สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

แบบจำลองชุดถังผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

SIMULATION MODELS OF MIXING AND AGITATION TANKS BY USING STAR-CD PROGRAM

T 055702

โดย

นายชยันต์ แต้สงเคราะห์

นางสาวสมรักษ์ กมลสินธุ์

นางสาวสุโอปอ เพ็ชรสังหาร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2546

เลขหมู่ 55702

เลขทะเบียน

วัน,เดือน,ปี 24 พ.ค. 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบจำลองชุดถังผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

นายชยันต์ แต้สงเคราะห์
นางสาวสมรักษ์ กมลสินธุ์
นางสาวสุโอปอ เพ็ชรสังหาร

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเกษตร
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION MODELS OF MIXING AND AGITATION TANKS BY USING STAR-CD PROGRAM

Chayan Taesongkroe

Somrug Kamonsin

Suopor Petsangharn

A Report Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

For the Bachelor Degree of Agricultural Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2546

ภาควิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง แบบจำลองชุดถังผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นายชยันต์ แต้สงเคราะห์
2. นางสาวสมรักษ์ กมลสินธุ์
3. นางสาวสุโอปอ เพ็ชรสังหาร

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วิภา เจียระไนวชิระ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์วิภา เจียระไนวชิระ ผู้ให้คำแนะนำข้อมูลและตรวจแก้ไขรายงาน ตลอดระยะเวลาที่ผ่านมา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ ที่ให้คำแนะนำในการนำเสนอปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตร อาจารย์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประศาสตร์วิชชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย ทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความสามารถในการคิดแก้ปัญหา พัฒนา และประยุกต์นำไปใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายขอขอบคุณ คุณวัชระ ศุภฤกษ์รัตน์ และ บริษัท พัฒน์กล จำกัด (มหาชน) ที่กรุณารับคณะผู้วิจัยเข้าฝึกงาน ทำให้คณะผู้วิจัยได้ประสบการณ์และความรู้ นำมาใช้ในการทำวิจัยครั้งนี้

นายชยันต์ แต้สงเคราะห์
นางสาวสมรักษ์ กมลสินธุ์
นางสาวสุโอปอ เพ็ชรสังหาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรื่อง	แบบจำลองชุดถังผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์	
โดย	นายชยันต์	แต้สงเคราะห์
	นางสาวสมรักษ์	กมลสินธุ์
	นางสาวสุโอปอ	เพ็ชรสังหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วิภา	เจียระไนวชิระ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์วีระชัย	ลิ้มพรชัยเจริญ
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเกษตร	
	ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร วิศวกรรมศาสตร์	
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาแบบจำลองการผสมของของเหลวภายในถังกวนและถังผสม โดยใช้โปรแกรม Star – CD เพื่อศึกษารูปแบบของการผสมและเส้นการไหลของของเหลวภายในถังกวน ย่านการผสม (Mixing Zones) รวมถึงการไม่ผสมกันของของเหลวภายในถัง (Dead Zones) การเปรียบเทียบลักษณะการผสมของของเหลวได้แก่ Newtonian fluid Dilatant fluid Pseudoplastic fluid และ Binghamplastic fluid โดยใช้ผลิตภัณฑ์ น้ำ เนยถั่วบด (Peanut Butter) ครีม (Cream) และ น้ำซอสเข้มข้น (Ketchup) แทนของเหลวดังกล่าวตามลำดับ ซึ่งปัจจัยที่ศึกษาทั้งหมดคือ ชนิดของใบกวน ได้แก่ Helical Incline และ Turbine อิทธิพลของการติดแผ่นกั้น (Baffle) และความเร็วรอบของใบกวนแต่ละชนิด ผลการศึกษาพบว่าของเหลวประเภท Newtonian เหมาะสมกับใบกวน Incline ที่ความเร็วรอบ 97-175 rpm ของเหลวประเภท Pseudoplastic เหมาะสมกับใบกวน Helical ที่ความเร็วรอบ 250-350 rpm ของเหลวประเภท Dilatant และBinghamplastic เหมาะสมกับใบกวน Turbine ที่ความเร็วรอบ 600-800 rpm ผลของความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นและการติดแผ่นกั้น (Baffle) ทำให้ของเหลวภายในถังมีการผสมกันทั่วถึงมากขึ้น ย่านที่ไม่มีการผสมกัน (Dead Zones) เกิดบริเวณก้นถัง และใต้ใบกวนจะมีขนาดเล็กลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report Title	SIMULATION MODELS OF MIXING AND AGITATION TANKS BY USING STAR-CD PROGRAM
By	Chayan Taesongkroe
	Somrug Kamonsin
	Suopor Petsangharn
Advisor	Dr. Vipa Jayranaiwachaira
Co- Advisor	Mr.Verachai Limpornchaijaran
Report for	Bachelor Degree of Agricultural Engineering
	Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering
	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This work is the study of the mathematical modals of mixing and agitation tanks by using the Star-cd program to investigate the patterns of mixing , mixing zone and dead zones in mixing tanks. It also study the influences of fluid types , such as represented : Newtonian fluid , Pseudoplastic fluid ,Binghamplastic fluid and Dilatant fluid which are replaced by water , cream , ketchup and peanut butter , respectively. Focusing on the type of mixing blades, helical, incline and turbine. This thesis also deals with the effect of baffles and the velocity of mixing blades. Findings are that Newtonian fluid is suitable with incline blade which the speed of 97-175 rpm , Pseudoplastic fluid is suitable with helical blade which the speed of 250-350 rpm , Binghamplastic fluid and Dilatant fluid are suitable with turbine blade which the speed of 600-800 rpm. The increasing speed and the installing of baffles cause the fluid to mix very well to our the tank. The dead zones at the bottom of the tank and under the mixing blade tend to have smaller size.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	1
1.3 วัตถุประสงค์	4
1.4 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินงาน	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 การกวนของเหลว	5
2.1.1 จุดประสงค์ของการกวน	5
2.1.2 ชุดถังกวน	6
2.1.3 รูปแบบการไหลของ ของเหลวในถังกวน	9
2.1.4 การป้องกันการเกิดน้ำวน	10
2.1.5 ท่อกั้น	11
2.1.6 มาตรฐานการออกแบบ	12
2.1.7 ความเร็วการไหล การหมุนเวียนของเหลว และการใช้กำลังงาน	13
2.2 การผสม	13
2.2.1 การผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้ากันได้	13
2.2.2 การผสมภายในภาชนะ	14
2.2.3 การผสมแบบปรับแกนกวน	15
2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง	15
2.3.1 ความเร็วปลายใบกวน	15
2.3.2 รูปแบบความเร็ว	18
2.3.3 กำลังงานที่ใช้ขับใบกวน	20
2.3.4 กำลังงานในการกวนของเหลว	20
2.3.5 ผลกระทบที่เกิดจากอัตราส่วนเรขาคณิต	24
2.3.6 การคำนวณหากำลังงาน	26
2.3.7 กำลังงานที่ต้องการสำหรับของเหลวที่เป็น Non-Newtonian	27
2.3.8 ระยะเวลาในการผสม	29
2.4 คุณสมบัติของของไหล	31
2.4.1 ความเค้นและความหนืดของของไหล	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2 ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวขนานกับผิวของของไหล 31

2.4.3 การแบ่งประเภทของเหลวตามลักษณะการไหล 33

2.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นต่อลักษณะการไหล 40

บทที่ 3 การออกแบบ และ สร้างแบบจำลอง 43

3.1 สมการที่เกี่ยวข้องกับใบพัดแบบกังหัน 43

3.1.1 สมการความเร็วตามเส้นสัมผัสวงกลม 43

3.1.2 สมการความเร็วตามแนวรัศมีของของเหลวที่ออกจากปลายใบกวน 43

3.1.3 สมการการไหลของของเหลว 43

3.1.4 สมการการไหลมวลรวม 43

3.1.5 กำลังงานสำหรับของเหลวที่เป็น Newtonian 44

3.1.6 กำลังงานสำหรับของเหลวที่เป็น Non-Newtonian 44

3.1.7 ระยะเวลาในการผสม 45

3.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง 45

3.2.1 สมการการอนุรักษ์มวล สำหรับพิกัดทรงกระบอก 45

3.2.2 สมการโมเมนตัม 48

3.2.3 สมการความร้อน 52

3.2.4 การประยุกต์ใช้ Finite Volume Method 55

3.3 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม 60

3.4 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม STAR – CD 69

3.5 สภาวะการทำงาน 69

3.5.1 ความเร็วรอบของใบกวนแต่ละชนิด 69

3.5.2 ผลิตภัณฑ์อาหารตัวอย่างตามทฤษฎีของของไหล 69

3.5.3 การติดแผ่นกั้นและไม่ติดแผ่นกั้น 69

บทที่ 4 ผลของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ผล 71

4.1 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริง กับผลจากการแบบจำลอง 72

4.1.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริง กับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 72

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริง กับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2 ผลของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ใบกวนชนิดเดียวกัน 76

4.2.1 ผลของแบบจำลอง โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 76

4.2.2 ผลของแบบจำลอง โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 89

4.2.3 ผลของแบบจำลอง โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 102

บทที่ 5 สรุปผลการสร้างแบบจำลอง 115

5.1 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลแบบจำลอง โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ในการทดลอง 115

5.1.1 เปรียบเทียบที่ใบกวนแบบ Helical Blade 115

5.1.2 เปรียบเทียบที่ใบกวนแบบ Incline Blade 116

5.1.3 เปรียบเทียบที่ใบกวนแบบ Turbine Blade 117

5.2 สรุปผลแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบประเภทของของเหลว 118

5.2.1 ของเหลวประเภท Newtonian fluid 118

5.2.2 ของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid 118

5.2.3 ของเหลวประเภท Binghamplastic fluid 118

5.2.4 ของเหลวประเภท Dilatant fluid 118

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เอกสารอ้างอิง	119
ภาคผนวก	121
ภาคผนวก ก	122
ภาคผนวก ข	129
ภาคผนวก ค	131
ภาคผนวก ง	156

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ a และ b ที่ใช้ในสมการ (2.19) 24

ตารางที่ 2.2 ผลจากความกว้างใบกวน และความสูงของใบกวนจากก้นถัง ที่มีต่อการสิ้นเปลืองกำลังงาน ของใบ Turbine 45° แบบแผ่นกั้นขอบถัง 6 ใบ 25

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ K_L และ K_T ที่ใช้ในสมการ (2.21) และ (2.23) สำหรับถังกวนชนิดมีแผ่นกั้นขอบถัง จำนวน 4 ใบติดตั้งที่ผนัง โดยมีความกว้างเท่า กับ 10% ของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน 27

ตารางที่ 2.4 อัตราเฉือนในกระบวนการผลิตอาหาร 33

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างอาหารที่เป็น Newtonian fluid 34

ตารางที่ 2.6 แสดงค่า flow behavior index (n) และ consistency coefficient (K) ของ ของไหลชนิดต่างๆ 38

ตารางที่ 2.7 สรุปประเภทของของไหล 39

ตารางที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อความหนืดปรากฏและ K ของน้ำส้ม เข้มข้นที่มี pulp 5.78% ที่อุณหภูมิ -10°C shear rate 100s^{-1} 41

ตารางที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณ pulp ต่อความหนืดปรากฏและ K ของน้ำส้มเข้มข้น 65°Brix ที่อุณหภูมิ-10°C shear rate 100 s^{-1} 41

ตารางที่ 3.1 Mass flux through Control Surface of a Cylindrical Differential Control Volume 47

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า n และ K และสภาวะในการสร้างแบบจำลองของผลิตภัณฑ์ 70

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ชุดถังกวนทั่วไป 6

รูปที่ 2.2 ใบกวน 8

รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดน้ำวน ของใบกวนแบบ Turbine Blade ที่เกิดในถังกวนไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง 9

รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลของของเหลว เมื่อใบกวนไม่ได้อยู่ตรงจุดศูนย์กลาง 10

รูปที่ 2.5 ใบกังหันหลายๆ ตัว ที่ติดตั้งในถังกวนทรงสูง 11

รูปที่ 2.6 ท่อกั้น และถังกวนชนิดมีแผ่นกั้น 12

รูปที่ 2.7 การวัดขนาดใบกวนแบบ 12

รูปที่ 2.8 ระยะเวลาการผสมภายในชุดถังกวน 14

รูปที่ 2.9 ระยะเวลาการผสมสำหรับของเหลวที่เข้ากันได้ ภายในชุดถังกวนแบบ Turbine Blade ชนิดมีแผ่นกั้นขอบถัง 14

รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณปลายใบกวนแบบ Turbine Blade 15

รูปที่ 2.11 รูปเส้นความเร็วปกติที่ไหลออกจากใบกวนแบบ Turbine Blade 16

รูปที่ 2.12 ค่าความเร็วตามแนวรัศมี V'_r/u_2 และปริมาณอัตราการไหล q/q_B ในชุดถังกวนของใบกวนแบบ Turbine Blade 18

รูปที่ 2.13 รูปแบบความเร็วของไหลในชุดถังกวนแบบ Turbine Blade 19

รูปที่ 2.14 กราฟแสดงตัวเลขกำลัง กับตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับใบกวนแบบ Turbine Blade แบบ 6ใบ 23

รูปที่ 2.15 กราฟแสดง ตัวเลขกำลัง กับ ตัวเลขเรย์โนลด์สำหรับใบแบบ Propeller Blade แบบ 6ใบ 23

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของกำลัง สำหรับใบกวนแบบ Turbine Blade ชนิด 6 ใบในของเหลวประเภท Non-Newtonian 29

รูปที่ 2.17 ความเร็วในการไหลเมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือน 32

รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Newtonian fluid 34

รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Binghamplastic fluid 35

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid 35

รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Dilatant fluid 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid แบบ power law 37

รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการไหลแบบ Time-dependent non-Newtonian 37

รูปที่ 3.1 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการการอนุรักษ์มวล 45

รูปที่ 3.2 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการพลังงานพิจารณาในระบบสองมิติ r,x 48

รูปที่ 3.3 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการความร้อนพิจารณาในระบบสองมิติ r, x 52

รูปที่ 3.4 แสดงอนุภาคของของไหลที่ใช้ Finite Volume Method หรือที่เรียกว่า cell control volume 56

รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวน Helical โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น 72

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวน Helical โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ติดแผ่นกั้น 73

รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวน Incline โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น 74

รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวน Incline โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ติดแผ่นกั้น 75

รูปที่ 4.5 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 76

รูปที่ 4.6 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 77

รูปที่ 4.7 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical 78

รูปที่ 4.8 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 79

รูปที่ 4.9 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 80

รูปที่ 4.10 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับโดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 82

รูปที่ 4.12 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 83

รูปที่ 4.13 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 84

รูปที่ 4.14 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 85

รูปที่ 4.15 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 86

รูปที่ 4.16 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade 87

รูปที่ 4.17 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 89

รูปที่ 4.18 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 90

รูปที่ 4.19 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 91

รูปที่ 4.20 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 92

รูปที่ 4.21 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 93

รูปที่ 4.22 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 94

รูปที่ 4.23 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 95

รูปที่ 4.24 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.25 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 97

รูปที่ 4.26 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 98

รูปที่ 4.27 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 99

รูปที่ 4.28 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade 100

รูปที่ 4.29 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 102

รูปที่ 4.30 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 103

รูปที่ 4.31 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 104

รูปที่ 4.32 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 105

รูปที่ 4.33 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 106

รูปที่ 4.34 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้ครีมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 107

รูปที่ 4.35 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 108

รูปที่ 4.36 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 109

รูปที่ 4.37 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำซอสเข้มข้นเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 110

รูปที่ 4.38 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 111

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.39 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 112

รูปที่ 4.40 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบดเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ โดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade 113

รูปที่ 5.1 แสดงเส้นการไหลของใบกวนแบบ Helical Blade 115

รูปที่ 5.2 แสดงเส้นการไหลของใบกวนแบบ Incline Blade 116

รูปที่ 5.3 แสดงเส้นการไหลของใบกวนแบบ Turbine Blade 117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

กระบวนการการผสม (Mixing) และ การกวน (Agitation) ถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่สำคัญในอุตสาหกรรมหลายๆชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร เช่น อุตสาหกรรมนมปรุงแต่งรสต่างๆ โยเกิร์ต กะทิสำเร็จรูป น้ำผลไม้ น้ำซอสเข้มข้น ฯลฯ ซึ่งมีบทบาทสำคัญอย่างมากต่อการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจภายในประเทศไทย

เนื่องจากอุตสาหกรรมส่วนมากที่มีกระบวนการผสมเป็นส่วนหนึ่งของการผลิต ถังผสมและชุดอุปกรณ์ถูกออกแบบ โดยสมมุติว่าผลิตภัณฑ์ในถังเป็นของเหลวประเภท Newtonian คือของเหลวที่มีความหนืดไม่ขึ้นกับความเค้นเฉือน แต่ผลิตภัณฑ์อาหารส่วนมากเป็นของเหลวประเภท Non-Newtonian คือของเหลวที่มีความหนืดแปรผันตามความเค้นเฉือน ซึ่งมีทั้งแบบความหนืดมากขึ้นเมื่อความเค้นที่กระทำมากขึ้น (Dilatant Fluid) หรือ ความหนืดน้อยลงเมื่อความเค้นเฉือนที่กระทำมากขึ้น (Pseudoplasitic Fluid) หรือของเหลวที่ต้องได้รับความเค้นมากระทำถึงจุดหนึ่ง จึงเกิดการเคลื่อนที่โดยไม่ขึ้นกับความหนืดของของเหลวนั้น (Binghamplasitic Fluid) และขาดการคำนึงถึงการกระจายกำลังภายในถังผสมทำให้เกิดการผสมของของเหลวที่ไม่ทั่วถึงกันทั้งถังจึงเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones) จึงทำให้การกวนและการผสมนั้นไม่ได้ประสิทธิภาพตามกำลังงานที่ให้แก่ใบกวน

นอกจากนี้ข้อมูลการออกแบบรูปแบบการผสม (Mixing Patterns) ที่เกี่ยวข้องกับของเหลวประเภท Non-Newtonian จำกัดอยู่ที่ชนิดของใบกวนและสภาวะการทำงาน การคำนวณทางด้านคณิตศาสตร์ และข้อมูลต่างๆของของเหลวประเภทนี้ ยังขาดการเผยแพร่ข้อมูลการออกแบบที่เหมาะสมแก่ภาคอุตสาหกรรม ดังนั้นการสร้างแบบจำลองคอมพิวเตอร์ (Simulation) จึงเป็นวิธีการหนึ่งในการแสดงผลของการผสมที่เกิดขึ้น ภายในถังกวนถังผสมของผลิตภัณฑ์อาหารประเภท Non-Newtonian ที่สามารถแสดงผลของรูปแบบการผสมในรูปตัวแปรต่างๆ โดยช่วยประหยัดเวลา และค่าใช้จ่าย และ สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลการออกแบบชุดถังกวนถังผสมหลากหลายมากขึ้นในภาคอุตสาหกรรม

1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

P. Zipp และ K. Patterson (2541) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์ในการผสมและทำปฏิกิริยาของสารเคมีในถังผสม จากการทดลองวัดการผสมสารเคมีในปฏิกิริยาขั้นที่2 สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดเวลาเฉลี่ย ลำดับขั้นของการถึงจุดอิ่มตัว และเมื่อนำมาใช้กับแบบจำลองคอมพิวเตอร์ ปฏิกิริยาโต้ตอบในแบบจำลองคอมพิวเตอร์พิจารณาได้ยากมากเนื่องจากปฏิกิริยาโต้ตอบที่ได้ค่อนข้างกว้าง และมีการไหลที่หลากหลาย

R. Bidoae และ E. Raad (2542) ได้ทำการศึกษาการผสมของของเหลวในถังผสมแบบเขย่า ซึ่งจากการทดลองที่ผ่านมาจะเข้าใจกันว่าในกระบวนการผสม การเพิ่มระยะเวลาในการเขย่าเป็นสิ่งสำคัญที่สุดสำหรับการออกแบบ ในกรณีถังผสมมีการผสมไม่เต็มถังผสม การไหลบริเวณผิวหน้าจะซับซ้อน และจะมีการเพิ่มเติมกระบวนการผสมโดยใช้ wave action การมองรายละเอียดการไหลจะทำให้เข้าใจกระบวนการผสมมากขึ้นหลังจากนั้นจึงนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เข้ามาช่วย

E. George, J. Glimm, X.-L. Li , A. Marchese และ Z.-L. Xu (2544) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองอัตราการผสมแบบ Rayleigh-Taylor ในช่วงอัตราเร่งที่กำหนดไว้ในการทดลอง เพื่อที่จะคาดการณ์ลักษณะการกระจายตัวของกลุ่มที่เราจะศึกษา ขณะเริ่มผสมกันจะเป็นอย่างไร จากการสร้างแบบจำลองพบว่า อัตราความเร่งจะลดลงเมื่อแรงลอยตัวลดลง ซึ่งข้อความดังกล่าวถูกอ้างอิงได้จากลักษณะการกระจายของมวลขณะเริ่มผสมในเชิงคณิตศาสตร์

Richtmeyer-Meshkov (2544) ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะทั่วไปของการไหลภายใน drop-tank โดยใช้ Miranda code การทดลองนี้ประกอบด้วย ถังใบเล็ก ภายในบรรจุของเหลวหนักและของเหลวเบา โดยสร้างคลื่นบนผิวหน้าของของเหลว ให้ถังยกตัวขึ้นลงโดยสปริง และรอจนกระทั้งของเหลวหยุดนิ่ง การทดลองจะเพิ่มความเร่งซึ่งจะมีผลต่อความหนาแน่นที่ผิวหน้าของของเหลว โดยใช้ Miranda Code ในการอธิบายถึงการเคลื่อนที่และการผสมกันของของเหลว Miranda code จะบอกถึงความหนืดของของเหลวและระดับการกระจายตัว

พิภพ ธรรมธารัย (2534) ได้ทำการวิจัยเพื่อหาเวลาที่จำเป็นของการผสมในถังผสมที่มีการกวนแบบไม่ต่อเนื่องด้วยเทคนิคสารติดตามทั้งชนิดที่เป็นสารรังสีและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยใช้ถังผสมที่มีสัดส่วนตามมาตรฐาน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายใน 24 ซ.ม.และมีน้ำบรรจุอยู่สูง 24 ซ.ม.เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากวิธีการทั้งสอง ตัวแปรที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาคือ ชนิดของใบกวนซึ่งเป็นแบบที่มีใบกวน 6 ใบ 3 ชนิด คือ แบบเปิด แบบติดบนจาน และแบบใบเอียง 45 องศา ความเร็วรอบของการกวน ในช่วง 200-400 รอบต่อนาที ตำแหน่งของใบกวน ที่ระยะความสูงจากก้นถัง 1/2 และ 1/3 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังและอิทธิพลของแผ่นกั้น ในการวิจัยนี้พบว่า เวลาที่จำเป็นในการผสมในระบบดังกล่าวจากวิธีการทั้งสองมีแนวโน้มเหมือนกัน

สมบูรณ์ เวชกามา (2538) ได้ทำการศึกษาแบบจำลองกระบวนการรีฟอร์มมิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการการกลั่นน้ำมัน โดยแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองกึ่งทฤษฎี (Semiempirical Model) ภายใต้สภาวะการปฏิบัติงานแบบคงตัว (Steady-State Condition) แบบจำลองที่สร้างขึ้นอาศัยสมมติฐานว่า หน่วยรีฟอร์มมิงใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพิจารณาแบบง่ายๆว่าเป็นเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor) ผลของแบบจำลองแบบกึ่งทฤษฎีเป็นแบบจำลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เชิงเส้นแสดงความสัมพันธ์ของสารป้อนกับสารผลิตภัณฑ์ของหน่วยรีฟอร์มมิงโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พารามิเตอร์ของแบบจำลองนี้สามารถกำหนดได้จากข้อมูลการปฏิบัติงาน

เพ็ญแข แซ่ตัน (2525) ได้ทำการวิจัยเรื่องอิทธิพลของตัวแปรที่สำคัญต่อการถ่ายเทมวลในถังกวน โดยทำการทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของของแข็งที่แขวนลอยในถังกวนที่อุณหภูมิระหว่าง 15 °C ถึง 40 °C และที่ความเร็วรอบระหว่าง 250 รอบต่อนาที ถึง 500 รอบต่อนาที ใบพัดที่ใช้มี 5 ชนิด นำมาเปรียบเทียบผลที่ได้กับผลงานของผู้วิจัยอื่นที่มีแผ่นกั้น และเสนอสมการอยู่ในรูป $Sh = a\,Re^{p}\,Sc^{q}$ สำหรับค่าตัวเลขเรย์โนลส์อยู่ในช่วง $2.6*10^{4}$ ถึง $5.2*10^{4}$ และค่าตัวเลขชมิดท์อยู่ในช่วง 573 ถึง 1571

ทัศนีย์ วัฒนเชาวน์พิสุทธิ์ (2541) ได้ทำการวิจัยและพัฒนาตัวควบคุมกระบวนการฟัซซีแบบฐานแบบจำลอง สำหรับเครื่องปฏิกรณ์เคมีแบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor) โดยการเขียนโปรแกรมแบบจำลองทางคณิตศาสตร์กระบวนการและการควบคุมเพื่อทดสอบตัวควบคุมที่ได้ใน 2 กรณีคือ กรณีที่ค่าเป้าหมายมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบสเต็พ และกรณีที่มีตัวรบกวนแบบสเต็พ เปรียบเทียบการควบคุมในลักษณะนี้กับตัวควบคุมแบบดั้งเดิมและการควบคุมแบบจำลองภายในที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยสมมติว่าสามารถวัดค่าตัวแปรทุกตัวได้อย่างต่อเนื่อง ผลการวิจัยพบว่าการควบคุมในลักษณะนี้สามารถควบคุมกระบวนการได้ดีกว่าการควบคุมแบบดั้งเดิมและสามารถใช้แทนการควบคุมแบบฐานแบบจำลองที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ ทั้งในการควบคุมระดับของของเหลวของกระบวนการของถังที่มีการไหลแบบไม่เป็นเชิงเส้นและการควบคุมอุณหภูมิของกระบวนการของเครื่องปฏิกรณ์ถังกวนแบบต่อเนื่อง

ธรวิภา เสือรอด (2541) ได้ทำการสร้างแบบจำลอง การปรับให้สอดคล้องของข้อมูลและการควบคุมเครื่องปฏิกรณ์อะเซทีลีนไฮโดจีเนชัน โดยเขียนบนโปรแกรมสปีดอัฟ ซึ่งเป็นโปรแกรมสภาวะจำลองแบบไดนามิก เครื่องปฏิกรณ์อะเซทีลีนไฮโดจีเนชันถูกจำลองด้วยชุดลำดับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor) ข้อมูลที่นำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองได้จากข้อมูลโรงงานที่ผ่านการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลด้วยตัวแปรเกินจากสมการสมดุลมวลสารและพลังงาน จำนวนชุดลำดับเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนต่อเนื่อง (Continuous Stirred Tank Reactor) ที่เหมาะสมเท่ากับยี่สิบถัง ซึ่งให้ผลการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในเครื่องปฏิกรณ์ และผลการทำนายค่าความเข้มข้นของอะเซทีลีนกับข้อมูลโรงงานเหมือนที่สุด

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังกล่าว พบว่าระบบหรือกระบวนการที่ใช้ชุดถังกวนถังผสมในการกวนหรือการผสมในแต่ละสภาวะเงื่อนไขนั้นจำเป็นต้องอาศัยหลักการทฤษฎีและสมการคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการทำการทดลองเพื่อเก็บข้อมูลและหาค่าตัวแปรต่างๆที่ต้องการศึกษา ซึ่งในการกวนหรือการผสมในแต่ละสภาวะเงื่อนไขนั้น จะต้องเปลี่ยน ค่า Parameter เพื่อที่จะทำการหาค่าตัวแปรที่ต้องการ ฉะนั้นการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของถังกวนถังผสม จึงจำเป็นต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาเทคโนโลยีทางด้านการกวนและการผสม เพราะเป็นการประหยัดเวลาและค่าใช้จ่ายเมื่อเปรียบเทียบกับการทำการทดลองจริง เนื่องจากกระบวนการกวนและการผสมนั้นเข้ามามีบทบาทมากขึ้น

1.3 วัตถุประสงค์

1.3.1 เพื่อศึกษาการใช้โปรแกรม STAR - CD ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองชุดถังผสม

1.3.2 เพื่อศึกษาหารูปแบบการผสม ย่านการผสม ของของเหลวประเภท Non-Newtonian ภายในถังผสมโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (STAR – CD) ในการสร้างแบบจำลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ผล

1.4 ขอบเขต และขั้นตอนการดำเนินงาน

1.4.1 ศึกษาหาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองชุดถังผสม และใบกวนรวมถึงเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาคุณสมบัติของของเหลวแต่ละประเภทที่จะนำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ในการสร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์

1.4.3 ศึกษากระบวนการผสม การออกแบบถังผสมและใบกวนในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหาร

1.4.4 ศึกษาการใช้โปรแกรม STAR - CD ที่ใช้สร้างแบบจำลองชุดถังผสม

1.4.5 สร้างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยใช้ข้อมูลการในออกแบบชุดถังกวนถังผสมจากภาคอุตสาหกรรม

1.4.6 รวบรวมและวิเคราะห์ผลที่ได้ เพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและสมการที่เกี่ยวข้อง

ในทางวิศวกรรม มีกระบวนการหลายอย่างที่ต้องอาศัยกรรมวิธีการกวน (Agitation) หรือผสม (Mixing) เป็นสำคัญ การกวนแตกต่างจากการผสม กล่าวคือ การกวนหมายถึงการกวนเนื้อสารให้เคลื่อนไปในทิศทางที่ต้องการ ซึ่งโดยมากมักกวนเป็นวงกลม ส่วนการผสมหมายถึง การคลุกเคล้าเนื้อสารให้แต่ละส่วนกระจายทั่วกัน

การผสมสามารถแบ่งออกได้หลายระดับตามความเข้ากันของเนื้อสาร ตัวอย่างกรณีการปล่อยก๊าซ 2 ชนิดลงในภาชนะเดียวกัน และกรณีใส่ทราย หิน ซีเมนต์ และน้ำลงในถังและผสมกันเป็นคอนกรีต กรณีทั้งสองเรียกได้ว่าเป็นการผสมเหมือนกันแต่เนื้อสารที่ได้อาจเป็นหรือไม่เป็นเนื้อเดียวกันก็ได้ โดยกรณีของก๊าซผสมข้างต้น ก๊าซแต่ละชนิดอาจยังอยู่ที่เดิม ไม่ได้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน ต่างกับกรณีคอนกรีตซึ่งส่วนผสมมีการกระจายทั่วกันมากกว่า
กล่าวถึง การกวน ของเหลวชนิดที่มีความหนืดต่ำ อันรวมถึงการผสม ของเหลวกับของเหลว ของเหลวกับก๊าซ และ ของเหลวกับของแข็ง

2.1 การกวนของเหลว

2.1.1 จุดประสงค์ของการกวน

ของเหลวถูกนำมากวน ด้วยจุดประสงค์หลายๆ ประการ ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของการทำงานในขั้นตอนนั้นๆ จุดประสงค์ของการกวน ของเหลวมีดังต่อไปนี้

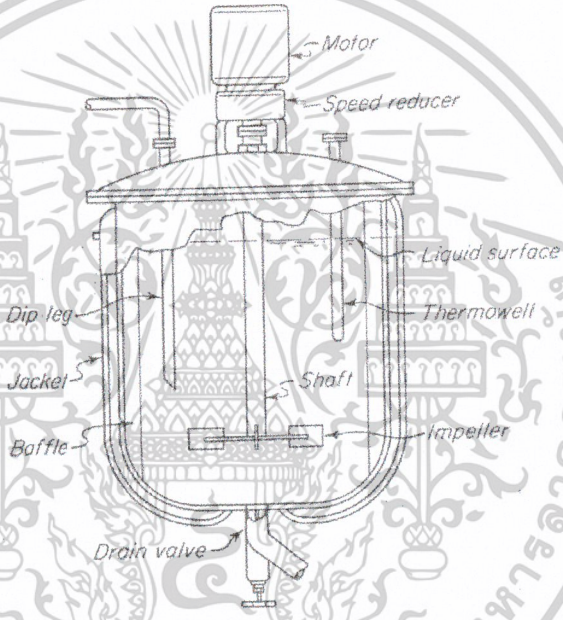
1. เพื่อแขวนลอยของแข็งภายในของเหลว
2. เพื่อผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้ากันได้ เช่น เมทิลแอลกอฮอล์ กับน้ำเป็นต้น
3. เพื่อกระจายฟองก๊าซเล็กๆ ให้ผสมลงในของเหลว
4. เพื่อทำของเหลวสองชนิดซึ่งไม่สามารถเข้ากันได้ ให้อยู่ในรูป Emulsion หรือ ให้เกิดการแขวนลอยเป็นหยดสารเล็กๆ
5. เพื่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลว กับ ขดลวด หรือ ตัวถังกวน

ในบางครั้งการกวนอาจมีจุดประสงค์มากกว่า 1 อย่างขึ้นไป เช่น กระบวนการ Catalytic Hydrogenation ของเหลว ซึ่งทำให้ก๊าซไฮโดรเจนมีลักษณะของแข็งแขวนลอยอยู่ในของเหลว พร้อมๆ กับถ่ายเทความร้อนให้ ขดลวดทำความเย็น และ ตัวถังกวน ไปด้วยในตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ชุดถังกวน

1. ถังกวน (Tank) ภาชนะที่ใช้สำหรับการกวน มีหลายรูปแบบ แต่โดยมากมักมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกตั้ง ฝาเปิด โดยขนาดและสัดส่วนขึ้นอยู่กับสภาพการกวนนั้นๆ ถังกวนที่แสดงในรูป 2.1เป็นรูปแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป พื้นถังกวนมีลักษณะโค้งมนไร้ขอบมุมเพื่อป้องกันการทะลุอันเกิดจากแรงหมุนของของเหลว เมื่อจะทำการกวน มักใส่ของเหลวให้มีความลึกใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน โดยต้องเผื่อพื้นที่ด้านบนไว้ด้วยพอสมควร เพลาขับใบกวนขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ โดยอาจเชื่อมต่อโดยตรงหรือผ่านทางระบบเกียร์ก็ได้ นอกจากนี้ยังอาจติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่างๆ เช่น ท่อดูดสารเข้าออก ขดลวด ตัวถังกวน และเทอร์โมมิเตอร์ หรืออุปกรณ์เกี่ยวกับอุณหภูมิ-ความดัน เอาไว้ด้วย



รูปที่ 2.1 ชุดถังกวนทั่วไป

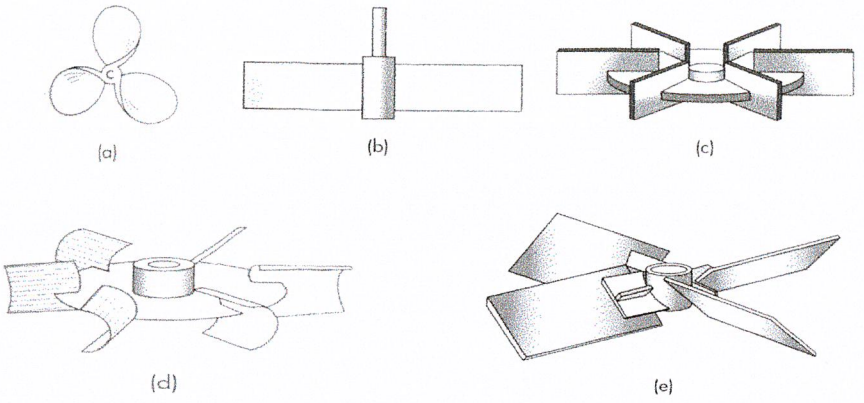
2. ใบกวน (Impellers) ถูกออกแบบมาเพื่อสร้างระบบการไหลให้กับของเหลว โดยของเหลวจะถูกเหวี่ยงออกจากศูนย์กลางออกไปชนผนังภาชนะแล้วย้อนกลับมาที่ใบพัดอีกครั้งหมุนเวียนไปเรื่อยๆ รูปแบบใบกวนสามารถแบ่งออกตามลักษณะการพัดพาของไหลได้ 2 แบบ คือ แบบพัดให้ของเหลวไหลขนานไปกับแกนกวน และแบบพัดของเหลวให้ไหลออกตามแนวรัศมี โดยแบบแรกเรียกว่า Axial-Flow Impellers และแบบที่สองเรียกว่า Radial-Flow Impellers ใบกวนแบ่งออกตามรูปร่างลักษณะได้ 3 ชนิด ได้แก่ ชนิด Propellers (ใบพัด) Paddles (ใบพาย) และชนิด Turbines (กังหัน) โดยทั้งสามชนิดเป็นใบกวนที่ใช้ในชุดถังกวนทั่วไปถึง 95%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- **ใบพัด (Propellers)** เป็นใบพัดแบบ Axial-Flow Impellers สามารถกวนของเหลวความหนืดต่ำได้ด้วยความเร็วสูง โดย Propellers ขนาดเล็กจะหมุนที่ความเร็วเต็มที่ 1150 รอบ/นาที หรือ 1750 รอบ/นาที แต่ถ้าเป็น ใบพัด (Propellers) ขนาดใหญ่จะหมุนที่ 400 รอบ/นาที ถึง 800 รอบ/นาที เท่านั้น ลักษณะการทำงานของใบพัดชนิดนี้ ของเหลวจะไหลผ่านใบพัดและพุ่งตรงออกไปเป็นเส้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ของเหลวที่ไหลผ่านนั้นถูกตัดและเฉือนกับใบพัดอย่างรวดเร็ว ใบพัดชนิดนี้สามารถดึงของเหลวให้ไหลผ่านตัวเองได้อย่างต่อเนื่องและทั่วถึง จึงเหมาะสำหรับใช้กับชุดถังกวนขนาดใหญ่ ใบของใบพัดชนิดนี้ มีลักษณะบิดเป็นเกลียวก้นหอย โดยเกลียวเหล่านี้ทำหน้าที่ผลักให้ของเหลวไหลผ่านออกไป เมื่อใบพัดหมุนครบ 1 รอบ ของเหลวจะถูกผลักออกไปเป็นระยะทางเท่ากับระยะเกลียว 1 รอบหมุน อัตราส่วนระหว่างระยะทางที่ของเหลวไหลผ่านเมื่อใบพัดหมุน 1 รอบ ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัดเรียกว่า Pitch โดยปกติใบพัดจะมี pitch เท่ากับ 1 ซึ่งเรียกว่า Square Pitch รูปที่ 2.2 a แสดงรูปใบพัด (Propellers) มาตรฐานแบบ 3ใบ ขนาด Square Pitch ซึ่งใช้กันทั่วไป ใบพัด (Propellers) อาจออกแบบให้มี 4 ใบ หรือหลายๆ ใบเรียงกันก็ได้ขึ้นอยู่กับจุดประสงค์การใช้งาน โดยปกติใบพัด (Propellers) มักมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 18 นิ้ว ถังกวนใบเดียวกันอาจมี 2 ใบพัดหรือมากกว่า ติดตั้งอยู่บนเพลาเดียวกัน โดยอาจหมุนในทิศทางเดียวกัน หรือหมุนตรงข้ามกันเพื่อกวนของเหลวให้ไหลรุนแรงในลักษณะ ดึงของเหลวลงไปตามใบพัด (Push-Pull)

- **ใบพาย (Paddles)** ตามปกติใบพายแบบ Paddles มักมี 2 – 3 ใบ โดยมากมีใบพายตั้งตรง แต่อาจมีลักษณะเป็น Pitch ก็ได้ ใบพายแบบ Paddles เหมาะสำหรับงานที่กวนด้วยความเร็วต่ำๆ ใบพายตั้งอยู่ตรงกลางถังกวน โดยจะหมุนผลักของเหลวให้ออกไปในแนวรัศมี พร้อมทั้งหมุนของเหลวให้เคลื่อนไปรอบๆ ในขณะที่แรงผลักแนวตั้งมีน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย เว้นแต่กรณีที่เป็นใบพายแบบ Pitch เท่านั้น เส้นการไหลของเหลวถูกผลักออกจากศูนย์กลางใบพาย พุ่งชนผนังถังกวน จากนั้นจึงแยกออกเป็น 2 ส่วนไหลขึ้นและลงขนานไปกับผนัง สำหรับถังกวนที่มีความลึกมากๆ อาจติดตั้งใบพาย Paddle ได้มากกว่า 1 อันเรียงตามแนวแกนเดียวกัน บางกรณีใบพายถูกออกแบบมาให้มีลักษณะเหมือนจานหรือถ้วย ซึ่งทำให้สามารถผลักของเหลวในทิศทางที่ต้องการได้ดีกว่า ใบพายชนิดดังกล่าวนี้เรียกว่า Anchor Agitator ใบพายแบบ Anchor สามารถป้องกันการตกตะกอนบนผิวหน้าที่มีการแลกเปลี่ยนความร้อน ภายในถังกวนที่ผิวผนังของถังมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี แต่ให้คุณสมบัติทางการผสมไม่ดีนัก จึงมักใช้งานร่วมกับใบกวนแบบอื่นๆ โดยอาจให้หมุนในทิศทางเดียวกันหรือตรงข้ามกันก็ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ใบกวน : (a) ใบพัดชนิด Marine Propeller แบบ 3ใบ; (b) กังหัน(Turbine) แบบ Open Straight-Blade; (c) กังหัน(Turbine) แบบ Bladed Disk ; (d) กังหัน(Turbine) แบบใบโค้งตั้ง; (e) กังหัน(Turbine) แบบ Pitched-Blade

ในทางอุตสาหกรรม ใบพาย (Paddles) มักหมุนที่ความเร็วรอบประมาณ 20-50 รอบ/นาที และมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 50-80% ของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน มีความกว้างใบพายประมาณ 1/6 หรือ 1/10 ของความยาวใบ ในรอบการกวนต่ำๆ ใบพายชนิดนี้จะให้การไหลของของเหลวแบบราบเรียบ แต่ถ้ารอบการกวนสูงขึ้นก็จะเกิดน้ำวน (Vortex) ขึ้นได้ง่าย จึงจำเป็นต้องมีแผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) ติดตั้งในถังกวนด้วยเสมอ

- **กังหัน (Turbines)** ในภาพที่ 2.2 b, 2.2c, 2.2d และ 2.2e เป็นรูปตัวอย่างกังหัน(Turbines) แบบต่างๆ ทุกๆ แบบมีลักษณะคล้ายกันคือ มีใบสั้นและหมุนด้วยความเร็วสูง ตัวใบอาจมีลักษณะแบบตั้งตรง โค้ง แบบ Pitch ก็ได้ ใบกวนชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า Paddles และมีขนาดประมาณ 30-50% ของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน กังหัน (Turbines) ใช้กับของเหลวได้หลายช่วงความหนืด สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ กังหัน (Turbines) จะทำให้เกิดการไหลปะทะกับผนังถังกวนอย่างรุนแรง โดยของเหลวจะพุ่งออกทางแนวรัศมีและหมุนวนรอบถังกวน ลักษณะการหมุนดังกล่าวทำให้เกิดน้ำวน (Vortex) ขึ้นได้ง่าย แต่อาจป้องกันได้โดยติดตั้งแผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) ไว้ในถังกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 รูปแบบการไหลของ ของเหลวในถังกวน

การไหลของของเหลวในถังกวนจะมีลักษณะอย่างไรนั้นขึ้นอยู่กับ ชนิดของใบกวน ลักษณะของเหลวขนาด และคุณสมบัติอื่นๆ การไหลของของเหลวสามารถแบ่งออกได้ 3 ลักษณะ

1. ความเร็วการไหลตามแนวรัศมีซึ่งมีทิศทางตั้งฉากกับแกนหมุน
2. ความเร็วการไหลในแนวดิ่ง ซึ่งมีทิศทางขนานกับแกนหมุน
3. ความเร็วการไหลรอบวง ซึ่งมีทิศรอบแกนหมุนเป็นวงกลม

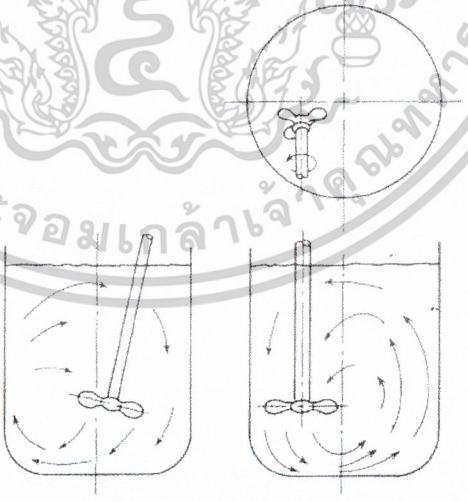
ในกรณีที่ใช้แกนหมุนในแนวดิ่ง จะถือความเร็วในแนวรัศมีและความเร็วหมุนรอบวงเป็นแนวนอนและจะถือความเร็วแนวดิ่งเป็นแนวตั้ง ความเร็วการไหลตามแนวรัศมีและแนวดิ่งนั้นถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิดการผสมของเหลวในถังกวน ในขณะที่ความเร็วการไหลรอบวงกลับไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากเป็นส่วนที่ก่อให้เกิดน้ำวน (Vortex) ดังแสดงรูปที่ 2.3 ซึ่งเป็นกรณีของกังหันแบบ Flat-Bladed Turbine ในความเป็นจริง ไม่ว่าจะเป็นใบกวนแบบไหน ก็สามารถทำให้เกิดน้ำวน (Vortex) ขึ้นได้ทั้งนั้น โดยน้ำวน (Vortex) จะมีผลทำให้การไหลในแนวดิ่งและแนวรัศมีลดลง ซึ่งหากมีอนุของแข็งผสมอยู่ก็จะทำให้เกิดการตกตะกอนอยู่บริเวณพื้นถังได้ นอกจากนั้นยังทำให้ความหนืดระหว่างใบกวนกับของเหลวมีค่าลดลงอีกด้วย ในใบกวนที่หมุนด้วยความเร็วสูงน้ำวน (Vortex) อาจลึกจนถึงใบกวนหรือก้นถังกวน ซึ่งทำให้อากาศจากด้านบนเข้ามาปะปนอยู่ในของเหลวได้

รูปที่ 2.3 ลักษณะการเกิดน้ำวน ของ Radial-Flow Turbine ที่เกิดในถังกวนไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การป้องกันการเกิดน้ำวน (Vortex)

เราสามารถใช้การไหลของเหลวแบบใดแบบหนึ่งจากทั้ง 3 แบบดังกล่าวเพื่อสกัดกั้นมิให้เกิดน้ำวน (Vortex) ขึ้นได้ สำหรับถังกวนขนาดเล็กอาจใช้วิธีเอียงใบกวนไม่ให้อยู่ในแนวกลางถัง ดังรูปที่ 2.4 สำหรับถังกวนขนาดใหญ่อาจใช้วิธีเลื่อนใบกวนออกไปทางด้านข้าง ซึ่งการกระทำดังกล่าวมีผลให้รัศมีการกระจายของเหลวเปลี่ยนไปและสามารถลดการเกิดน้ำวน (Vortex) ได้ การป้องกันน้ำวน (Vortex) ที่นิยมใช้กับชุดถังกวนแนวดิ่งคือ การติดตั้งแผ่นกั้น (Baffles) ที่บริเวณผนังถังกวนโดยแผ่นกั้น(Baffles) ดังกล่าวจะทำหน้าที่ขัดขวางมิให้เกิดการไหลในแนวรอบวง แต่ไม่ขวางกั้นการไหลในแนวรัศมีและแนวตั้ง แผ่นกั้น (Baffles) ในถังกวนอาจมีลักษณะเป็นแผ่นยาวติดตั้งกับผนังถัง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 สำหรับถังที่มีขนาดใหญ่มากๆ อาจมีแผ่นกั้น (Baffles) ถึง 4 ใบ ในถังที่มีใบกวนแบบ Turbines จะต้องมีความกว้างแผ่นกั้น (Baffles) ไม่เกิน 1/20 ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง และในถังที่มีใบพัด (Propellers) ต้องมีความกว้างแผ่นกั้น (Baffles) ไม่เกิน 1/18 ของเส้นผ่านศูนย์กลางถัง โดยเมื่อติดตั้งแผ่นกั้น (Baffles) แล้วก็ไม่จำเป็นต้องเลื่อนใบกวนออกทางด้านข้างอีกเมื่อสามารถหยุดการไหลในแนวรอบวงได้แล้ว ลักษณะการไหลของเหลวก็จะขึ้นอยู่กับชนิดใบกวน โดยแท้จริง ใบพัด (Propeller) มักใช้ขับของเหลวออกทางด้านล่างเพื่อให้ปะทะกับพื้นถัง แล้วกระจายย้อนกลับขึ้นด้านบน แล้วไหลกลับใบกวนอีกครั้ง ใบพัด (Propeller) มักใช้เมื่อต้องการให้เกิดการไหลในแนวดิ่งอย่างรุนแรง เช่น เมื่อต้องการแขวนลอยอนุภาคของแข็งในของเหลว แต่ไม่นิยมใช้เมื่อของเหลวมีความหนืดเกินกว่า 50 P



