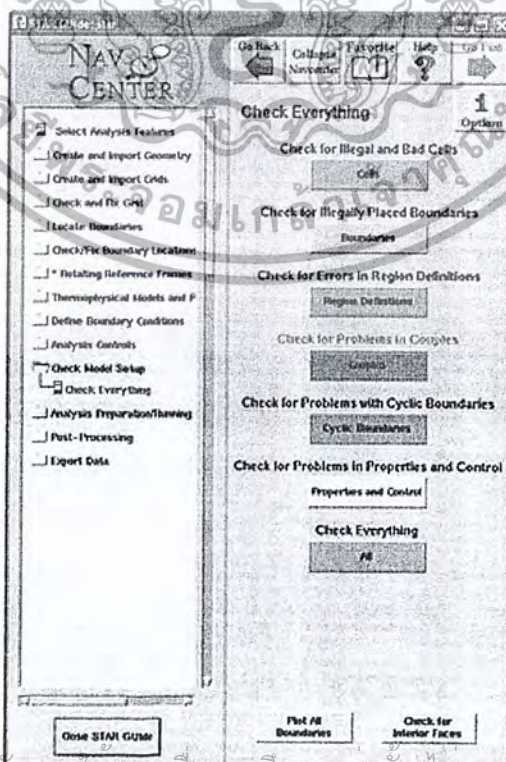
Star Guide>Analysis Control>Equation Behavior>Primary Valuable

Star Guide>Output Control>Analysis Output



- ตรวจสอบว่ามี การผิดพลาด ( Error ) หรือไม่

Star Guide>Check Model Setup>Check Everything>All



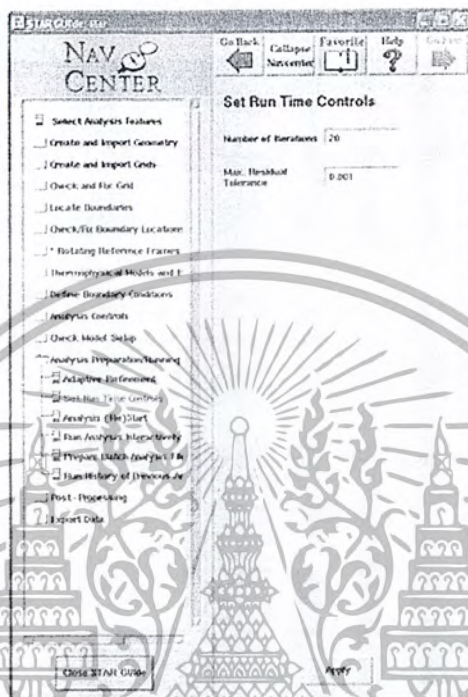
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. ทำการคำนวณเพื่อหาคำตอบ (Solution)

- กำหนดให้โปรแกรมวนรอบในการแก้สมการตามค่าการวนรอบที่ได้กำหนดไว้ โปรแกรมจะแสดงผลหรือจะหยุดการคำนวณเมื่อครบรอบการทำงาน

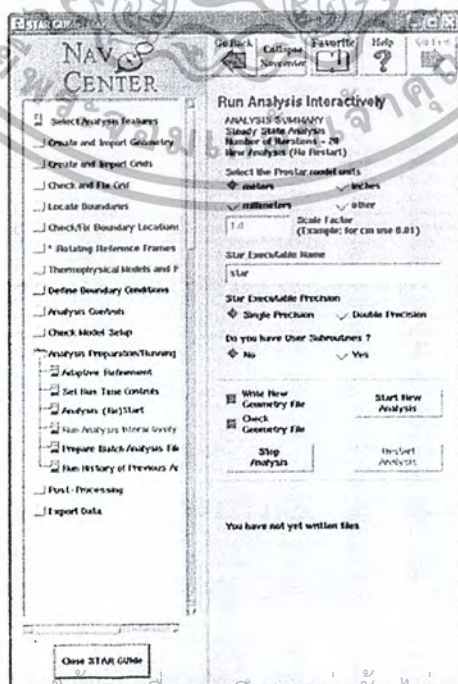
Star Guide>Analysis Preparation>Set Run Time Control

Star Guide>Analysis Preparation>Number of Iterations



- สั่งให้โปรแกรมเริ่มการคำนวณ และรอนโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จ