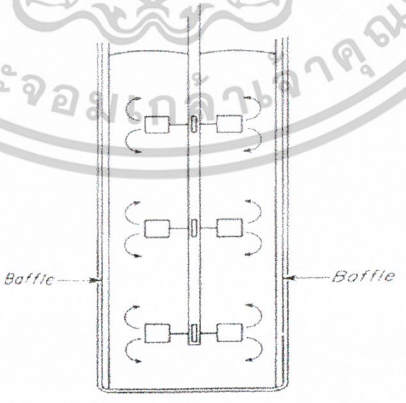
รูปที่ 2.4 รูปแบบการไหลของของเหลว เมื่อใบกวนไม่ได้อยู่ตรงจุดศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบพาย (Paddles) และกังหันแบบ Flat-Blade Turbines เป็นใบกวนที่ขับของเหลวออกทางแนวรัศมีได้ดี ทำให้ของเหลวพุ่งออกสู่ผนังของถังกวนและแยกออกเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 2.5 โดยส่วนหนึ่งไหลตามผนังลงสู่ด้านล่างอีกส่วนหนึ่งไหลขึ้นไปด้านบน แล้วย้อนกลับสู่ใบกวนอีกครั้ง สำหรับถังที่ไม่มีแผ่นกั้น (Unbaffles) ใบกวนชนิดนี้จะทำให้เกิดน้ำวน (Vortex) อย่างรุนแรง แต่หากมีแผ่นกั้น (Baffles) ก็จะทำให้เกิดการไหลในแนวดิ่งได้ดีและทำให้ของเหลวสามารถผสมกันได้ดีขึ้น ในถังกวนแบบแนวดิ่ง ควรให้ความลึกของเหลวมีขนาดเท่ากับหรือมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน และหากของเหลวมีความลึกมากก็อาจจัดให้มีใบกวน 2 ชุดหรือมากกว่าติดตั้งอยู่ในแนวแกนเดียวกัน โดยแต่ละตัวต่างมีทิศทางการหมุนเป็นของตัวเอง ดังในรูปที่ 2.5 สำหรับใบกวนด้านล่างนิยมใช้เป็นแบบกังหัน หรือแบบใบพัด

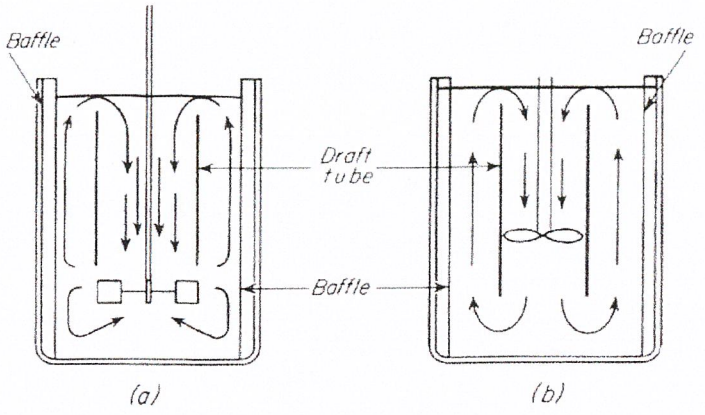
2.1.5 ท่อกั้น (Draff Tubes)

ของเหลวที่ย้อนกลับเข้าสู่ใบกวนนั้นมีการไหลมาจากทุกทิศทาง สำหรับชุดถังกวนที่ต้องการควบคุมทิศทางและความเร็วของเหลวที่ไหลเข้าออกใบกวนจะต้องใช้ท่อกั้น (Draff Tubes) เป็นตัวควบคุมการไหล (ดังในรูปที่ 2.6) โดยท่อกั้น (Draff Tubes) ดังกล่าวมักใช้กับงานที่ต้องการให้เกิด แรงเฉือน (Shear) ในใบกวนอย่างรุนแรง เช่นใช้ในอุตสาหกรรม ผสมของเหลว (Emulsions) หรือใช้เมื่อองค์ประกอบของแข็งที่ผสมอยู่มีแนวโน้มจะลอยตัวขึ้นบนผิวของเหลว ในกรณีใบกวนแบบ Propellers จะมีการติดตั้งท่อกั้น (Draff Tubes) ไว้รอบใบกวน แต่สำหรับใบกังหัน (Turbines) จะครอบท่อกั้น (Draff Tubes) ไว้เฉพาะด้านบนเท่านั้น ดังแสดงในรูป 2.6 การติดตั้งท่อกั้น (Draff Tubes) สามารถทำให้เกิด แรงต้านของของเหลว (Fluid Friction) ขึ้นในระบบ และทำให้เกิดกำลังที่ให้กับของเหลวมากขึ้น เนื่องจากช่วยลดอัตราการไหลที่ไม่จำเป็นออกไป



รูปที่ 2.5 ใบกังหัน (Turbines) หลายๆ ตัวที่ติดตั้งในถังกวนทรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



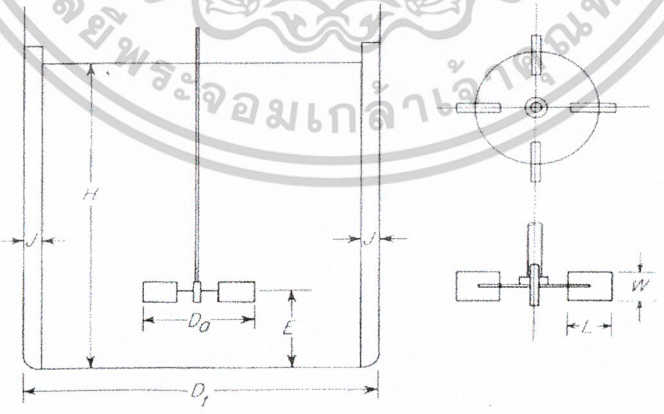
รูปที่ 2.6 ท่อกั้น (Draff Tubes) และถังกวนชนิดมีแผ่นกั้น (Baffles)
(a) ใบกังหัน (Turbines); (b) ใบพาย (Propeller)

2.1.6 มาตรฐานการออกแบบ Turbine

โดยปกติเราสามารถออกแบบชุดถังกวนได้หลายส่วนทั้ง ชนิดใบกวน ขนาดและสัดส่วนของถังกวน จำนวนและแผ่นกั้น (Baffles) ฯลฯ การออกแบบเหล่านี้มีผลต่อลักษณะความเร็วการไหลของเหลว รวมถึงการสิ้นเปลืองกำลังงานที่ใช้ ก่อนจะกล่าวถึงการออกแบบชนิดอื่น เราจะกล่าวถึงรูปแบบชุดถังกวนแบบ Turbine Agitator แบบมาตรฐาน ดังที่แสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้ทั่วไป โดยมีคุณสมบัติดังนี้

$$\frac{D_a}{D_t}=\frac{1}{3} \qquad \frac{H}{D_t}=1 \qquad \frac{J}{D_t}=\frac{1}{12}$$

$$\frac{E}{D_t}=\frac{1}{3} \qquad \frac{W}{D_a}=\frac{1}{5} \qquad \frac{L}{D_a}=\frac{1}{4}$$



รูปที่ 2.7 การวัดขนาดใบกังหัน (Turbines)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถังกวนดังกล่าวนี้มี แผ่นกั้น Baffles) 4 ใบ จากจำนวนใบที่อาจมีได้ตั้งแต่ 4-16 ใบ แต่โดยทั่วไปจะมี 6 และ 8 ใบ นอกจากนี้ยังอาจสามารถดังแปลงคุณสมบัติข้างต้นเพื่อปรับให้เหมาะกับการใช้งานได้อีก เช่น วางใบกวนให้สูงหรือต่ำลง ใช้ถังกวนให้ลึกหรือตื้นกว่าเดิม

2.1.7 ความเร็วการไหล การหมุนเวียนของเหลว และการใช้กำลังงาน

เพื่อให้ชุดถังกวนมีประสิทธิภาพที่ดีพอ ผู้ออกแบบต้องคำนึงถึงปริมาณการไหลที่เกิดจากใบกวนให้มีมากพอและทั่วถึง รวมถึงเวลาในการกวน ความเร็วของการไหลที่ต้องมากพอและสามารถผลักของเหลวออกไปได้ไกลทั่วถึง โดยหากเป็นกรณีที่เป็นการผสมสารก็จำเป็นต้องคำนึงถึงความปั่นป่วน (Turbulence) รวมถึงทิศทางการไหลของเหลวด้วย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงเรื่องกำลังงานที่ให้กับของเหลว และค่า ตัวแปร (Parameter) ต่างๆ การออกแบบชุดถังกวนบางถังมีจุดประสงค์เพื่อให้มีการไหลวนมากๆ และมีความเร็วการไหลแรงสูง ในขณะที่บางถังออกแบบมาให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) สูงเป็นหลัก การออกแบบดังกล่าวจำเป็นต้องให้ความสำคัญกับชนิด ขนาดของใบและถังกวน ซึ่งโดยทั่วไปใบกวนขนาดใหญ่จะใช้กวนที่ความเร็วรอบปานกลาง และใบกวนขนาดเล็กจะใช้กวนที่ความเร็วรอบสูงๆ หรือเมื่อต้องการให้เกิดความปั่นป่วน (Turbulence) รุนแรงเท่านั้น

2.2 การผสม (Blending And Mixing)

การผสมมีรายละเอียดที่ซับซ้อนกว่าการกวนมาก สำหรับการกวน แม้ลักษณะความหนืดการใช้กำลังงานจะมีความซับซ้อนแต่ก็สามารถตรวจวัดและจำลองภาพได้ชัดเจนกว่า ในขณะที่การผสมนั้นจำลองภาพได้ยากและมีตัวแปรเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยมาก การวัดค่าการผสมจึงต้องอาศัยผลจากการทดลองเป็นสำคัญ บ่อยครั้งที่วัดคุณภาพของการผสมได้จากการสังเกตการแทรกตัวของอากาศและการเปลี่ยนสี Indicator กรด-เบส ของสารนั้นๆ หรืออาจใช้เกณฑ์ตรวจวัดอื่นๆ เช่น การกระจายตัวของสารหรือการเพิ่มขึ้น ลดลงของอุณหภูมิ การละลายของสารหนึ่งเข้ากับอีกสารหนึ่ง หรืออาจสังเกตจากการแขวนลอยของส่วนผสม สำหรับสารที่มีของเหลวและของแข็งผสมกัน

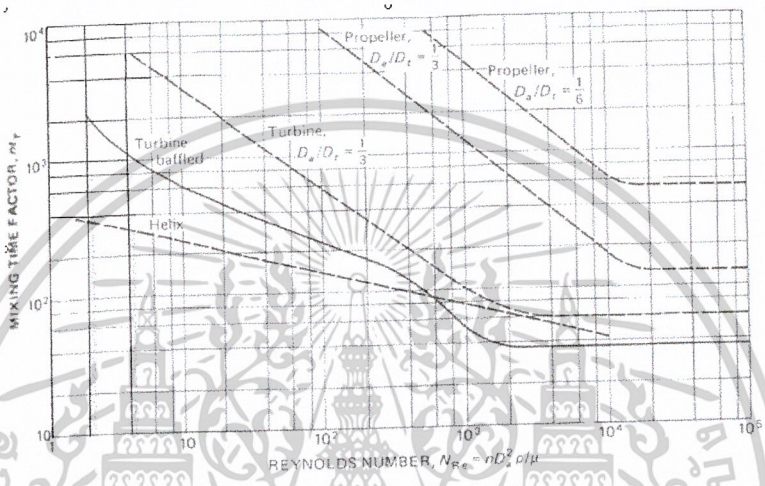
2.2.1 การผสมของเหลวที่สามารถละลายเข้ากันได้

การผสมของเหลวที่มีคุณสมบัติเข้ากันได้ มักใช้วิธีผสมด้วยใบกวน โดยติดตั้งใบกวนอยู่ตรงกลางภายในถังผสมขนาดเล็ก แต่สำหรับถังผสมขนาดใหญ่หรือบ่อบำบัดอาจใช้ใบกวนติดตั้งอยู่ด้านข้างหรือใช้การผสมด้วยการฉีดของผสมเข้าในถังผสม (Jet Mixer) สำหรับการผสมภายในถังผสมขนาดเล็กจะทำให้ของเหลวสามารถเข้ากันได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ถังผสมขนาดใหญ่อาจต้องใช้เวลานานกว่า หรืออาจต้องค่อยๆ เทสารลงผสมทีละชั้นซึ่งทำให้เสียเวลาอย่างมาก

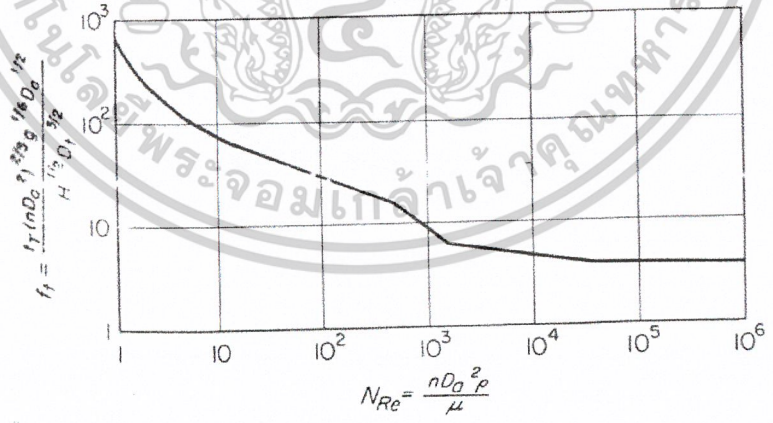
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การผสมภายในภาชนะ (Process Vessels)

สำหรับการผสมในภาชนะ ของเหลวจะผสมเข้ากับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดสูงๆ ได้ดีเฉพาะบริเวณที่อยู่ใกล้กับใบกวนเท่านั้น เนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความปั่นป่วน (Turbulence) สูง และเมื่อผลิตภัณฑ์เข้ากับของเหลวบ้างแล้ว การไหลก็จะช้าลงกลายเป็นการไหลวนอยู่รอบๆ ผนังของถังผสม โดยช่วงนี้จะเกิดการผสมแบบตามแนวรัศมี (Radial Mixing) บ้างเล็กน้อย จากนั้นจึงหมุนเข้ามายังใบกวนที่เป็นศูนย์กลางอีกครั้ง การผสมแบบดังกล่าวส่วนผสมจะสามารถเข้ากันได้ถึง 99% ในระยะการผสม 5 ครั้ง



รูปที่ 2.8 ระยะเวลาการผสมภายในชุดถังกวน Agitated Vessels เส้นประหมายถึงเป็นถังกวนชนิดไม่มีแผ่นกั้น (Unbaffles) เส้นทึบหมายถึงถังกวนชนิดมีแผ่นกั้นขอบถัง(Baffles)



รูปที่ 2.9 ระยะเวลาการผสมสำหรับของเหลวที่เข้ากันได้ ภายในชุดถังกวน Turbine-Agitated Vessels ชนิดมีแผ่นกั้นขอบถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การผสมแบบปรับแกนกวน

เพื่อให้การผสมภายในถังที่มีขนาดใหญ่มีประสิทธิภาพมากขึ้น จำเป็นต้องปรับแกนกวนให้ทำมุมเอียงกับผนังถังผสม โดยมุมเอียงที่ได้ผลดีที่สุดคือ 80 ° และ 83 ° ส่วนระยะเวลาการผสมนั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลเวียน (Circulation Rate) โดยเฉพาะการแทรกปะทะ (Erosion) กันระหว่างชั้นของเหลวที่จะทำการผสม

2.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 ความเร็วปลายใบกวน

พิจารณาใบกังหัน Flat-Bladed Turbine Impeller ดังที่แสดงในรูป 2.10

u = ความเร็วการหมุนใบกังหัน (Blade Tips)

V'_{u2} = ความเร็วตามเส้นสัมผัสวงกลม

V'_{r2} = ความเร็วตามแนวรัศมีของของเหลวที่ออกจากปลายใบกวน

V'_2 = ความเร็วทั้งหมดของของเหลว ณ. จุดนั้น

รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ความเร็วที่บริเวณปลายใบกังหัน (Turbine Impeller)

สมมุติว่า ความเร็วตามเส้นสัมผัสวงกลมของของเหลว มีค่าเท่ากับ k ของความเร็วปลายใบกังหัน

$$V'_{u2} = ku_2 = k\pi D_a n \qquad (2.1)$$

เนื่องจาก $u_2 = \pi D_a n$ อัตราการไหลที่ไหลผ่านใบกังหันจึงเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = V_{r2}' A_p \tag{2.2}$$

A_p = พื้นที่ ที่ปลายใบกังหันกวาดไปถึง

$$A_p = \pi D_a W \tag{2.3}$$

D_a = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหัน

W = ความกว้างของใบกังหัน

จากรูปที่2.10 จะได้สมการว่า

$$V_{r2}' = (u2 - V_{u2}')\tan\beta_2' \tag{2.4}$$

แทนค่า V_{u2}' ในสมการที่ (2.1) ลงไปจะได้สมการ

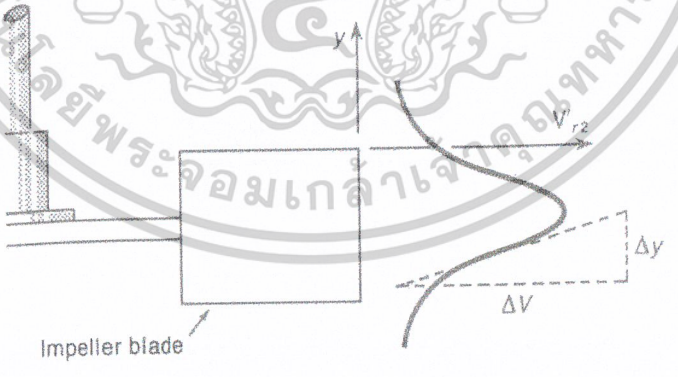
$$V_{r2}' = \pi D_a n(1-k)\tan\beta_2' \tag{2.5}$$

รูปที่ 2.11 แสดงถึง ความเร็วการไหลของเหลวที่พุ่งออกจากใบกังหัน (Turbine) มาตรฐาน โดยความเร็วที่แสดงในภาพเป็นความเร็วที่ปลายใบกังหัน จะเห็นได้ว่าความเร็วที่กึ่งกลางใบกังหันมีค่ามากที่สุด และจะมีค่าน้อยลงที่ขอบบนและล่าง ต่อไปเราจะกล่าวถึงความเร็วที่เปลี่ยนไปเมื่อมีระยะห่างจากปลายใบกังหันมากขึ้น

q = อัตราการไหลที่ออกจากใบกังหันทั้งหมดเมื่อวัดที่ปลายใบกังหัน

สรุปสมการการไหลของของเหลวได้ดังนี้

$$q = K\pi^2 D_a^2 nW(1-k)\tan\beta_2' \tag{2.6}$$



รูปที่ 2.11 รูปเส้นความเร็วปกติที่ไหลออกจากใบกังหัน Straight-Blade Turbine แสดงการกำหนด Shear Rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

K = ค่าคงที่ ที่ใช้แทนความเร็วตามแนวรัศมีจริง ซึ่งไม่สม่ำเสมอกันตลอดความกว้างของใบกวน

W = สัดส่วนของใบกวนเมื่อเทียบกับ D_a

K, = ค่าคงที่โดยประมาณ

K = ค่าคงที่โดยประมาณ

β'_2 = ค่าคงที่โดยประมาณ

$$q \alpha n D_a^3 \tag{2.7}$$

อัตราส่วนระหว่างค่าทั้งสองข้างต้นนี้ เรียกว่า Flow Number N_Q ซึ่งนิยามได้สมการว่า

$$N_Q \equiv \frac{q}{nD_a^3} \tag{2.8}$$

N_Q = ค่าคงที่สำหรับแต่ละชนิดใบกวน

สำหรับใบกังหันมาตรฐานแบบ Flat-Blade Turbine ภายในภาชนะแบบมีแผ่นกั้น(Baffles)

N_Q = 1.3

ซึ่งเป็นค่าการไหลที่ออกจากปลายใบกวนเท่านั้น ไม่ใช้การไหลทั้งหมดที่ใบกวนทำได้ ทันทีที่ของเหลวพุ่งออกมาจากใบกวนจะมีความเร็วสูง และจะค่อยๆ ลดลงเมื่อของเหลวเคลื่อนห่างออกมา อัตราการไหลมวลรวม (Total Flow Rate) เพิ่มมากขึ้น

สำหรับใบกังหันแบบ Flat-Blade Turbines สามารถประมาณการไหลมวลรวม

$$q_T = 0.92 n D_n^3 \left(\frac{D_t}{D_a} \right) \tag{2.9}$$

อัตราส่วน D_t/D_a มีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้น q_T จึงเท่ากับ $2.76nD^3_a$ หรือเป็น 2.1 เท่าของการไหลที่ใบกวน (N_Q = 1.3) ดังนั้นสมการ (2.9) จึงควรใช้กับอัตราส่วน D_t/D_a ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4

สำหรับใบกวนแบบ Axial-Flow Impellers เช่น Pitched-Blade Turbines หรือ Marine Propellers

Q = อัตราการไหลของเหลวในแนวตั้ง โดยทำการวัดใต้ใบกวนทันทีที่เกิดการหมุน

ในการออกแบบเราอาจพิจารณาให้ N_Q เป็นค่าคงที่ โดยถังกวนแบบมีแผ่นกั้น(Baffles) จะมีค่า N_Q ดังนี้

สำหรับใบกวน Marine Propellers (Square Pitch)

N_Q = 0.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

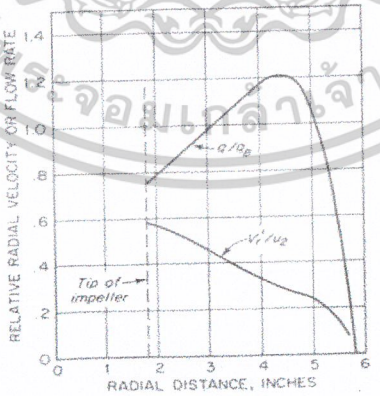
55702

สำหรับใบกวน Turbine 4 ใบ 45^{o} ($W/D_a = 1/6$)

$$N_Q = 0.87$$

2.3.2 รูปความเร็วและ Velocity Gradients

รูปแบบการไหล ความเร็ว และการไหลโดยรวมทั้งหมด เป็นข้อมูลที่ได้จากเครื่องตรวจสอบความเร็วขนาดเล็ก หรือจากการตรวจ Photographic Of Tracer Particles รูปที่ 2.12 แสดงข้อมูลบางส่วนที่ได้จากถังกวน Flat-Blade Turbine ขนาด 4 นิ้ว ทดสอบในถังขนาด 11.5 นิ้ว จากรูปแสดงให้เห็นว่า ความเร็วตามแนวรัศมีของของเหลวที่ออกจากปลายใบกวน หรือ V'_r มีขนาดประมาณ 0.6 เท่าของความเร็วใบกวน และเมื่อระยะห่างจากแนวแกน(Centerline) ออกไป ความเร็วรัศมีก็จะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่ามวลความเร็วมีการขยายวงกว้างออกไปมากขึ้น และเมื่ออินทิเกรดค่าการไหลทั้งหมดพบว่าได้เท่ากับ $0.75q_B$ และ q_B คือค่าการไหลออกจากใบกวนโดยสมมติให้ของเหลวเคลื่อนออกจากใบกวนด้วยความเร็ว u_2 ดังนั้น จึงมีการไหลแบบ Entrained Flow คิดเป็น 25% ของการไหลที่เกิดจากใบกวนโดยตรง เมื่อแรงผลักพุ่งออกจากใบกวนมันจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากมีพื้นที่การไหลเพิ่มขึ้น และของเหลวถูก Entrain มากขึ้น ความเร็วจะมีการลดลงเป็นเส้นตรงตามระยะรัศมี โดย V'_r มีค่าเกือบจะคงที่ ปริมาณการไหลมีการเพิ่มขึ้นตามแนวรัศมีจนมีค่าเป็น $1.2q_B$ เนื่องจากเกิด Further Entrainment จากนั้นเมื่อใกล้ผนังภาชนะก็จะลดค่าลง เนื่องจากมวลการไหลเกิดการแยกเป็น 2 ส่วนคือ ไหลวนขึ้นไปข้างบนกับไหลวนลงด้านล่าง เมื่อเทียบค่าการไหลสูงสุดซึ่งเท่ากับ $1.2q_B$ กับความเร็วรัศมีสูงสุด $0.6u_2$ แล้วจะเห็นว่า การไหลทั้งหมดนั้นมีค่าเป็น 2 เท่าของการไหลที่เกิดจากใบกวนโดยตรง ซึ่งสอดคล้องกับค่า Factor 2.1 ที่คำนวณได้จากสมการ 2.9

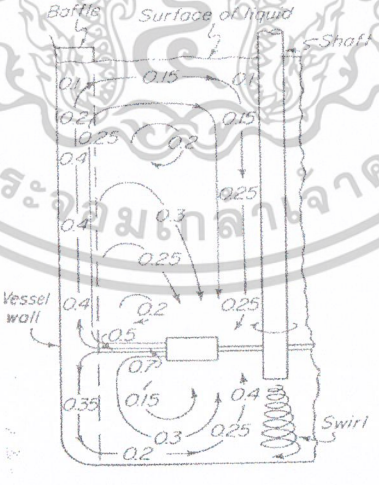


รูปที่ 2.12 ค่าความเร็วตามแนวรัศมี V'_r/u_2 และปริมาณอัตราการไหล q/q_B ในชุดถังกวน Turbine-Agitated Vessel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Velocity Gradients ในถังกวนมีการเปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางจากจุดถึงจุดภายในของเหลว ดังในรูปที่ 2.11 Gradient มีค่าเท่ากับ $\Delta V / \Delta y$ จะเห็นได้ว่าบริเวณใกล้ขอบ Jet จะมีค่า Gradient มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วมีค่าสูงขึ้นในขณะที่ Jet แคบลง เมื่อพิจารณาความเร็วแนวตั้งที่ส่วนบนของใบกวน Velocity Gradient จะมีค่าประมาณ 0.9u/0.75W โดย 0.9u เป็นค่าที่ได้จากความเร็วแนวรัศมีกับความเร็วรอบวง และ 0.75W คือครึ่งหนึ่งของความกว้างของท่อทางออกของของเหลว ที่พุ่งออกจากใบกวน ดังนั้นสำหรับใบกังหัน Standard Turbine จะได้ $u = \pi n D_a$ และ $W = D_a/5$ สอดคล้องกับค่า 19n ที่ใช้เป็นค่าประมาณแรงเฉือน (Shear) สูงสุดที่เกิดบริเวณใกล้ใบกังหัน (Turbine) โดยเมื่อแรงดันทางออกของของเหลวถูกขับออกจากใบกังหันความเร็วของมันจะช้าลง และมีค่า Velocity Gradient ที่ขอบทางออกของของเหลวลดลงด้วย อนึ่งในขณะที่ใบกังหันกำลังหมุน ด้านหลังของใบกังหันจะเกิดน้ำวน(Vortex)อย่างรุนแรงโดยอาจมีอัตราการเฉือน (Shear Rate) สูงถึง 50 n

รูปที่ 2.13 เป็นภาพจากการสังเกตการไหลของเหลวที่เกิดจาก ใบกังหัน (Turbine) แบบ 6 ใบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 นิ้ว มีอัตราการหมุน 200 รอบ/นาที ภายในถังกวนขนาด 12 นิ้ว ซึ่งบรรจุด้วยน้ำ จากภาพเป็นภาพตัดขวางตามแนวแกนหมุนผ่านด้านแผ่นกั้น (Baffles) จะเห็นได้ว่าของเหลวถูกผลักจากใบกังหันออกทางแนวรัศมี กระจายไหลในแนวตั้ง แล้วไหลย้อนกลับทางด้านบนและล่างเข้าสู่แกนเพลาและใบกังหันอีกครั้ง ด้านล่างของถังนับตั้งแต่ใต้แกนเพลาลงมา ของเหลวมีลักษณะการไหลแบบหมุนวน ในขณะที่บริเวณอื่นยังคงเป็นกระแสการไหลในแนวรัศมีกับแนวตั้ง



รูปที่ 2.13 รูปแบบความเร็วของไหลในชุดถังกวนแบบ Turbine Agitator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวเลขที่แสดงในภาพ 2.13 แสดงค่าความเร็วของเหลว ณ.จุดต่างๆ หารด้วยความเร็วบนใบกังหัน โดยความเร็วที่บนใบกังหันมีค่าเท่ากับ 4.8 ft/s (1.46 m/s) เห็นได้ว่าเมื่อเข้าใกล้ผนังถังกวน ความเร็วของทางออกของของเหลวมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าเป็น 0.4 เท่าของความเร็วบนใบกังหัน ในขณะที่ความเร็ว ณ.จุดอื่นๆ มีค่าประมาณ 2.5 เท่า และของเหลวเกือบจะหยุดนิ่งที่บริเวณด้านบนและล่างของใบกังหันซึ่งมีค่าความเร็วเพียง 0.10 ถึง 0.15 ของความเร็วบนใบกังหันเท่านั้น การเพิ่มความเร็วการหมุนใบกังหัน มีผลให้ความเร็วของเหลวที่บนใบกังหันและอัตราการหมุนวนมีค่าสูงขึ้น

2.3.3 กำลังงานที่ใช้ขับใบกวน (Power Consumption)

สิ่งสำคัญประการหนึ่งที่ต้องคำนึงเมื่อออกแบบชุดถังกวนคือ พลังงานที่ต้องใช้ขับเคลื่อนใบกวน เมื่อของเหลวถูกกวน อาจคำนวณค่ากำลังงานที่ต้องใช้ได้จากการไหลอันเกิดจากใบกวนและค่าพลังงาน Kinetic Energy E_k ต่อปริมาณการไหล โดย

$$q = nD_a^3 N_Q \quad \text{และ} \quad E_k = \frac{\rho (V_2')^2}{2 g_c}$$

ความเร็ว V'_2 มีค่าน้อยกว่าความเร็วที่บนใบกวน u_2 เล็กน้อย ถ้าเราแทนอัตราส่วน V'_2/u_2 ด้วย α $V'_2 = \alpha\pi nD_a$ กำลังงานที่ต้องการจะเท่ากับ

$$p = \frac{\rho n^3 D_a^5}{g_c}\left(\frac{\alpha^2\pi^2}{2} N_Q\right) \tag{2.10}$$

จัดรูปใหม่ได้เป็น

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \frac{\alpha^2\pi^2}{2} N_Q \tag{2.11}$$

$$N_P = \frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} \tag{2.12}$$

สำหรับ Standard Six-bladed Turbine

N = 1.3

α = 0.9

2.3.4 กำลังงานในการกวนของเหลว (Power Correlation)

การประมาณค่ากำลังงานที่ใช้สำหรับหมุนใบกวนให้มีความเร็วตามที่ต้องการ จำเป็นต้องทราบถึงค่า ความสัมพันธ์ของกำลังงาน รวมถึงตัวแปรอื่นที่จำเป็นของระบบ รูปแบบความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถหาได้จากการวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis) โดยจะนำมิติต่างๆ ของถังกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และใบกวน ระยะระหว่างใบกวนถึงพื้นถังกวน ความลึกของของเหลวที่ใช้กวน และมิติของแผ่นกั้น (Baffles) มาเป็นตัวแปร โดยทั้งนี้จำนวนและการจัดวางแผ่นกั้น (Baffles) และจำนวนใบของใบกวน เป็นค่าที่ถูกกำหนดไว้ก่อนแล้ว ค่าตัวแปรที่นำมาวิเคราะห์มิติได้แก่ ค่าที่วัดได้จากถังกวนและใบกวน

μ = ค่าความหนืดของเหลว

ρ = ความหนาแน่นของเหลว

n = ความเร็วการกวน

g_c = ค่ามิติคงที่ อันเนื่องมาจากกฎของนิวตัน

ยกเว้นการประมาณค่าการหมุนวน การเกิดน้ำวน(Vortex)ในของเหลวบางชนิด ซึ่งต้องนำค่า แรงลอยตัวเข้ามาเป็นตัวแปรในการวิเคราะห์ด้วย

ค่าการวัดขนาดเชิงเส้น (Linear Measurement) สามารถแปลงให้เป็นค่าอัตราส่วนมิติ (Dimensionless Ratios) ที่เรียกว่าแฟคเตอร์สัดส่วน (Shape Factors) ได้ โดยการหารแต่ละค่าด้วยเลขตัวใดตัวหนึ่งซึ่งอาจเป็น

D_a = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

D_t = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน

โดยจะแทนค่า แฟคเตอร์สัดส่วน (Shape Factors) ด้วย S_1, S_2, S_3, …, S_n และจะแทนขนาดเครื่องมือด้วยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน D_a และใช้ D_a เป็นตัวแปรสำหรับใช้ในการวิเคราะห์ด้วย ในกรณีที่เป็นการวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis) โดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางถัง เป็นหลัก ถังผสม 2 ถังที่มีขนาดต่างกันแต่มีสัดส่วนเหมือนกันจะมี แฟคเตอร์สัดส่วน (Shape Factors) เหมือนกันด้วย แม้เส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน D_a จะต่างกันก็ตาม ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ค่า Shape Factors ในการบอกว่าถังกวนนั้นมีสัดส่วนเหมือนกันหรือไม่

ให้ของเหลวเป็น Newtonian จะสามารถเขียนกำลังงาน P ในรูปของตัวแปรที่เหลือได้ดังนี้

$$P = \psi(n, D_a, g_c, \mu, g, \rho) \tag{2.13}$$

และเมื่อทำการวิเคราะห์มิติ (Dimensional Analysis) แล้วจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \psi\left(\frac{nD_a^2\rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}\right) \tag{2.14}$$

เมื่อนำ แฟคเตอร์สัดส่วน (Shape Factors) เข้ามาพิจารณาด้วย จะเขียนได้ว่า

$$\frac{Pg_c}{n^3 D_a^5 \rho} = \psi\left(\frac{nD_a^2\rho}{\mu}, \frac{n^2 D_a}{g}, S_1, S_2, ..., S_n\right) \tag{2.15}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสมการ (2.14)

$N_p = Pg_c/n^3D^5{}_a\rho$ คือ ตัวเลขกำลัง (Power Number)

$N_{Re} = nD^2{}_a\rho/\mu$ คือ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number)

$N_{Fr} = n^2D_a/g$ คือ ตัวเลขฟรูด์ (Froude Number)

ดังนั้นสามารถเขียนสมการ

$$N_P = \psi(N_{Re}, N_{Fr}, S_1, S_2, \ldots, S_n) \tag{2.16}$$

พิจารณา $nD^2{}_a\rho/\mu$ กับความเร็วที่บนใบกวน u_2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ nD_an ดังนี้

$$N_{Re} = \frac{nD^2{}_a\rho}{\mu} = \frac{(nD_a)D_a\rho}{\mu} \alpha \frac{u_2D_a\rho}{\mu} \tag{2.17}$$

สมการนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number) ที่คำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วรอบของใบกวน

ตัวเลขกำลัง (Power Number) คืออัตราส่วนระหว่างแรงภายนอกต่อความเฉื่อยของของเหลว ดังนั้นโมเมนตัมของการไหลจึงเกิดมาจากการเคลื่อนที่ของมวลของเหลวเป็นหลัก เนื่องจากมีแรงเกิดขึ้นบนถังกวนทุกทิศทาง จึงไม่สามารถกำหนดเครื่องหมายนำหน้าได้ แต่ได้ทำการกำหนดเครื่องหมายให้ กลุ่มมิติ (Dimensionless Groups) ของระบบ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถแทนค่าลงในสมการได้สะดวก

ความสัมพันธ์ของกำลังที่ใช้กับใบกวน จากสมการที่ (2.16) แฟคเตอร์สัดส่วน (Shape Factors) ขึ้นอยู่กับชนิดและรูปแบบการจัดวางภายในอุปกรณ์ ในรูปที่ 2.7 ได้แสดงค่าการวัดที่จำเป็นต้องใช้สำหรับชุดถังกวนแบบกังหัน (Turbines) โดยมีค่าสัดส่วน

$S_1 = D_a/D_t$, $S_2 = E/D_t$,

$S_3 = L/D_a$, $S_4 = W/D_a$,

$S_5 = J/D_t$ $S_6 = H/D_t$

นอกจากนั้นยังได้ระบุจำนวนใบกวนและจำนวนแผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) จากรูปที่ 2.12 เป็นกราฟแสดงค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) และตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) สำหรับถังกวนแบบมี แผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) ที่มีใบกวนชนิดกังหัน (Turbines) แบบ 6 ใบติดตั้งอยู่ตรงกลาง

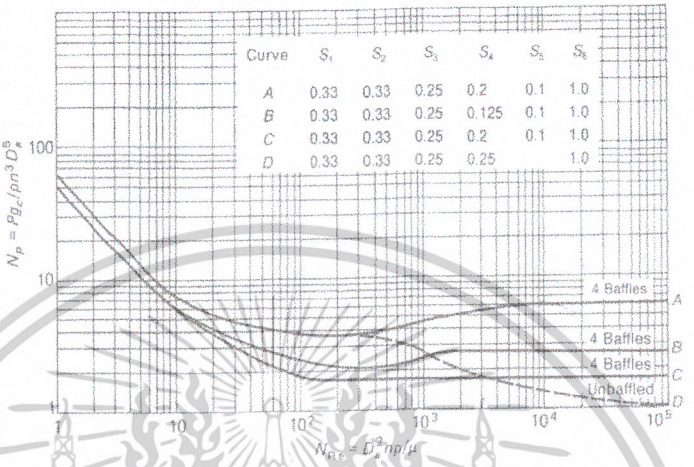
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟเส้น A เป็นเส้นแสดงค่าเมื่อเป็นใบกวนแบบตั้งที่ $S_4 = 0.2$

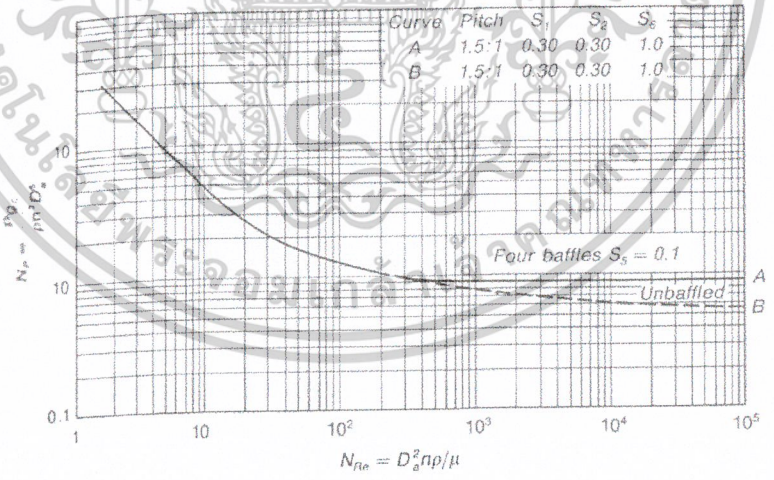
กราฟเส้น B เป็นเส้นแสดงค่าเมื่อใบกวนมีขนาดแคบลง ($S_4 = 0.125$)

กราฟเส้น C เป็นเส้นแสดงค่าสำหรับใบกวนชนิดกังหันมีมุมใบกวนเอียง

กราฟเส้น D เป็นเส้นแสดงค่าเมื่อเป็นถังกวนแบบไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง(Unbaffles)



รูปที่ 2.14 กราฟแสดง ตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) กับ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) สำหรับใบกวนชนิดกังหัน แบบ 6ใบ ค่าแสดงตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) ที่อ่านได้จาก เส้น D คือส่วนที่เป็นเส้นประ ต้องนำไปคูณกับ N_{Fr}^m



รูปที่ 2.15 กราฟแสดง ตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) กับ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) สำหรับใบพัด (Propellers) แบบ 6ใบ ค่า ตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) ที่อ่านได้จาก เส้น B คือส่วนที่เป็นเส้นประ ต้องนำไปคูณกับ N_{Fr}^m

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.15 เส้น A แสดงค่าสำหรับใบกวนชนิด 3 ใบ ติดตั้งอยู่กลางถังกวนแบบมี แผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) จากลักษณะเส้นกราฟทั้งหมดจะเห็นได้ว่าใบกวนชนิด กังหันแบบใบเอียง (Pitched-Bladed Turbine) มีกำลัง (Power) น้อยกว่าใบกวนชนิดใบตั้ง ถังกวนชนิดไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) เมื่อ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Numbers N_{Re}) มีค่าต่ำกว่า 300 เส้นแสดงตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) ของถังกวนทั้งชนิดมีและไม่มี แผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) จะมีลักษณะเหมือนกัน แต่เมื่อตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าสูงขึ้นจะแสดงเส้น D ในรูป 2.14 และเส้น B ในรูป 2.13 คือเส้นประ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นจุดที่ของเหลวจะเกิดน้ำวน ขึ้นนั้นเอง จากสมการที่ (2.16) สามารถแปลงรูปเป็น

$$\frac{N_P}{N_{Fr}^m} = \psi(N_{Re}, N_{Fr}, S_1, S_2, \ldots, S_n) \qquad (2.18)$$

โดยตัวแปร m ในสมการ (2.18) มีความสัมพันธ์กับ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds numbers N_{Re}) ดังนี้

$$m = \frac{a - \log_{10} N_{Re}}{b} \qquad (2.19)$$

a และ b = ค่าคงที่

โดยขนาด a และ b ที่ใช้ในรูปกราฟที่ 2.12 และ 2.13 เป็นไปดังตารางที่ 21 ดังนั้นเมื่อจะอ่านค่าในกราฟ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) จากแกนกราฟจึงต้องปรับค่าโดยคูณ N_{Fr}^m

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ a และ b ที่ใช้ในสมการ (2.19)

รูป	เส้น	a	b
9.12	D	1.0	40.0
9.13	B	1.7	18.0

2.3.5 ผลกระทบที่เกิดจากอัตราส่วนเรขาคณิต

จากสมการ (2.16) ผลของ แฟคเตอร์สัดส่วน (Shape Factors) $S_1, S_2, \ldots, S_n$ ที่มีอิทธิพลต่อตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) โดยอาจมีแฟคเตอร์(Factor) 2 ตัวหรือมากกว่า ที่มีอิทธิพลต่อกันภายใน เช่น การเปลี่ยนแปลงของ S_1 อาจเกิดจากการเปลี่ยนของ S_2, S_3 ได้ ใบกังหันแบบแบน (Flat-Bladed Turbine) ที่มี ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Numbers N_{Re}) สูงๆ ภายในถังมีแผ่นกั้นขอบถัง 4 แผ่น ดังนั้นอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนเรขาคณิต สรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ในกรณีที่ แผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) มีจำนวนน้อยและแคบ การเพิ่ม S_1 หรือเพิ่มอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวนต่อเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน จะทำให้ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เพิ่มขึ้น แต่หาก แผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) มีจำนวนมากและมีขนาดใหญ่ ก็จะทำให้ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) ลดลง ดังนั้น S_1 และ S_5 จึงมีความสัมพันธ์ต่อกัน ในวงการอุตสาหกรรม มักใช้แผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) จำนวน 4 แผ่นและให้ S_5 มีค่าเท่ากับ 1/12 ซึ่งเป็นแบบที่การเปลี่ยนแปลงของ S_1 แทบไม่ส่งผลต่อ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p)

2. การเปลี่ยนแปลงของ S_2 ซึ่งโดยมากเกิดจากการออกแบบ มีผลให้ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) ของใบกังหันแบบจาน (Disk Turbine) เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 9.7 โดยการเปลี่ยนแปลงของ S_2 ใบกวนแบบกังหันมีมุมเอียง (Pitched-Blade Turbine) จะมีผลให้ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เพิ่มขึ้นน้อยกว่า

3 . การเปลี่ยนแปลงของ S_4 ในใบกังหันแบบตรง (Straight-Blade Open Turbine) หรือ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความกว้างใบกวน (Blade) ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน (Impeller) สำหรับใบกวนแบบ 6 ใบ การเพิ่ม S_4 จะทำให้ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เพิ่มขึ้นโดยตรง สำหรับใบกวน 4 ใบ การเพิ่ม $S_4^{1.25}$ จะทำให้ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เพิ่มขึ้น และสำหรับใบกวนแบบกังหันมีมุมเอียง (Pitched-Blade Turbine) ความกว้างใบกวนมีผลการสิ้นเปลืองกำลังงานน้อยกว่าแบบใบกังหันแบบตรง Stringht-Blade Turbines มาก(ตารางที่ 2.2)

ตารางที่ 2.2 ผลจากความกว้างใบกวนและความสูงของใบกวนจากก้นถัง ที่มีต่อการสิ้นเปลืองกำลังงาน ของใบกังหัน (Turbines) 45° แบบ แผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) 6 ใบ

W/D_a, (S_4)	ความสูงของใบกวนจากก้นถัง(S_2)	K_T
0.3	0.33	2.0
0.2	0.33	1.63
0.2	0.25	1.74
0.2	0.17	1.91

1.) ใบกวนแบบใบกังหันแบบตรง (Straight-Blade Open Turbine) 2 ชุดที่อยู่บนแกนเดียวกัน จะมีค่ากำลังงานมากกว่าแบบใบกวนแบบชุดเดียวประมาณ 1.9 เท่า โดยต้องจัดให้ระยะห่างระหว่างใบกวนมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ เส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน ในกรณีที่ใบกวน 2 ใบอยู่ใกล้กันมาก อาจมีค่ากำลังงานมากกว่าใบกวนเดียวถึง 2.4 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) รูปทรงของถังกวนมีผลต่อ ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เพียงเล็กน้อย การสิ้นเปลืองกำลังงานในถังกวนทรงกระบอกเตี้ย (Horizontal Cylindrical) ทั้งแบบมีและไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) หรือถังกวนชนิดแผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) แนวตั้ง และแบบหน้าตัดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ต่างสิ้นเปลืองกำลังงานใกล้เคียงกับถังแบบทรงกระบอกสูงทั้งสิ้น ถังสี่เหลี่ยมแบบไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง (Unbaffles) มีการสิ้นเปลืองกำลังงานประมาณ 0.75 เท่าของถังทรงกระบอกแบบมีแผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) แม้รูปทรงถังกวนจะไม่มีผลต่อการสิ้นเปลืองกำลังงาน แต่ก็มีผลต่อการไหลเวียนของของเหลวในภาชนะ

2.3.6 การคำนวณหากำลังงาน

ค่ากำลังที่ส่งไปยังของเหลวสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.12) โดยได้สมการ

$$P = \frac{N_p n^3 D_a^5 \rho}{g_c} \tag{2.20}$$

ทั้งถังกวนแบบมีและไม่มีแผ่นกั้นขอบถัง(Unbaffles) เมื่อ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Numbers N_{Re}) มีค่าน้อย เส้นค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) และ เส้นตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) จะทับเป็นเส้นเดียวกัน และมีค่าความชัน (Slope) เป็นลบ ดังนั้น

$$N_p = \frac{K_L}{N_{Re}} \tag{2.21}$$

$$P = \frac{K_L n^2 D_a^3 \mu}{g_c} \tag{2.22}$$

การไหลในช่วงดังกล่าวมีลักษณะราบเรียบ (Laminar) และไม่รับอิทธิพลจากความหนาแน่นของเหลวมากนัก จึงสามารถใช้สมการที่ (2.21) และ (2.22) หาค่าสิ้นเปลืองกำลังงาน ในกรณีที่ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าน้อยกว่า 10 ได้

ในถังชนิดมีแผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) เมื่อ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าเกินกว่า 10,000 ค่า ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) จะไม่ขึ้นกับ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) และจะไม่นำค่าความหนืดมาเป็น แฟคเตอร์ (Factor) การไหลในช่วงนี้มีลักษณะปั่นป่วนรุนแรง (Turbulant) ดังนั้นสมการ (2.16) จะเป็น

$$N_p = K_T \tag{2.23}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{K_L n^2 D_a^3 \rho}{g_c} \quad (2.24)$$

K_T = ขนาดของค่าคงที่

K_L = ขนาดของค่าคงที่

สำหรับใบกวนและถังกวนชนิดต่างๆ ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าคงที่ K_L และ K_T ที่ใช้ในสมการ (2.21) และ (2.23) สำหรับถังกวนชนิดมีแผ่นกั้นขอบถัง (Baffles) จำนวน 4 ใบ ติดตั้งที่ผนัง โดยมีความกว้างเท่ากับ 10% ของเส้นผ่านศูนย์กลางถังกวน

ชนิดของใบกวน	K_L	K_T
ใบพัด (Propeller) 3ใบ		
Pitch 1.0	41	0.32
Pitch 1.5	55	0.87
แบบกังหัน		
แบบจาน 6 ใบ(S_3 = 0.25, S_4 = 0.2)	65	5.75
แบบกังหัน (S_4 = 0.2)	70	4.80
แบบ 6 ใบ Pitch Blades (45^o, S_4 = 0.2)	-	1.63
แบบ 4 ใบ Pitch Blades (45^o, S_4 = 0.2)	44.5	1.27
Flat Paddle แบบ 2ใบ (S_4 = 0.2)	36.5	1.70
Anchor	300	0.35

2.3.7 กำลังงานที่ต้องการสำหรับของเหลวที่เป็น Non-Newtonian

การนิยามค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เท่ากับ $Pg_c/n^3D^5{}_a\rho$ ในของเหลวชนิด Non-Newtonian สามารถทำได้แบบเดียวกับของเหลวชนิด Newtonian แต่การกำหนดค่า ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) ยุ่งยากกว่า เนื่องจากค่าความหนืดของของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราของ อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) ดังนั้นจึงต้องพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของ อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) ที่เกิดขึ้นจากจุดถึงจุดในภาชนะด้วย อย่างไรก็ตาม ได้มีการนิยามค่า ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) ขึ้นได้ดังสมการ (2.17) โดยใช้ค่าเฉลี่ยความหนืด μ_a ที่คำนวณได้จากค่าเฉลี่ย อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) $(du/dy)_{av}$ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{Re,n} = \frac{nD_a^2\rho}{\mu_a} \tag{2.25}$$

จากกฎกำลังงานของไหล (Power-Law Fulid) ในสมการที่ (2.7) สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดเฉลี่ยกับ อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) เฉลี่ย ได้ว่า

$$\mu_a = K'\left(\frac{du}{dy}\right)_{av}^{n'-1} \tag{2.26}$$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.25) จะได้เป็น

$$N_{Re,n} = \frac{nD_a^2\rho}{K'\left(du/dy\right)_{av}^{n'-1}} \tag{2.27}$$

สำหรับใบกวนแบบกังหันแบบตรง (Straight-Blade Turbine) ที่กวนในของเหลวแบบ Pseudoplastic นั้น พบว่าค่าอัตราแรงเฉือน (Shear Rate) เฉลี่ยมีความสัมพันธ์โดยตรงกันความเร็วการหมุนใบกวน โดยประมาณค่าได้ดังนี้

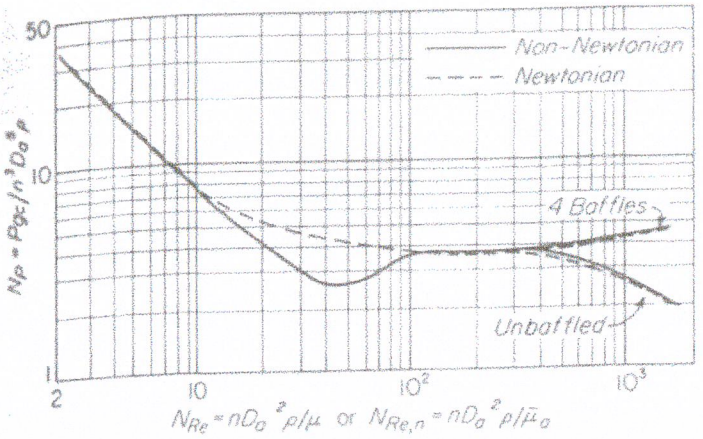
$$\left(\frac{du}{dy}\right)_{av} = 11n \tag{2.28}$$

อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) เฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 11n มีค่ามากกว่า ½ ของค่าประมาณสูงสุด 19n เพียงเล็กน้อย สำหรับในถัง (Tank) ค่า อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) เฉลี่ยอาจต่ำกว่า 11n ได้เล็กน้อย โดยประสิทธิภาพการใช้กำลังงานจะขึ้นอยู่กับค่า อัตราแรงเฉือน (Shear Rate)ในบริเวณที่เกิดการกวน

$$N_{Re,n} = \frac{n^{2-n'}D_a^2\rho}{11^{n'-1}K'} \tag{2.29}$$

รูปที่ 2.16 แสดงถึงค่า ค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) และตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) ของใบกวน Turbine แบบ 6 ใบ กวนในของเหลวประเภท Pseudoplastic โดยได้ค่าเส้นกราฟมาจากสมการ (2.25) และ (2.29) เห็นได้ว่าเมื่อ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าต่ำกว่า 10 และสูงกว่า 100 เส้นกราฟของของเหลวประเภท Pseudoplastic จะทับเป็นเส้นเดียวกับของเหลวแบบ Nowtonian และในช่วงที่ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าระหว่าง 10 ถึง 100 ของเหลวประเภท Pseudoplastic จะมีการสิ้นเปลืองกำลังงานน้อยกว่าของเหลวแบบ Newtonian และของเหลวประเภท Pseudoplastic มีการเปลี่ยนจากการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) เป็นแบบปั่นป่วนช้ากว่า โดยจะเกิดเปลี่ยนแปลงการไหลต่อเมื่อ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าถึง 40 ในขณะที่ของเหลวแบบ Newtonian เกิดเปลี่ยนแปลงการไหลต่อเมื่อมีค่า ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number N_{Re}) เท่ากับ 10 เท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ของกำลัง (Power Correlation) สำหรับใบกวนแบบกังหัน (Turbines) ชนิด 6 ใบในของเหลวชนิด Non-Newtonian

รูปแบบการไหลของของเหลว Pseudoplastic มีความแตกต่างจากของเหลว Newtonian โดยของเหลว Pseudoplastic มีค่า อัตราแรงเฉือน (Shear Rate) สูง แต่มีความหนืดปรากฏ (Apparent Viscosity) ต่ำ และเมื่อของเหลวเคลื่อนจากใบกวนออกไป ค่าก็จะเริ่มลดลง ในขณะที่ความหนืดปรากฏกลับมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น แม้บริเวณใกล้ๆ ใบกวนจะมีการปั่นป่วนรุนแรงแต่ของเหลวก็อาจเพียงเคลื่อนตัวเป็นราบเรียบช้าๆ เท่านั้น

2.3.8 ระยะเวลาในการผสม (Mixing Time)

ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมนั้น สามารถพิจารณาได้โดยเทียบกับการไหลทั้งหมดที่เกิดจากใบกวน โดยสำหรับใบกวนแบบกังหัน (Turbine) 6 ใบ จะมีการไหลรวมดังนี้

$$q = 0.92 n D_a^3 \left(\frac{D_t}{D_a}\right) \tag{2.30}$$

$$t_T \approx \frac{5V}{q} = 5\frac{\pi D_t^2 H}{4}\frac{1}{0.92 n D_a^2 D_t} \tag{2.31}$$

$$nt_T \left(\frac{D_a}{D_t}\right)^2 \left(\frac{D_t}{H}\right) = \text{const} = 4.3 \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับถังและใบกวนที่มีลักษณะคล้ายกับระบบดังกล่าวนี้ ระยะเวลาการผสมอาจจะมากกว่าหรือน้อยกว่านี้ได้ขึ้นอยู่ความเร็วการกวน ในภาพที่ 2.15 ได้แสดงค่า nt_T กับ ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) ที่ได้จากระบบต่างๆ โดยใบกวนแบบกังหัน (Turbines) ที่มี

$D_a / D_t = 1/3$

$D_t / H = 1$ ที่ $N_{Re} > 10^3$ จะได้ค่า

$nt_T = 36$ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการทำนายซึ่งเท่ากับ 39

เมื่อ ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าอยู่ในช่วงตั้งแต่ 10 ถึง 1000 ระยะเวลาการผสมจะมากขึ้น แม้การใช้กำลังงานจะไม่ต่างจากช่วงปั่นป่วน(Turbulent) จากภาพที่ 2.8 ระยะเวลาการผสมที่ใช้ในการผสมด้วยใบกวนแบบกังหัน (Turbine) แบบถังกวนมีแผ่นกั้นขอบถัง(Baffles) มีค่าน้อยกว่ากำลัง (Power) ของความเร็วการกวน ประมาณ –1.5 และจะเพิ่มขึ้นอย่างมากเมื่อ ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) ลดลง ภาพ 2.9แสดงการเทียบวัดค่าด้วยวิธี Norwood และ Metzner ซึ่งมีระยะเวลาในการผสมต่างจากค่าที่ได้จากการทำนาย

$$f_t = \frac{t_T \left(nD_a^2\right)^{2/3} g^{1/6} D_a^{1/2}}{H^{1/2} D_t^{3/2}} = nt_T \left(\frac{D_a}{D_t}\right)^2 \left(\frac{D_t}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{g}{n^2 D_a}\right)^{1/6} \tag{2.33}$$

จาก ตัวเลขฟรูด์ (Froude Number) ในสมการ (2.33) แสดงให้เห็นว่าอาจเกิดน้ำวน(Vortex) ขึ้นได้เล็กน้อยหาก ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าน้อย

ใบกวนชนิดอื่นที่สามารถใช้ผสมของเหลวได้ เช่น ใบกวนแบบเกลียว (Helical Ribbon Agitator) สามารถผสมของเหลวที่มีลักษณะเหนียวข้นได้เร็วกว่าใบกวนชนิดอื่นเมื่อเทียบในกำลังงานที่เท่ากัน แต่สามารถผสมของเหลวที่มีลักษณะตื้นได้ช้ากว่าใบกวนแบบกังหัน (Turbines) ระยะเวลาการผสมสำหรับใบกวนแบบใบพัด (propellers) ดูเหมือนจะมีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับใบกวนแบบกังหัน (Turbine) แต่สิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าเมื่อเทียบกันที่ความเร็วรอบเท่ากัน ข้อมูลเส้นกราฟในภาพที่ 2.15 เป็นค่าของ Fox และ Gex ซึ่งได้มาจากสมการที่ (2.32) และ (2.33)

$$f_t' = \frac{t_T \left(nD_a^2\right)^{2/3} g^{1/6}}{H^{1/2} D_t} = nt_T \left(\frac{D_a}{D_t}\right)^{3/2} \left(\frac{D_t}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{g}{n^2 D_a}\right)^{1/6} \tag{2.34}$$

โดยเป็นค่าข้อมูลที่ใช้สำหรับ D_a/D_t ตั้งแต่ 0.07 ถึง 0.18 ดังนั้น D_a/D_t ในภาพที่ 2.15 ซึ่งเท่ากับ 1/3 จึงอาจทำให้ค่ามีความคลาดเคลื่อนบ้างเล็กน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สภาวะใบกวนแบบเดียวกัน ที่ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าต่ำกว่า 1000 ของเหลว Pseudoplastic จะมีระยะเวลาการผสมนานกว่าของเหลวแบบ Newtonian ในบริเวณที่มีค่าแรงเฉือน (Shear) ต่ำ บริเวณที่ไกลออกไปจากใบกวน Pseudoplastic จะมีค่าความหนืดปรากฏสูงกว่าบริเวณที่อยู่ใกล้ใบกวน ส่งผลให้การปั่นป่วนของของเหลวที่ระยะไกลออกไปจากใบกวนลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ของเหลวที่ถูกกวนส่วนใหญ่มีลักษณะนิ่ง ซึ่งลักษณะดังกล่าวส่งผลให้ผสมได้ยากและใช้เวลายาวนานขึ้น ต่างกับเมื่อ ตัวเลขเรย์โนลล์ (Reynolds Number N_{Re}) มีค่าสูง ซึ่งพฤติกรรมการกวนผสมระหว่าง Pseudoplastic และ Newtonian แทบจะไม่ต่างกันเลย

เมื่อมีการผสมฟองก๊าซ, หยดของเหลว, หรืออนุภาคแข็งลงในของเหลว จะทำให้ระยะเวลาที่ต้องใช้เพื่อผสมให้เป็นเนื้อเดียวกันนั้น ใช้เวลานานขึ้น แม้จะได้รับกำลังเท่ากันก็ตาม การเพิ่มความหนืด, การเพิ่มของเหลวที่มีความหนืดสูงลงไป อาจทำให้ระยะเวลาการผสมเพิ่มขึ้นกว่าระยะเวลาปกติที่ได้จากการผสมก๊าซลงในของเหลว 10% ถึง 2 เท่า

2.4 คุณสมบัติของของไหล

ของไหลมีลักษณะที่สำคัญ คือ สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้ตามภาชนะที่บรรจุและเมื่อได้รับแรงกระทำ ผลิตภัณฑ์ อาหารหลายประเภทมีลักษณะเป็นของไหล ลักษณะการไหลของผลิตภัณฑ์อาหารนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติและองค์ประกอบของอาหารนั้นๆ

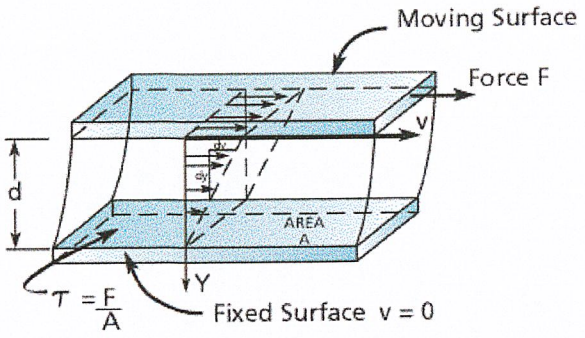
สมบัติของของไหลที่มีผลต่อการถ่ายโอนหรือการเคลื่อนย้ายของไหลที่สำคัญ คือ ความหนืดของของไหล ความหนืด คือ ความต้านทาน ต่อการเคลื่อนที่ของของไหล ความหนืดจะมีผลต่อกำลังที่ต้องการใช้ในการผลักดันให้ของไหลเกิดการเคลื่อนที่

2.4.1 ความเค้นและความหนืดของของไหล

ของไหลจะไหลได้เมื่อได้รับความเค้น (stress) ความเค้น คือ แรงที่กระทำต่อของไหล ต่อพื้นที่มีหน่วยเป็นแรงต่อพื้นที่ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวตั้งฉากกับผิดของของไหลจะเรียกว่า ความเค้นปกติ (normal stress) ซึ่งมีค่าเท่ากับความดัน

2.4.2 ความเค้นที่กระทำต่อของไหลในแนวขนานกับผิวของของไหลจะเรียกว่า ความเค้นเฉือน (shear stress)เมื่อให้ความเค้นเฉือน ของไหลจะไหล ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ความเร็วในการไหลเมื่อของไหลได้รับความเค้นเฉือน

ตามนิยาม ความเค้นเฉือน (τ_{yz}) มีค่าเท่ากับ

$$(\tau_{yz} = \frac{F}{A}) \tag{2.35}$$

โดย $$F \propto A \frac{\Delta v_z}{\Delta y}$$

ดังนั้น

$$\tau_{yx} \propto \frac{\Delta v_z}{\Delta y} \Rightarrow \tau_{yz} = \mu \frac{\Delta v_z}{\Delta y} \tag{2.36}$$

เมื่อ μ คือ สัมประสิทธิ์ความหนืด หรือ Coefficient of viscosity โดยทั่วไปจะเรียกว่า "ความหนืด" หรือ viscosity มีหน่วยเป็น แรงคูณเวลาต่อพื้นที่ (เช่น N s/m^2) (บางตำราอาจใช้สัญลักษณ์ σ แทนความเค้นเฉือน และ η แทนความหนืด) เมื่อให้ค่า $\Delta_y \rightarrow 0$ จะสามารถเขียนสมการ 2.36 ได้เป็น

$$\tau_{yz} = \mu \frac{dv_z}{dy} \qquad \text{(SI unit)} \tag{2.37}$$

โดย $\frac{dv_z}{dy}$ คือ velocity gradient ในแนวแกน y เรียกว่า "Shear rate" หรืออัตราเฉือนมีลักษณะเป็น γ มีหน่วยเป็นส่วนกลับของเวลา โดยปกติคือ 1/s

$$\tau_{yz} = \mu\gamma \qquad \text{(SI unit)} \tag{2.38}$$

อัตราเฉือนที่พบในกระบวนการผลิตอาหารมีค่าที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของอุปกรณ์ ช่วงของอัตราเฉือนที่พบแสดงในตารางที่ 2.4

ของไหลที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเฉือน (Shear rate) และความเค้นเฉือน (Shear stress) ตามสมการ 2.38 จัดเป็น Newtonian fluid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนืดมีหน่วยดังนี้

1 N s/m^2 = 1Pa s = 1 kg/m s = 10 poise (P) = 1000 cP

1P = 1 g/cm s

1cP = 6.7197x10^{-4} Ibm/ft.s

น้ำมีความหนืดประมาณ 1cP ที่อุณหภูมิ 20°C

ตารางที่ 2.4 อัตราเฉือนในกระบวนการผลิตอาหาร

Application	Shear rate (1/s)	Example
Sedimentation of particles	$10^{-6} - 10^{-3}$	Spices in salad dressing
Leveling due to surface tension	$10^{-2} - 10^{-1}$	Frosting, paints
Draining under gravity	$10^{-1} - 10$	Painting and costing
• Extrusion • Pipe flow	$1 - 10^{3}$	• Snack foods, Cereal, Pasta • Food processing
• Calendaring • Pouring from a bottle • Chewing and swallowing	$10^{1} - 10^{2}$	• Dough sheeting • Foods & cosmetics • Foods
Mixing and stirring	$10^{1} - 10^{3}$	Food processing
Rubbing	$10^{2} - 10^{4}$	Application of lotion
Brushing	$10^{3} - 10^{4}$	Lipstick, nail polish
Spraying	$10^{3} - 10^{5}$	Spray drying

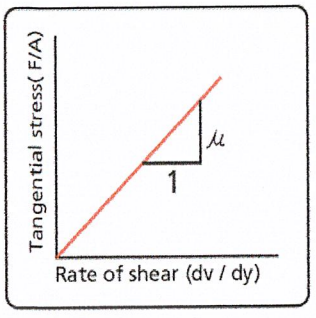
2.4.3 การแบ่งประเภทของเหลวตามลักษณะการไหลการแบ่งประเภทของของเหลวมักจะทำโดยพิจารณาค่าความหนืดเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งของเหลวได้เป็นสองประเภทหลักคือ Newtonian fluid และ Non-Newtonian fluid

1. Newtonian fluid

คือ ของเหลวที่มีความหนืดที่ไม่ขึ้นกับอัตราเฉือนและประวัติการ ได้รับแรงเฉือน (Shear history) ความหนืดของเหลวประเภทนี้จะขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของเหลวเท่านั้น shear stress และ shear rate มีความสัมพันธ์กันตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\tau = \mu\gamma \quad (2.39)$$



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Newtonian fluid

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่างอาหารที่เป็น Newtonian fluid

Product	flow behavior index (n)	consistency coefficient (K)
Whole milk	1	0.0212
Apple Juice	1	0.021
Grape Juice	1	0.0025
Honey	1	6.18
Corn syrups	1	0.053

2. Non-Newtonian fluid

คือ ของเหลวที่มีความหนืดที่แปรตามอัตราเฉือน สามรถแบ่งได้เป็น

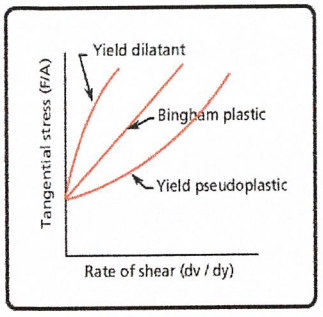
1) Time-independent non-Newtonian fluids ได้แก่

- Bingham plastic มีความสัมพันธ์ระหว่าง shear stress และ shear rate ดังนี้

Bingham model: $\tau = \tau_0 + \mu\gamma$ (2.40)

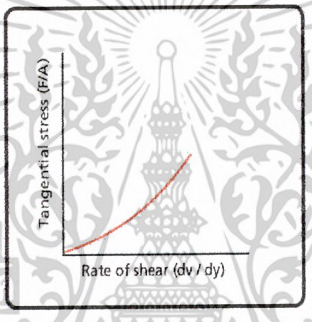
เมื่อ τ_0 คือ yield stress ของเหลวชนิดนี้ต้องได้รับความเค้นเฉือนมากกว่า τ_0 จึงจะเกิดการไหลได้ และเมื่อเกิดการไหลแล้ว ความหนืดของของเหลวจะไม่ขึ้น กับ shear rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



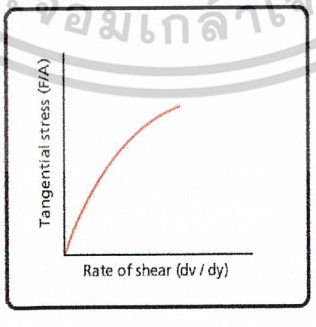
รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Bingham plastic fluid

- Shear-thinning fluid หรือ pseudo plastic fluid มีความหนืดลดลงตาม shear rate



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท pseudo plastic fluid

- Shear thickening fluid หรือ Dilatant fluid มีความหนืดเพิ่มขึ้นตาม shear rate



รูปที่ 2.21 แสดงลักษณะการไหลของของเหลวประเภท Dilatant fluid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้ง pseudoplastic fluid และ Dilatant fluid จะมี shear stress และ shear rate มีความสัมพันธ์กันดังนี้

$$\text{Power law model:} \qquad \tau = K\gamma^{n} \tag{2.41}$$

ในกรณีที่ของเหลวมี yield stress จะเขียนความสัมพันธ์ได้เป็น

$$\text{Herschel – Bulkley model:} \quad \tau = \tau_0 + K\gamma^{n} \tag{2.42}$$

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

เมื่อ $n > 1$ ➡ Dilatant fluid

$n < 1$ ➡ Pseudoplastic fluid

สามารถคำนวณความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity; μ_a) ของของเหลวที่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic และ Dilatant ได้ ดังนี้

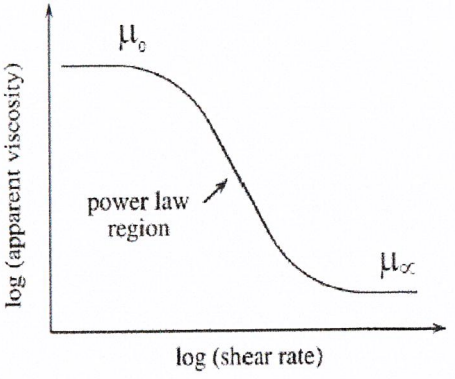
$$\mu_0 = K\gamma^{n-1} \tag{2.43}$$

อาหารเหลวส่วนใหญ่มีลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic คือ ยิ่งเกิดการกวนของเหลวมากๆ ความหนืดของของเหลวจะลดลง โดยเฉพาะอาหารที่มีแป้งหรือ hydrocolloids อื่นเป็นส่วนผสมหากความเข้มข้นขององค์ประกอบสูง อาหารที่อยู่ในกลุ่มนี้จะแสดงลักษณะดังรูปที่ 2.22 คือ

(1) ที่อัตราเฉือนต่ำ จะแสดงลักษณะการไหลแบบ Newtonian โดยมีค่าความหนืดคงที่ที่ Zero-shear viscosity; μ_0

(2) ที่อัตราเฉือนสูง จะแสดงลักษณะการไหลแบบ Pseudoplastic การเปลี่ยนจาก Newtonian เป็น Pseudoplastic นี้จะเกิดที่ Characteristic time หรือ time constant (t_c) โดย $t_c = \frac{1}{\gamma}$ เมื่ออัตราเฉือนมีค่าสูงมาก ของเหลวจะมีความหนืดที่คงที่ที่ μ_∞ เรียกว่า infinite-shear viscosity

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

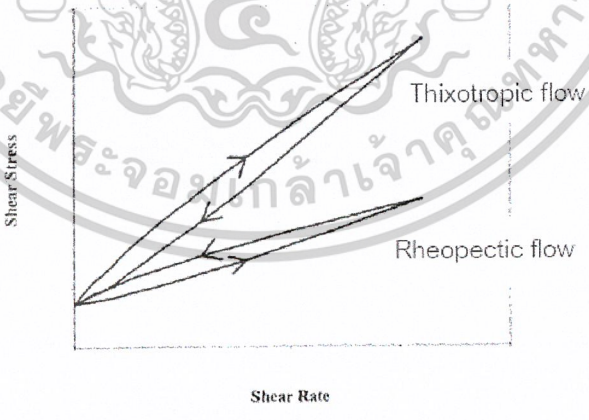


รูปที่ 2.22 แสดงลักษณะการไหลของของไหล Pseudoplastic fluid แบบ power law

2) Time-dependent non-Newtonian fluids

อาหารที่มีโครงสร้างซับซ้อนมักจะมีลักษณะการไหลที่ขึ้นกับเวลาในการให้อัตราเฉือนด้วย สามารถแบ่งของเหลวในกลุ่มนี้ได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

- Thixotropic fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดลดลงเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลเพิ่มขึ้น
- Rheopectic fluid เป็นของเหลวที่มีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับอัตราเฉือนที่คงที่ในเวลาที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.23 แสดงลักษณะการไหลแบบ Time-dependent non-Newtonian

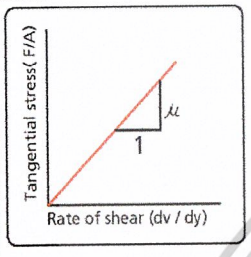
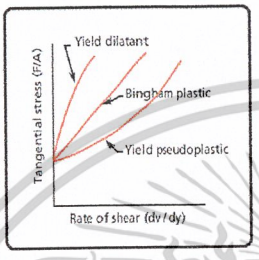
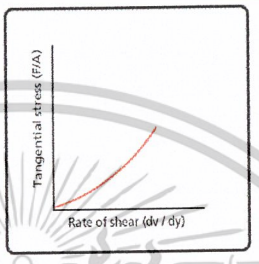
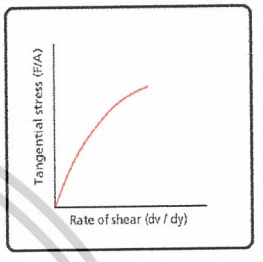
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.6 แสดงค่า flow behavior index (n) และ consistency coefficient (K) ของของไหลชนิดต่างๆ

Product	flow behavior index (n)	consistency coefficient (K)
Ketchup	0.27	18.7
Applesauce	0.30	16.7
Banana puree	0.43	6.08
Mayonnaise	0.55	6.4
Tomato juice concentrate	0.41	12.9
Blueberry pie filling	0.43	6.1
Chocolate , melted	0.57	0.57
Mustard	0.39	19.1
Peach puree	0.4	13.4
Comminuted better meat	0.16	693.3
Orange juice concentrate	0.58	4.121
Cream (most emulsion)	0.98	0.0138
Olive oil	1.0	0.084
Honey	1.0	5.6
Whole milk	1.0	0.0212
Skim milk	1.0	0.0014
Apple juice	1.0	0.0021
Peanut butter	1.2	15.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 สรุปประเภทของของไหล

NEWTONIAN	NON NEWTONIAN		
	Bingham plastic Yield pseudoplastic Yield dilatant	Pseudoplastic	Dilatant
			
		ความหนืดลดลงตาม rate of shear.	ความหนืดเพิ่มขึ้นตาม rate of shear.
- น้ำ - high viscosity fuel - some motor oils - most mineral oils - gasoline - kerosene - most salt solutions in water - light suspensions of dye stuff	- thermoplastic polymer solutions - sewage sludge's - digested sewage - mud - ketchup - chewing gum - tar - high concentrations of Asselstine in oil	- GRS latex solutions - sewage sludge's - grease - molasses - paint - starch - soap - most emulsions - printer's ink	- starch in water - beach sand - quicksand - feldspar - mica - clay - candy compounds - peanut butter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 อิทธิพลของอุณหภูมิและความเข้มข้นต่อลักษณะการไหล

1. อิทธิพลของอุณหภูมิ

ในอาหารเหลวบริสุทธิ์ (Pure liquid) อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของของเหลวเป็นไปตามสมการของ Arrhenius

สำหรับ Newtonian fluid

$$\mu = \mu_0 e^{E_a / RT} \tag{2.44}$$

สำหรับ non-Newtonian fluid

$$K = K_0 e^{E_a / RT} \tag{2.45}$$

เมื่อ K คือ consistency index ($Pa\ s^n$)

μ_0 และ K_0 คือ frequency factor มีหน่วย Pa s และ $Pa\ s^n$ ตามลำดับ

E_a คือ Activation energy สำหรับการไหลแบบหนืด (kJ/mol)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (Kelvin)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (8.314 kJ/kmol.K)

μ คือ สมประสิทธิ ความหนืด (N_s/m^2)

สำหรับ Newtonian fluid Activation energy มีค่าตั้งแต่ 14.4 kJ/mol สำหรับน้ำ จนถึง 60 kJ/mol สำหรับน้ำเชื่อมและน้ำผลไม้เข้มข้น

อุณหภูมิมีผลต่อลักษณะการไหลด้วยเช่นกัน โดยค่า flow behavior index (n) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2. อิทธิพลของความเข้มข้น

องค์ประกอบของของเหลวทั้งที่ละลายได้ (Soluble solids) และละลายไม่ได้ (Insoluble solids) ล้วนมีผลต่อความหนืดของของเหลว โดยความหนืด (Newtonian fluid) หรือ Consistency index (non-Newtonian fluid) มักจะแปรตามความเข้มขนในรูปแบบ exponential หรือ power law ดังนี้

$$\mu_a = \mu_0 e^{AC} \quad \text{หรือ} \quad \mu_a = \mu_0 e^{A'C}$$
$$\mu_a = \mu_0 C^B \quad \text{หรือ} \quad \mu_a = \mu_0 C^{B'} \tag{2.46}$$

เมื่อ A, A',B,B' คือ ค่าคงที่ และ C คือ ความเข้มข้น

ยกตัวอย่าง ของค่า ความเข้มข้นที่มีผลต่อค่าความหนืด ดังตารางที่ 2.8 – 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 อิทธิพลของปริมาณของแข็งที่ละลายได้ต่อความหนืดปรากฏและ K ของน้ำส้มเข้มข้นที่มี pulp 5.78% ที่อุณหภูมิ -10°C shear rate $100s^{-1}$

°Brix	μ_a (Pa s)	K (Pa s^n)
50.8	0.29	0.89
56.5	0.65	2.18
57.9	0.83	2.56
61.6	1.62	5.61
65.3	3.38	23.58

ตารางที่ 2.9 อิทธิพลของปริมาณpulp ต่อความหนืดปรากฏและ K ของน้ำส้มเข้มข้น 65°Brix ที่อุณหภูมิ-10°C shear rate $100\ s^{-1}$

°Brix	μ_a (Pa s)	K (Pa s^n)
0	1.95	3.74
3.4	2.73	7.11
5.7	3.38	8.63
8.6	4.70	15.77
11.1	5.76	23.91

3. อิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและความเข้มข้น

เนื่องจากค่า flow behavior index (n) มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากตามอุณหภูมิเมื่อเทียบกับค่า K หรือความหนืดปรากฏ จึงอาจพิจารณาเฉพาะอิทธิพลของอุณหภูมิต่อ K ได้ และจะได้ว่าอิทธิพลร่วมของอุณหภูมิและความเข้มข้น

$$K = K_0 e^{(E_a / RT) + BC} \qquad (2.47)$$

เมื่อ B คือค่าคงที่ และ C คือ ความเข้มข้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. อิทธิพลของของเข็งที่ละลายไม่ได้ต่อลักษณะการไหล

การหาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะการไหลและปริมาณของของแข็งที่ละลายไม่ได้ อาจทำได้โดยการพิจารณาสัดส่วนของแข็ง

ในกรณีของสารแขวนลอยเจือจางของของแข็งทรงกลม สัดส่วนของปริมาณที่ถูกครอบครองโดยของแข็ง (ϕ) จะมีผลต่อความหนืดสัมพันธ์ (Relative viscosity; μ_r) ดังนั้น

$$\mu_r = 1 + 1.5\phi \tag{2.48}$$

เมื่อ $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_s}$

μ คือ ความหนืดของสารแขวนลอย

μ_s คือ ความหนืดของ continuous medium ในสารแขวนลอย

แต่เนื่องจากของแข็งในสารแขวนลอยในอาหารทั่วไปมักจะมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรงกลม จึงอาจใช้สมการที่ (14) ในการแสดงความสัมพันธ์แทน ในกรณีที่ Aspect ratio (L/D) $\leq$ 30 โดย

$$\mu_r = \left[1 - \frac{\phi}{A}\right]^{-2} \tag{2.49}$$

เมื่อ L คือด้านยาวของของแข็ง D คือด้านกว้างของของแข็ง

A คือค่าคงที่

สำหรับทรงกลม L/D = 1.0 ➡ A = 0.68

สำหรับ rough crystal 6<L/D<8 ➡ A = 0.44

อาหารส่วนใหญ่มีสารแขวนลอยที่มีรูปร่างอยู่ระหว่างทรงกลมกับ rough crystal จึงอาจใช้สมการที่ 2.49 ในการทำนายลักษณะการไหลได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
การออกแบบ และ สร้างแบบจำลอง

3.1 สมการที่เกี่ยวข้องกับใบพัดแบบกังหัน

3.1.1 สมการความเร็วตามเส้นสัมผัสวงกลม

$$V'_{u2} = ku_2 = k\pi D_a n \tag{3.1}$$

เนื่องจาก $u_2 = \pi D_a n$ อัตราการไหลที่ไหลผ่านใบกังหันจึงเท่ากับ $q = V'_{r2} A_p$

A_p = พื้นที่ ที่ปลายใบกังหันกวาดไปถึง

$A_p = \pi D_a W$

D_a = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกังหัน

W = ความกว้างของใบกังหัน

3.1.2 สมการความเร็วตามแนวรัศมีของของเหลวที่ออกจากปลายใบกวน

$$V'_{r2} = (u2 - V'_{u2}) \tan\beta'_2 \tag{3.2}$$

พิจารณาใบกังหัน Flat-Bladed Turbine Impeller

u = ความเร็วการหมุนใบกังหัน (Blade Tips)

V'_{u2} = ความเร็วตามเส้นสัมผัสวงกลม

V'_{r2} = ความเร็วตามแนวรัศมีของของเหลวที่ออกจากปลายใบกวน

V'_2 = ความเร็วทั้งหมดของของเหลว ณ.จุดนั้น

3.1.3 สมการการไหลของของเหลว

$$q = K\pi^2 D_a^2 n W (1-k) \tan\beta'_2 \tag{3.3}$$

K = ค่าคงที่ ที่ใช้แทนความเร็วตามแนวรัศมีจริง ซึ่งไม่สม่ำเสมอกัน ตลอดความกว้างของใบกวน

W = สัดส่วนของใบกวนเมื่อเทียบกับ D_a

$K,$ = ค่าคงที่โดยประมาณ

K = ค่าคงที่โดยประมาณ

β'_2 = ค่าคงที่โดยประมาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14 สมการการไหลมวลรวม

สำหรับใบกังหันแบบ Flat-Blade Turbines

$$q_T = 0.92nD_n^3\left(\frac{D_t}{D_a}\right) \tag{3.4}$$

อัตราส่วน D_t/D_a มีค่าเท่ากับ 3 ดังนั้น q_T จึงเท่ากับ $2.76nD^3_a$ หรือเป็น 2.1 เท่า ของการไหลที่ใบกวน ($N_Q = 1.3$) ดังนั้นจึงควรใช้กับอัตราส่วน D_t/D_a ที่มีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 4

D_a = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน

D_t = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังกวน

3.1.5 กำลังงานสำหรับของเหลวที่เป็น Newtonian

$$N_p = Pg_c/n^3D^5_a\rho \tag{3.5}$$

$$N_{Re} = \frac{nD_a^2\rho}{\mu} = \frac{(nD_a)D_a\rho}{\mu} \alpha \frac{u_2D_a\rho}{\mu} \tag{3.6}$$

สมการนี้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number) ที่คำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วรอบของใบกวน

N_p = ตัวเลขกำลัง (Power Number)

N_{Re} = ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number)

3.1.6 กำลังงานสำหรับของเหลวที่เป็น Non-Newtonian

$$N_p = Pg_c/n^3D^5_a\rho$$

การนิยามค่าตัวเลขกำลัง (Power Number N_p) เท่ากับ $Pg_c/n^3D^5_a\rho$ ในของเหลวชนิด Non-Newtonian สามารถทำได้แบบเดียวกับของเหลวชนิด Newtonian แต่การกำหนดค่า ตัวเลขเรย์โนลส์ (Reynolds Number N_{Re}) ยุ่งยากกว่า เนื่องจากค่าความหนืดของของเหลวมีการเปลี่ยนแปลงตามอัตราของ อัตราแรงเฉือน (Shear Rate)

$$N_{Re,n} = \frac{nD_a^2\rho}{\mu_a}$$

$$N_{Re,n} = \frac{nD_a^2\rho}{K'\left(du/dy\right)_{av}^{n'-1}} \tag{3.7}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 ระยะเวลาในการผสม (Mixing Time)

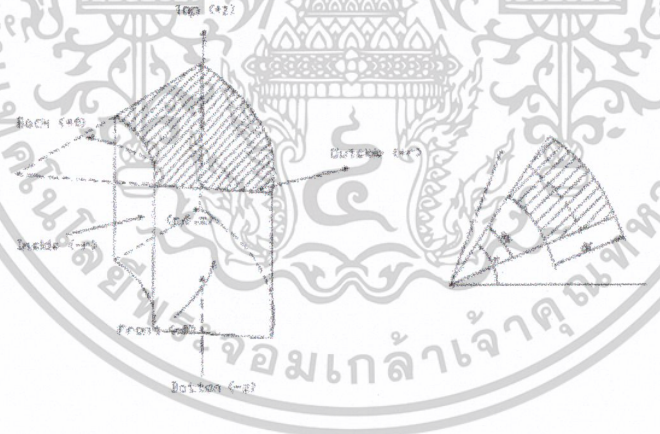
ระยะเวลาที่ใช้ในการผสมนั้น สามารถพิจารณาได้โดยเทียบกับการไหลทั้งหมดที่เกิดจากใบกวน โดยสำหรับใบกวนแบบกังหัน (Turbine) 6 ใบ จะมีการไหลรวมดังนี้

$$q = 0.92 n D_a^3 \left(\frac{D_t}{D_a} \right) \tag{3.8}$$

$$t_T \approx \frac{5V}{q} = 5 \frac{\pi D_t^2 H}{4} \frac{1}{0.92 n D_a^2 D_t} \tag{3.9}$$

3.2 สมการทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลอง

3.2.1 สมการการอนุรักษ์มวล สำหรับพิกัดทรงกระบอก
(Mass Conservation in Cylindrical Coordinate System)



รูปที่ 3.1 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการการอนุรักษ์มวล

พิจารณา Mass flux ผ่านพื้นผิว 6 ด้านของ Control Surface $\int_{cs} \rho V dA$ คุณสมบัติของแต่ละด้านของ Control Surface ถูกอธิบายด้วย Taylor Series Expansion รอบจุด O ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ $\int_{cs} \rho V dA = \left[\rho V_r + \frac{r\partial \rho V_r}{\partial r} + \frac{\partial \rho V_\theta}{\partial \theta} + \frac{r\partial \rho V_z}{\partial z} \right] dr d\theta dz$ (3.10)

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

รวม ได้ $\frac{\partial (r\rho V_r)}{r\partial r} + \frac{\partial (\rho V_\theta)}{r\partial \theta} + \frac{\partial (\rho V_z)}{r\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ (3.11)

เขียนรูป Vector จะได้ $\nabla \rho V + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$

ใน Project พิจารณาในระบบสองมิติ r, x โดยให้ z = x, V_r = V, V_x = U

ได้ $\frac{\partial r\rho V}{r\partial r} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ (3.12)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.1 Mass flux through Control Surface of a Cylindrical Differential Control Volume

Surface $\int_{cs} \rho V \cdot dA$

Inside =

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

Outside =

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

Front =

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

Back =

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

Bottom =

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

Top =

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

จากข้างบนจะได้

$$\int_{cs}\rho\vec{V}\cdot d\vec{A}=\left[\rho V_r+\frac{r\partial\left(\rho V_r\right)}{\partial r}+\frac{\partial\left(\rho V_\theta\right)}{\partial\theta}+\frac{r\partial\left(\rho V_z\right)}{\partial z}\right]drd\theta dz \qquad (3.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 สมการโมเมนตัม (Momentum Equation)

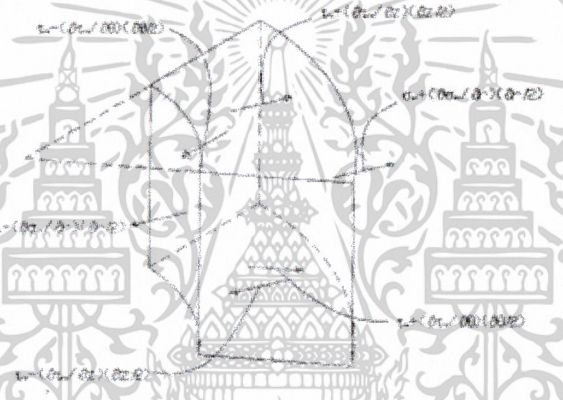
โดยทำการประยุกต์จาก Newton's second Law ซึ่งโมเมนตัมเชิงเส้นของ ρ ของระบบ คือ

$$\rho = \int_{mass\ system} V\ dm \quad \text{For infinite system ;} \quad dF = dm \frac{dV}{dt}\Big)_{system}$$

เขียนเป็นสมการ Vector ได้คือ

$$dF = dm\frac{dV}{dt} = dm\left[u\frac{\partial \forall}{\partial x} + v\frac{\partial \forall}{\partial y} + w\frac{\partial \forall}{\partial z} + \frac{\partial \forall}{\partial t}\right] \tag{3.14}$$

แรงที่กระทำบนอนุภาคของไหล



รูปที่ 3.2 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการพลังงานพิจารณาในระบบสองมิติ r,x

Continuity Equation

$$-\left[\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right]\Delta x\Delta y\Delta z \tag{3.15}$$

สมการแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลที่เข้าไปในปริมาตรควบคุม

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้เราเรียกว่า Continuity equation เขียนได้เป็น

$$\nabla \cdot (\rho V) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}$$

$$\frac{D}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial x} + V \cdot \nabla = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + w\frac{\partial}{\partial z} \tag{3.16}$$

สำหรับสมการ Continuity Equation ในพิกัดทรงกระบอก (r, θ, z) สำหรับ การไหลแบบอัดตัวไม่ได้

$$\frac{\partial v_r}{\partial_r} + \frac{v_r}{r} + \frac{1}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Equations of Motion หรือเรียกว่า Momentum equations

$$F = \frac{dM}{dt} = \frac{d(mV)}{dt} = ma \tag{3.17}$$

โดยที่ F คือ แรงสุทธิที่กระทำบนอนุภาคของไหล

ที่เวลาใด ๆ ผลรวมของการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอนุภาค แสดงดังสมการ

$$\Delta V = \frac{\partial V}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial V}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial V}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial V}{\partial z}\Delta z$$

ความเร่งของอนุภาค

$$a = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} + u\frac{\partial V}{\partial x} + v\frac{\partial V}{\partial y} + w\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{DV}{Dt} \tag{3.18}$$

โดยที่แรงบนอนุภาคแบ่งได้ 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

สำหรับแรงที่ผิวเราจะได้แรงที่เกิดจาก ความเค้นและความเค้นเฉือน

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

สำหรับแรงสุทธิที่กระทำบนอนุภาคในทิศทาง x

$$F_x = \left(\rho f_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \tag{3.19}$$

ใช้ Newton's second law of motion

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho\frac{Du}{Dt}=\rho f_x+\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} \tag{3.20}$$

$$\rho\frac{Dv}{Dt}=\rho f_y+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} \tag{3.21}$$

$$\rho\frac{Dw}{Dt}=\rho f_z+\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \tag{3.22}$$

สำหรับ Newtonian fluids จะใช้ Navier-Stokes equations

โดยที่ μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืด และ p คือ ความดัน

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

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

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

$$\rho\frac{Du}{Dt}=\rho f_z-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(2\frac{\partial u}{\partial x}-\frac{2}{3}\nabla\cdot V\right)\right]$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right]$$

$$\rho\frac{Dv}{Dt}=\rho f_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial y}\right)\right]$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(2\frac{\partial v}{\partial y}-\frac{2}{3}\nabla\cdot V\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]$$

$$\rho\frac{Dw}{Dt}=\rho f_z-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial x}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial z}\right)\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left[\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}-\frac{\partial v}{\partial z}\right)\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\mu\left(2\frac{\partial w}{\partial z}-\frac{2}{3}\nabla\cdot V\right)\right]$$

สำหรับพิกัดทรงกระบอก

R component $\dfrac{\partial v_r}{\partial t}+v_r\dfrac{\partial v_r}{\partial r}+\dfrac{v_\theta}{r}\dfrac{\partial v_r}{\partial \theta}-\dfrac{v_\theta^2}{r}+w\dfrac{\partial v_r}{\partial z}$

$$=f_r-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r}+\nu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rv_r\right)\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_r}{\partial\theta^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_\theta}{\partial\theta}+\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right\} \tag{3.23}$$

θ component $\dfrac{\partial v_\theta}{\partial t}+v_r\dfrac{\partial v_\theta}{\partial r}+\dfrac{v_\theta}{r}\dfrac{\partial v_\theta}{\partial\theta}+\dfrac{v_r v_\theta}{r}+w\dfrac{\partial v_\theta}{\partial z}$

$$=f_r-\frac{1}{\rho r}\frac{\partial p}{\partial\theta}+\nu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rv_\theta\right)\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial\theta^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial\theta}+\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}\right\} \tag{3.24}$$

Z component $\dfrac{\partial w}{\partial t}+v_r\dfrac{\partial w}{\partial r}+\dfrac{v_\theta}{r}\dfrac{\partial w}{\partial\theta}+w\dfrac{\partial w}{\partial z}$

$$=f_\theta-\frac{1}{\rho r}\frac{\partial p}{\partial\theta}+\nu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rv_\theta\right)\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial\theta^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial\theta}+\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}\right\} \tag{3.25}$$

จัดรูปแบบใหม่ 2 มิติ ได้

ทิศทาง X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x}+\frac{\partial(r\rho uv)}{r\partial r}=\frac{\partial\left[2\mu\left(\frac{u}{x}\right)\right]}{\partial x}+\frac{\partial\left[r\mu\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]}{r\partial r}-\frac{\partial p}{\partial x}+\rho g\beta\Delta T \tag{3.26}$$

ทิศทาง R

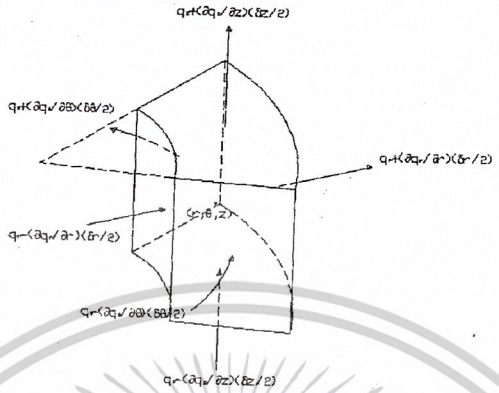
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x}+\frac{\partial(r\rho vv)}{r\partial r}=\frac{\partial\left[2r\mu\left(\frac{\partial v}{\partial r}\right)\right]}{\partial x}+\frac{\partial\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]}{r\partial r}-\frac{\partial p}{\partial r}-\frac{2\mu v}{r^2} \tag{3.27}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 สมการความร้อน (Heat Equation)

Energy Flux due to Heat Conduction

Components of the Heat Flux Vector



รูปที่ 3.3 แสดงพิกัดทรงกระบอกของสมการความร้อนพิจารณาในระบบสองมิติ r, x

Energy Equation

ใช้ First law of thermodynamics พิจารณาอัตราการเปลี่ยนแปลงของการถ่ายเทความร้อน โดยไม่พิจารณาการแผ่รังสีจะได้

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right]\Delta x\Delta y\Delta z \tag{3.28}$$

อัตราการเปลี่ยนแปลงของงานที่ถูกทำโดย surface force และ body force บนอนุภาคของไหล คือ

$$-\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(u\sigma_{xx}+v\tau_{xy}+w\tau_{xz}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(u\tau_{yx}+v\sigma_{yy}+w\tau_{yz}\right)\right.$$

$$\left.+\frac{\partial}{\partial z}\left(u\tau_{zx}+v\tau_{zy}+w\sigma_{zz}\right)+\rho V\cdot f\right]\Delta x\Delta y\Delta z \tag{3.29}$$

อัตราการเพิ่มของพลังงานภายใน (u_i) และ พลังงานจลน์ คือ

$$\rho\frac{D}{Dt}\left[u_i+\frac{1}{2}\left(u^2+v^2+w^2\right)\right]=\nabla\cdot\left(k\nabla T\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(u\sigma_{xx}+v\tau_{xy}+w\tau_{xz}\right)$$

$$+\frac{\partial}{\partial y}\left(u\tau_{yx}+v\sigma_{yy}+w\tau_{yz}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(u\tau_{zx}+v\tau_{zy}+w\sigma_{zz}\right)+\rho V\cdot f \tag{3.30}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาสมการ (3.27), (3.28), (3.29) คูณด้วย u, v, w จะได้

$$\rho\frac{D}{Dt}\left[\frac{1}{2}\left(u^2+v^2+w^2\right)\right]=u\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial\sigma_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial}\right)$$

$$+v\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial\tau_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial\sigma_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial z}\right)+w\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial\tau_{zx}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{zy}}{\partial y}+\frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z}\right)+\rho V\cdot f \qquad (3.31)$$