Star Guide>Analysis Preparation>Run Analysis Interactively>Start New Analysis

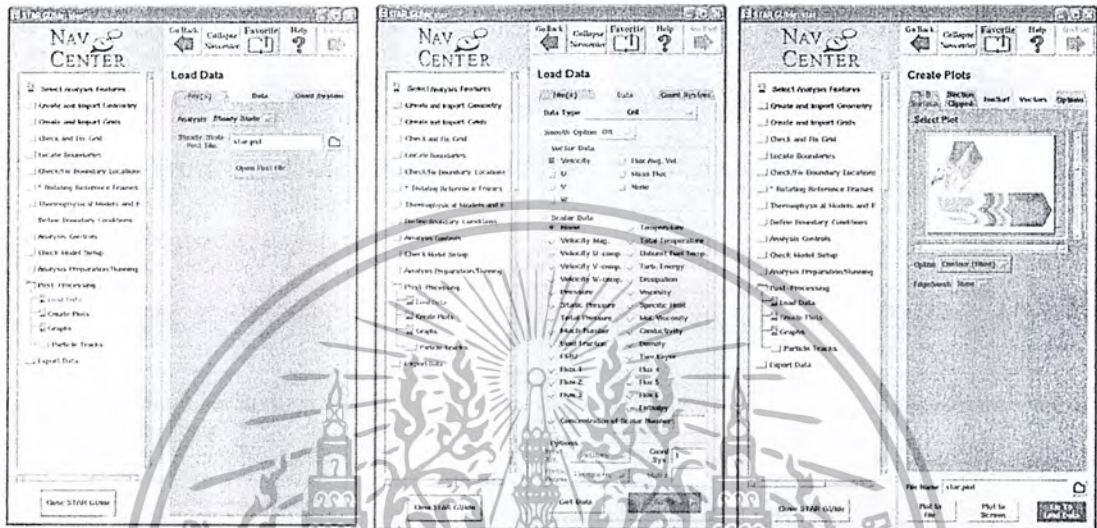


5. การดูผลลัพธ์ (Post Processing)

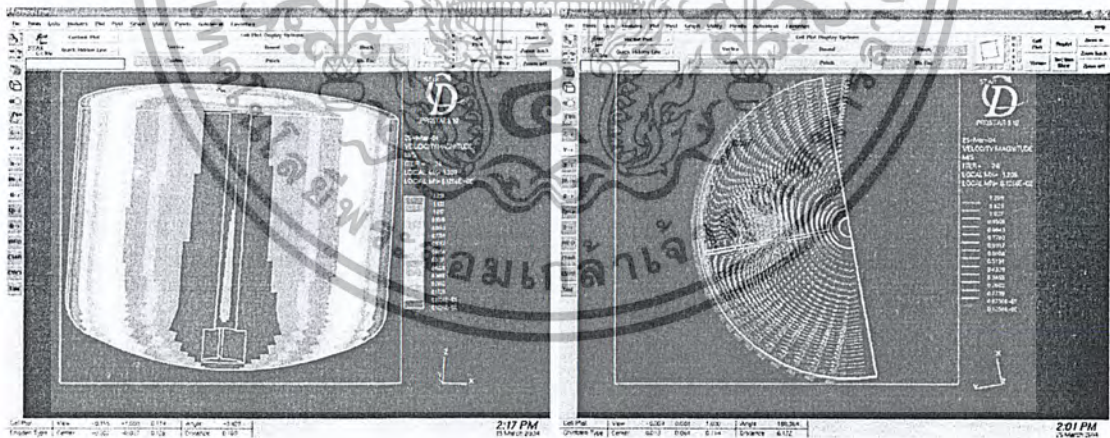
- เปิด File เพื่อดูผลลัพธ์ และเลือกการแสดงผล

Star Guide>Post Processing>Load Data>File>Open Post File

Star Guide>Post Processing>Load Data>Get Data>Go to>Create plot



- แบบของการนำเสนอ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ง

### การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์

#### 1. แนวความคิดในการเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์

##### 1.1 ความสามารถของอินเวอร์เตอร์

###### 1. ขณะเร่งความเร็ว และความเร็วรอบคงที่

ให้ดูว่าอินเวอร์เตอร์สามารถจ่ายกระแสที่มอเตอร์ต้องการได้หรือไม่ ขนาดกระแสที่จ่ายได้นี้ให้ดูที่ค่ากระแสขาออกพิกัด และกระแสไหลคืนพิกัด

###### 2. ขณะลดความเร็ว

ในขณะที่ลดความเร็วมอเตอร์จะทำงานเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และคืนพลังงานกลับไปให้อินเวอร์เตอร์ อินเวอร์เตอร์มีความสามารถในการรับคืน(หรือใช้ให้หมด)ได้หรือไม่ พลังงานบางส่วนจะใช้อินเวอร์เตอร์ ส่วนที่เหลือจะคืนกลับมาที่อินเวอร์เตอร์ทั้งหมด