สมการ (3.30) เรียกว่า Mechanical energy equation

จากนั้นเอาสมการ (3.22) ลบด้วย สมการ (3.21) จะได้

$$\rho\frac{Du_i}{Dt}=\nabla\cdot(k\nabla T)+\sigma_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\sigma_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}+\sigma_{zz}\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$+\tau_{xy}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\tau_{yz}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)+\tau_{zx}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right) \qquad (3.32)$$

สมการ (3.31) เรียกว่า Thermal energy equation

ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง ความเค้น กับความเครียด สำหรับ Newtonian fluids จะได้

$$\sigma_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\sigma_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}+\sigma_{zz}\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$=-p\nabla\cdot V-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot V)^2+2\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right] \qquad (3.33)$$

และ

$$\tau_{xy}\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)=\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \qquad (3.34)$$

$$\tau_{yz}\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)=\mu\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 \qquad (3.35)$$

$$\tau_{zx}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \qquad (3.36)$$

จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho\frac{Du_i}{Dt}=\nabla\cdot(k\nabla T)-p\nabla\cdot V+\mu\phi \tag{3.37}$$

ซึ่ง

$$\phi=2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]+\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2$$

$$+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2-\frac{2}{3}(\nabla\cdot V)^2 \tag{3.38}$$

ค่า ϕ นี้เรียกว่า dissipation function ซึ่งเป็น อัตราที่ viscous forces ทำที่ irreversible work Energy equation นี้เขียนในรูปของ enthalpy คือ $i=u+p/\rho$ จะได้

$$\rho\frac{Di}{Dt}=\nabla\cdot(k\nabla T)+\frac{Dp}{Dt}+\mu\phi \tag{3.39}$$

สำหรับ Incompressible fluid $du_i = cdT$ ซึ่ง $c = c_v \approx c_p$ สำหรับสมการพลังงานได้

$$\rho c\frac{DT}{Dt}=\nabla\cdot(k\nabla T)+\mu\phi$$

$$\phi=2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]$$

$$+\left(\frac{\partial v}{\partial x}+\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \tag{3.40}$$

ค่า k คงที่ จะได้ $\frac{DT}{Dt}=\alpha\nabla^2T+\frac{\mu}{\rho c}\phi$

$$\rho c\frac{DT}{Dt}=\nabla\cdot(k\nabla T)+q'''+\mu\phi \tag{3.41}$$

$$\frac{D}{Dt}=\frac{\partial}{\partial t}+v_r\frac{\partial}{\partial r}+\frac{V_\theta}{r}\frac{\partial}{\partial\theta}+w\frac{\partial}{\partial z} \tag{3.42}$$

$$\nabla\cdot(k\nabla T)=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(rk\frac{\partial T}{\partial t}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial\theta}\left(k\frac{\partial T}{\partial\theta}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right) \tag{3.43}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi = 2\left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r}\right)^2 + \left\{\frac{1}{r}\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r\right)\right\}^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]$$

$$+\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)^2 + \left[\frac{1}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta} + r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{v_\theta}{r}\right)\right]^2 \qquad (3.44)$$

เนื่องจากว่าการไหลเป็นแบบ Laminar ทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากความหนืดของอนุภาคของไหลมีค่าน้อย จึงพิจารณาให้ค่า dissipation มีค่าน้อยเข้าใกล้ศูนย์ เพราะฉะนั้นจะได้สมการพลังงานเป็น

$$\rho\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho vT)}{r\partial r} = \frac{\partial\left[\left(\frac{\mu}{\Pr}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right]}{\partial x} + \frac{\partial\left[r\left(\frac{\mu}{\Pr}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)\right]}{r\partial r} \qquad (3.45)$$

ซึ่ง $\left(\frac{\rho k}{\rho c_p}\right) = \rho\alpha = \frac{\rho V}{\Pr}$

3.2.4 การประยุกต์ใช้ Finite Volume Method

จากสมการที่ได้มาในบทที่ 2 เราสามารถจัดให้อยู่ในรูป General form โดยมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho v\Phi)}{r\partial r} = \frac{\partial\left[\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)\right]}{\partial x} + \frac{\partial\left[r\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)\right]}{r\partial r} - S_\Phi \quad \text{--GeneralEq.}$$

Term1 Term2 Term3 Term4 Term5 Term6

เมื่อนำสมการที่ได้มาเทียบกับ General Equation

1) สำหรับสมการอนุรักษ์มวล

$$\Phi = 1 \qquad \Gamma_{\Phi x} = 0 \qquad \Gamma_{\Phi r} = 0$$

$$S\Phi = S_u + S_p\Phi_p = 0 + 0, (\Phi_p = 1)$$

2) สำหรับสมการโมเมนตัม

2.1) ในทิศทาง x

$$\Phi = u \qquad \Gamma_{\Phi x} = \mu \qquad \Gamma_{\Phi r} = \mu$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_\Phi = S_u + S_p\Phi_p = \frac{\partial\left[\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\right]}{\partial x} + \frac{\partial\left[r\mu\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\right]}{r\partial r} - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g\beta\Delta T + 0, (\Phi_p = u)$$

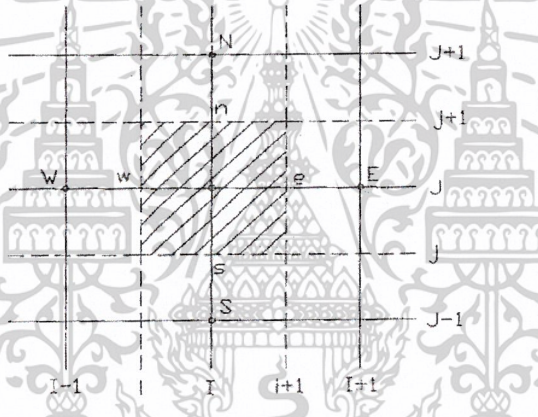
2.2) ในทิศทาง R

3) สำหรับสมการพลังงาน (Enthalpy = H = c_pT)

$$\Phi = T \qquad \Gamma_{\Phi x} = \mu/Pr \qquad \Gamma_{\Phi r} = \mu/Pr$$

$$S\Phi = S_u + S_p\Phi_p = 0 + 0, (\Phi_p = T)$$

สมการสำหรับการไหลแบบ Unsteady Flow



รูปที่ 3.4 แสดงอนุภาคของของไหลที่ใช้ Finite Volume Method หรือที่เรียกว่า cell control volume

The Cells of Control Volume (แสดงในตารางที่ 3.1)

ทำการ Discretised General Equation ในลักษณะการไหลแบบ Lamonar Unsteady Incompressible Flow ในรูป 3.4

Term 1 Unsteady Term

$$\int_c \forall \int_t^{t+\Delta t} \left[\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}\right] dt d\forall = \rho\left(\Phi_p - \Phi_p^0\right)\Delta\forall$$

$$= \rho^0\left(\Phi_p - \Phi_p^0\right)\Delta\forall \qquad (3.46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Term 2 and 3 Convection Term

$$\frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x}+\frac{\partial(r\rho v\Phi)}{r\partial r}=\int_c\forall\int_t^{t+\Delta t}\left[\frac{\partial(\rho u\Phi)}{\partial x}\right]dtd\forall+\int_c\forall\int_t^{t+\Delta t}\left[\frac{\partial(r\rho v\Phi)}{r\partial r}\right]dtd\forall$$

$$=\int_t^{t+\Delta t}\left[\partial\int_A(\rho u\Phi)dA_x\right]dt+\int_t^{t+\Delta t}\left[\frac{\partial\int_A(r\rho v\Phi)dA_r}{r}\right]dt$$

$$=\int_t^{t+\Delta t}\left[(\rho u\Phi_A)_n-(\rho u\Phi_A)_s\right]dt+\int_t^{t+\Delta t}\left[(\rho v\Phi_A)_e-(\rho v\Phi_A)_w\right]dt \quad (3.47)$$

กำหนดให้ 1) F = ρu, ρv

2) $\int_t^{t+\Delta t}(\Phi)dt=\left[\theta(\Phi)+(1-\theta)\left(\Phi^0\right)\right]dt$

$$=\left[\theta\left(F_nA_n\Phi_n-F_sA_s\Phi_s\right)+(1-\theta)\left(F_nA_n\Phi_n^0-F_sA_s\Phi_s^0\right)\right]\Delta t$$

$$+\left[\theta\left(F_eA_e\Phi_e-F_wA_w\Phi_w\right)+(1-\theta)\left(F_eA_e\Phi_e^0-F_wA_w\Phi_w^0\right)\right]\Delta t \quad (3.48)$$

สำหรับ Implicit Scheme ($\theta=1$)

$$=\left[\left(F_nA_n\Phi_n-F_sA_s\Phi_s\right)\right]\Delta t+\left[\left(F_eA_e\Phi_e-F_wA_w\Phi_w\right)\right]\Delta t \quad (3.49)$$

Term 4 and Term 5 Diffeusion Term

$$\frac{\partial\left[\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)\right]}{\partial x}+\frac{\partial\left[r\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)\right]}{r\partial r}$$

$$=\int_c\forall\int_t^{t+\Delta t}\left[\frac{\partial\left[\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)\right]}{\partial x}\right]dtd\forall+\int_c\forall\int_t^{t+\Delta t}\frac{\partial\left[r\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)\right]}{r\partial r}dtd\forall$$

$$=\int_t^{t+\Delta t}\left[\partial\int_A\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)dA_x\right]dt+\int_t^{t+\Delta t}\left[\frac{\partial\int_A r\Gamma_{\Phi x}\left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)dAr}{r}\right]dt$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Use Central Difference Scheme

$$\partial\Phi_e = \left(\frac{\Phi_E + \Phi_P}{2}\right) \qquad \partial\Phi_n = \left(\frac{\Phi_N + \Phi_P}{2}\right)$$

$$\partial\Phi_w = \left(\frac{\Phi_P + \Phi_W}{2}\right) \qquad \partial\Phi_s = \left(\frac{\Phi_P + \Phi_s}{2}\right)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t}\left[\left(\Gamma_{\Phi_n} A_n \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_n\right)\right] - \left[\left(\Gamma_{\Phi_s} A_S \left(\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right)_S\right)\right] dt$$

$$+ \int_t^{t+\Delta t}\left[\left(\Gamma_{\Phi_e} A_e \left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)_e\right)\right] - \left[\left(\Gamma_{\Phi_w} A_W \left(\frac{\partial\Phi}{\partial r}\right)_W\right)\right] dt$$

$$= \int_t^{t+\Delta t}\left[\left(\frac{\Gamma_{\Phi_n} A_n}{2}\left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{\delta x_{PN}}\right)\right) - \left(\frac{\Gamma_{\Phi_s} A_S}{2}\left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{\delta x_{SP}}\right)\right)\right] dt$$

$$+ \int_t^{t+\Delta t}\left[\left(\frac{\Gamma_{\Phi_e} A_e}{2}\left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta r_{PE}}\right)\right) - \left(\frac{\Gamma_{\Phi_w} A_W}{2}\left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{\delta r_{WP}}\right)\right)\right] dt$$

กำหนดให้ 1) $D = \frac{\Gamma_\Phi}{\delta x}, \frac{\Gamma_\Phi}{\delta r}$

2) $\int_t^{t+\Delta t}(\Phi)dt = \left[\theta(\Phi) + (1-\theta)\left(\Phi^0\right)\right]dt$

$$= \left[D_n A_n\left(\frac{\Phi_N - \Phi_P}{2}\right) - D_s A_S\left(\frac{\Phi_P - \Phi_S}{2}\right)\right]\Delta t$$

$$+ \left[D_e A_e\left(\frac{\Phi_E - \Phi_P}{2}\right) - D_w A_W\left(\frac{\Phi_P - \Phi_W}{2}\right)\right]\Delta t \qquad (3.50)$$

Term 6 Source Term

$$\int_c \forall \int_t^{t+\Delta t}(s\Phi)dtd\forall = s_\Phi \Delta\forall\Delta t = \left[s_U + s_P\Phi_P\right]\Delta t \qquad (3.51)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวม Term 1 ถึง 6 และหารตลอดด้วย Δt จะได้

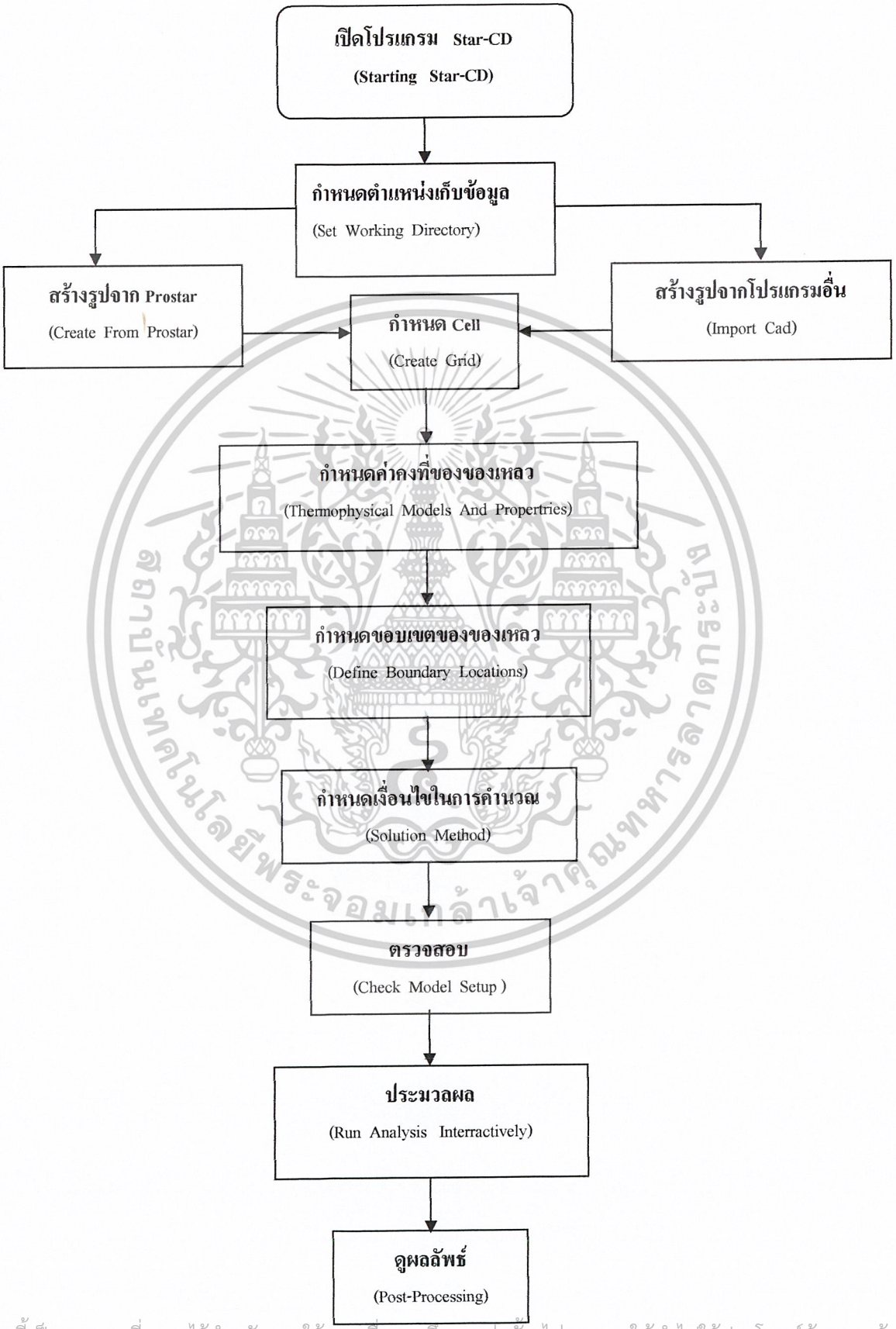
$$\rho^0\left(\Phi_P-\Phi_P^0\right)\frac{\Delta\forall}{\Delta t} \qquad \left[D_nA_n\left(\frac{\Phi_N-\Phi_P}{2}\right)-D_sA_S\left(\frac{\Phi_P-\Phi_S}{2}\right)\right]$$

$$+\left[\left(F_nA_n\Phi_n-F_sA_s\Phi_s\right)\right]=+\left[D_eA_e\left(\frac{\Phi_E-\Phi_P}{2}\right)-D_wA_W\left(\frac{\Phi_P-\Phi_W}{2}\right)\right]$$

$$+\left[\left(F_eA_e\Phi_e-F_wA_w\Phi_w\right)\right] \quad +\left[S_U+S_P\Phi_P\right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 แผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม

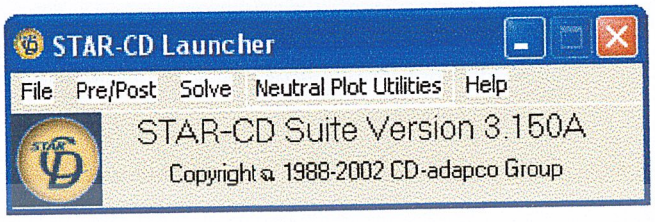


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

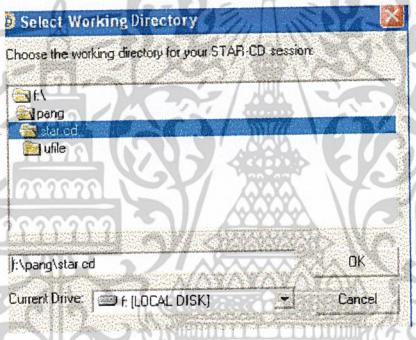
3.4 ขั้นตอนการใช้งานโปรแกรม STAR – CD

1. การเปิดโปรแกรม STAR – CD Lecher

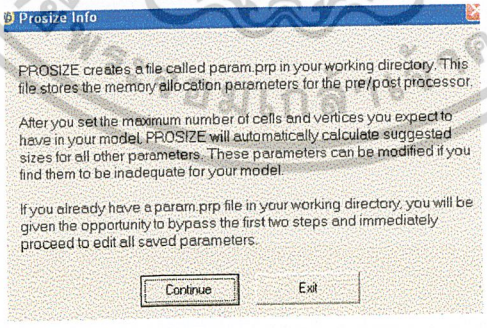
- จากเมนูโปรแกรมของ Window เลือก Program > STAR – CD ดังรูป



- เลือก File.>Set Working Directory
- กำหนดค่าตำแหน่งที่เก็บข้อมูลของการทำงานในหัวข้อ Working directory >F\ star cd ซึ่งหมายความว่า ข้อมูลทั้งหมดของปัญหาจะถูกเก็บลงในโฟลเดอร์

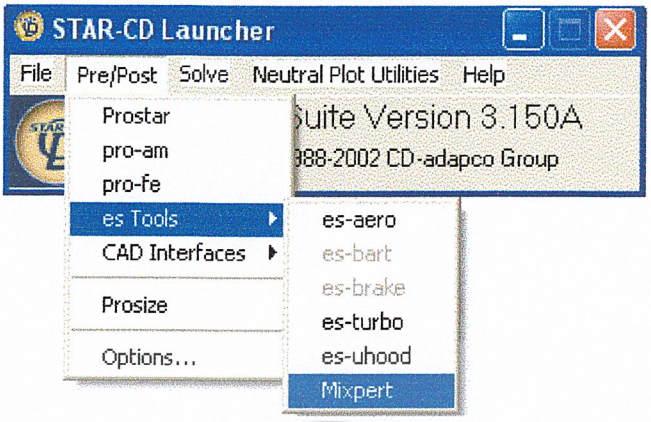


- เลือก pre/post> prosize กด continue เพื่อตั้งค่าการทำงานของ prostar

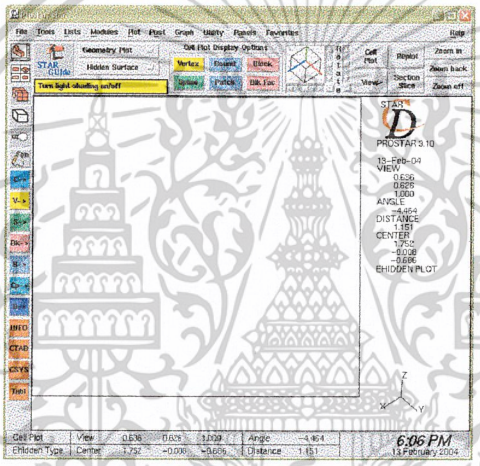


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เลือก pre/post>es Tools >Mixpert เพื่อเข้าสู่หน้าจอที่ใช้แสดงผล ดังรูป



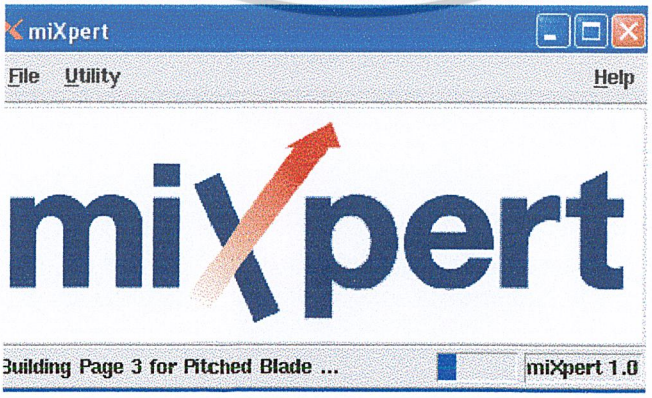
- จะปรากฏหน้าจอดังรูป



2. ขั้นตอนของการสร้างแบบจำลอง (preprocess)

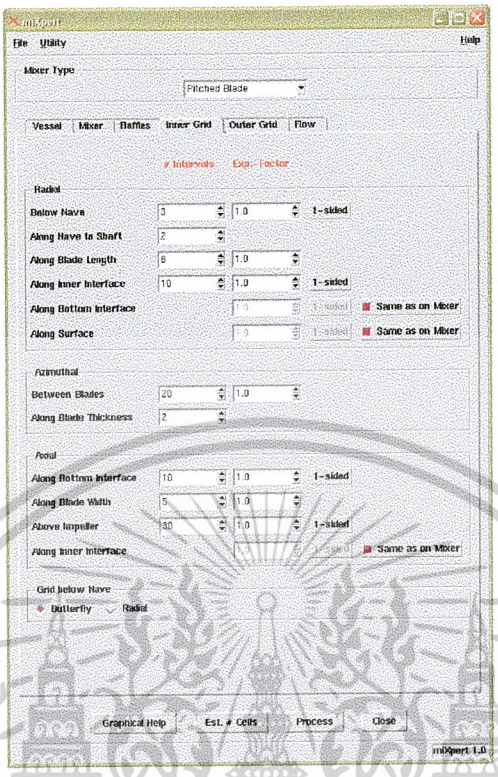
- ใส่ค่ารายระเอียดของถังกวน และ กำหนดMash

Prostar>Automash>Mixpert ซึ่ง นี้เป็น โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งสามารถกำหนด Mash ที่เราต้องการได้

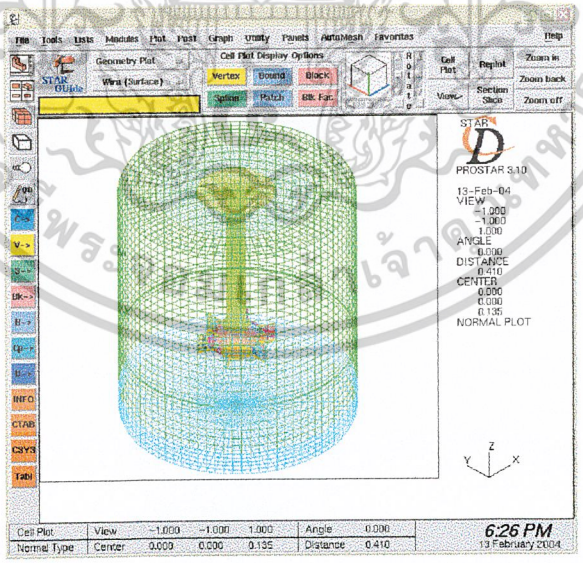


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ใส่ค่ารายระเอียดของถัง พร้อมทั้งกำหนด Mash ใน Mixpart



- กด process เป็นการนำแบบจำลองที่เรากำหนดเข้าสู่ prostar และแสดงผลดังนี้

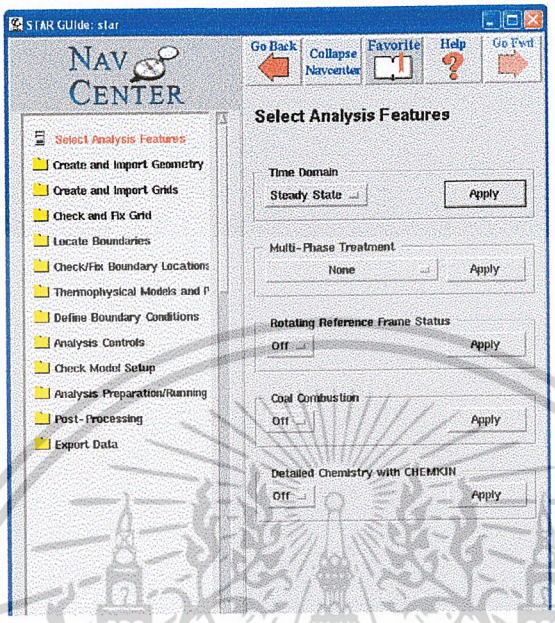


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การกำหนดค่าคุณสมบัติของวัสดุต่างๆ

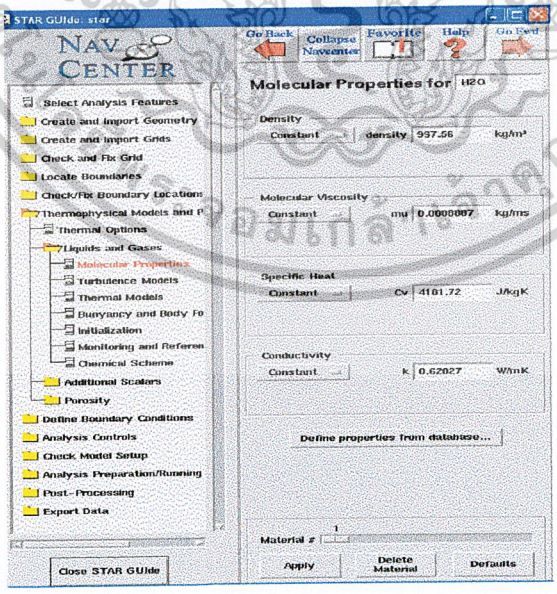
- กำหนดค่าการทำงานให้เป็นแบบ Steady state

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



- กำหนดคุณสมบัติของของเหลวจาก

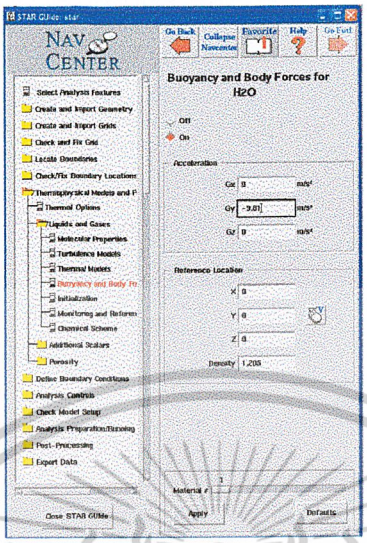
star Guide>Thermaphysical Models>Liquid and Gas>Molecular Properties ใส่ค่าความหนาแน่นและความหนืดของของเหลว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

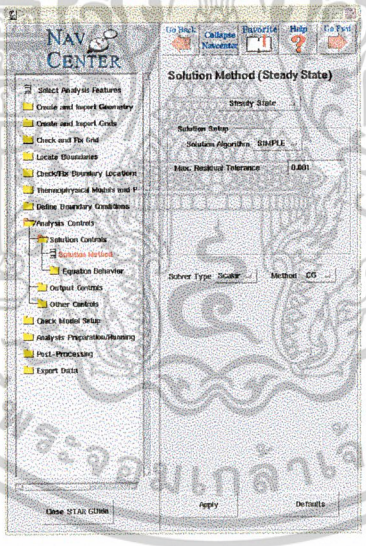
- กำหนดแรงลอยตัวของขอลเหลวจาก

star Guide>Thermaphysical Models>Liquid and Gas>Buoyancy and Body Forces on



- กำหนดกระบวนการทำ

star Guide>Analysis Control>Solution Control>Solution Method

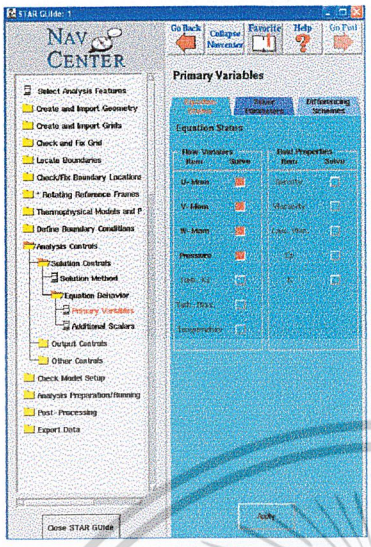


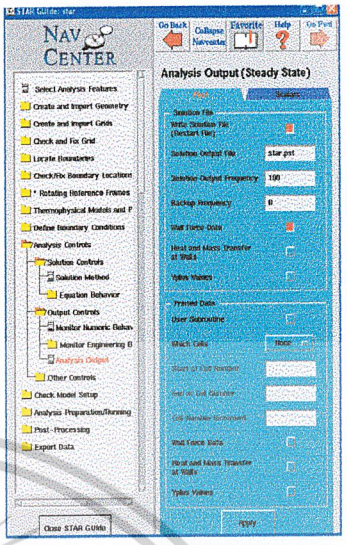
- เลือกสมการที่จะใช้ในการคำนวนด้วยโปรแกรม โดยใช้สมการความเร็ว 3 มิติ และสมการที่เกี่ยวข้องกับความหนืด

star Guide>Analysis Control>Equation Behavior>Primary Variables

star Guide>Output Control>Analysis Output

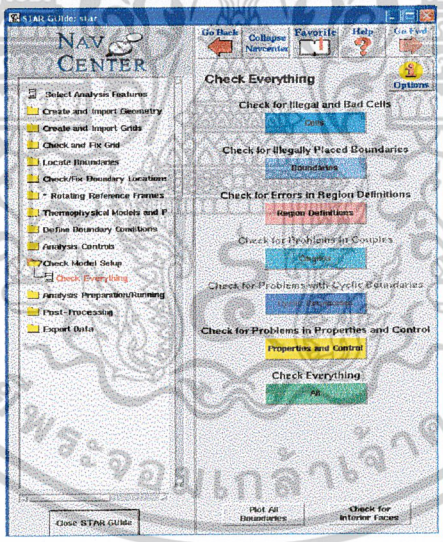
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





- ตรวจสอบว่ามีการผิดพลาด(error)หรือไม่

  star Guide>Check Model Setup>Check Everything>All



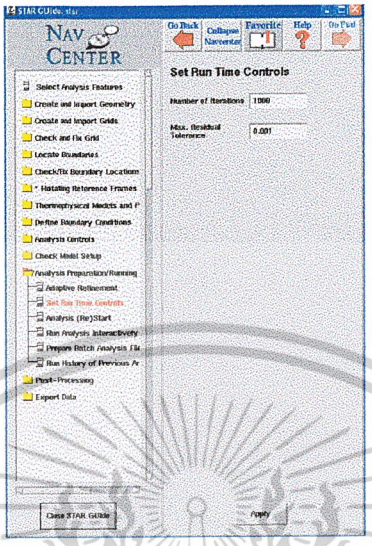
4. การทำการคำนวณเพื่อหาคำตอบ (solution)

- กำหนดให้โปรแกรมวนรอบในการแก้สมการตามค่าการวนรอบที่ใส่เข้าไป โปรแกรมจะแสดงผลหรือจะหยุดการคำนวณเมื่อครบรอบการทำงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

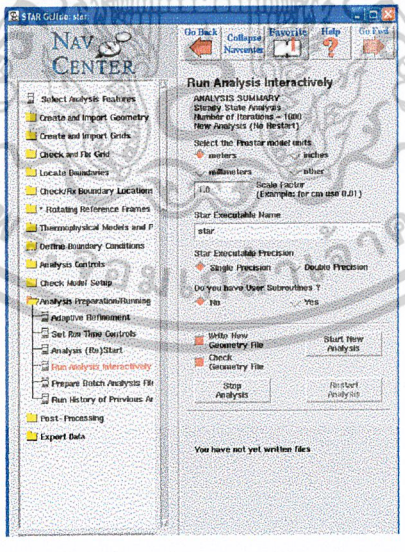
star Guide>Analysis Preparations>Set run time control

star Guide>Analysis Preparations> Number of Iterations



- สั่งให้โปรแกรมstar cdเริ่มการคำนวณ และรอจนโปรแกรมทำการคำนวณเสร็จ

star Guide>Analysis Preperation>Run Analysis Interactive >Start New Analysis



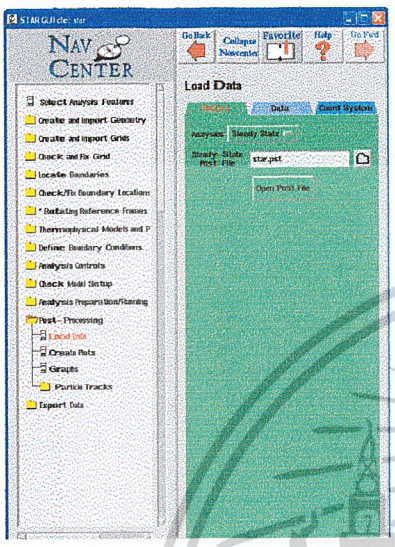
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การดูผลลัพธ์ (Post Processing)

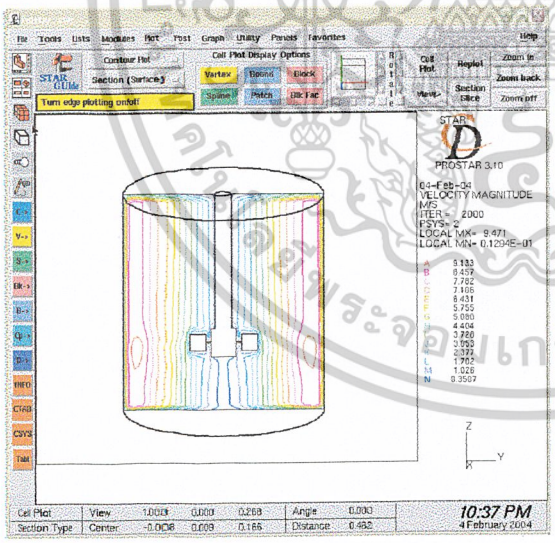
- เปิด Fileเพื่อการดูผลลัพธ์ และเลือกการแสดงผล

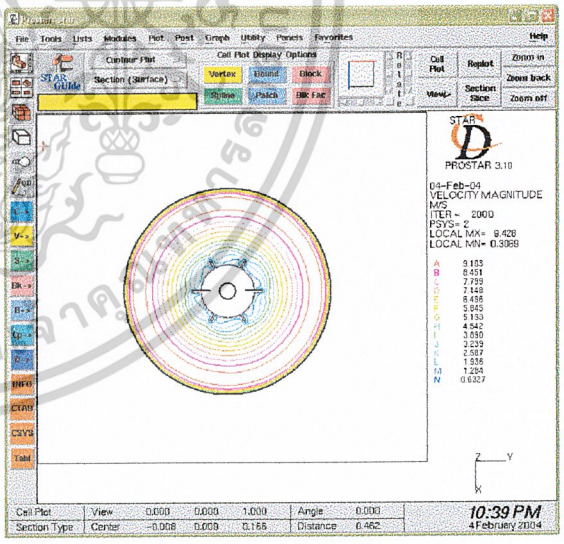
star Guide> Post Processing>Load Data >File>Open Post File

star Guide> Post Processing>Load Data> Get data > Goto>Create plot



- แบบของการนำเสนอ





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 สภาวะการทำงาน

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดถังกวนถังผสมโดยใช้โปรแกรม Star-CD ได้กำหนดสภาวะของการsimulation โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปร ดังนี้

3.5.1 ความเร็วรอบของใบกวนแต่ละชนิดโดยกำหนด 5 ความเร็วรอบ

1. ความเร็วรอบสำหรับใบกังหันแบบเอียง 45° (Pitche-Blade Turbine)

ที่ความเร็วรอบ 57 rpm 97 rpm 136 rpm 175 rpm 210 rpm

2. ความเร็วรอบสำหรับใบกังหันแบบจาน (Disk-Blade Turbine)

ที่ความเร็วรอบ 500 rpm 600 rpm 700 rpm 800 rpm 900 rpm

3. ความเร็วรอบสำหรับใบพัด (Helical Blade)

ที่ความเร็วรอบ 200 rpm 250 rpm 300 rpm 350 rpm 400 rpm

3.5.2 ผลิตภัณฑ์อาหารตัวอย่างตามทฤษฎีของของไหล 4 ประเภทดังนี้

1. น้ำ เป็นของเหลวประเภท Newtonian fluid
2. Most Emultions (Ctream) เป็นของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid
3. Peanut butter เป็นของเหลวประเภท Dilatant fluid
4. Ketchup เป็นของเหลวประเภท Bingham plastic fluid

3.5.3 การติดแผ่นกั้นและไม่ติดแผ่นกั้น

1. ติดแผ่นกั้น
2. ไม่ติด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง 3.2 แสดงค่า n และ K และสภาวะในการสร้างแบบจำลองของผลิตภัณฑ์

ผลิตภัณฑ์	ชนิดของใบกวน	ความเร็วรอบ (RPM)				
น้ำ (Newtonian fluid) n = 1 K = 1	1.) Helical blade	200	250	300	350	400
	2.) Incline blade	57	97	136	175	210
	3.) Turbine blade	500	600	700	800	900
Ketchup (Bingham plastic fluid) n = 0.27 K = 18.7	1.) Helical blade	200	250	300	350	400
	2.) Incline blade	57	97	136	175	210
	3.) Turbine blade	500	600	700	800	900
Cream (most emulsion) (Pseudoplastic fluid) n = 0.98 K = 0.0138	1.) Helical blade	200	250	300	350	400
	2.) Incline blade	57	97	136	175	210
	3.) Turbine blade	500	600	700	800	900
Peanut butter (Dilatant fluid) n = 1.2 K = 15.6	1.) Helical blade	200	250	300	350	400
	2.) Incline blade	57	97	136	175	210
	3.) Turbine blade	500	600	700	800	900

ตาราง 3.3 แสดงค่าความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

ผลิตภัณฑ์	น้ำ (Non Newtonian) n = 1 K = 1	Ketchup (Bingham plastic) n = 0.27 K =18.7	Cream (Pseudoplastic) n = 0.98 K =0.0138	Peanut butter (Dilatant) n = 1.2 K = 15.6
ความหนืด (kg/m^3)	0.0008887	50	0.051	250

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

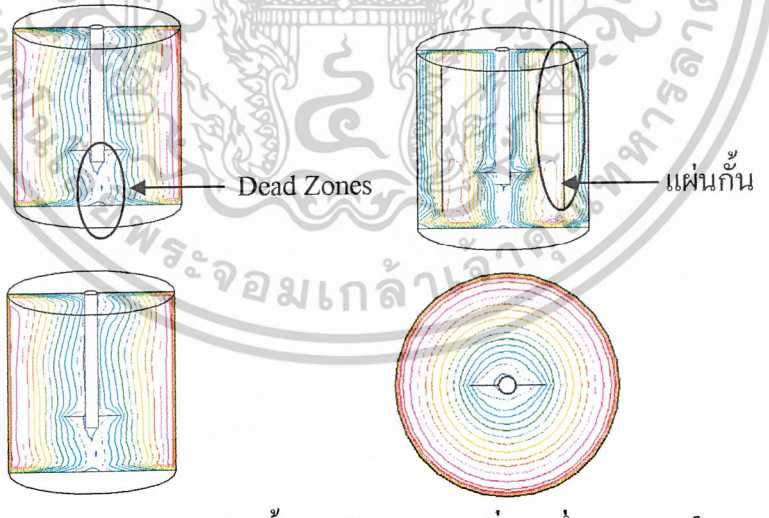
บทที่ 4

ผลของแบบจำลอง และการวิเคราะห์ผล

จากผลของแบบจำลอง สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือ

1. ศึกษาย่านการผสมรวมถึงจุดที่ไม่เกิดการผสมกันของของเหลวภายในถังกวน(Dead Zones)
2. รูปแบบการผสมและเส้นการไหลของของเหลวภายในถังกวนเมื่อเปลี่ยนชนิดของใบกวน
3. เปรียบเทียบลักษณะการผสมของของเหลวของแต่ละประเภท
4. เปรียบเทียบผลของการติดแผ่นกั้นและไม่ติดแผ่นกั้น

โดยแสดงผลของแบบจำลองในรูปแบบของความเร็วของของเหลวภายในถังกวนเป็นแบบเส้นที่มีความเร็วเท่ากัน (Scalar) ทิศทางของของเหลว (Vector) และความดันของของเหลวภายในถังกวน(Scalar) ซึ่งแสดงรูปในแนวตัดขนานกับแกนเพลาและตั้งฉากกับแกนเพลาที่แนวกึ่งกลางของใบกวน

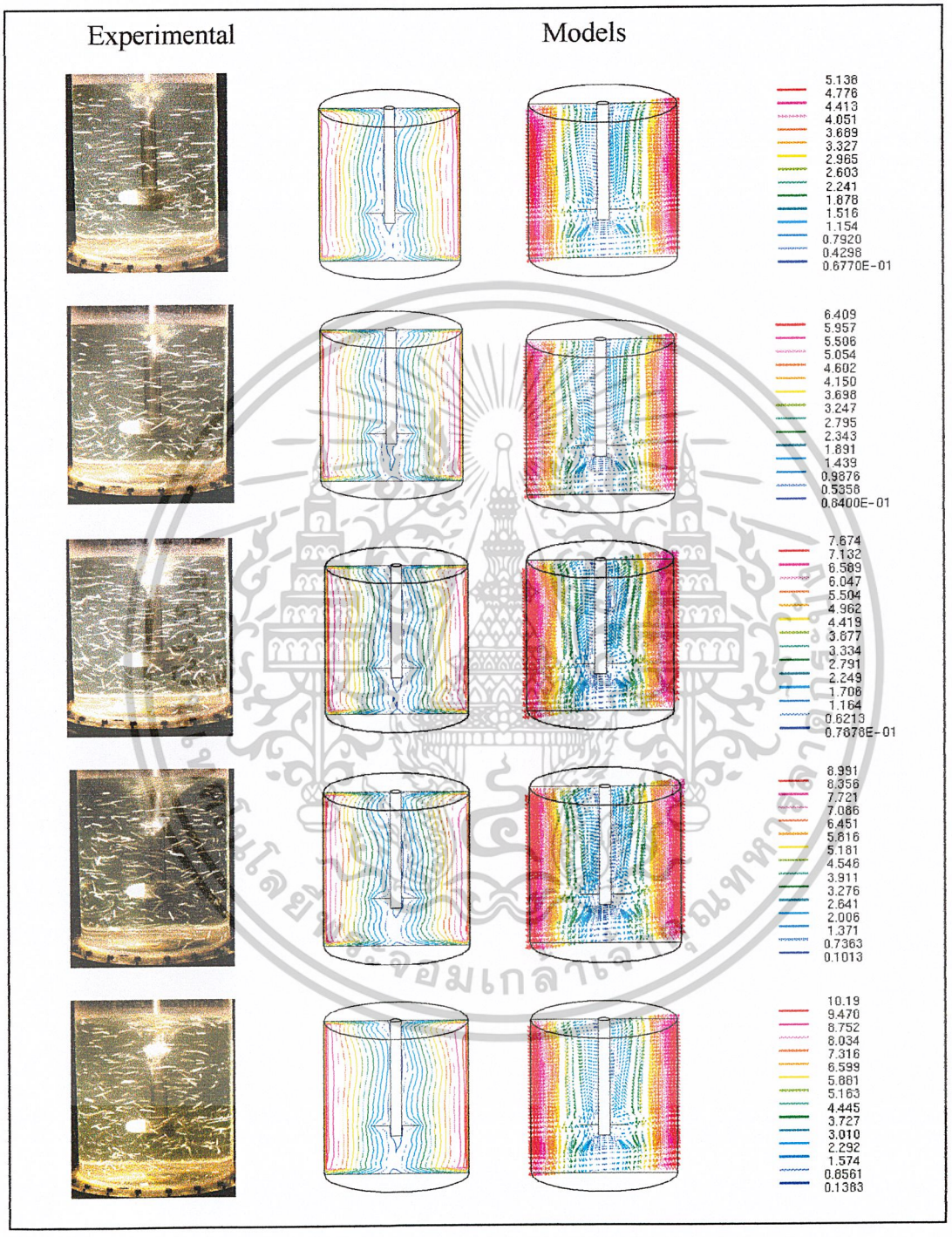


ขนานกับแกนเพลา ตั้งฉากกับแกนเพลาที่แนวกึ่งกลางของใบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

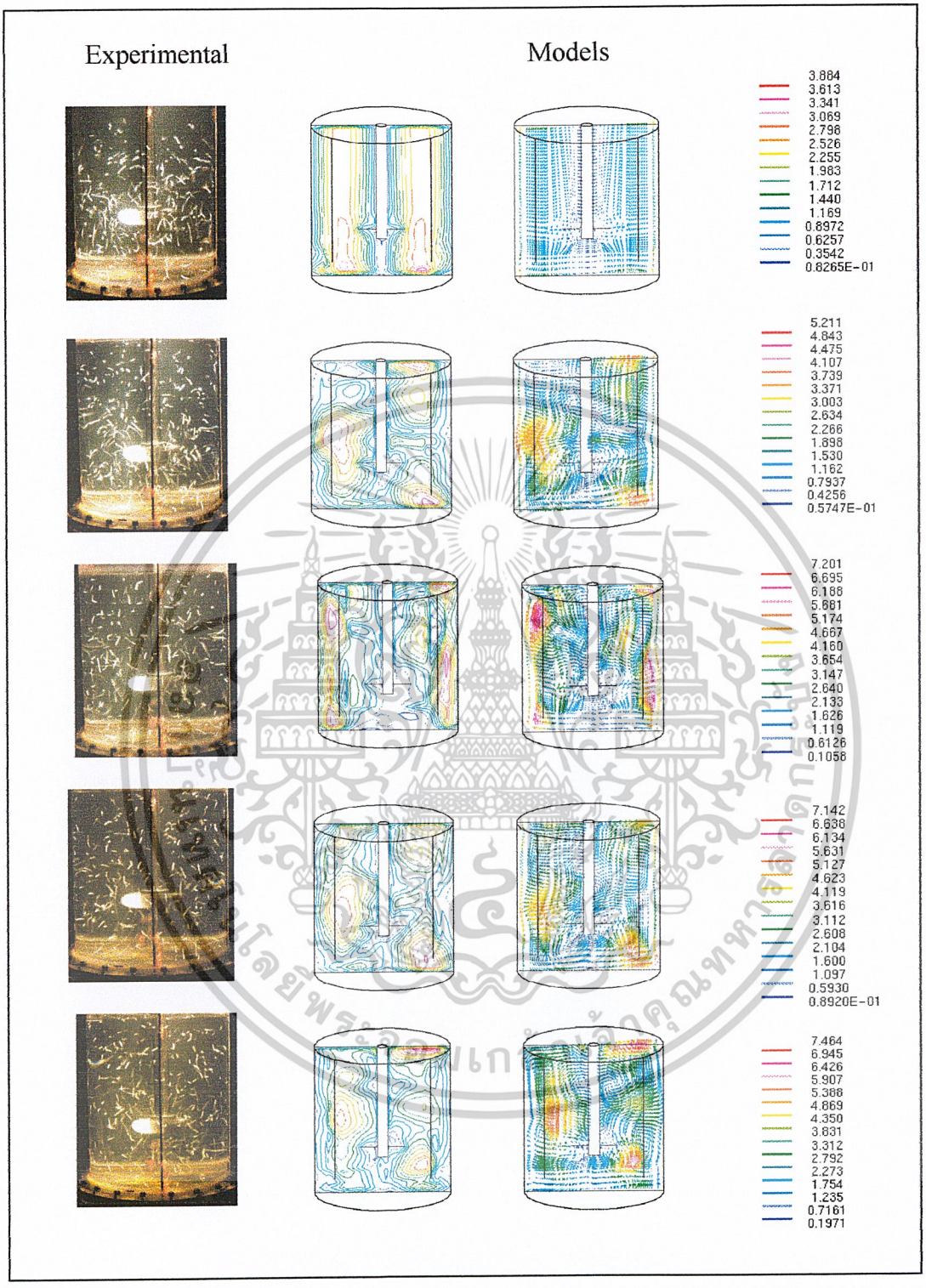
4.1 การเปรียบเทียบผลจากการทดลองจริง กับผลจากแบบจำลอง

4.1.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวน Helical



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ความเร็วรอบ 200 250 300 350 และ 400 rpm ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น(Baffle)

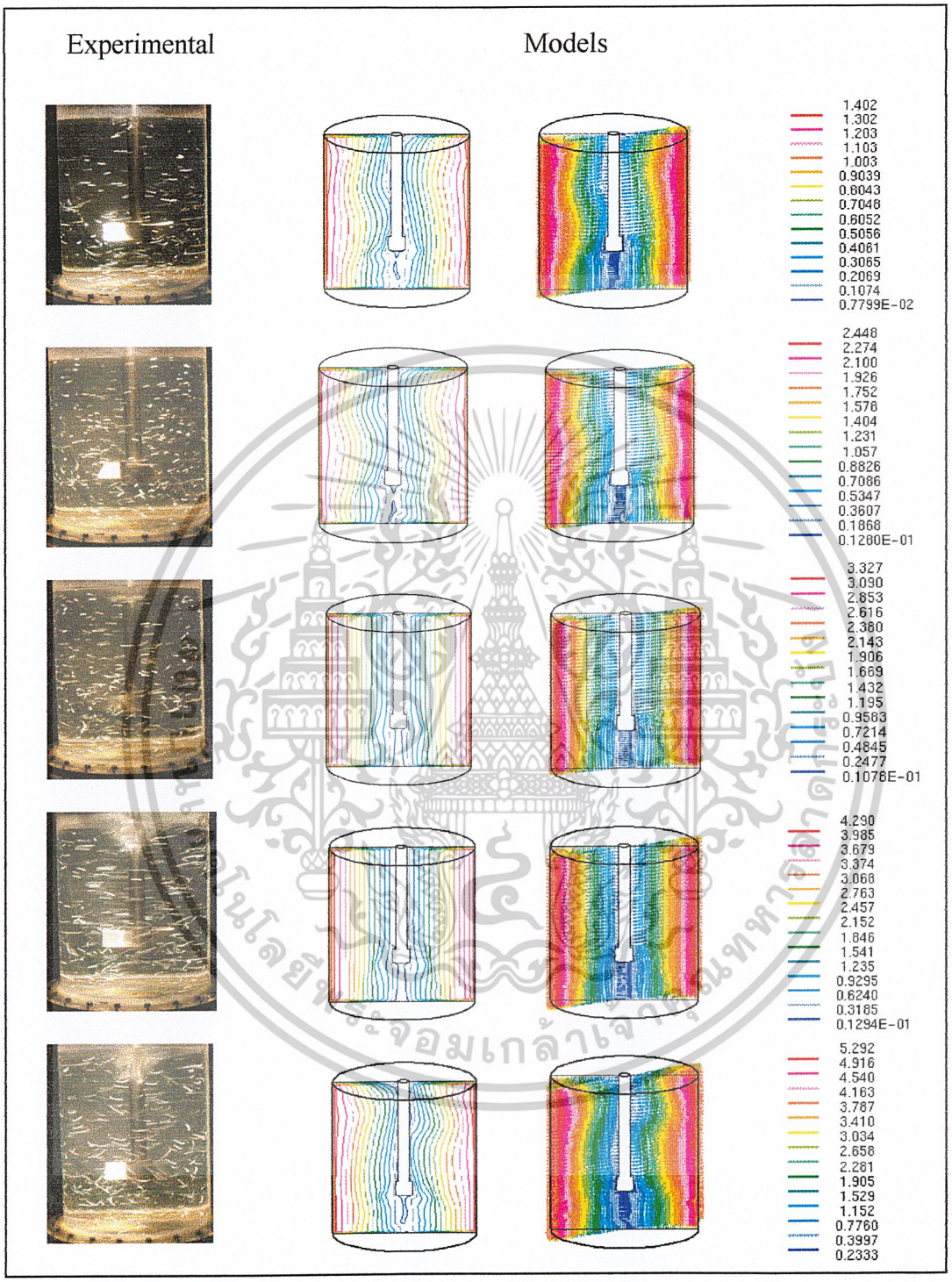
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ความเร็วรอบ 200 250 300 350 และ 400 rpm ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ติดแผ่นกั้น(Baffle)

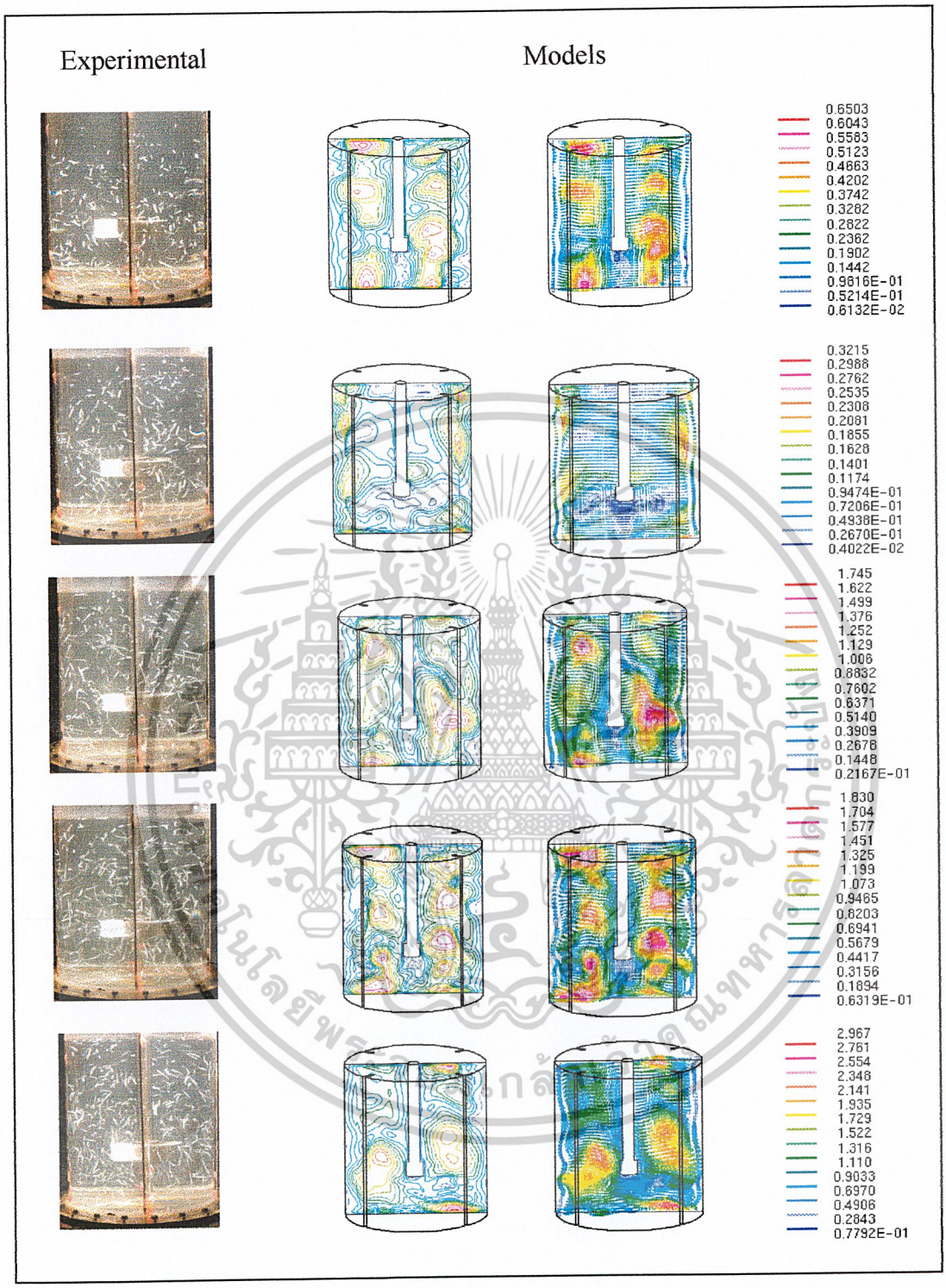
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ใช้ใบกวน Incline



รูปที่ 4.3 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากแบบจำลอง ที่ความเร็วรอบ 57 97 136 175 และ 210 rpm ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น(Baffle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

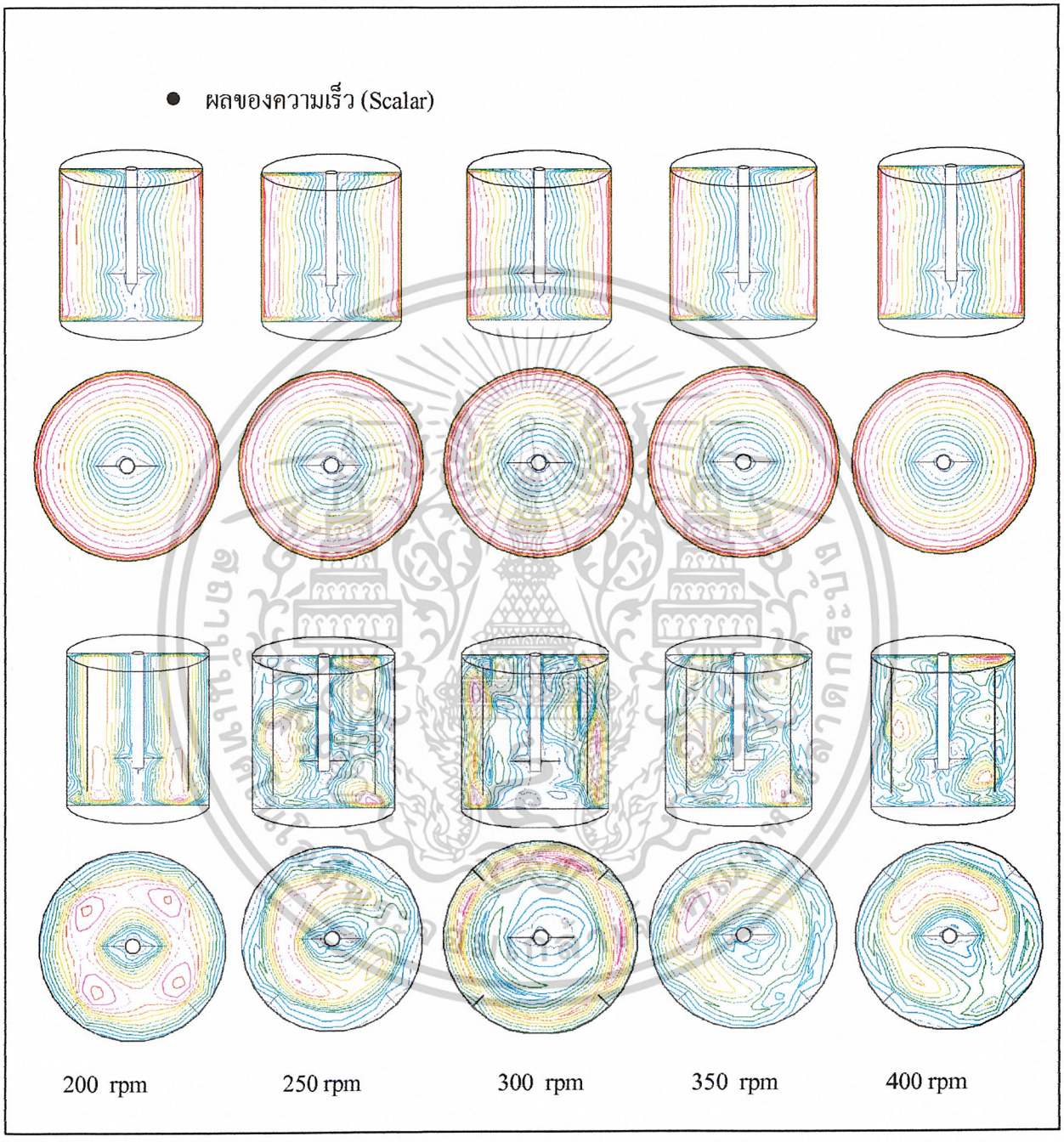


รูปที่ 4.4 การเปรียบเทียบผลการทดลองจริงกับผลจากจากแบบจำลอง ที่ความเร็วรอบ 57 97 136 175 และ 210 rpm ตามลำดับ โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ติดแผ่นกั้น(Baffle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

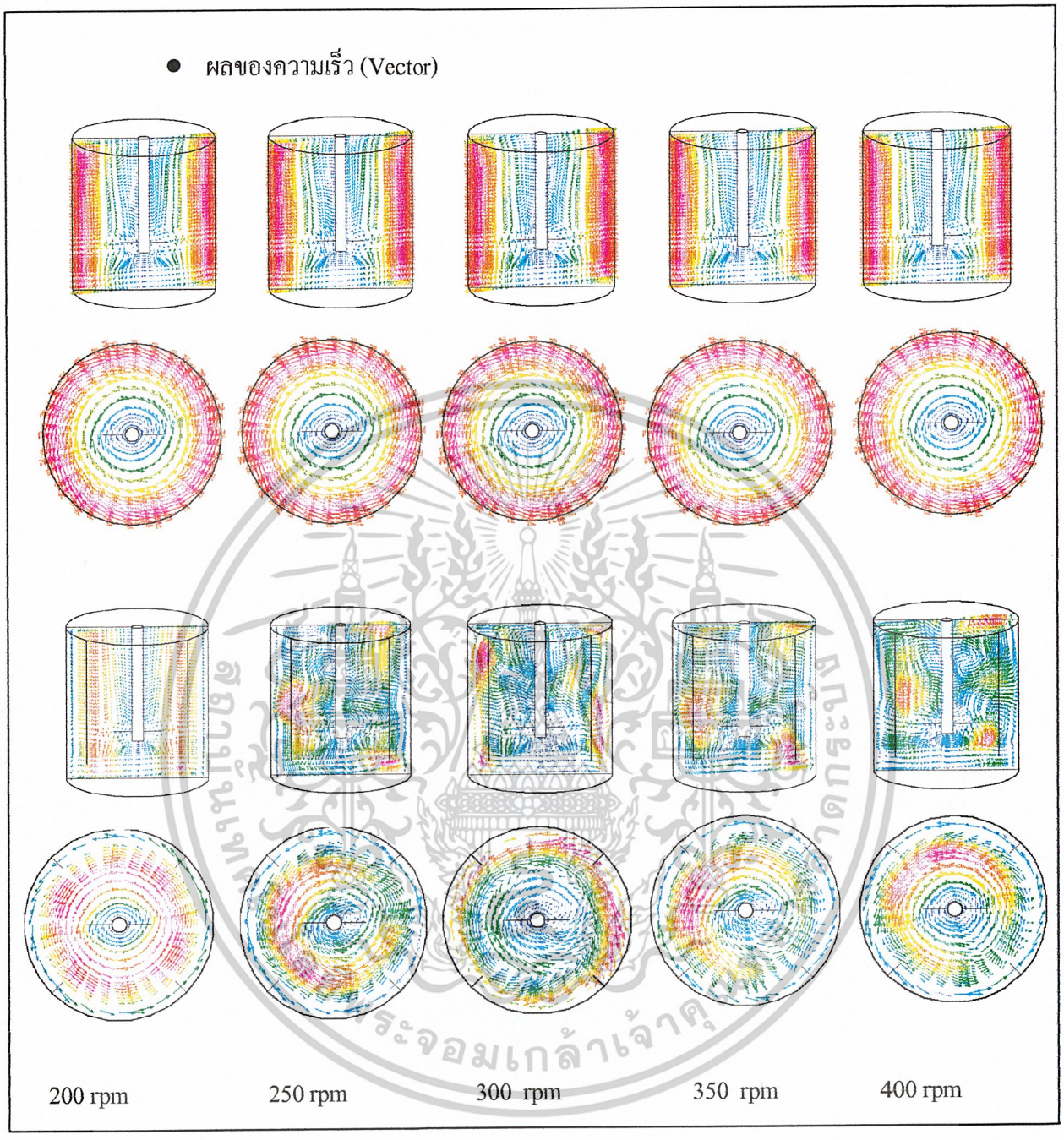
4.2 ผลของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดที่ใบกวนชนิดเดียวกัน

4.2.1 ผลของแบบจำลองโดยใช้ใบกวนแบบ Helical Blade



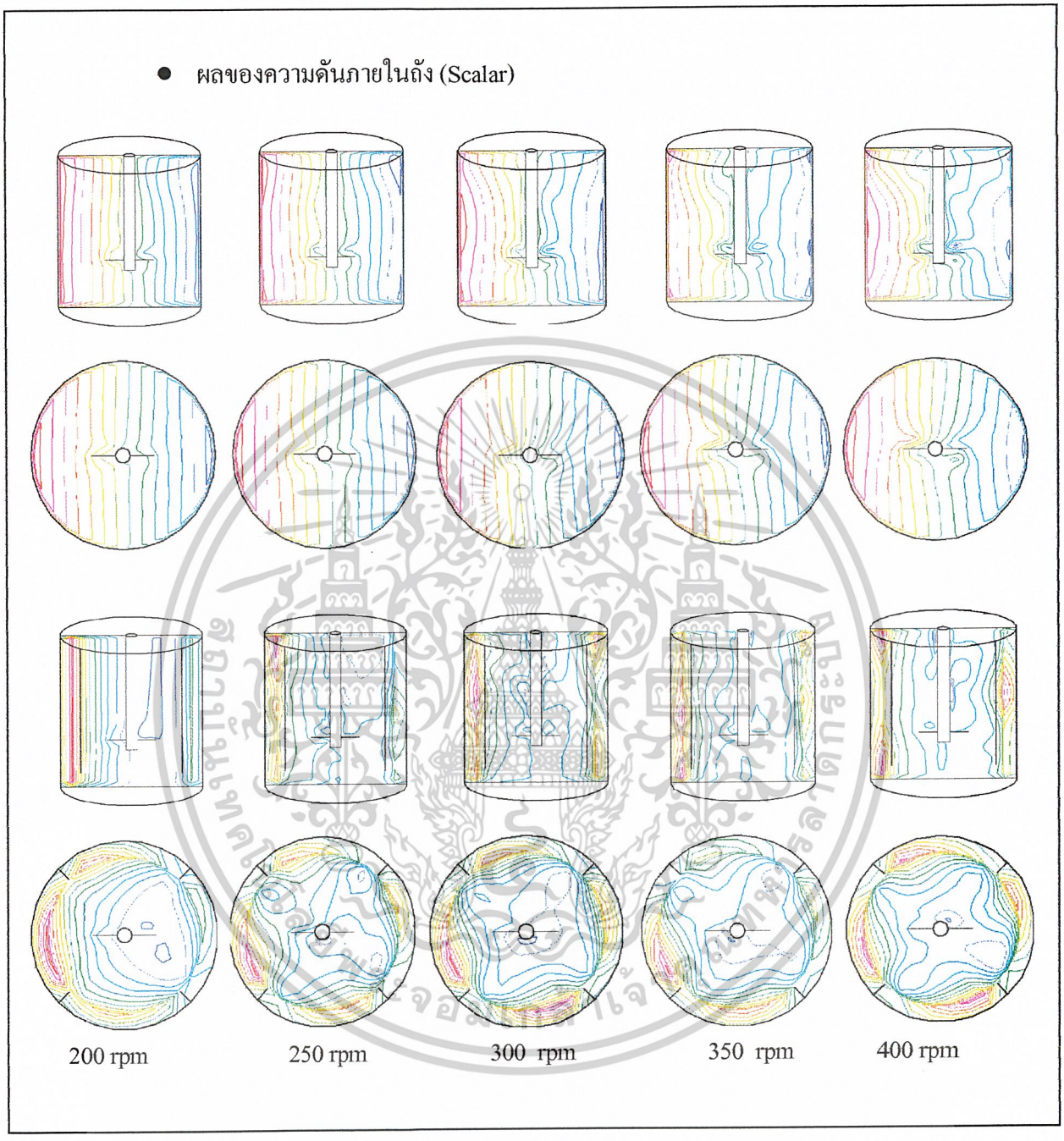
รูปที่ 4.5 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้น และติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



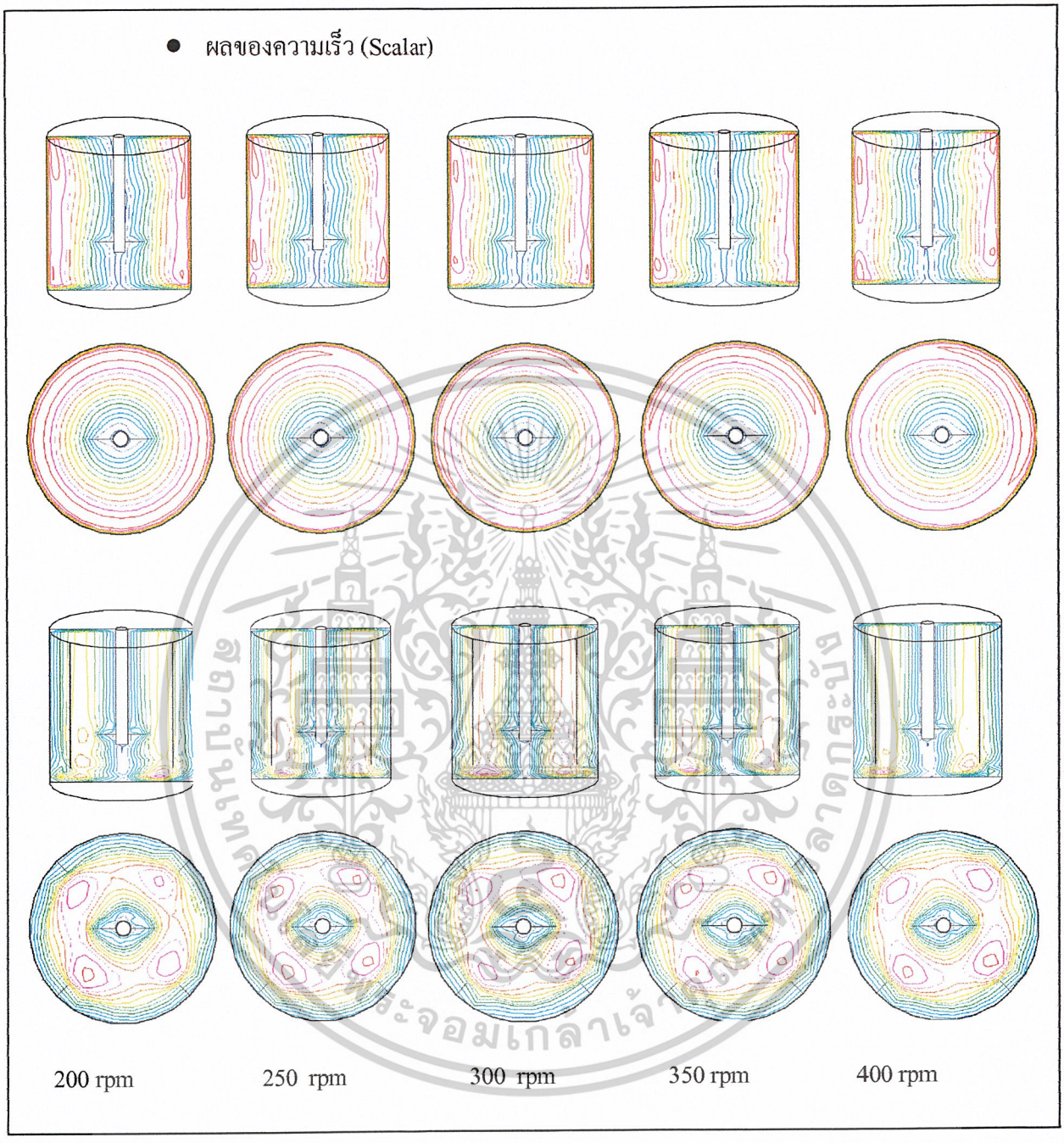
รูปที่ 4.6 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



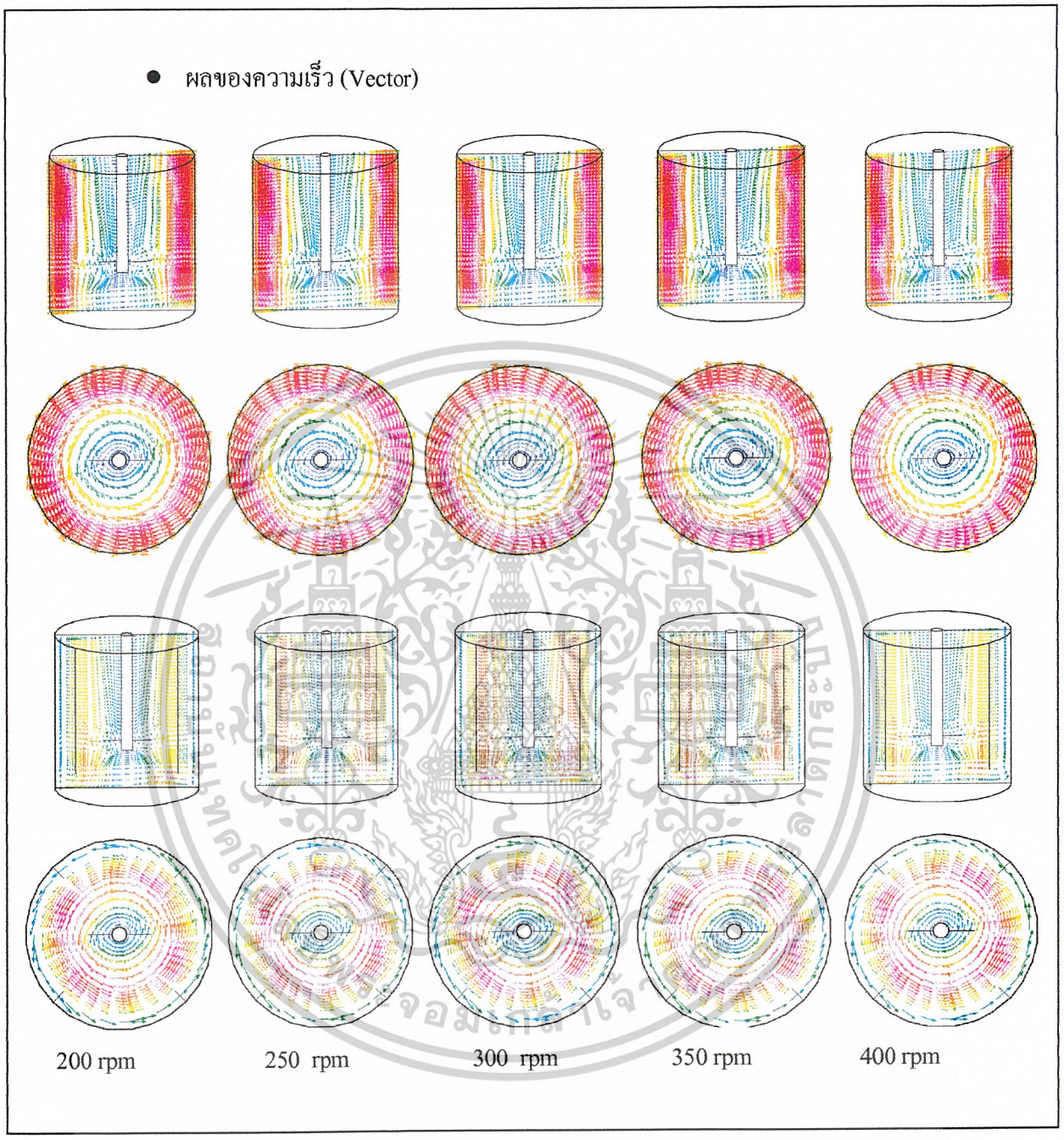
รูปที่ 4.7 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



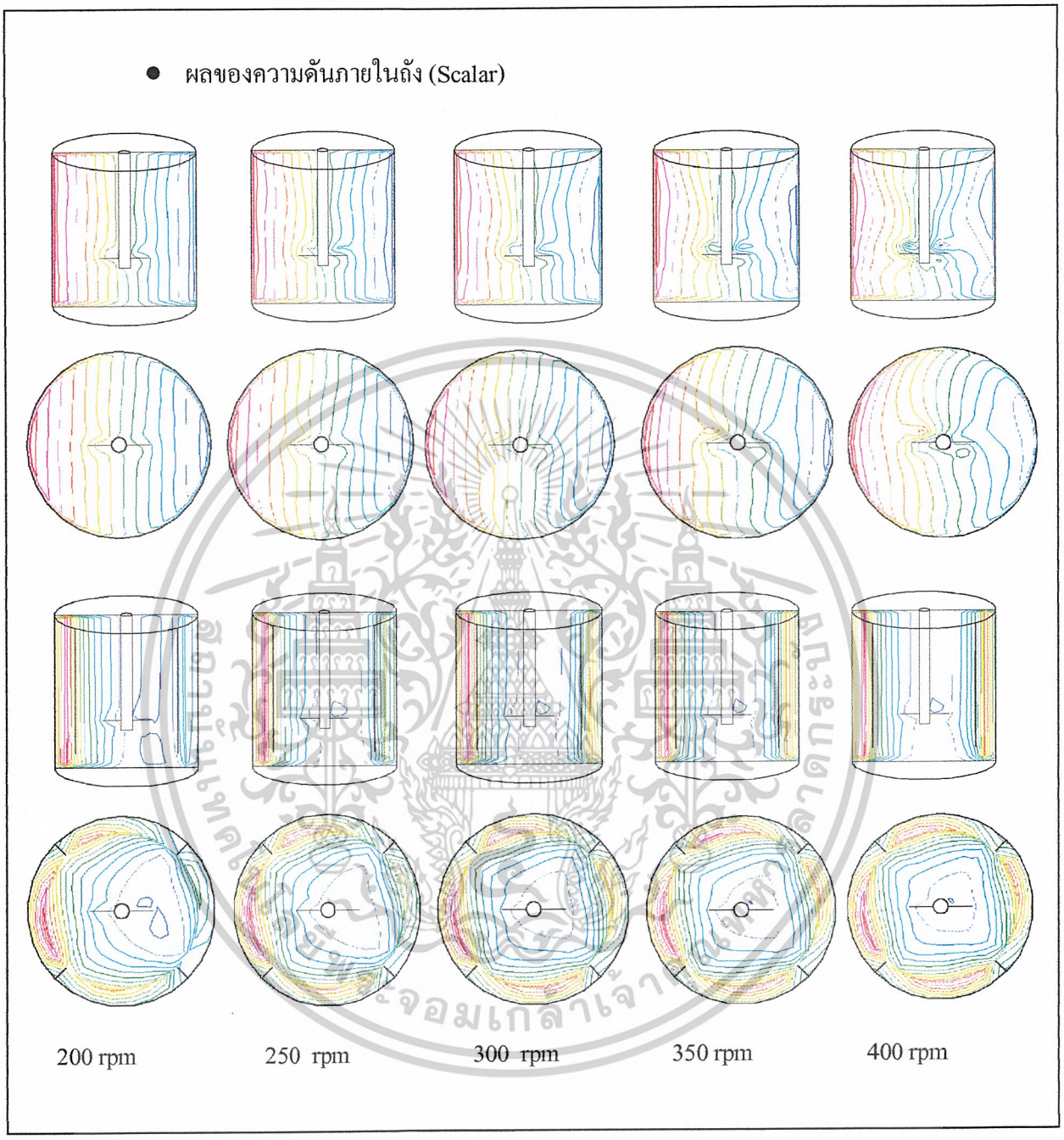
รูปที่ 4.8 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้ ครีม(CREAM)เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



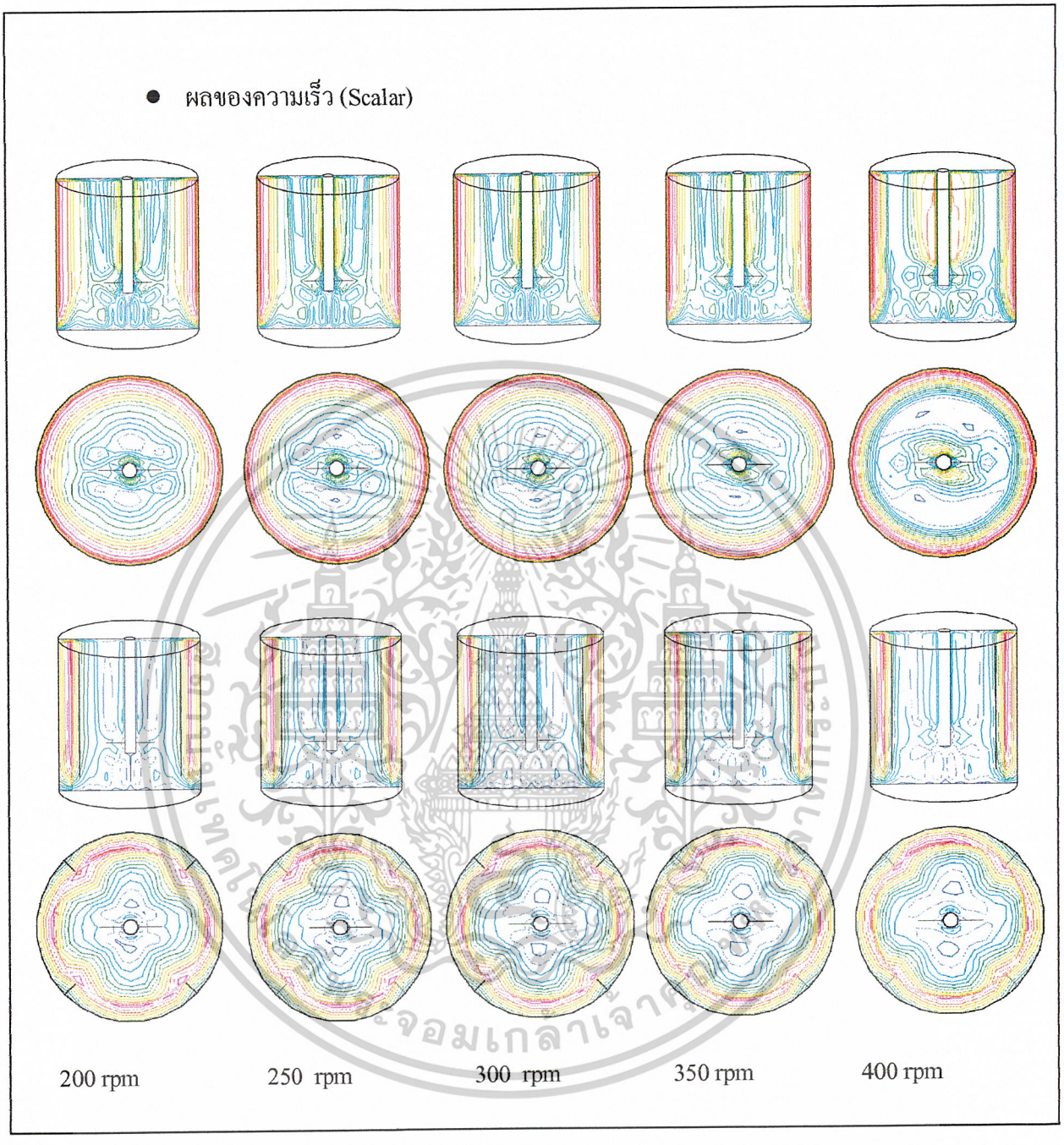
รูปที่ 4.9 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้ ครีม(CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



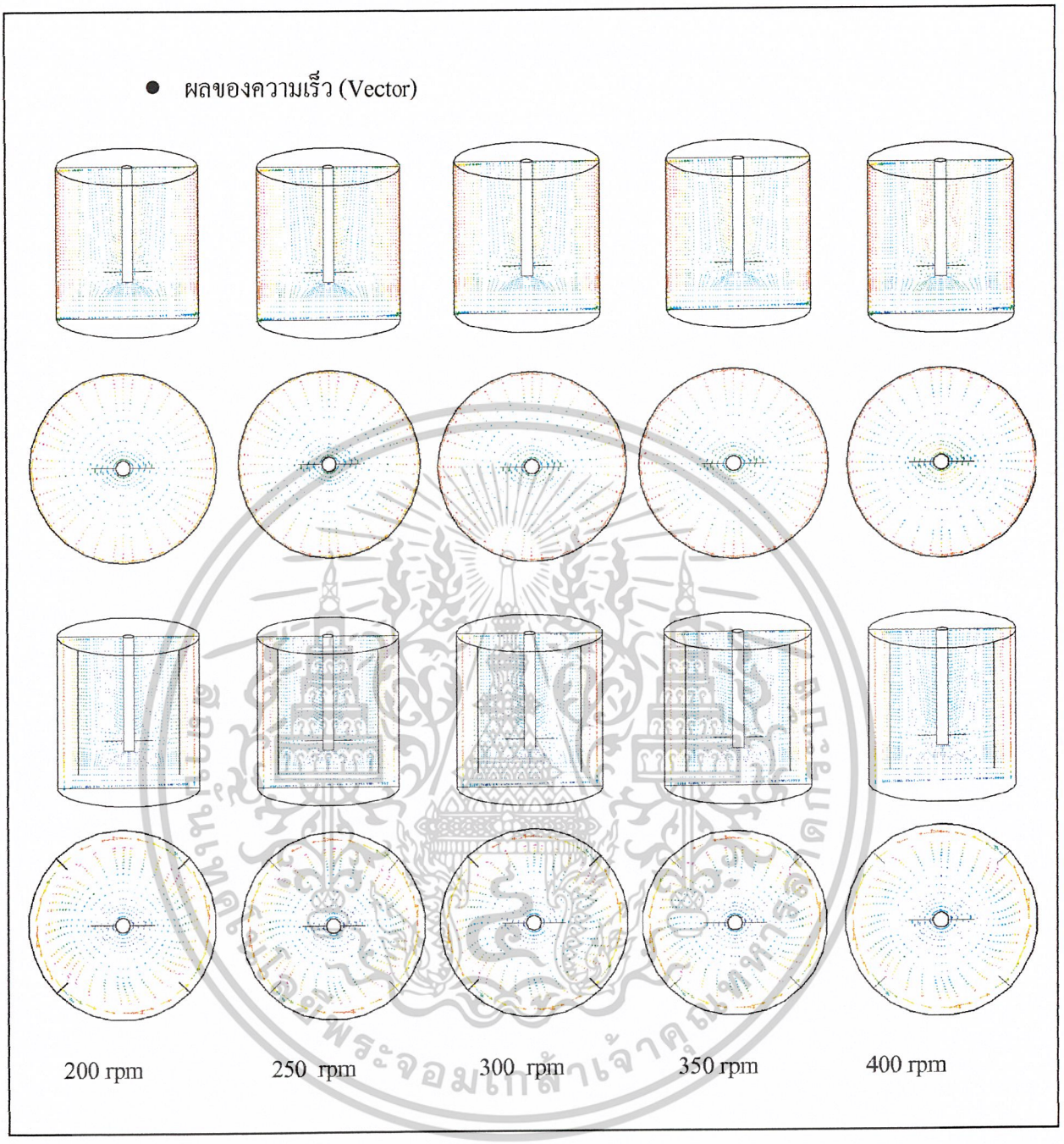
รูปที่ 4.10 แสดงผลของความดัน (Scalar) โดยใช้ ครีม(CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



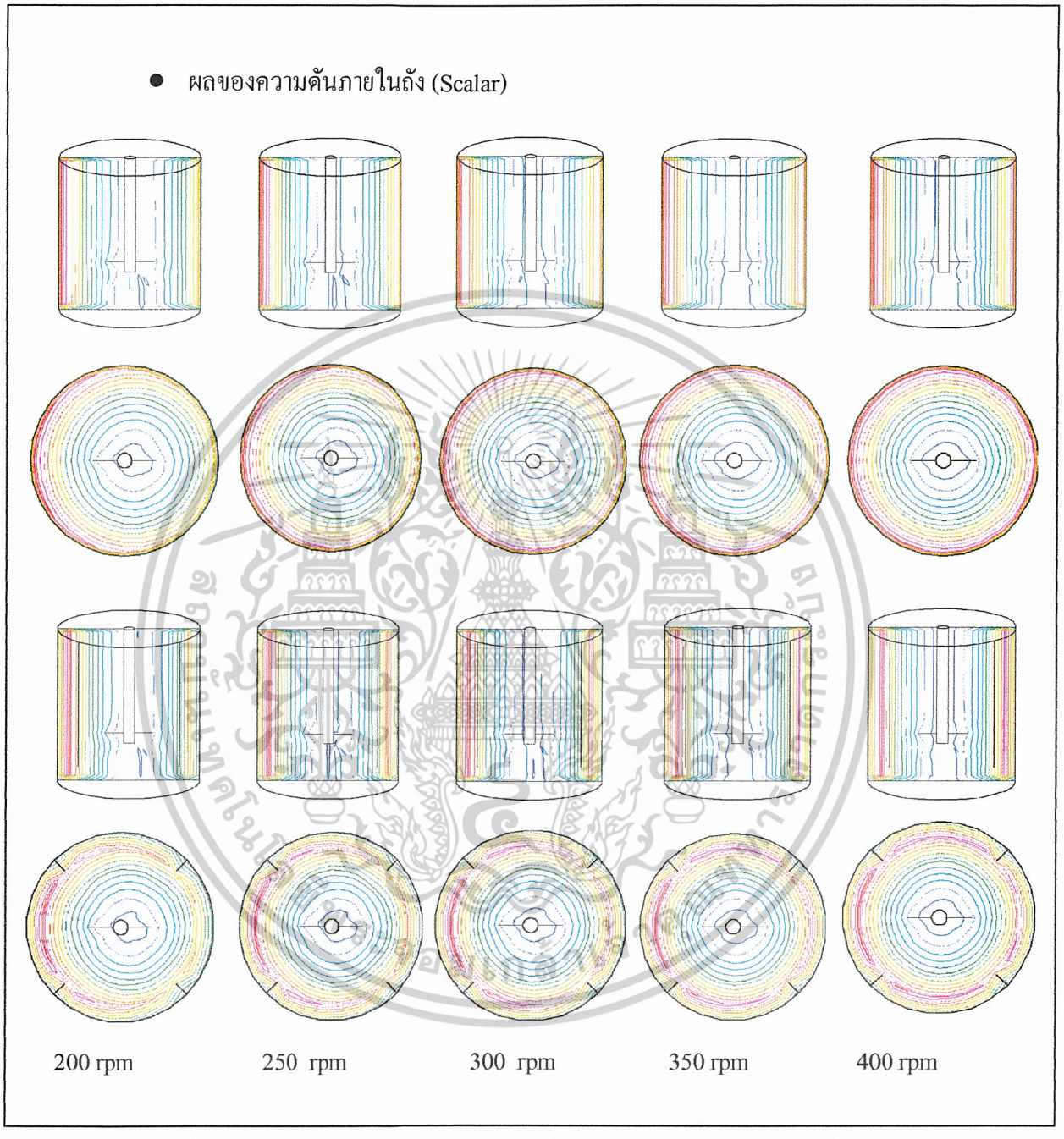
รูปที่ 4.11 แสดงผลของความเร็ว (Scalar) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น (KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



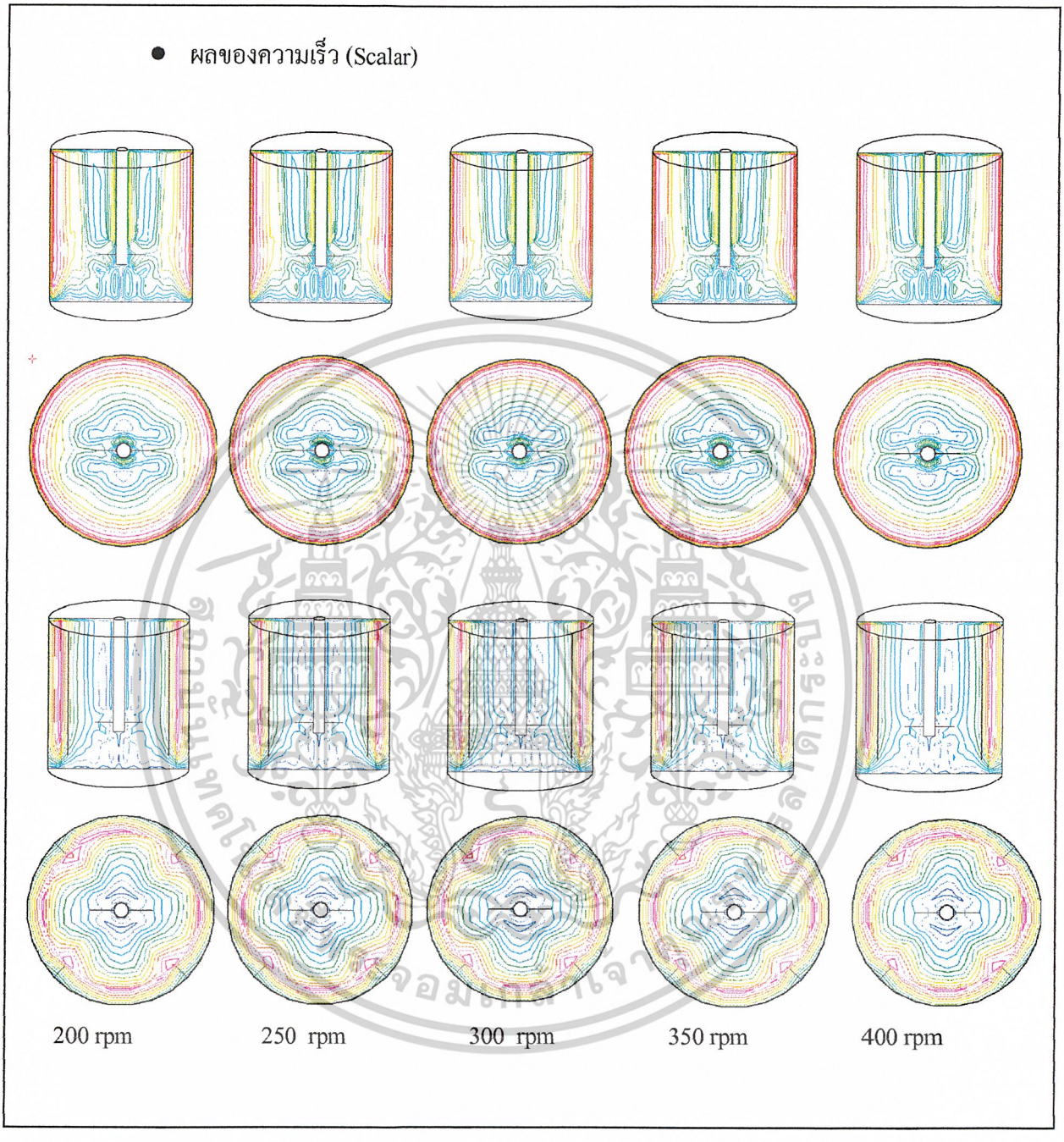
รูปที่ 4.12 แสดงผลของความเร็ว (Vector) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



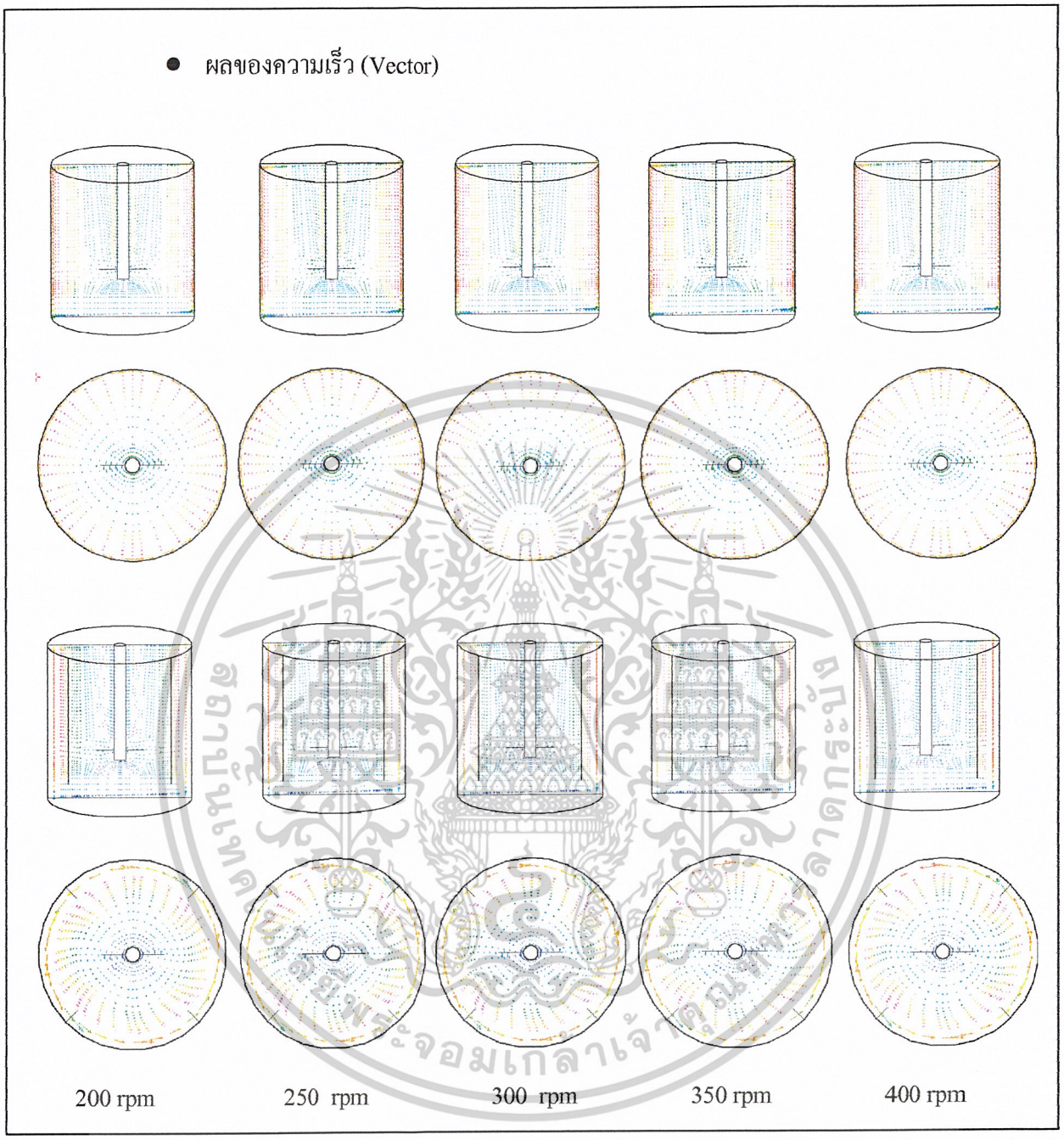
รูปที่ 4.13 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น (KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