ในขณะที่คืนพลังงาน แรงดันไฟตรงที่คร่อมคอนเดนเซอร์ของอินเวอร์เตอร์จะสูงขึ้น อินเวอร์เตอร์จะต้องมีความสามารถในการระบายพลังงานที่คืนมา หรือคืนกลับไปให้แหล่งจ่ายไฟ เพื่อไม่ให้แรงดันไฟตรงนี้สูงเกินค่าที่กำหนด

##### 1.2 ข้อพิจารณาในการเลือกขนาด

เราจะไม่เลือกขนาดของอินเวอร์เตอร์ โดยดูเพียงขนาดของมอเตอร์เท่านั้น แต่จะต้องพิจารณาถึงคุณสมบัติของโหลด วิธีการเดินเครื่อง และสภาพการเดินเครื่องด้วย

การเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์โดยดูจากขนาด และจำนวนมอเตอร์นั้น ให้เลือกอินเวอร์เตอร์ที่มีกระแสพิกัดมากกว่าผลรวมของกระแสมอเตอร์ทุกตัว

เมื่อใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์ในย่านความเร็วต่ำ การควบคุม  $V/f$  จะทำให้ได้แรงบิดน้อยลงกว่าการต่อมอเตอร์เข้ากับแหล่งจ่ายไฟโดยตรง การใช้อินเวอร์เตอร์ขับมอเตอร์อาจพบปัญหาฮาร์มอนิกมอเตอร์ไม่ได้ นอกจากนั้นยังอาจมีปัญหามอเตอร์ร้อนด้วย

#### 2. วิธีการเดินเครื่อง

จุดเด่นของอินเวอร์เตอร์อีกอย่างหนึ่งก็คือ สามารถขับมอเตอร์ได้หลายๆตัวพร้อมกันด้วยอินเวอร์เตอร์เพียงตัวเดียว แต่วิธีการเดินเครื่องบางแบบอาจต้องเลือกขนาดอินเวอร์เตอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าก็จะไม่เป็นการประหยัด และอาจเกิดข้อผิดพลาดในการเลือกขนาดได้ง่ายด้วย อินเวอร์เตอร์ที่ทำงานในโหมดการควบคุมฟลักซ์เวกเตอร์ จะไม่สามารถขับมอเตอร์ได้หลายตัวพร้อมกัน จะต้องเปลี่ยนโหมดการควบคุมไปเป็นแบบ  $V/f$  เท่านั้นจึงจะสามารถขับมอเตอร์ได้หลายตัว