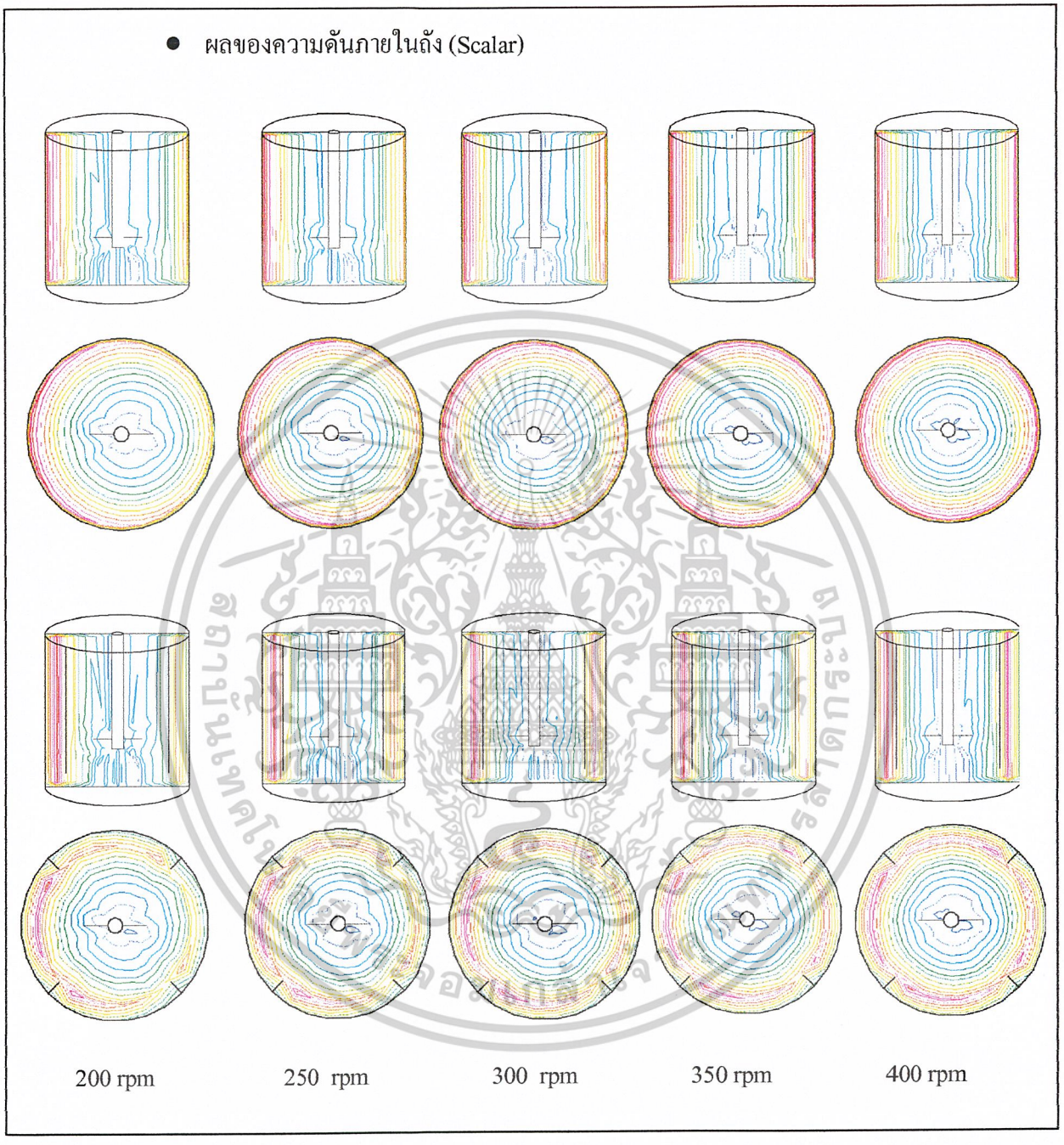
รูปที่ 4.14 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบด (PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Vector) โดยใช้ เนยถั่วบด (PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

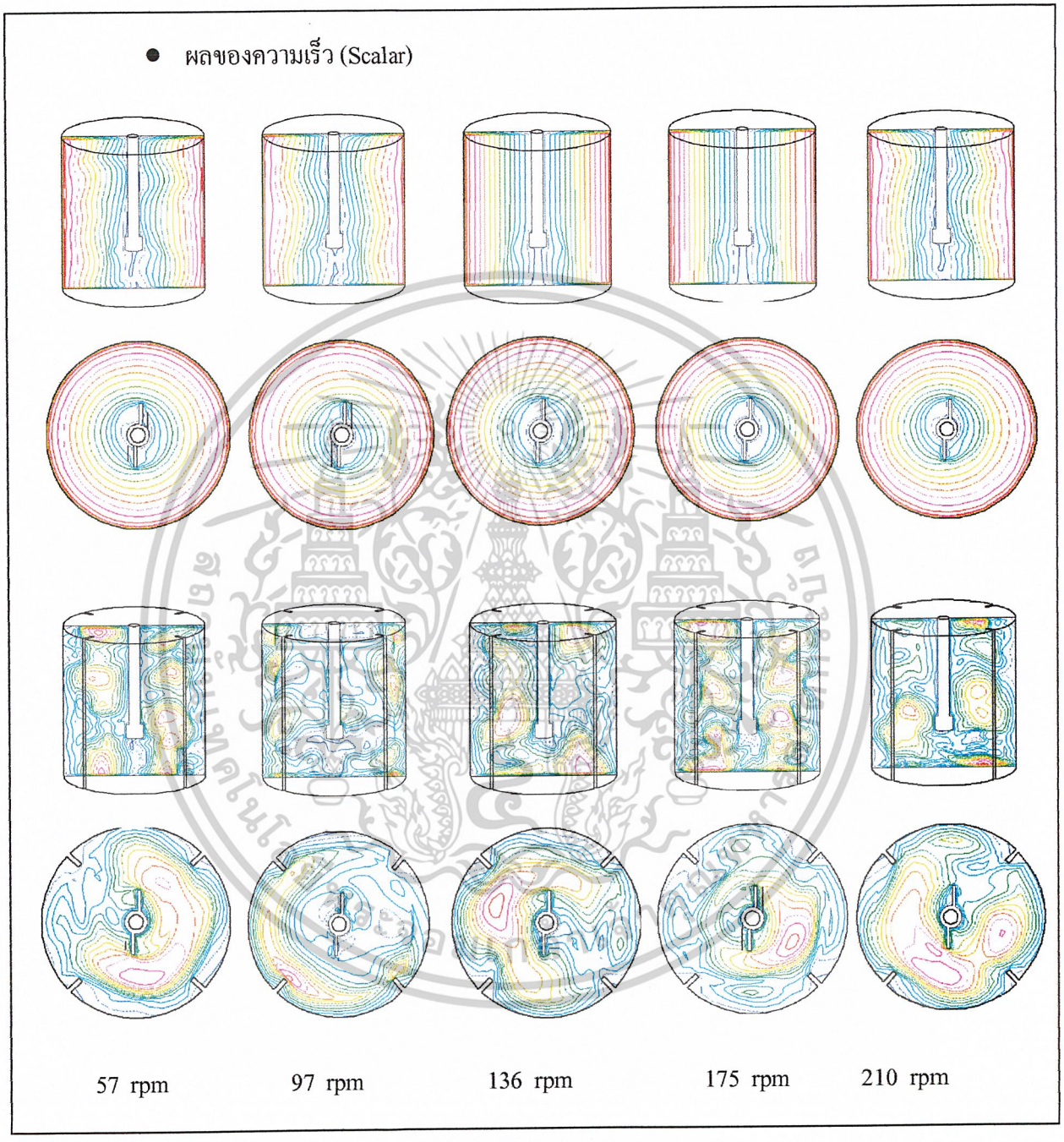
ผลจากแบบจำลอง พบว่าใบกวนแบบ Helical Blade นี้ ลักษณะของใบพัดจะพัดพาของเหลวตรงบริเวณที่ถูกใบกวนส่วนหนึ่งไปตามด้านข้างของถังกวน หรือตามแนวรัศมีของใบกวน อีกส่วนหนึ่งจะพัดขึ้นด้านบนและลงด้านล่างตามแนวแกนเพลาและเกิดการผสมกัน เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นจะทำให้การไหลของของเหลวเปลี่ยนแปลง คือเมื่อชนแผ่นกั้นของเหลวจะไหลขนานไปตามแผ่นกั้นทำให้เส้นการไหลของของเหลวมีความปั่นป่วนมากขึ้น

ของเหลวบริเวณก้นถังและใต้ใบกวนมีความเร็วน้อยที่สุดเนื่องจากการจุดนี้ได้รับอิทธิพลจากการกวนการผสมกันน้อยที่สุดจึงเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones) เมื่อเพิ่มความเร็วรอบของใบกวนมากขึ้นจะทำให้ของเหลวบริเวณก้นถัง และใต้ใบกวนนี้เกิดการผสมกันมากขึ้น Dead Zones จะน้อยลง เมื่อติดแผ่นกั้นบริเวณด้านข้างของถังกวนซึ่งแผ่นกั้นนั้นไปปิดกั้นการไหลของของเหลวจะทำให้ของเหลวภายในถังเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น และทำให้มีการผสมกันของของเหลวภายในถังมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ของเหลวบริเวณก้นถังและใต้ใบกวนนั้นเกิดการผสมกันมากขึ้นด้วยและ Dead Zones จะน้อยลง โดยของเหลวภายในถังกวนที่ติดแผ่นกั้นจะมีความเร็วลดลงเมื่อเทียบกับแบบไม่ติดแผ่นกั้นที่ความเร็วรอบเดียวกัน และ ความดันของของเหลวภายในถังจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเดียวกันของเหลวที่มีความเร็วสูงที่สุดคือ น้ำ CREAM น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) และ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) ตามลำดับ และความเร็วของของเหลวจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณข้างถังกวน ซึ่งความเร็วของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น เมื่อติดแผ่นกั้นบริเวณด้านข้างของถังกวน ความเร็วของของเหลวจะมีค่าสูงสุดอยู่ระหว่างปลายใบกวนกับขอบแผ่นกั้น ความเร็วของของเหลวบริเวณจุด Dead Zones ที่น้อยที่สุดคือ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) CREAM และ น้ำ ตามลำดับ ความดันภายในถังกวนของของเหลวที่มีค่ามากที่สุดคือ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) CREAM และ น้ำ ตามลำดับ ความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นและเมื่อติดแผ่นกั้น

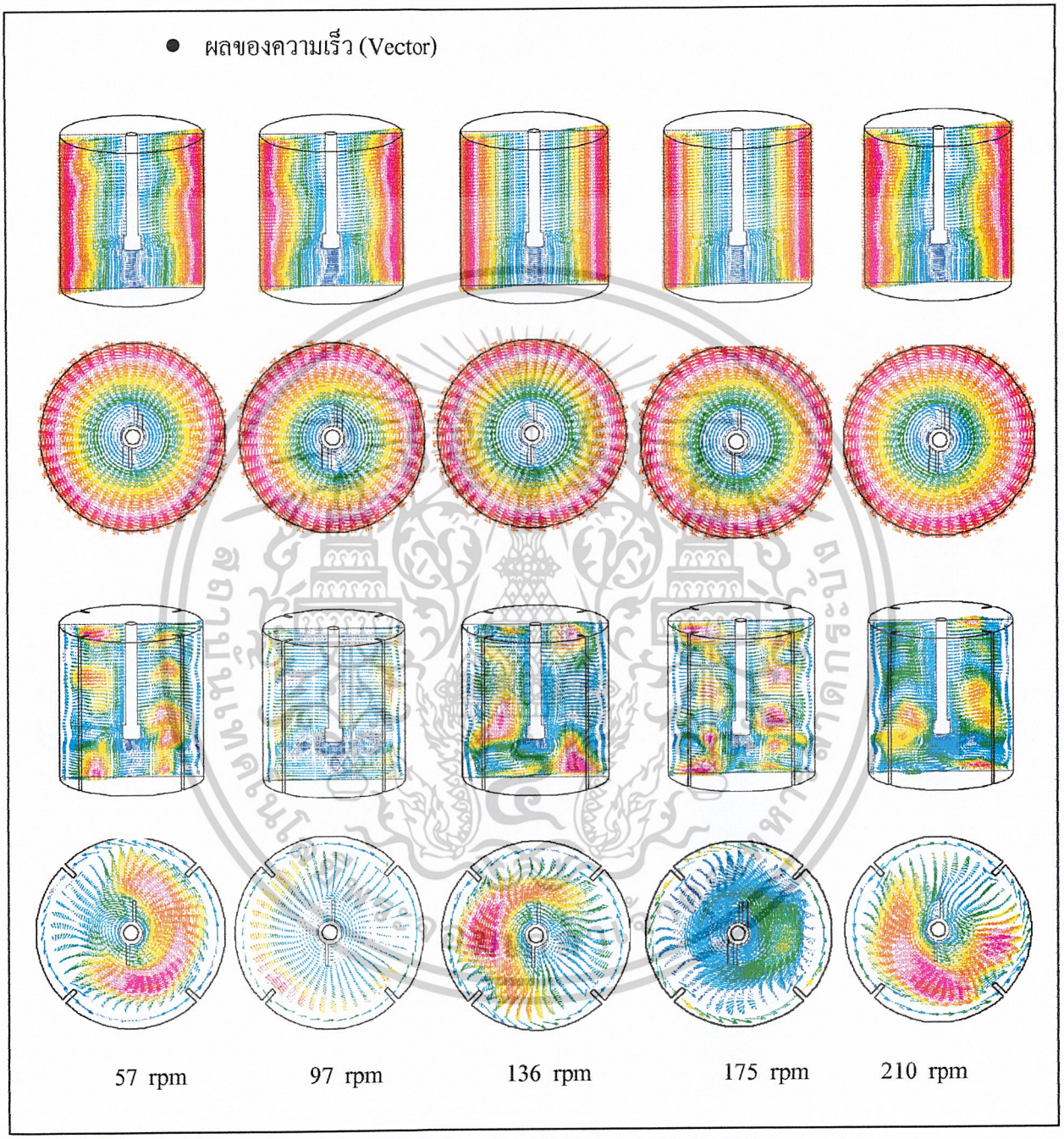
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของแบบจำลองโดยใช้ใบกวนแบบ Incline Blade



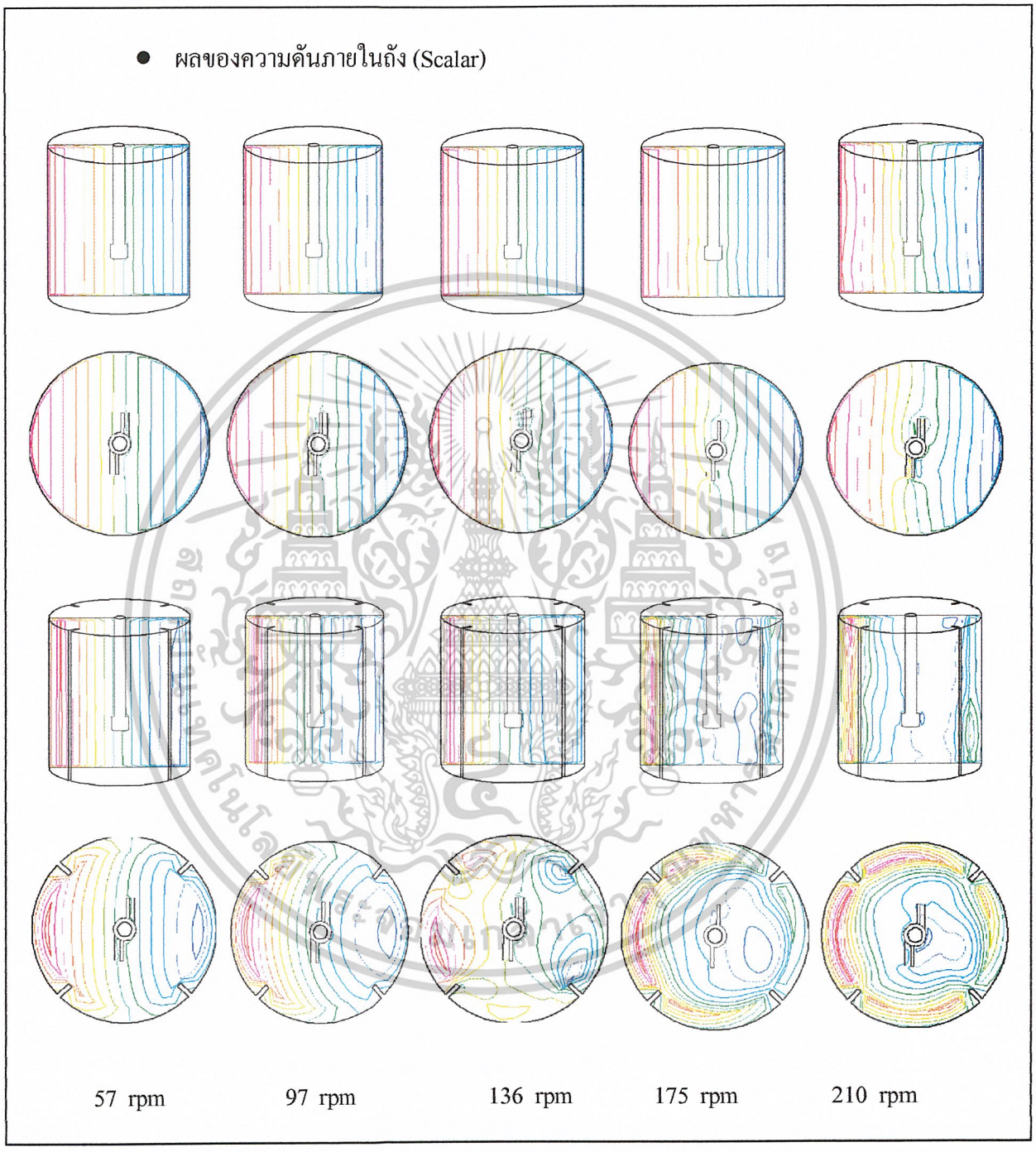
รูปที่ 4.17 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Scalar) โดยใช้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



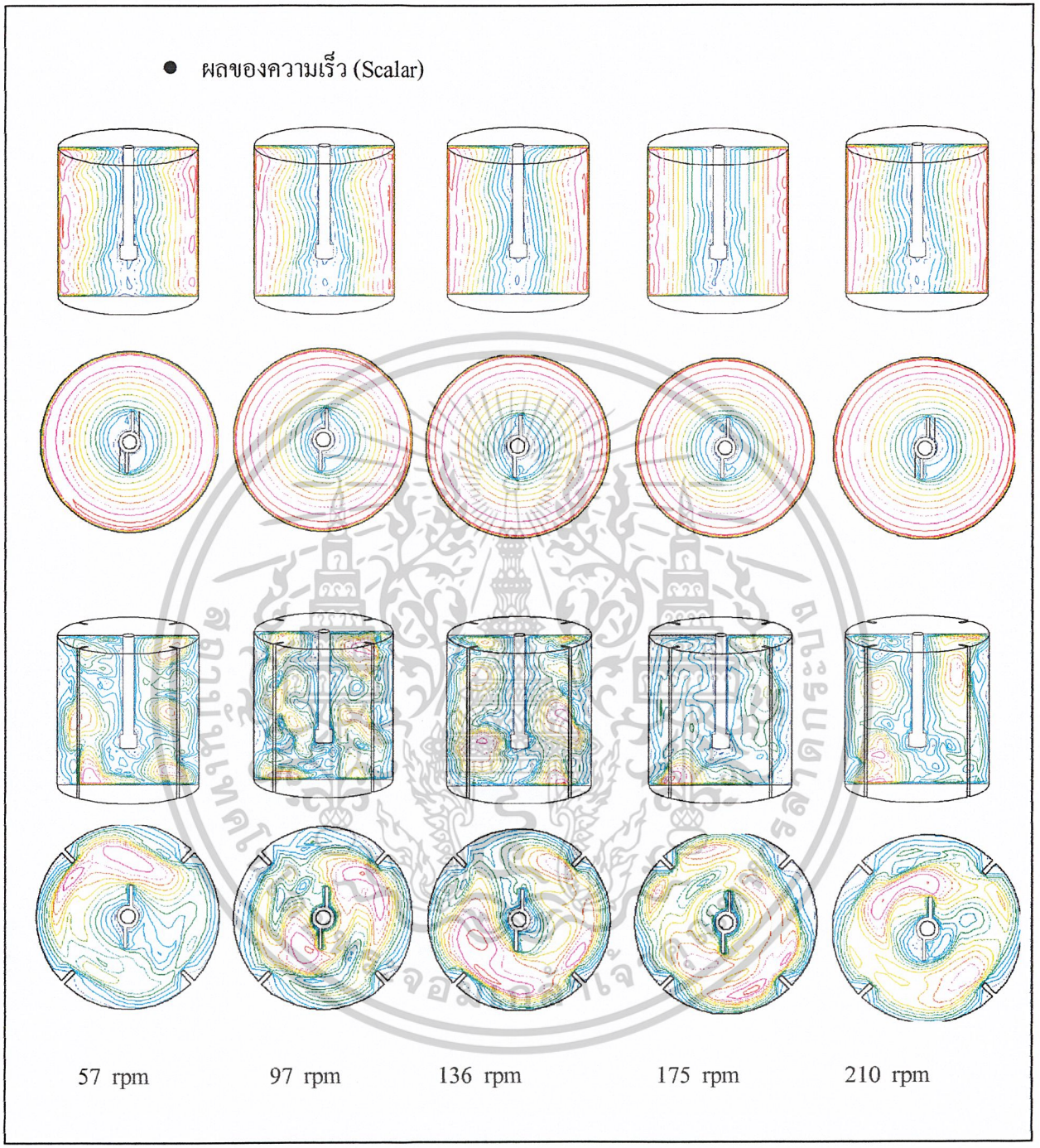
รูปที่ 4.18 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Vector) โดยใช้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



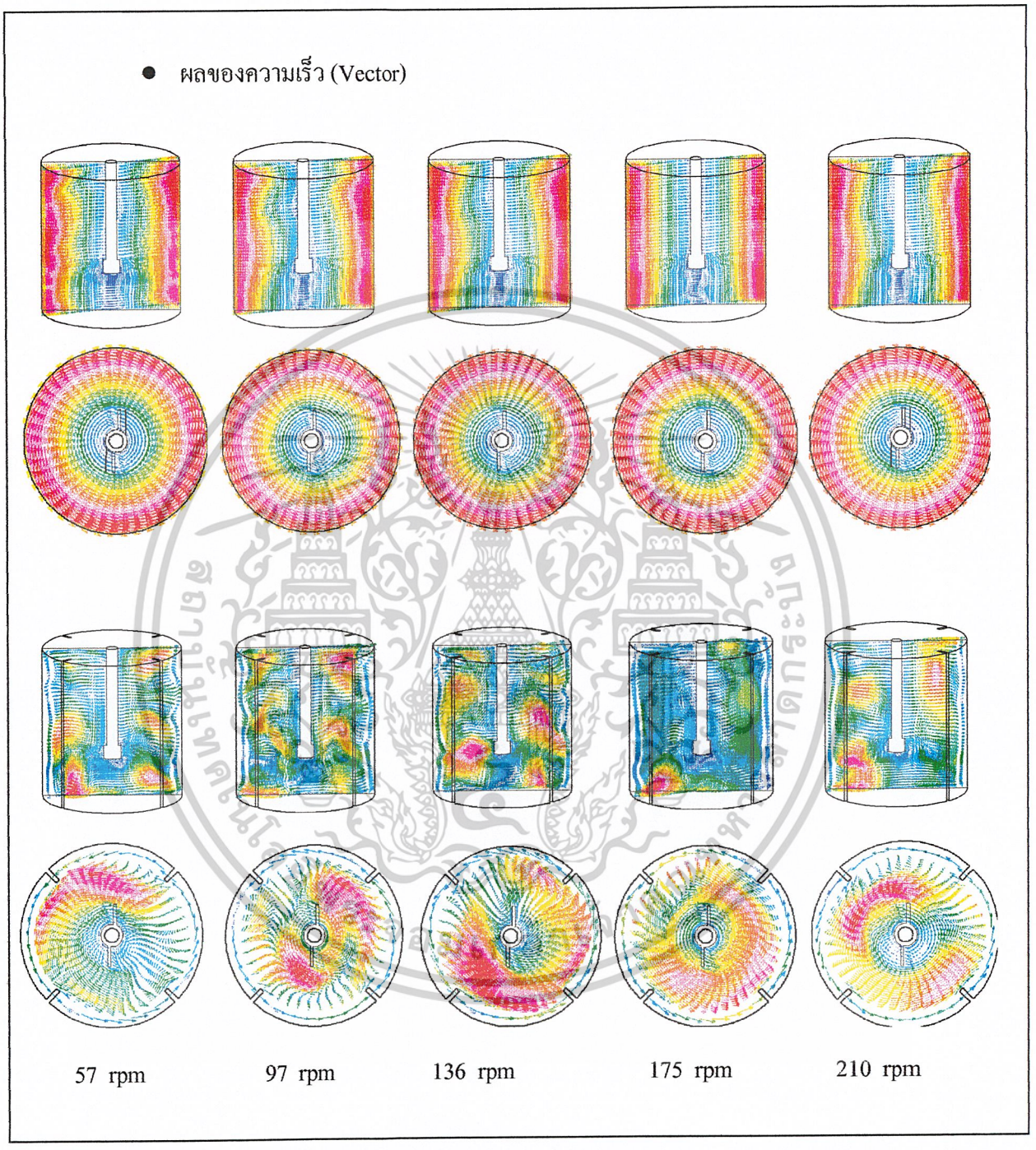
รูปที่ 4.19 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



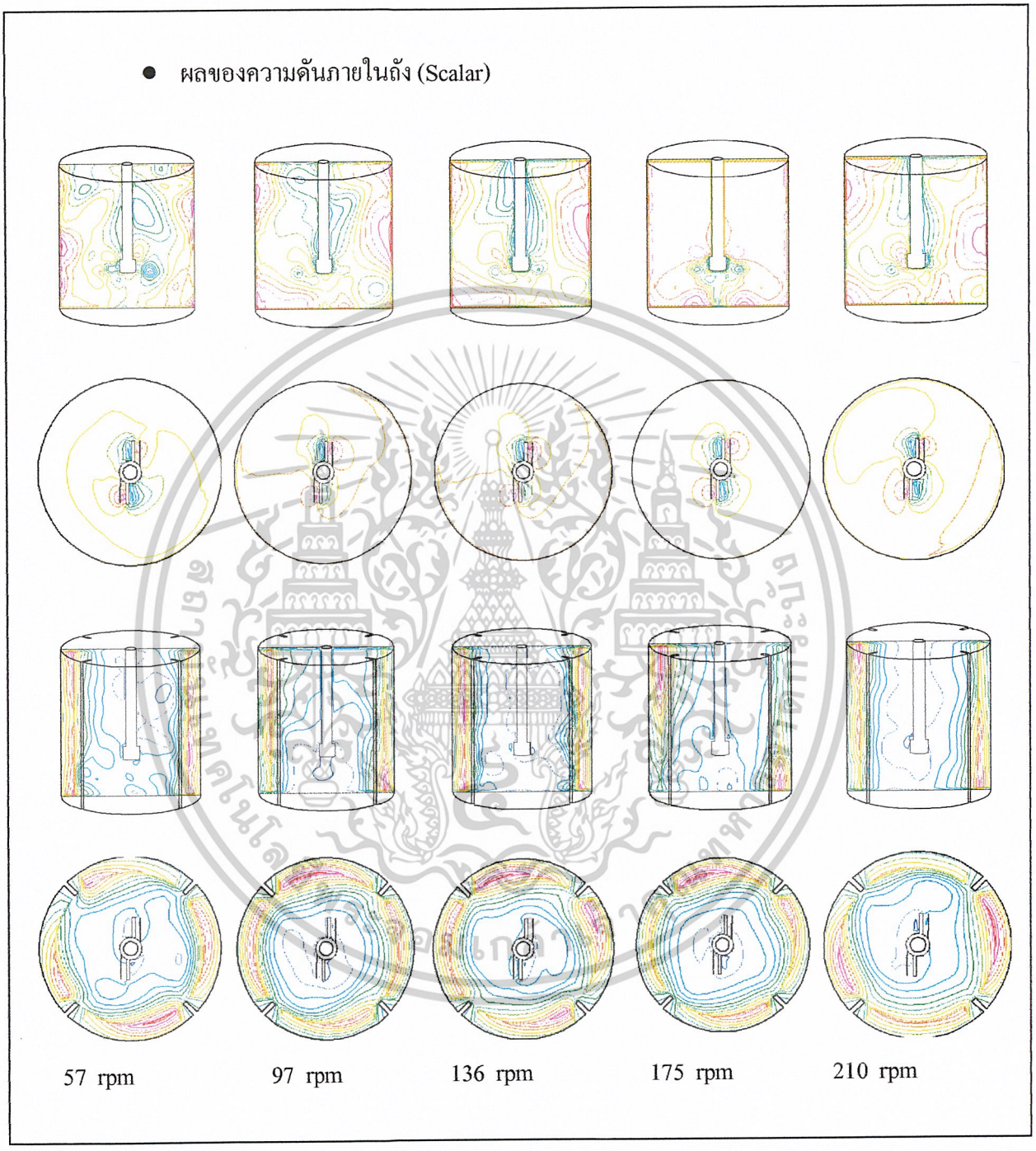
รูปที่ 4.20 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Scalar) โดยใช้ ครีม(CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



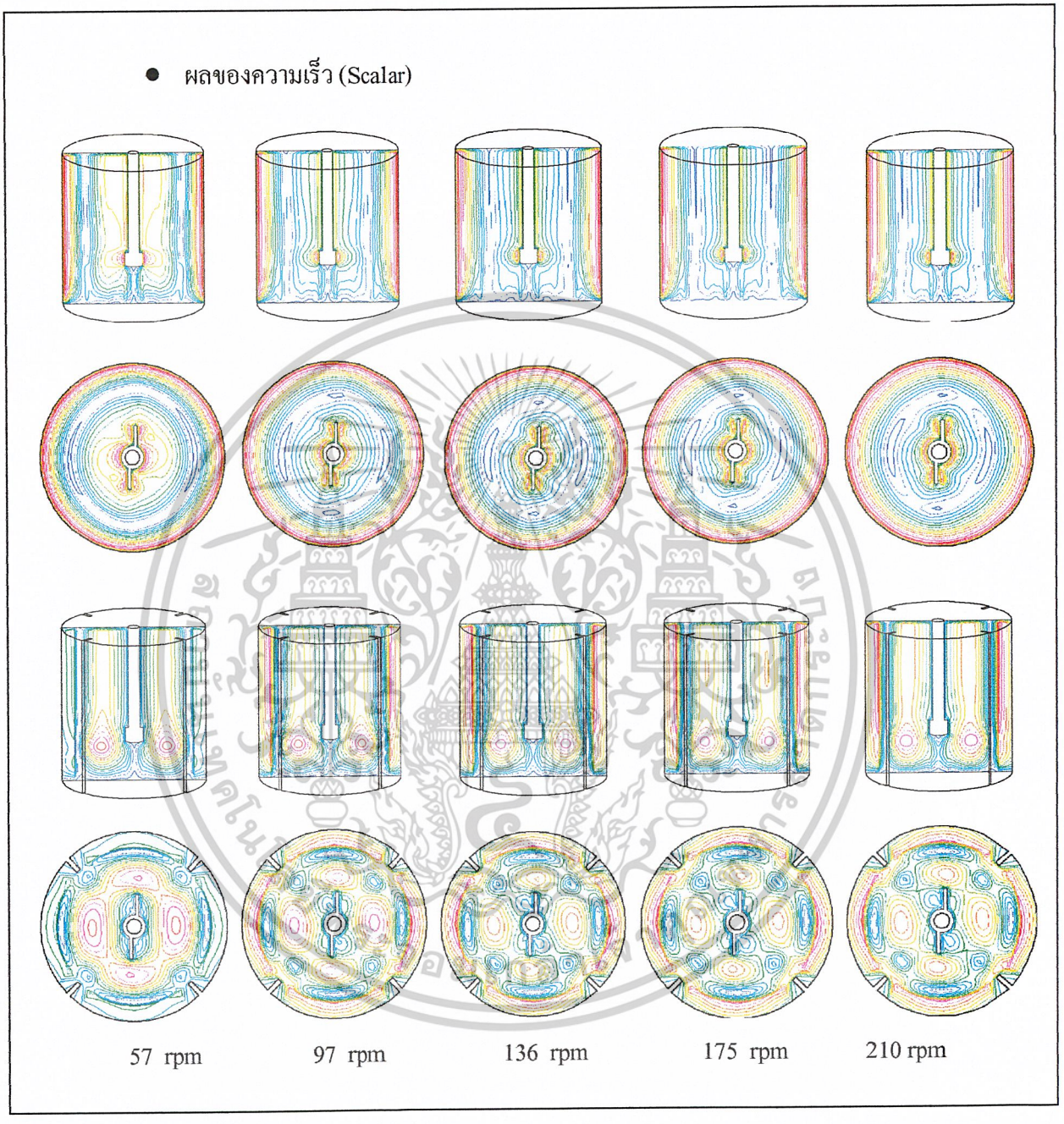
รูปที่ 4.21 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Vector) โดยใช้ ครีม(CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



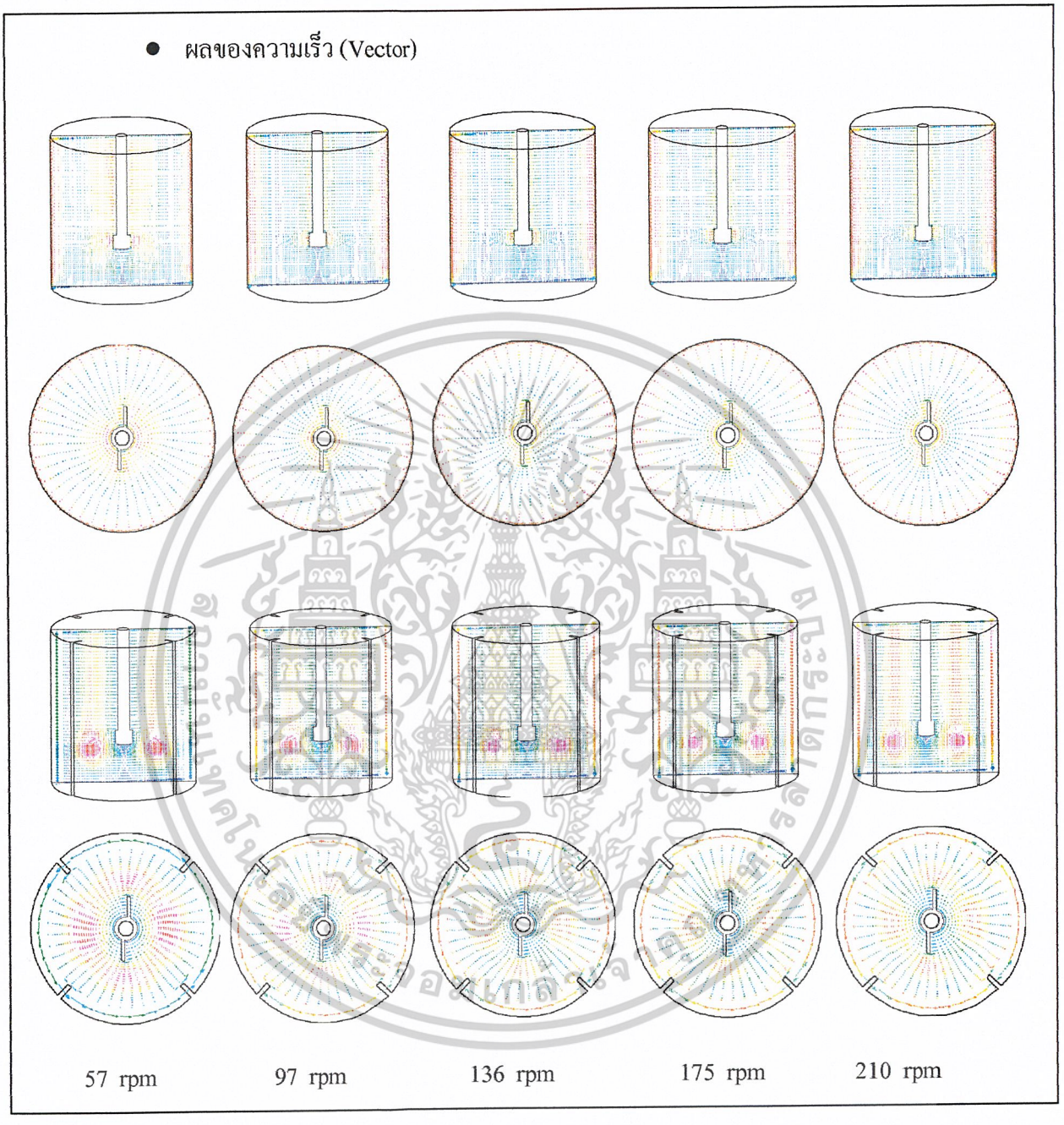
รูปที่ 4.22 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ ครีม(CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



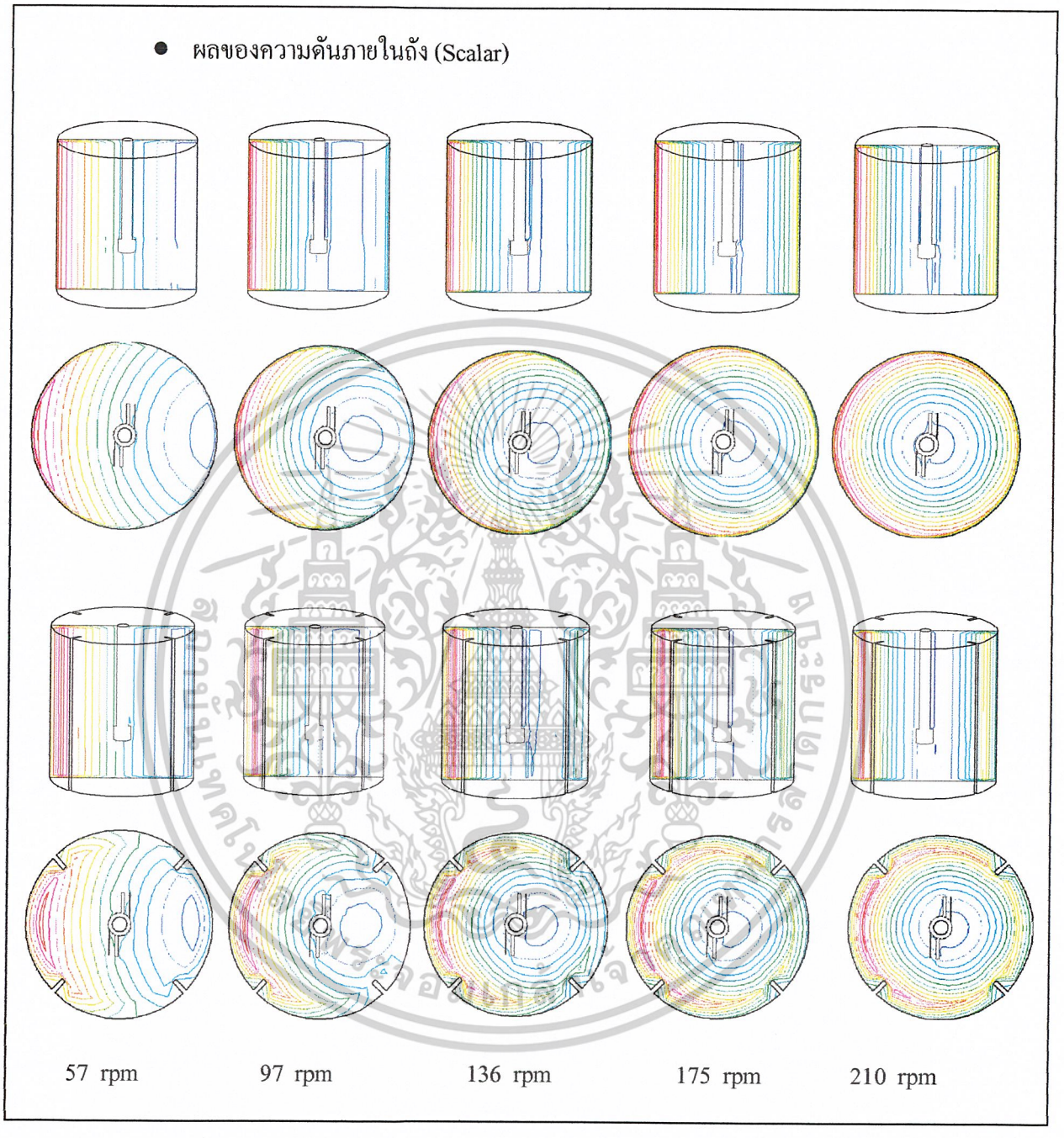
รูปที่ 4.23 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Scalar) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



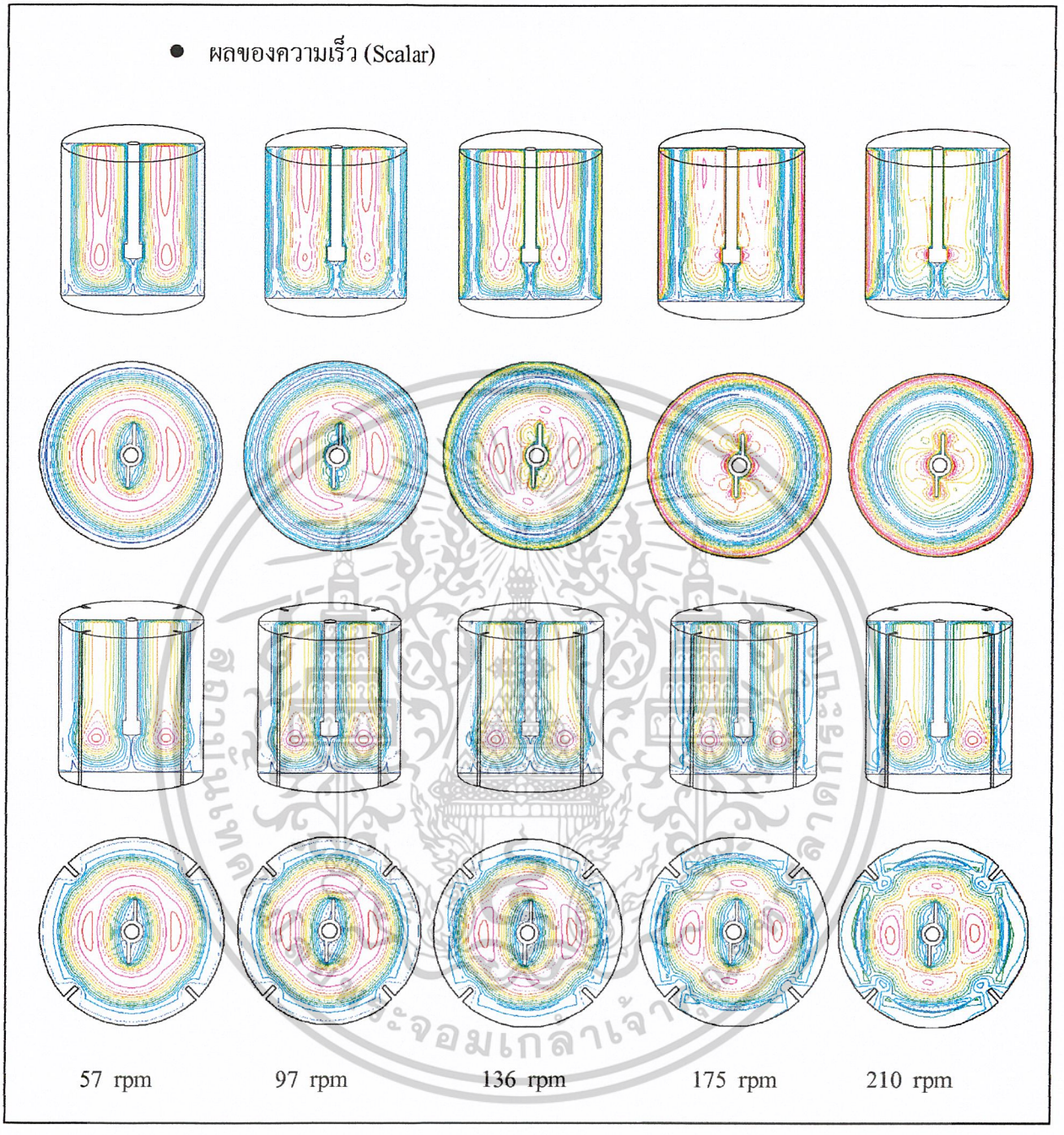
รูปที่ 4.24 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Vector) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



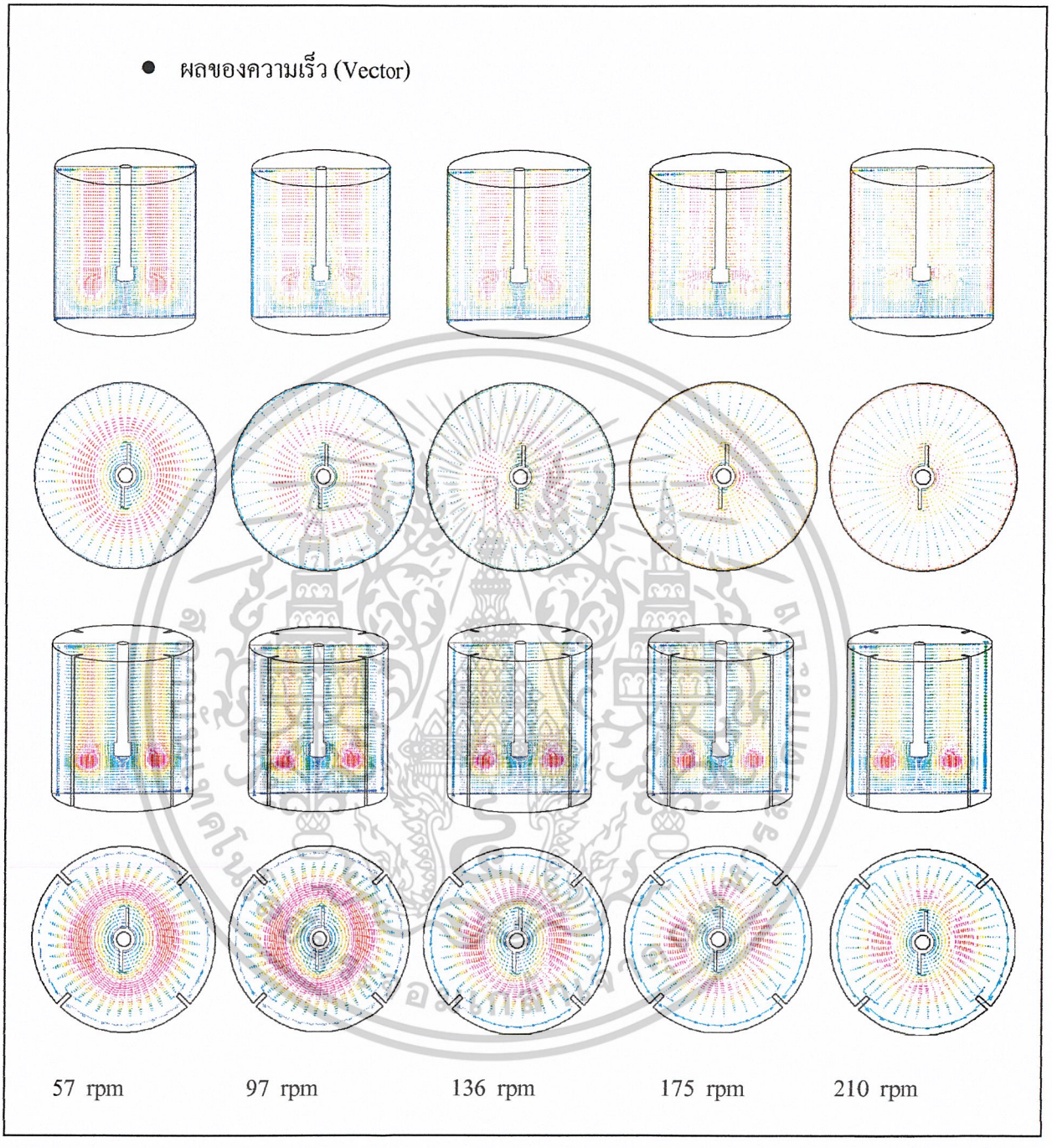
รูปที่ 4.25 แสดงผลของความดันภายในถัง(Scalar) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



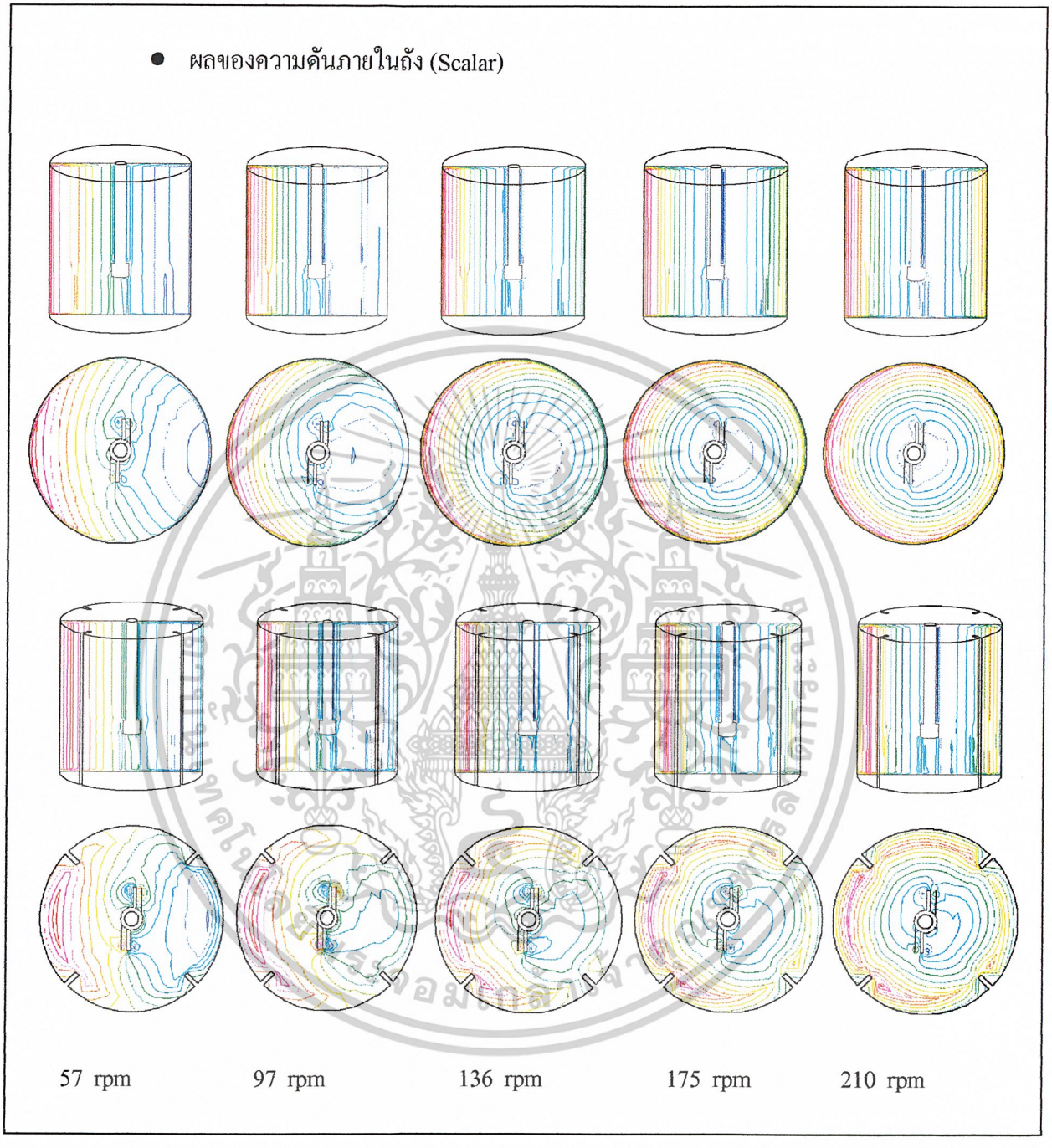
รูปที่ 4.26 แสดงผลของความเร็วภายในถัง(Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงผลของความเร็วภายในถัง(Vector) โดยใช้ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงผลของความดันภายในถัง(Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

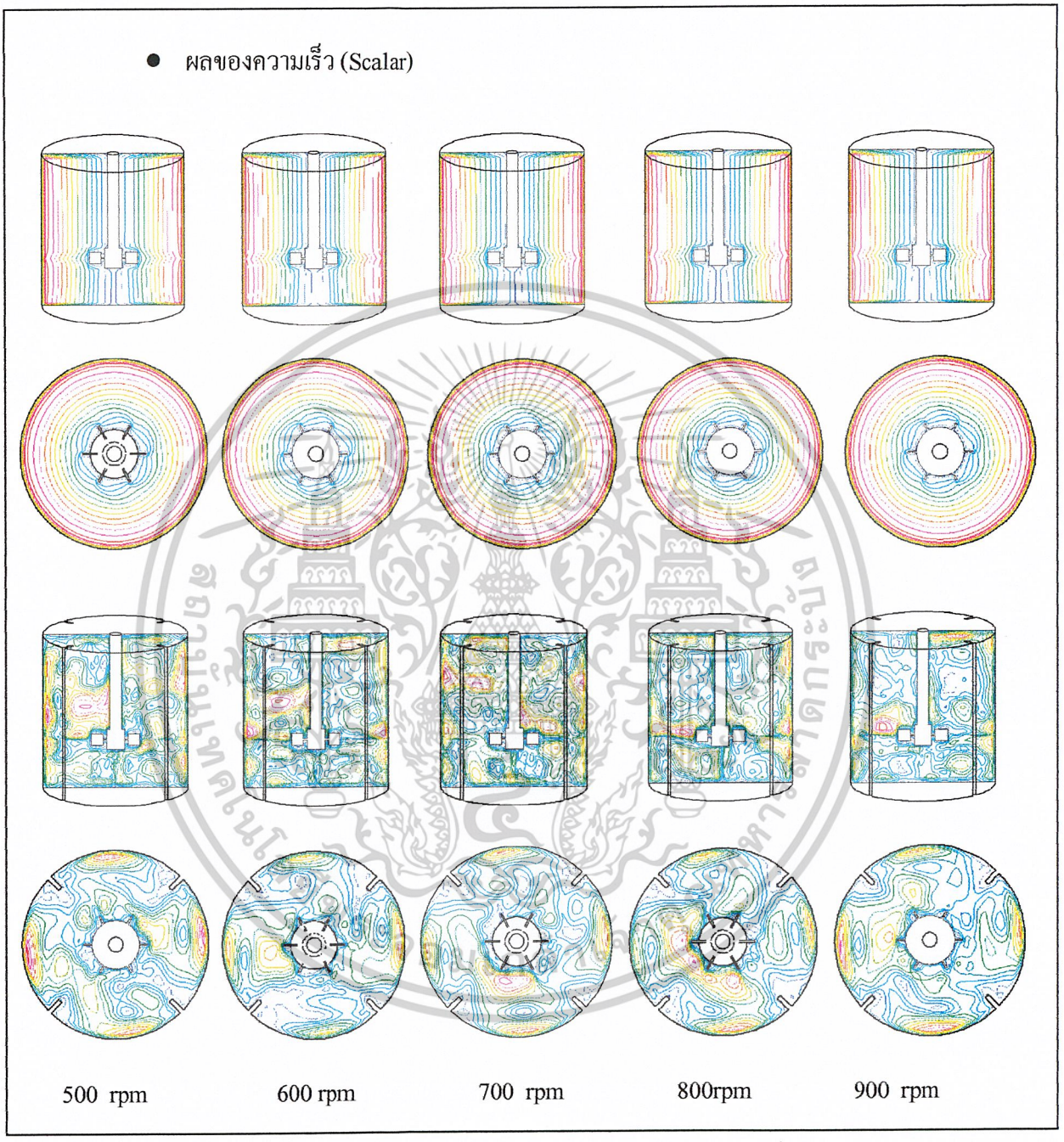
ผลจากแบบจำลอง พบว่าใบกวน Incline Blade นี้ลักษณะของใบพัดจะพัดพาของเหลวออกทางด้านข้างถังกวนตามแนวเอียงของใบกวน พุ่งลงด้านล่างของถังกวนและวนขึ้นตรงบริเวณด้านข้างของถังกวน เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นจะทำให้เส้นการไหลของของเหลวปั่นป่วนมากขึ้น โดยเมื่อของเหลวไหลปะทะกับแผ่นกั้นของเหลวจะไหลในแนวขึ้นและลงขนานกับแผ่นกั้น

เนื่องจากความเร็วรอบของใบกวนชนิดนี้ใช้ที่ความเร็วรอบต่ำจึงทำให้ของเหลวบริเวณก้นถัง และใต้ใบกวนมีความเร็วน้อยมากทำให้เกิดจุดไม่มีการเคลื่อนที่ของของเหลว (Dead Zones) เป็นบริเวณกว้าง เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นความเร็วของของเหลวบริเวณใต้ใบกวนก็เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้มีการกวนและการผสมที่ดีขึ้น Dead Zones ลดลง เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นซึ่งแผ่นกั้นนั้นไปปิดกั้นการไหลของของเหลวจะทำให้ของเหลวภายในถังเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้น ทำให้บริเวณก้นถังและใต้ใบกวนมีการไหลของของเหลวมากขึ้นด้วย และความเร็วของของเหลวลดลงเมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเดียวกัน ความดันของของเหลวภายในถังจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นหรือติดแผ่นกั้น

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเดียวกันของเหลวที่มีความเร็วสูงที่สุดคือ น้ำ ครีม (CREAM) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) และเนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) ตามลำดับ และความเร็วของของเหลวจะมีค่าสูงสุดที่บริเวณข้างถังกวนและบริเวณปลายใบกวน แต่เมื่อติดแผ่นกั้นความเร็วของของเหลวที่สูงที่สุดจะอยู่ระหว่างปลายใบกวนและปลายแผ่นกั้น ซึ่งความเร็วของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความเร็วของของเหลวบริเวณจุด Dead Zones ที่น้อยที่สุด คือ เนยถั่วบด (PEANUT BUTTER) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) ครีม(CREAM) และ น้ำ ตามลำดับ ความดันภายในถังกวนของของเหลวที่มีค่ามากที่สุดคือ เนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) ครีม(CREAM) และ น้ำ ตามลำดับ ความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นหรือติดแผ่นกั้น

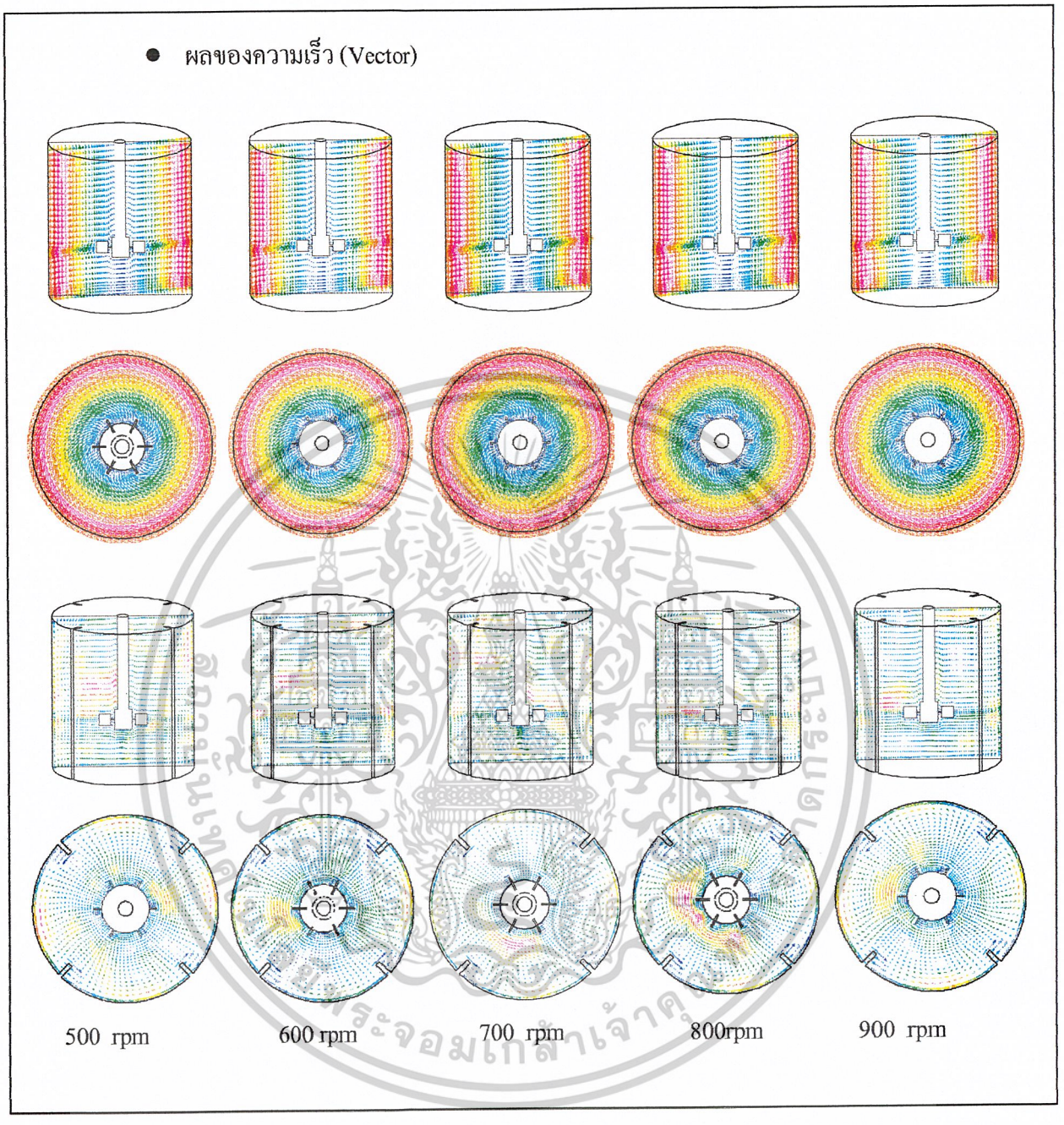
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลของแบบจำลองโดยใช้ใบกวนแบบ Turbine Blade



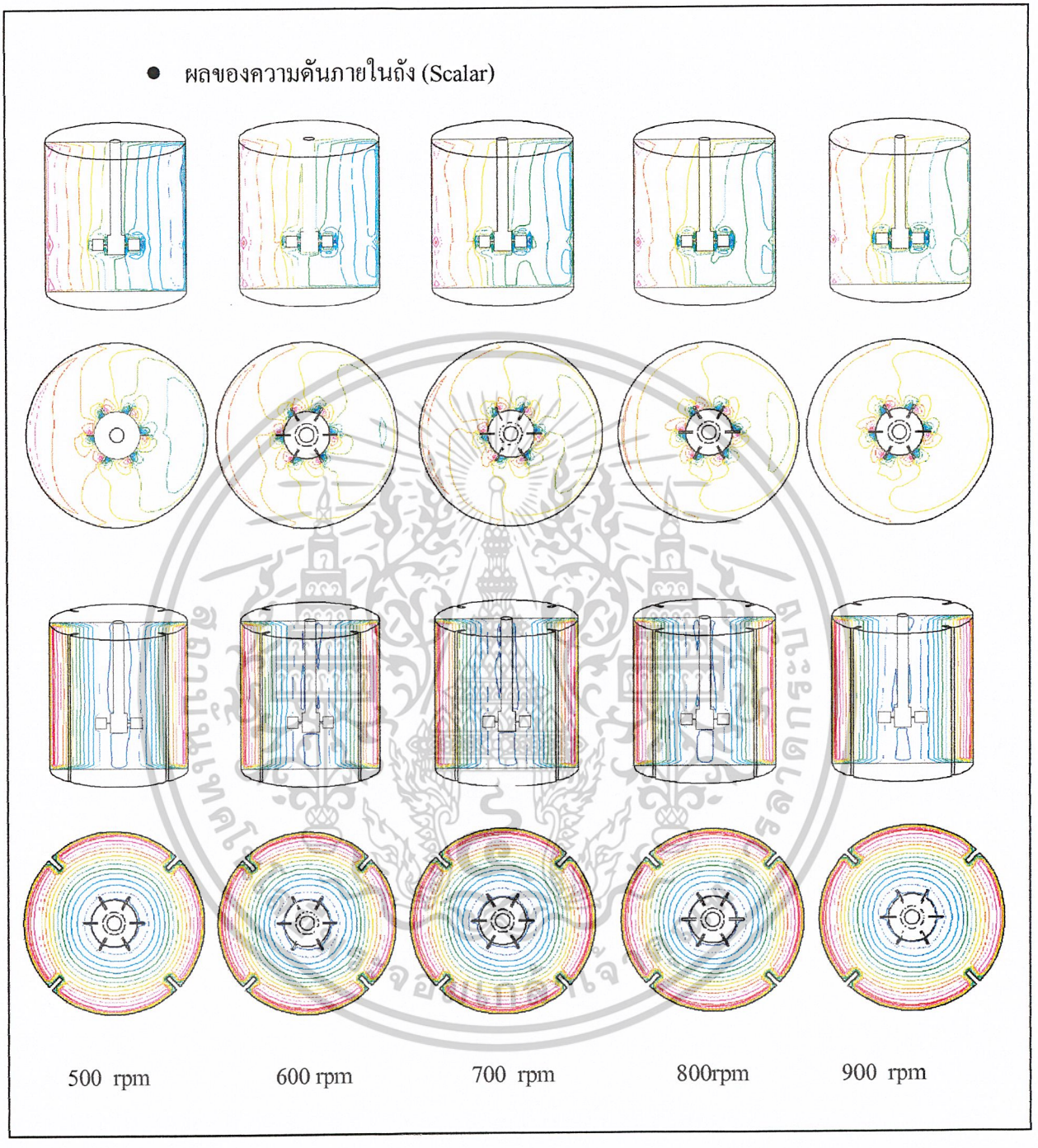
รูปที่ 4.29 แสดงผลของความเร็วภายในถัง(Scalar) โดยใช้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



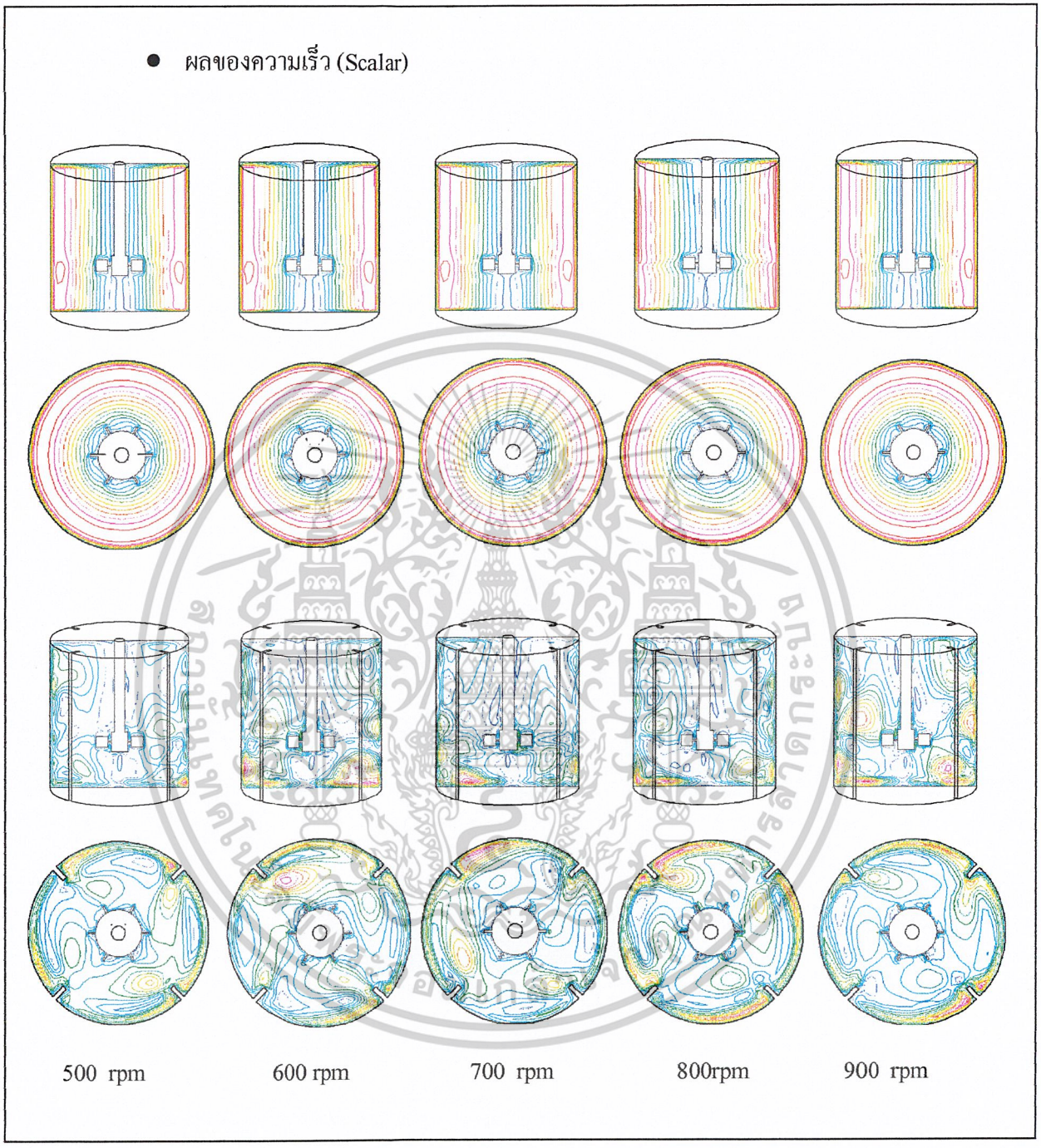
รูปที่ 4.30 แสดงผลของความเร็วภายในถัง(Vector) โดยใช้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



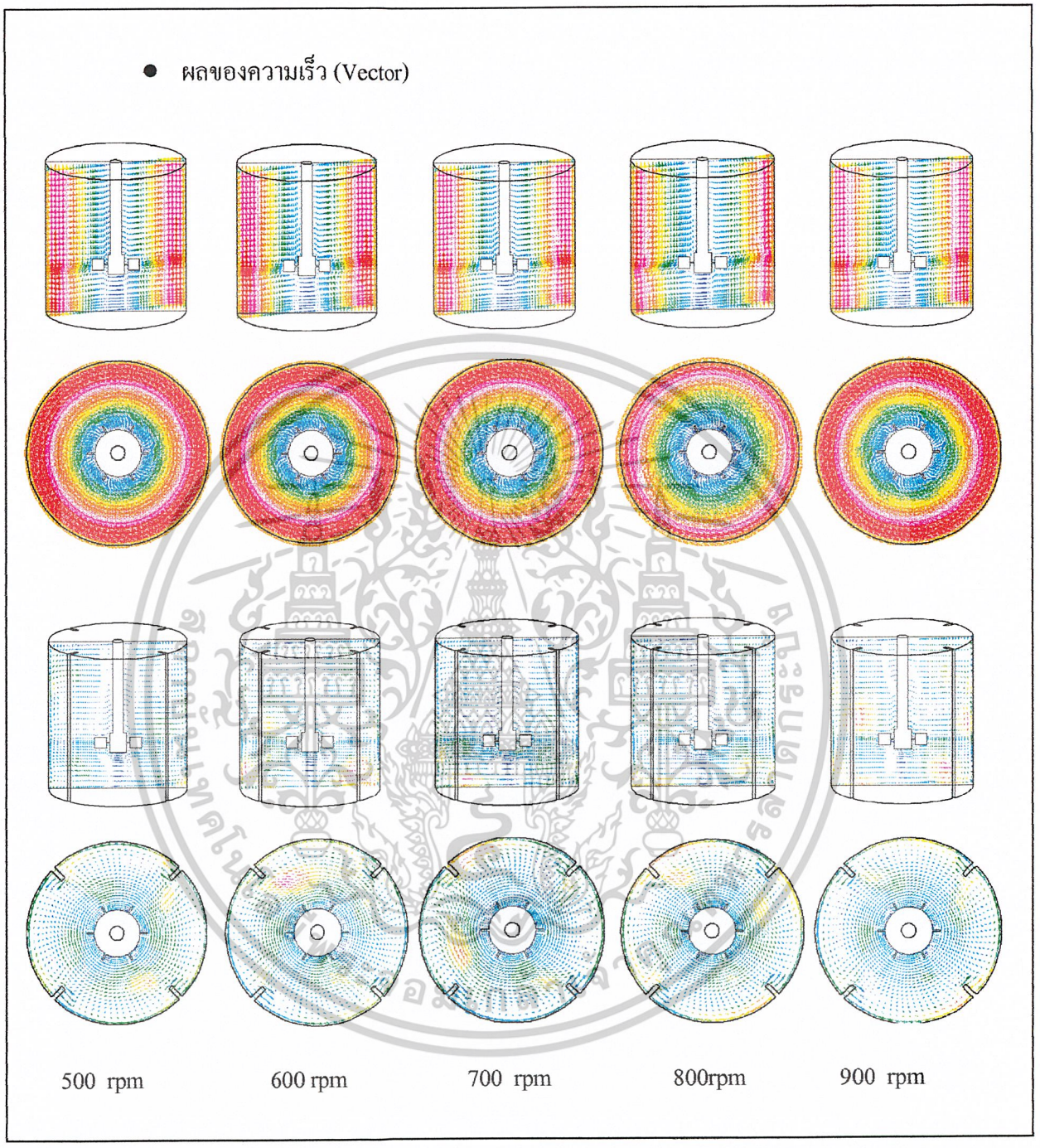
รูปที่ 4.31 แสดงผลของความดันภายในถัง(Scalar) โดยใช้ น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



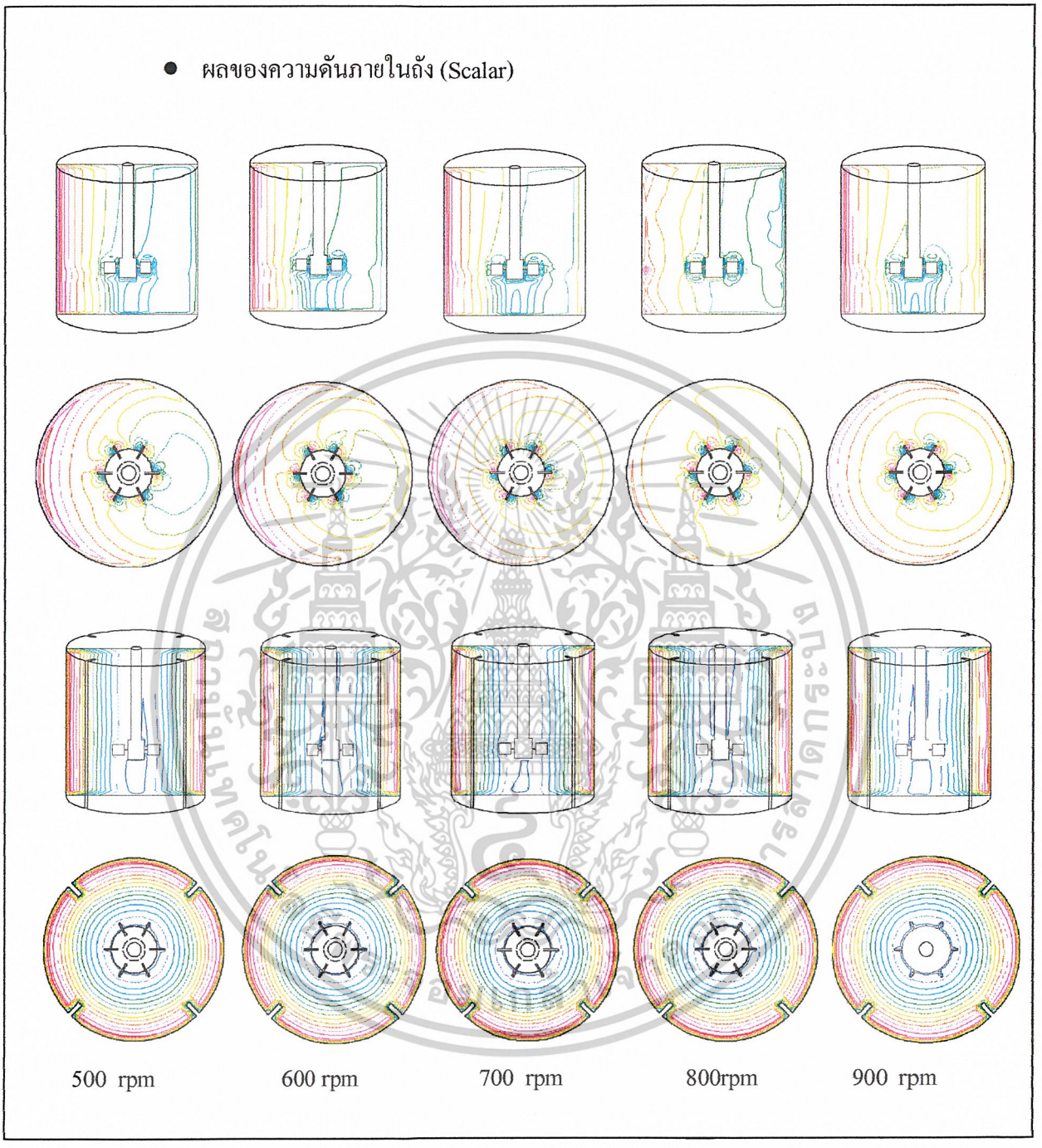
รูปที่ 4.32 แสดงผลของความเร็วภายในถัง(Scalar) โดยใช้ ครีม(CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



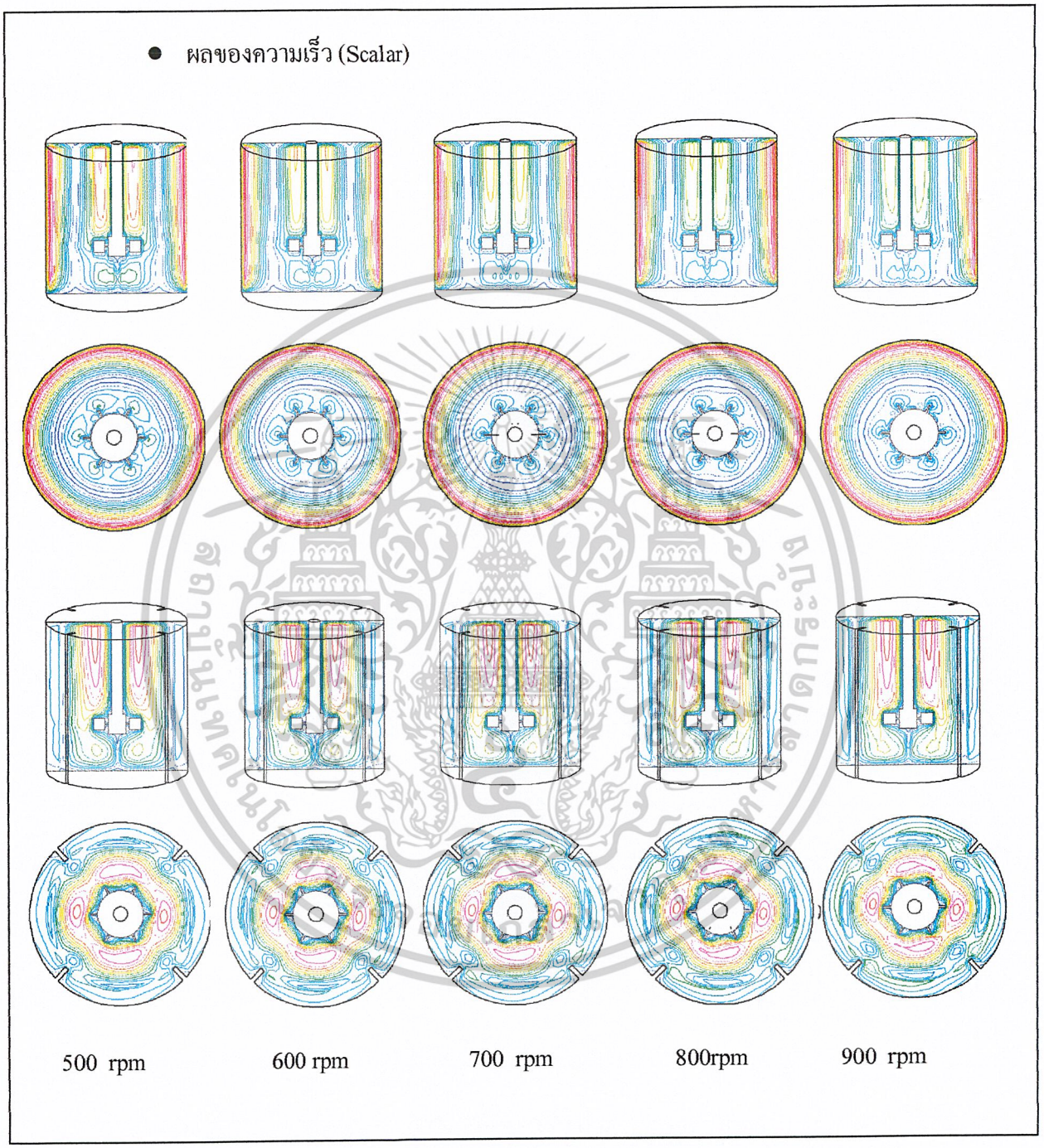
รูปที่ 4.33 แสดงผลของความเร็วภายในถัง(Vector) โดยใช้ ครีม (CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



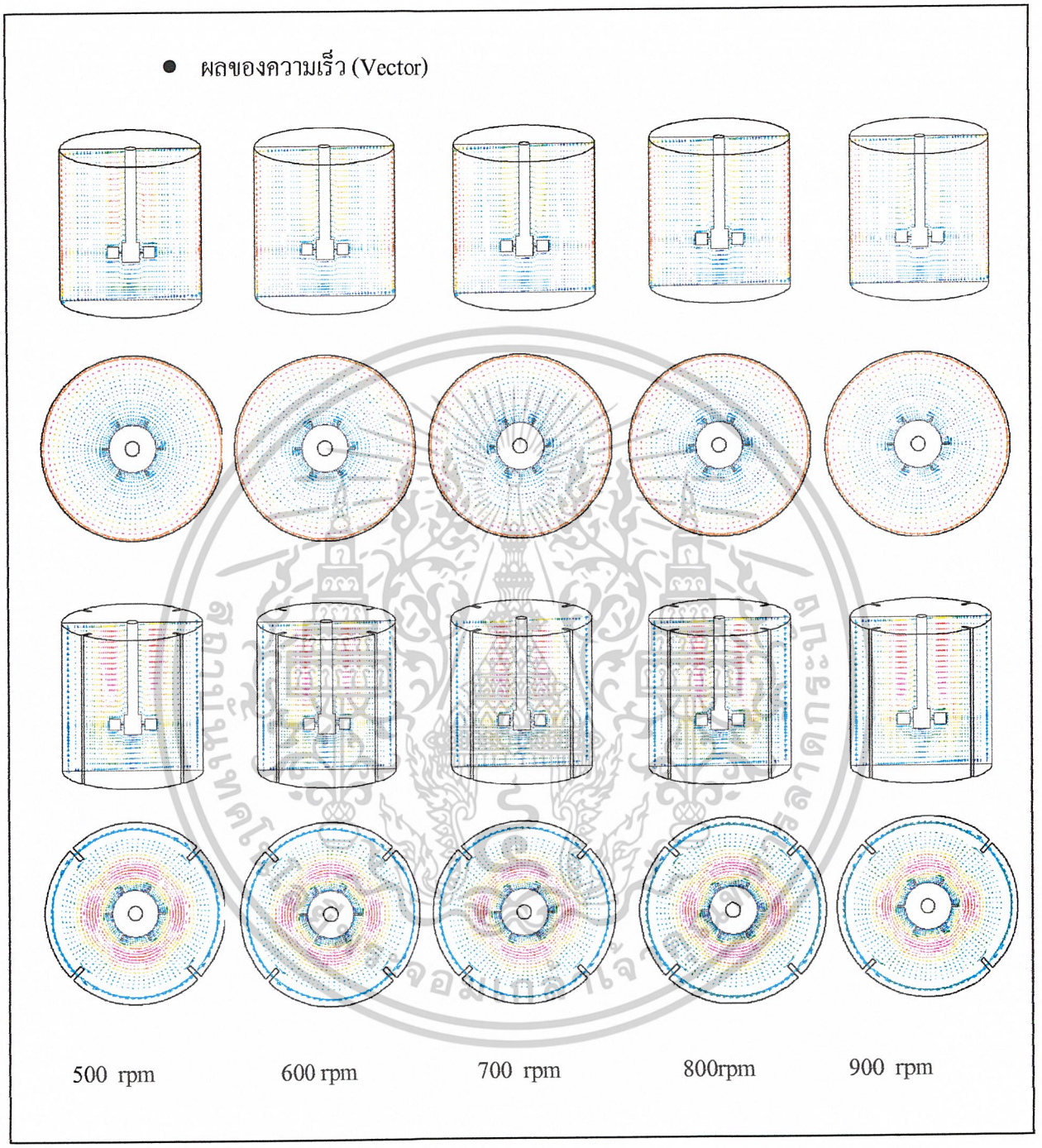
รูปที่ 4.34 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ ครีม (CREAM) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



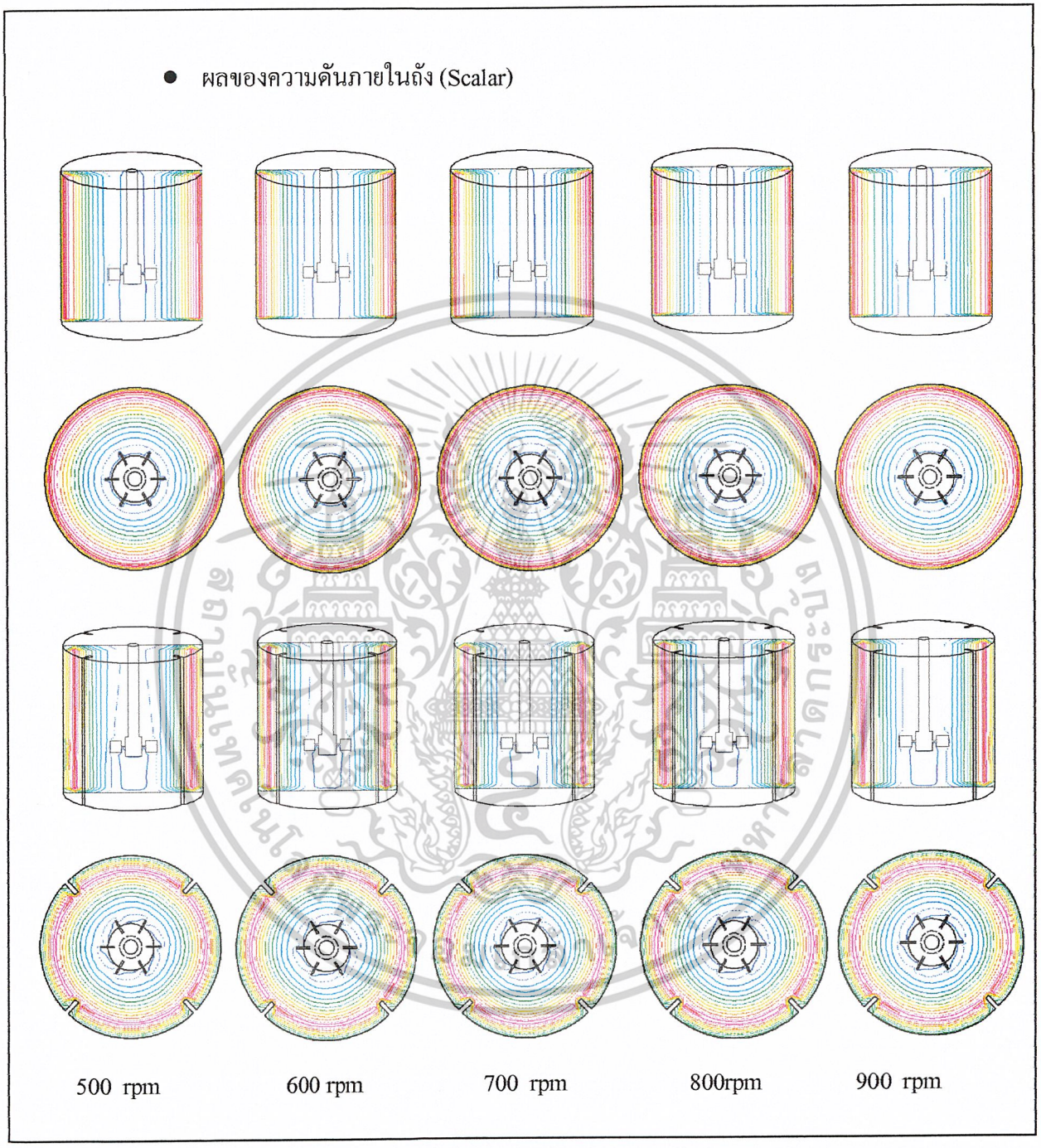
รูปที่ 4.35 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Scalar) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



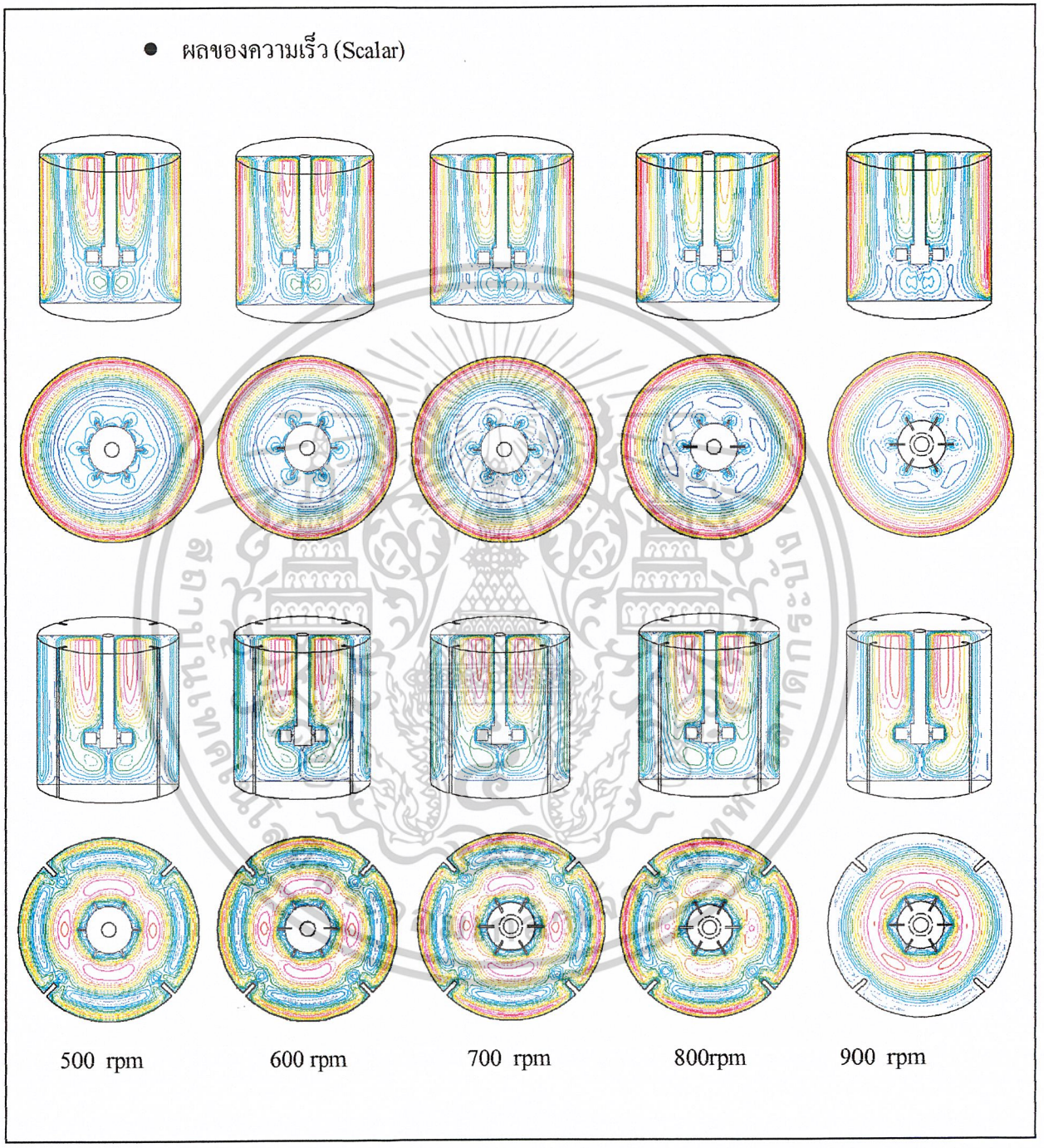
รูปที่ 4.36 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Vector) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



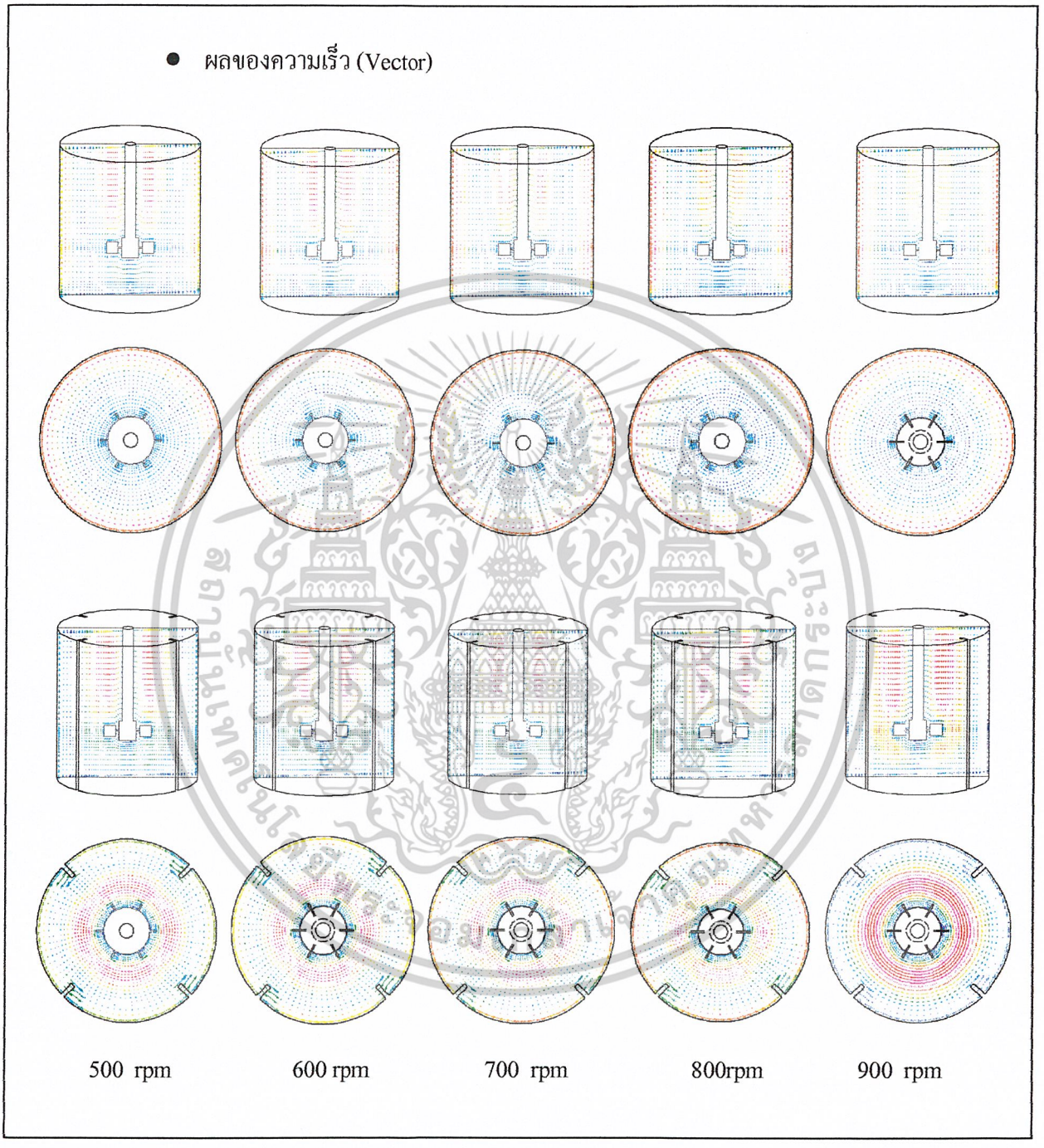
รูปที่ 4.37 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ น้ำซอสเข้มข้น (KETCHUP) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