วิธีเดินเครื่องโดยทั่วไปมีดังนี้

1. ใช้อินเวอร์เตอร์หนึ่งตัวขับมอเตอร์เพียงตัวเดียว

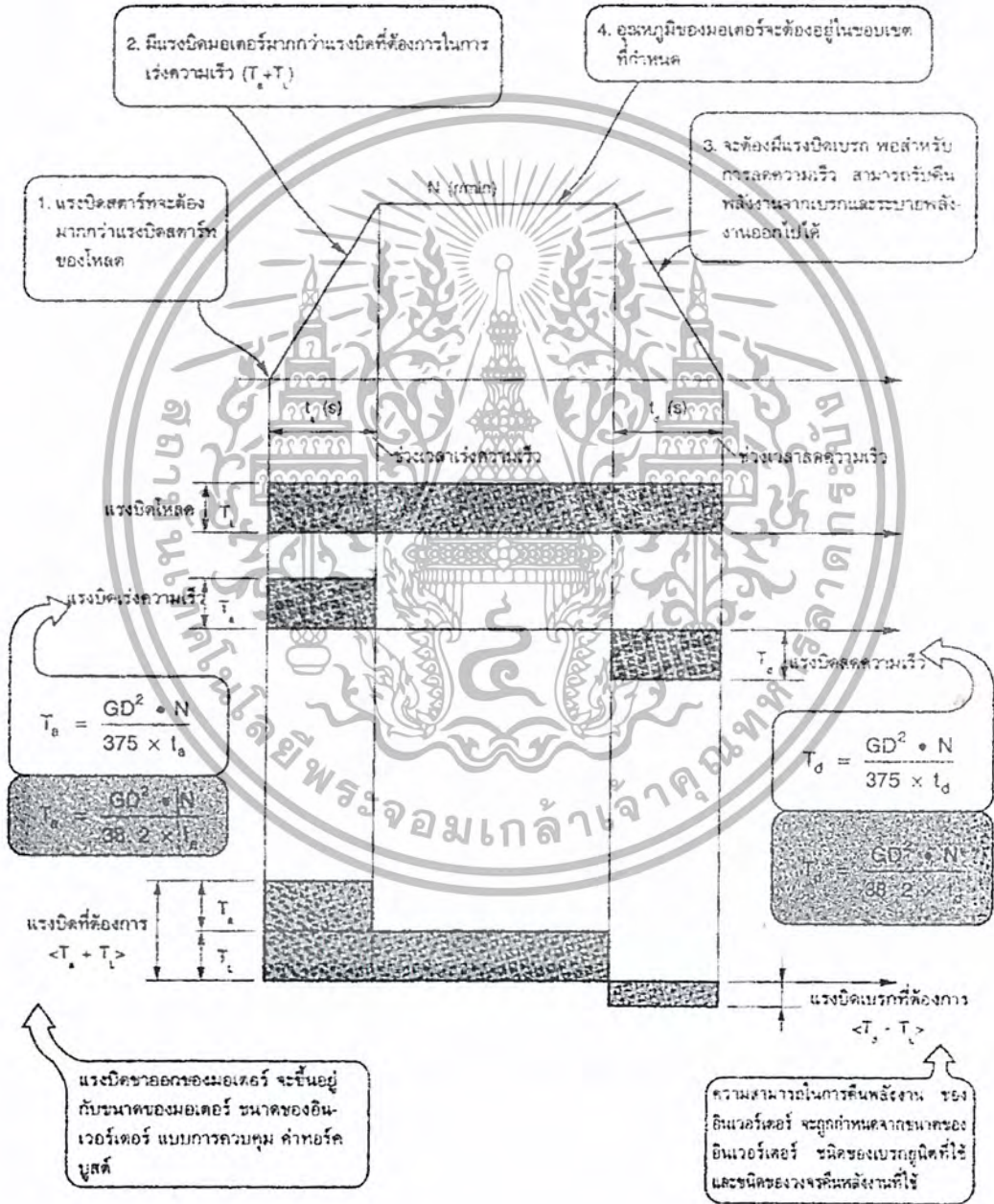
2. ใช้อินเวอร์เตอร์หนึ่งตัวขับมอเตอร์หลายตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ใช้อินเวอร์เตอร์หนึ่งตัวสตาร์ทมอเตอร์หลายตัวตามลำดับกัน
4. เปิด-ปิด มอเตอร์หนึ่งตัวที่ด้านขาออกของอินเวอร์เตอร์
5. ติดตั้งคลัทช์ที่เพลาของมอเตอร์

3. รูปแบบการเดินเครื่อง

ถ้ามีการกำหนดเวลาในการเร่งหรือลดความเร็วของมอเตอร์ การเลือกขนาดของอินเวอร์เตอร์ โดยพิจารณากระแสตามสูตรที่ได้กล่าวมาอย่างเดียวยังไม่เพียงพอ



รูปที่ 1 แสดงแบบการเดินเครื่องและแรงบิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] R.P. Chhabra, J.F. Richardson, " Non – Newtonian Flow in the Process Industries " , Butterworth Heinemann
- [2] User Guide Star-CD Version 3.15A (2002) , CD Adapco Group , 2002 Computational Dynamics Limited.
- [3] Anthony Esposito ,Professor Emeritus Department of manufacturing Engineering Miami University Oxford, Ohio " Fluid Power with Application " ,Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey Columbus. Ohio
- [4] วิฑูร รัตนศักดิ์ , " รูปร่างของก้านผสมที่ดีเป็นอย่างไร " , 65 เรื่องนำรู้เทคนิคเครื่องกล , บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด , 2533 , หน้า183-186
- [5] Anon , " Instruction Manual : DC-Stirrer " Tokyo : Rikakikai , 1981
- [6] Chapman , E.S. & Holland , F.A. , " Liquid Mixing and Processing in Stirred Tanks " , 2<sup>nd</sup> Ed. New York : Mc Graw-Hill , 1967 , pp.1-107.
- [7] Coulson , J.M. & Richardson , J.F. , " Chemical Engineering Volume2 " , 2<sup>nd</sup> Ed. , New York , 1956 , pp. 917-939.
- [8] Mc Cabe W.L. , Smith J.C. & Harriott p. , " Unit Operation of Chemical Engineering " , 4th Ed. , Mc Graw-Hill , 1985 , pp. 208-229.