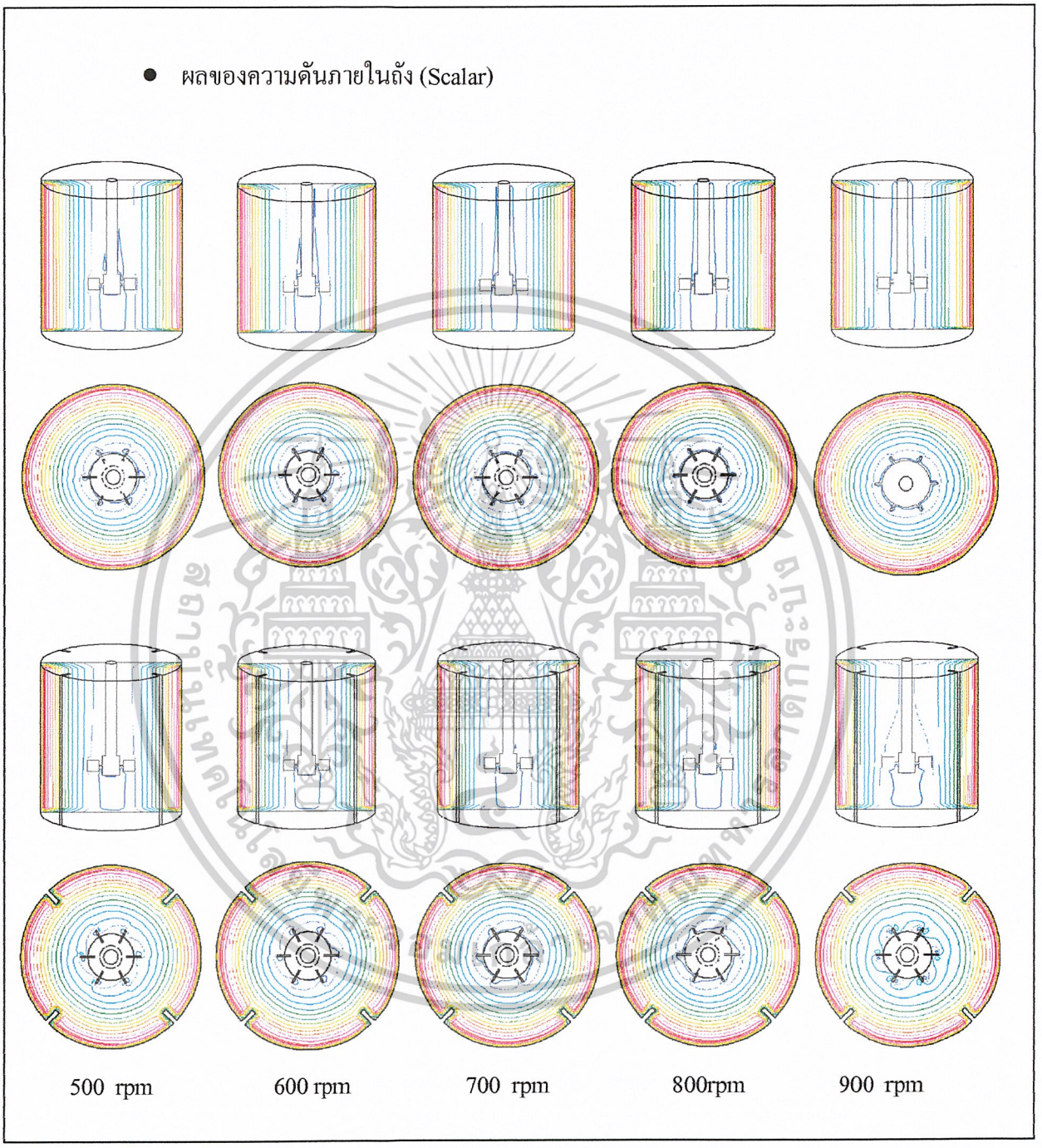
รูปที่ 4.38 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบด (PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.39 แสดงผลของความเร็วภายในถัง (Vector) โดยใช้ เนยถั่วบด (PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.40 แสดงผลของความดันภายในถัง (Scalar) โดยใช้ เนยถั่วบด (PEANUT BUTTER) เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ไม่ติดแผ่นกั้นและติดแผ่นกั้นตามลำดับ max min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากแบบจำลอง พบว่าใบกวน Turbine Blade นี้ลักษณะของใบกวนจะใช้ความเร็วรอบที่สูง โดยใบกวนจะพัดพาของเหลวออกในแนวด้านข้างถังกวนและของเหลวที่ถูกพัดออกในทางด้านข้างนั้น จะถูกแบ่งเป็นสองส่วนส่วนหนึ่งจะไหลเป็นแนวตรงขึ้นไปข้างบนตามแกนเพลาไหลวนออกทางด้านข้าง และไหลวนกลับมาตรงใบกวนอีกส่วนหนึ่งจะถูกพัดลงมาข้างล่างและไหลวนขึ้นมาตรงใบกวนเช่นกัน เมื่อติดตั้งแผ่นกั้นจะทำให้การไหลของของเหลวปั่นป่วนรุนแรงมากขึ้น

ของเหลวบริเวณก้นถังและใต้ใบกวนมีความเร็วน้อยที่สุด เนื่องจากบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากการกวนการผสมกันน้อยที่สุดจึงเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones) เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นบริเวณใต้ใบกวนจะเกิดการผสมกันมากขึ้น และเมื่อติดตั้งแผ่นกั้น แผ่นกั้นนั้นจะไปปิดกั้นการไหลของของเหลว จะทำให้ของเหลวภายในถังเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากยิ่งขึ้นจึงทำให้จุด Dead Zones น้อยลง และความดันของของเหลวภายในถังกวนจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเร็วรอบเดียวกัน ของเหลวที่มีความเร็วสูงที่สุดคือ น้ำ ครีม (CREAM) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) และเนยถั่วบด(PEANUT BUTTER) ตามลำดับ และความเร็วของของเหลวที่มากที่สุดจะอยู่บริเวณปลายใบกวนและข้างถังกวน เมื่อติดแผ่นกั้นความเร็วของของเหลวที่มากที่สุดจะอยู่ระหว่างปลายใบกวนกับปลายแผ่นกั้น ซึ่งความเร็วของของเหลวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความเร็วของของเหลวบริเวณจุด Dead Zones ที่น้อยที่สุดคือ เนยถั่ว(PEANUT BUTTER) น้ำซอสเข้มข้น (KETCHUP) ครีม(CREAM) และ น้ำ ตามลำดับ เมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นจุด Dead Zones จะลดลง ความดันภายในถังกวนของของเหลวที่มีค่ามากที่สุดคือ เนยถั่ว(PEANUT BUTTER) น้ำซอสเข้มข้น(KETCHUP) ครีม (CREAM) และ น้ำ ตามลำดับ และความดันจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้น ความดันของของเหลวจะมากที่สุดบริเวณข้างถังกวนแต่เมื่อติดแผ่นกั้นความดันที่มากที่สุดจะอยู่บริเวณปลายแผ่นกั้น

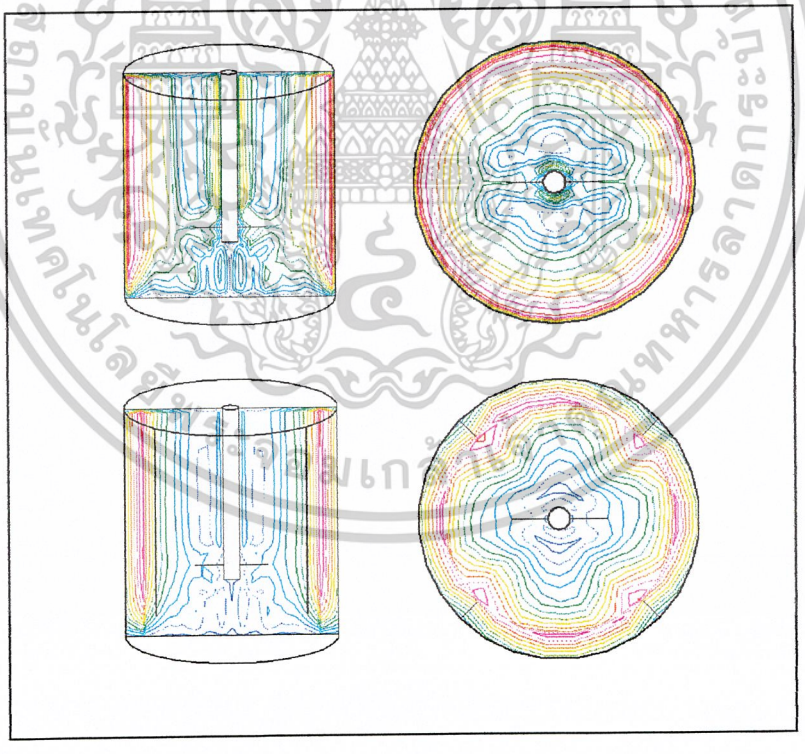
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลการสร้างแบบจำลอง

5.1 สรุปผลการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลของแบบจำลอง โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ในการทดลอง

5.1.1 เปรียบเทียบที่ใบกวน Helical blade

ผลของเส้นการไหลของของเหลวในแบบจำลอง มีความคล้ายคลึงกันกับผลการทดลองจริง คือ ให้เส้นการไหลออกตามแนวรัศมีของใบกวน (Radial Flow) พร้อมกับไหลวนไปในทิศทางที่ใบกวนพัดพา บริเวณที่ของเหลวมีความเร็วสูงสุดคือปลายใบกวน และข้างถังกวน เมื่อของเหลวไหลชนก้นถัง และข้างถังเส้นการไหลจะเปลี่ยนแปลงคือของเหลวจะไหลขึ้นบนและลงล่างตามแนวแกนเพลา (Axial Flow) เมื่อติดแผ่นกั้น (Baffle) ทำให้ของเหลวเกิดการไหลปั่นป่วนมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบทำให้เส้นการไหลปั่นป่วนมากขึ้น และเกิดจุด Dead Zones ลดลง

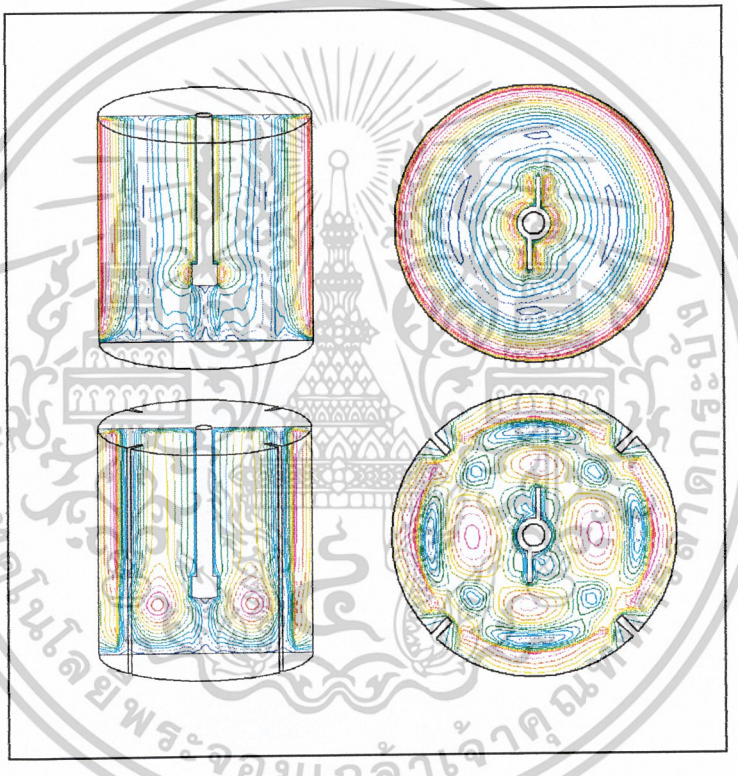


รูปที่ 5.1 แสดงเส้นการไหลของใบกวน Helical blade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.2 เปรียบเทียบที่ใบกวนแบบ Incline blade

ผลของเส้นการไหลของของเหลวในแบบจำลองมีความคล้ายคลึงกันกับผลการทดลองจริงคือให้เส้นการไหลออกตามแนวเอียงของใบกวนซึ่งใบกวนเอียงทำมุม 45° กับแนวราบ แผ่ไปตามรัศมีใบกวน (Radial Flow)ลงสู่ก้นถัง เมื่อของเหลวชนกับก้นถังจะเปลี่ยนทิศทางการไหลขึ้นไปตามแนวแกนเพลา(Axial Flow) เนื่องจากใบกวนชนิดนี้ใช้ที่ความเร็วรอบต่ำทำให้เกิด Dead Zones มากกว่าใบกวนแบบ Helical เมื่อติดแผ่นกั้น(Baffle)ทำให้ของเหลวเกิดการไหลปั่นป่วนมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบทำให้เส้นการไหลปั่นป่วนมากขึ้น และเกิดจุด Dead Zones ลดลง

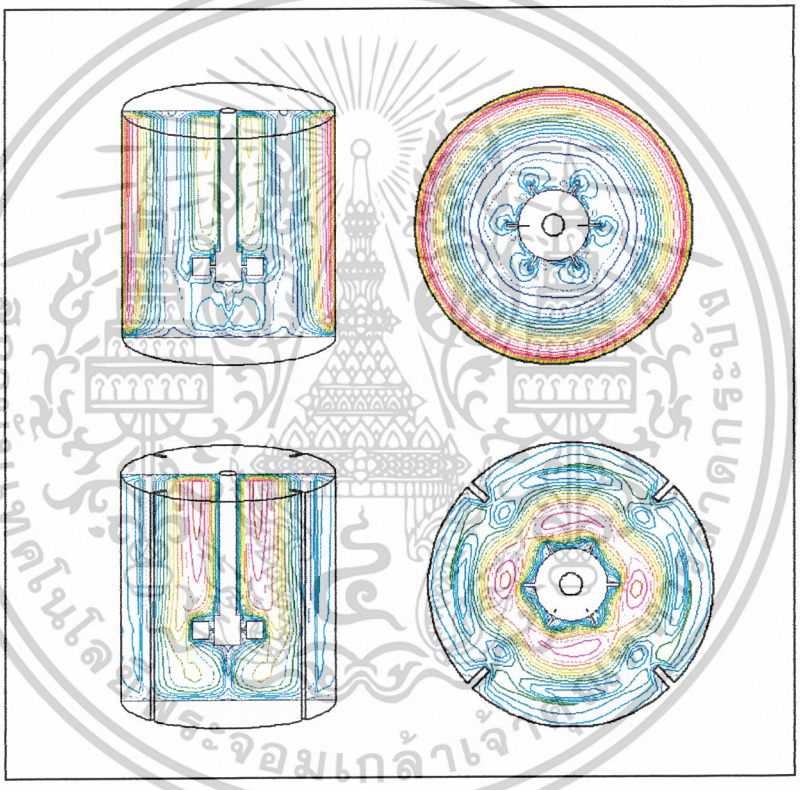


รูปที่ 5.2 แสดงเส้นการไหลของใบกวน Incline blade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 เปรียบเทียบที่ใบกวนแบบ Turbine blade

ผลของเส้นการไหลของของเหลวในแบบจำลอง พบว่าเส้นการไหลของของเหลวมีลักษณะไหลออกตามแนวรัศมีใบกวน (Radial Flow) พร้อมกับไหลออกตามแนวแกนเพลา(Axial Flow) ไหลวนสู่ด้านล่างและด้านบนของถังกวน เนื่องจากใบกวนชนิดนี้หมุนที่ความเร็วรอบสูงจึงทำให้การไหลมีความปั่นป่วนมากจึงทำให้เกิด Dead Zones ในปริมาณน้อย และเมื่อเพิ่มความเร็วรอบหรือติดแผ่นกั้น(Baffle)ทำให้ของเหลวเกิดการไหลปั่นป่วนมากขึ้น เมื่อเพิ่มความเร็วรอบทำให้เส้นการไหลปั่นป่วนมากขึ้น และเกิดจุด Dead Zones ลดลง



รูปที่ 5.3 แสดงเส้นการไหลของใบกวน Turbine blade

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 สรุปผลของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบประเภทของของเหลว

5.2.1 ของเหลวประเภท Newtonian fluid

ซึ่งใช้น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์แทน สรุปได้ว่าของเหลวประเภท Newtonian fluid เหมาะสมที่จะใช้ใบกวน Incline blade ที่ความเร็วรอบ 97-175 rpm ในกระบวนการผสม เนื่องจากของเหลวประเภท Newtonian นี้มีความหนืดน้อย ในการกวนการผสมนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ใบกวนที่มีความเร็วรอบต่ำก็สามารถกวนผสมของเหลว Newtonian fluid ให้ทั่วถึงกันภายในถังได้ และเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones)ในปริมาณน้อย

5.2.2 ของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid

ซึ่งใช้ ครีม(Cream) เป็นผลิตภัณฑ์แทน สรุปได้ว่าของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid เหมาะสมที่จะใช้ใบกวน Helical blade ที่ความเร็วรอบ 250-350 rpm ในกระบวนการผสม เนื่องจากของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid นี้มีความหนืดปานกลาง ในการกวนการผสมนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ใบกวนที่มีความเร็วรอบปานกลางก็สามารถกวนผสมของเหลว Pseudoplastic fluid ให้ทั่วถึงกันภายในถังได้ และเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones) ในปริมาณน้อย

5.2.3 ของเหลวประเภท Binghamplastic fluid

ซึ่งใช้น้ำซอสเข้มข้น (Ketchup) เป็นผลิตภัณฑ์แทน สรุปได้ว่าของเหลวประเภท Bingham-plastic fluid เหมาะสมที่จะใช้ใบกวน Turbine blade ที่ความเร็วรอบ 600-800 rpm ในกระบวนการผสมเนื่องจากของเหลวประเภท Binghamplastic fluid นี้มีความหนืดมาก ในการกวนการผสมนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ใบกวนที่มีความเร็วรอบสูงก็สามารถกวนผสมของเหลว Binghamplastic fluid ให้ทั่วถึงกันภายในถังได้ และเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones) ในปริมาณน้อย

5.2.4 ของเหลวประเภท Dilatant fluid

ซึ่งใช้ เนยถั่วบด (Peanut butter) เป็นผลิตภัณฑ์แทน สรุปได้ว่าของเหลวประเภท Dilatant fluid เหมาะสมที่จะใช้ใบกวน Turbine blade ที่ความเร็วรอบ 600-800 rpm ในกระบวนการผสมเนื่องจากของเหลวประเภท Dilatant fluid นี้มีความหนืดมาก ในการกวนการผสมนั้นจึงเหมาะสมที่จะใช้ใบกวนที่มีความเร็วรอบสูงก็สามารถกวนผสมของเหลว Dilatant fluid ให้ทั่วถึงกันภายในถังได้ และเกิดจุดที่ไม่มีการผสมกันของของเหลว (Dead Zones) ในปริมาณน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, คู่มืออุปกรณ์การผลิตในอุตสาหกรรมเคมี, วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมเคมี) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533

พิภพ ธรรมธารัย, การหาเวลาที่จำเป็นของการผสมในถังผสมที่มีการกวนแบบไม่ต่อเนื่องด้วยเทคนิคสารติดตาม, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมเคมี) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2534

ยุพดี สันติวุฒน์, รีโอโลยีของของไหลนอน-นิวโตเนียนและการผสมในถังปฏิกรณ์แบบอากาศยก, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมเคมี) บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2538

ธีรยุทธ หล่อภูมิพันธ์, ภาวะที่มีผลต่อการผสมในถังกวนแบบต่อเนื่อง, วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมเคมี) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536

ณัทธร สุทธิธรรม และ ไตรภูมิ มาสสะอาด, การศึกษาการถ่ายเทความร้อนที่แปรผันตามเวลาในถังเก็บน้ำเย็นโดยวิธีไฟไนต์วอลลุ่ม, ปริญญานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์(วิศวกรรมเครื่องกล) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

User Guide Star-CD Version 3.15A (2002), CD Adapco Group, 2002 Computational Dynamics Limited.

McCabe W.L.,Smith J.C. and Harriott P. (1993) Unit Operations of Chemical Engineering. 5th Edition, McGraw-Hill Inc, USA.

Revil M.K. (1974) Mixing in the process industries, Bradford university, UK.

Paul & Dennis (2001) Introduction to Food Engineering. 3rd Edition, Food Science and Technology, International Series, UK.

Fellows (1990) Food Processing Technogy Principles And Practice, Department Catering Management, England.

Z. Jaworski & M.L. Wyszynski (1995) Sliding Mesh Simulation of Transitional, Non-Newtonian Flow in a Baffled, Stirred Tank, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.

Razvan B. & Peter E. (1998) Fluid Mixing Enhancement in a Shaking Tank: A Combined Numerical and Experimental Study, New Orleans Hyatt Regency.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Robert P. & Gary K. (1997) Experimental Measurements and Simulation of Mixing and Chemical Reaction in a Stirred Tank, journal/journal/_private/navbar.html.

www.chula.ac.th/~jirarat/FoodQA

www.bangkokiznews.com/scitech/2003

www.fluidedesign.com/about_fluids.htm

www.engrusask.ca/societies/csae/protectedpapers/co243.pdf

www.epotek.com/techtips/tech%20Tip%203.pdf

www.marinesture.co.uk/merchant2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

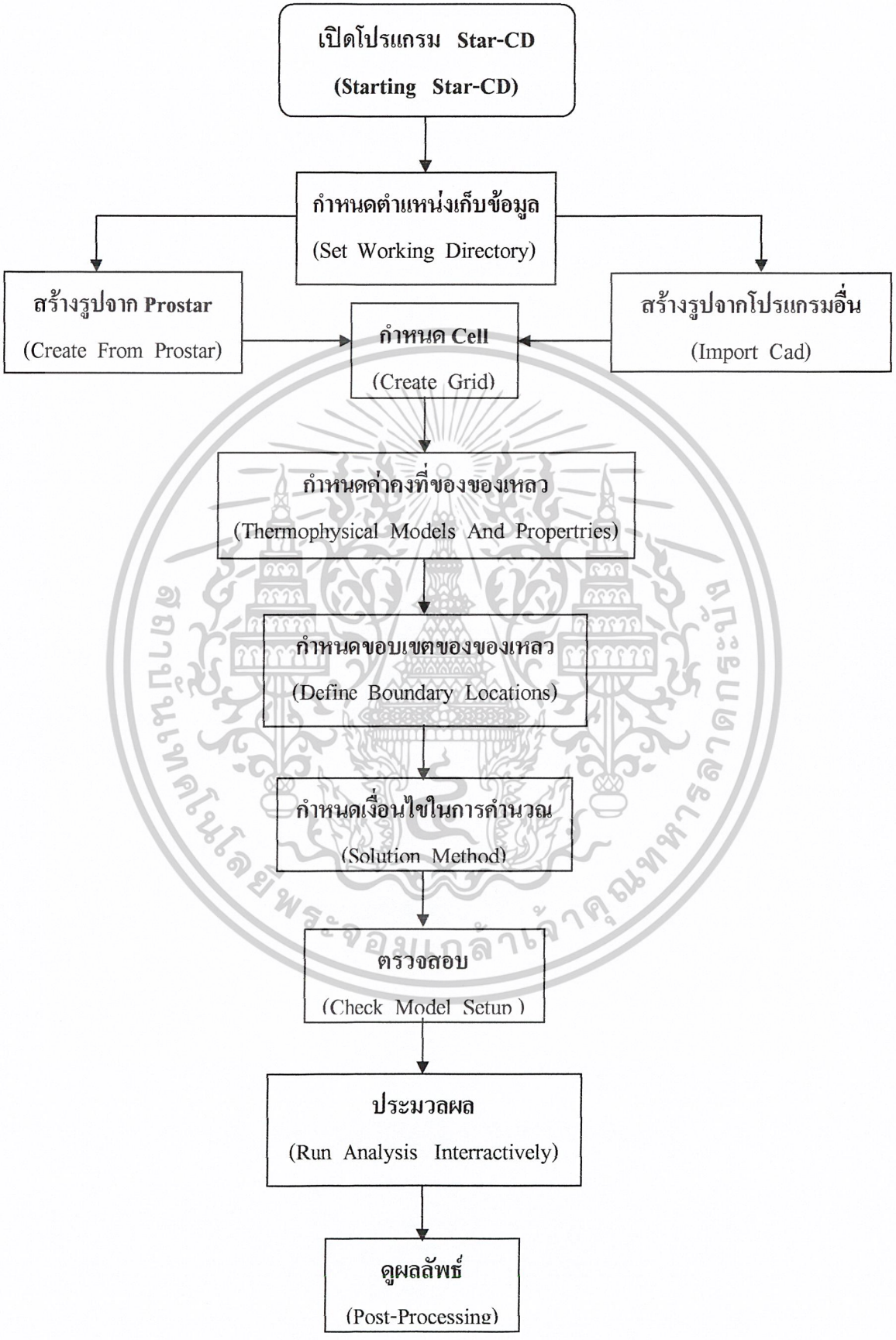
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

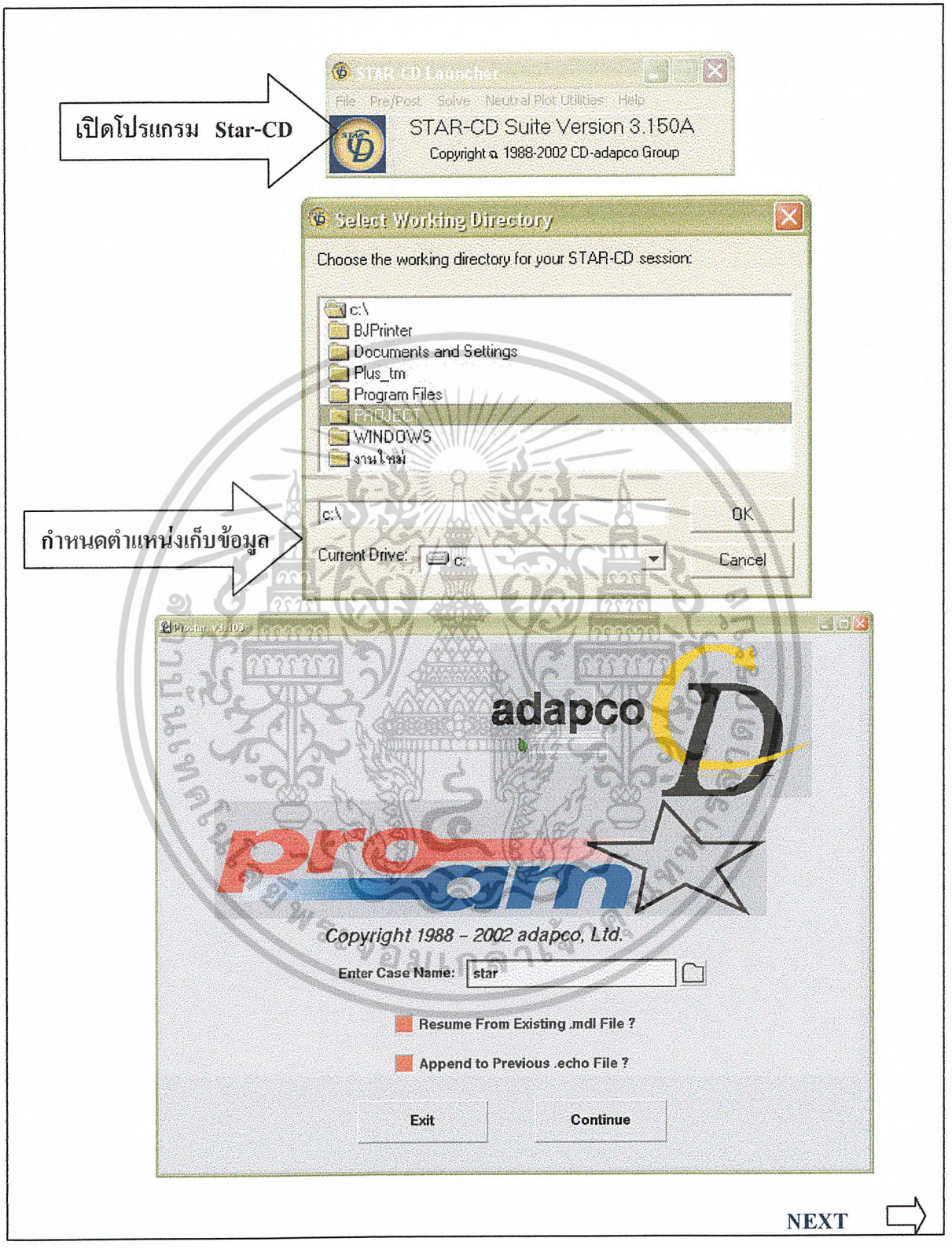
แสดงขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Star - CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



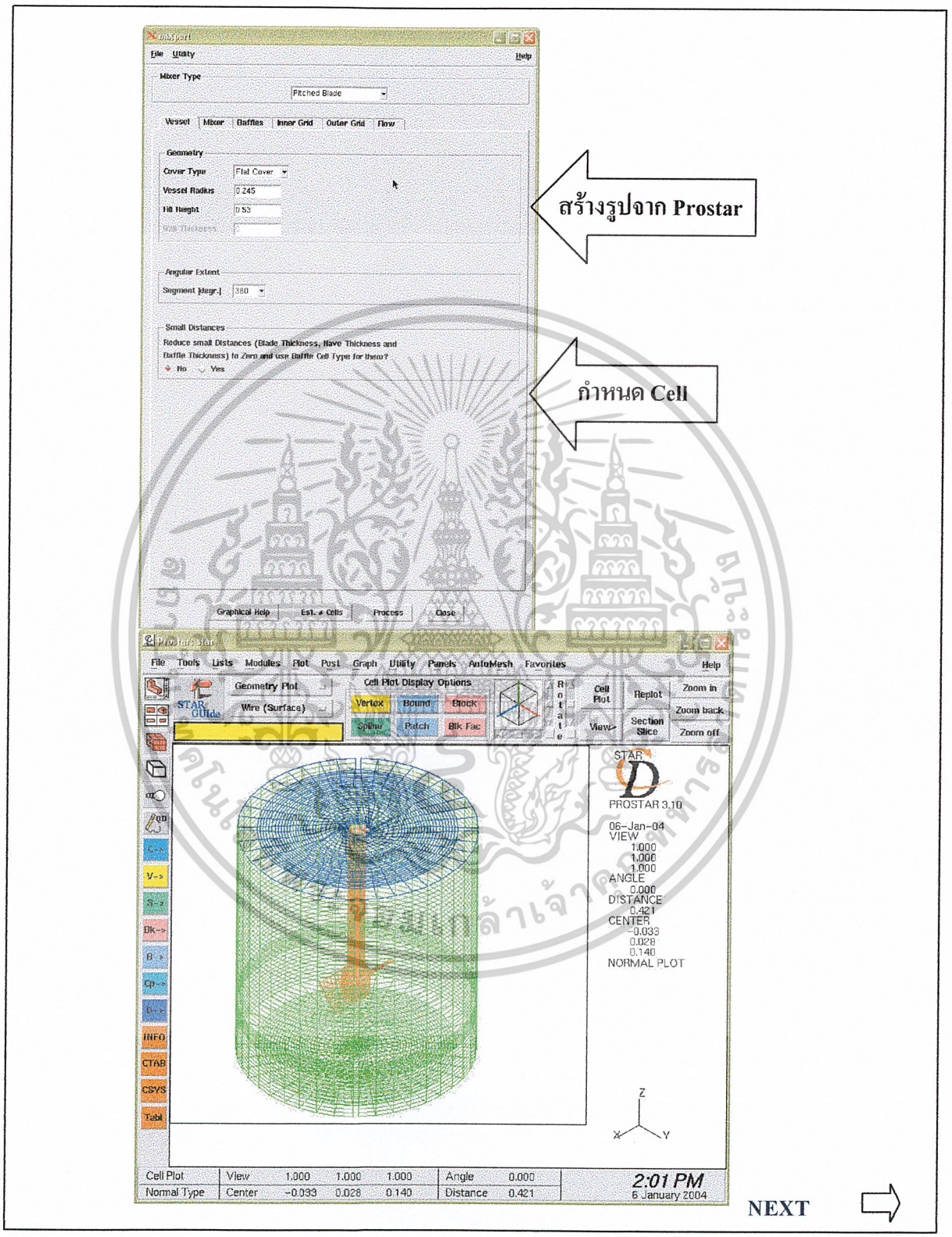
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ ก1 แสดงแผนภาพขั้นตอนการทำงานของโปรแกรม Star CD



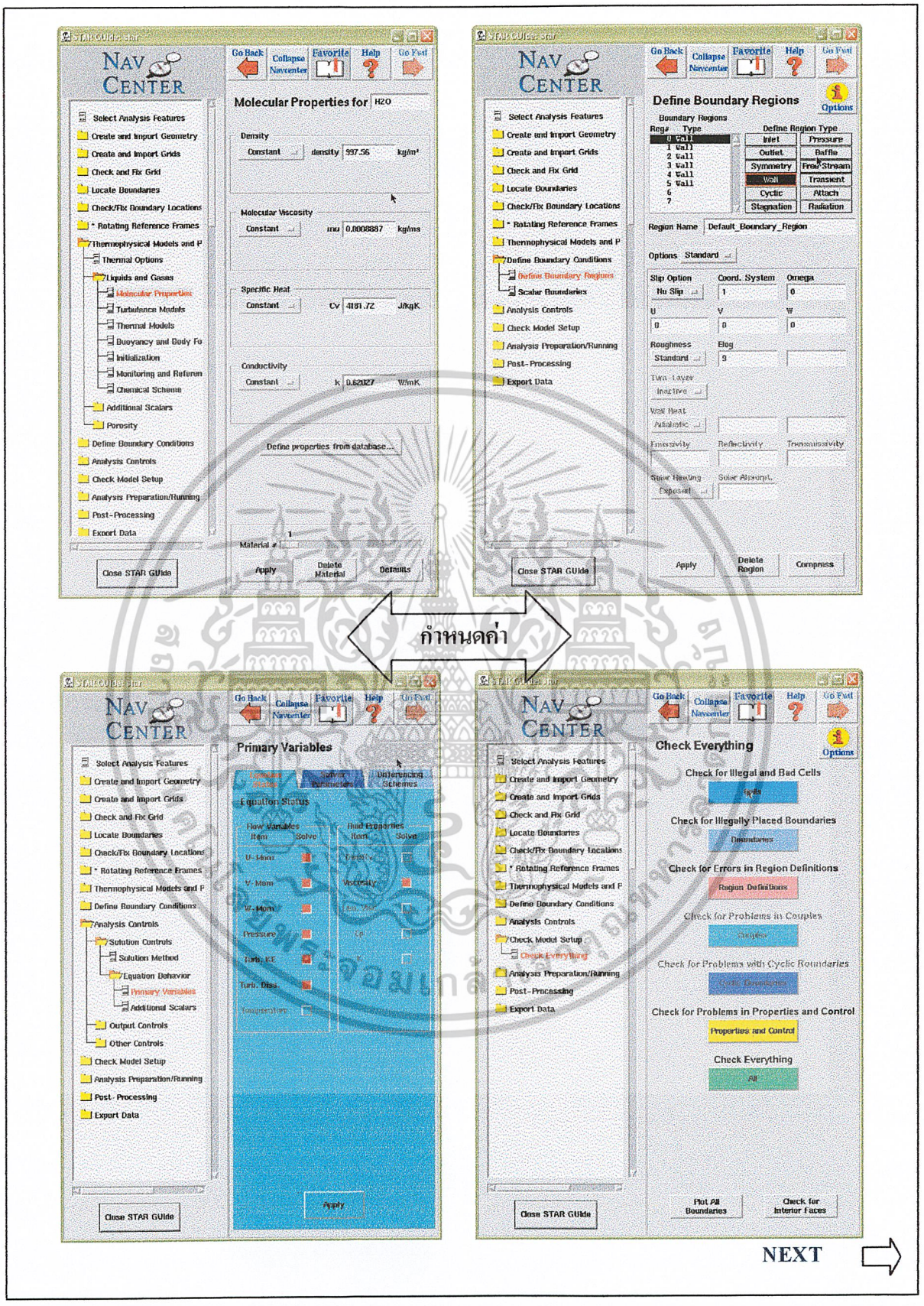
รูปที่ ก2 แสดงหน้าจอการเปิดโปรแกรมและกำหนดตำแหน่งเก็บข้อมูลของโปรแกรม Star CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



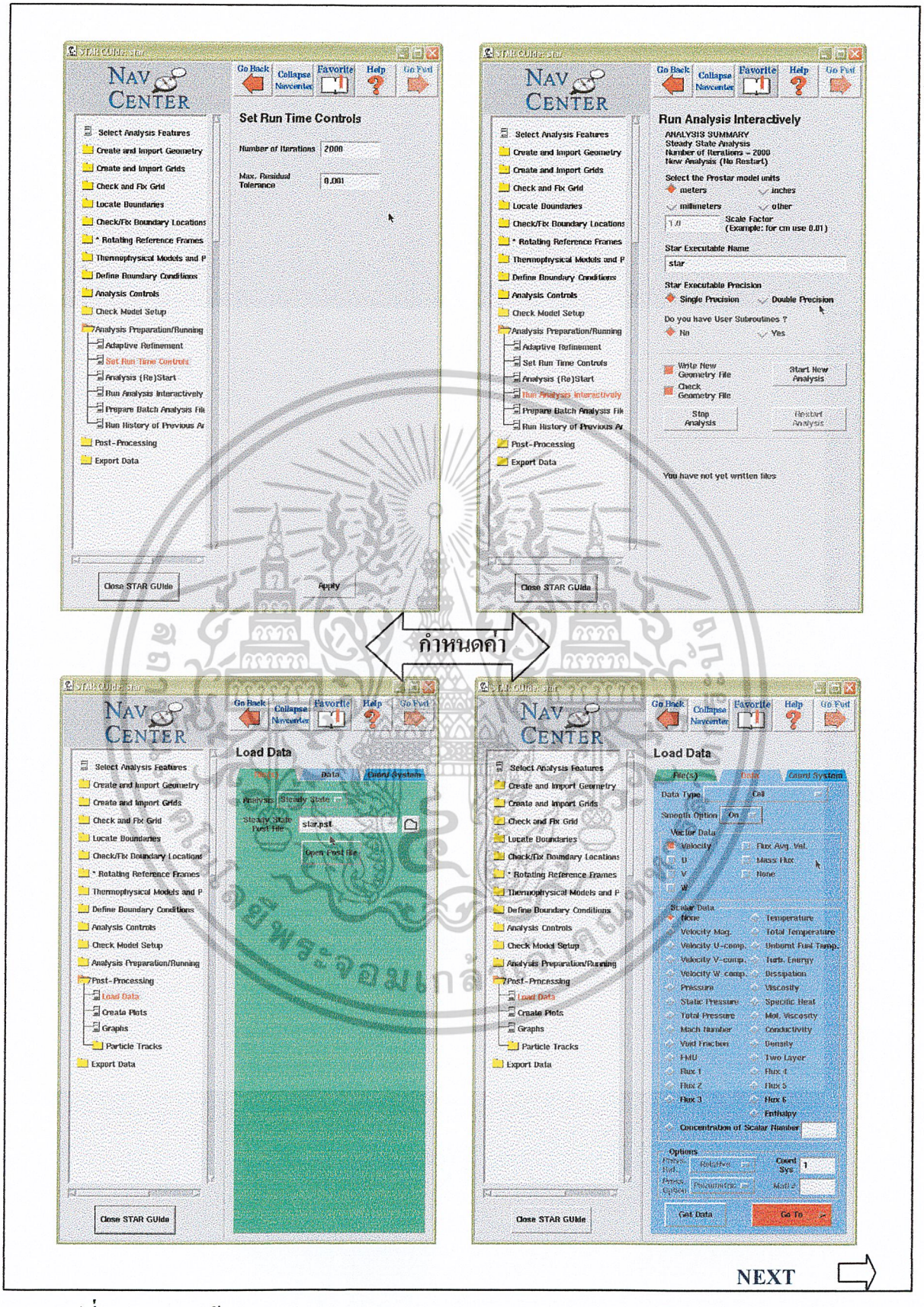
รูปที่ ก3 แสดงหน้าจอการสร้างแบบจำลองจาก Prostar และการกำหนด Cell ของโปรแกรม Star CD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



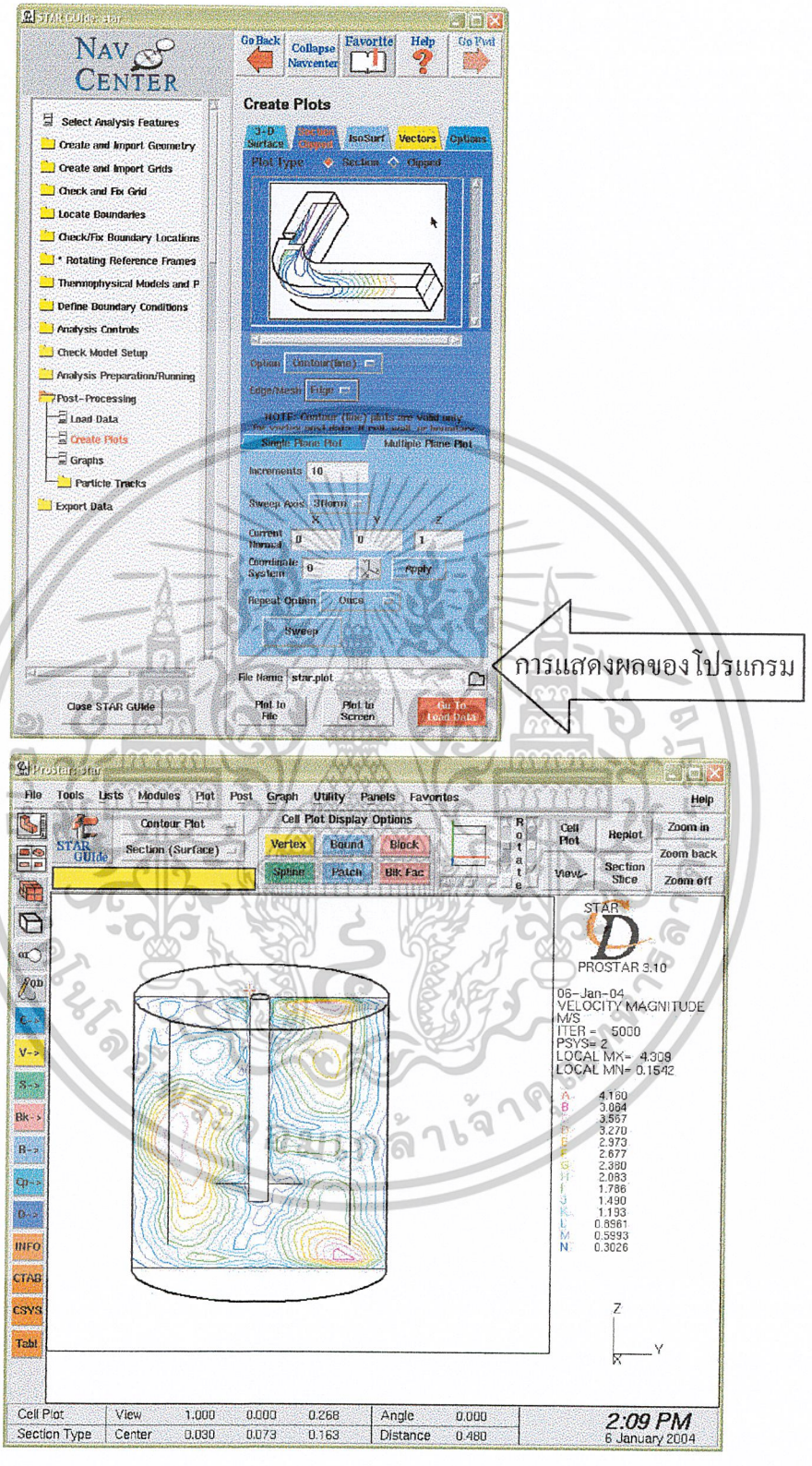
รูปที่ ก4 แสดงหน้าจอการกำหนดค่าคงที่ของของเหลว ขอบเขตของของเหลว เงื่อนไขในการคำนวณ และการตรวจสอบของโปรแกรม Star CDตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก5 แสดงหน้าจอการประมวลผล และกำหนดค่าการแสดงผลของโปรแกรม Star CD ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก6 แสดงหน้าจอแสดงผลของโปรแกรม Star CD

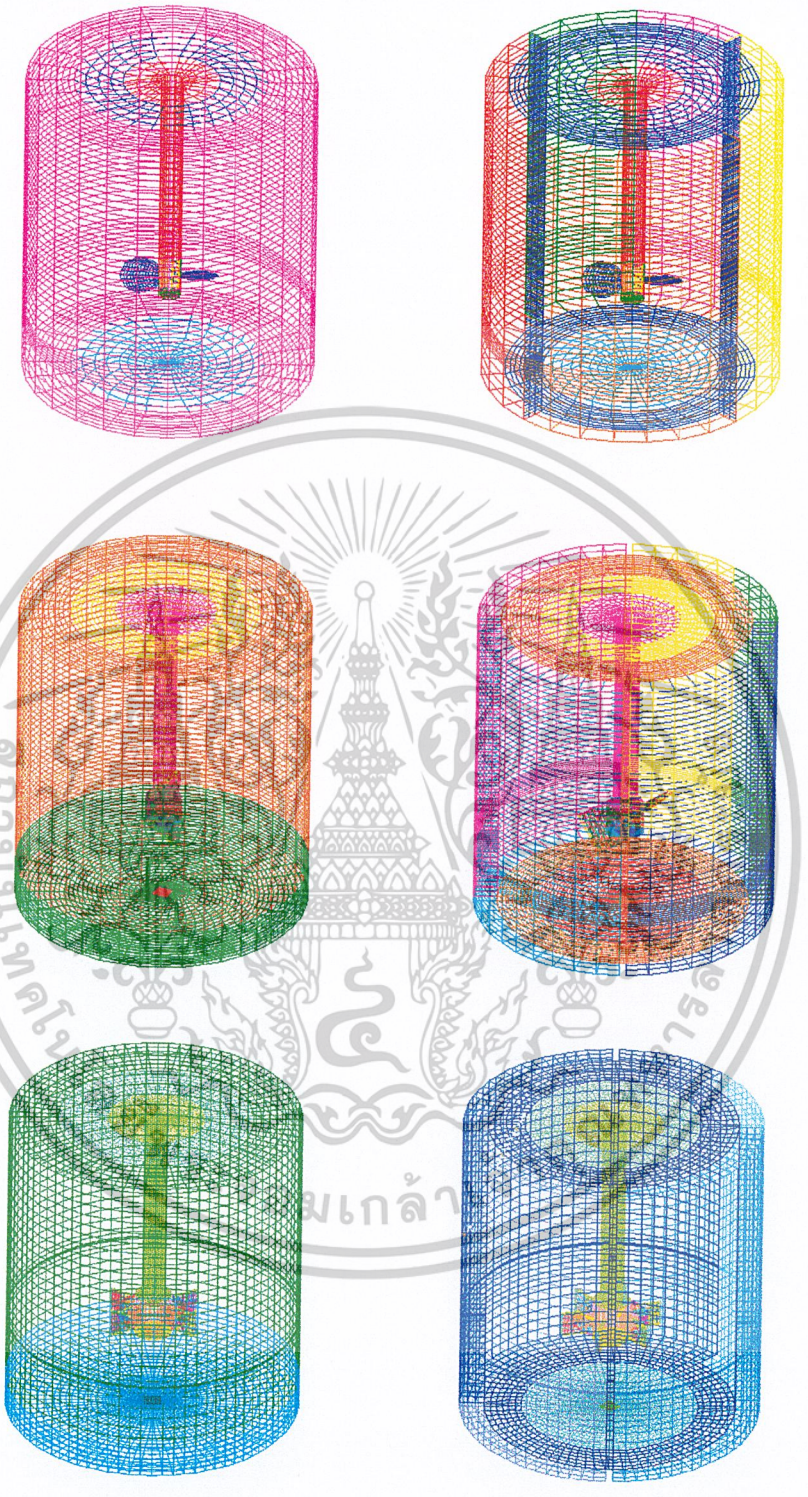
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

แสดงแบบจำลองชุดถังผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงแบบจำลองชุดถังผสม



unbaffle baffle

รูปที่ ข แสดงแบบจำลองชุดถังผสม Helical Blade, Incline Blade, Turbine Blade ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

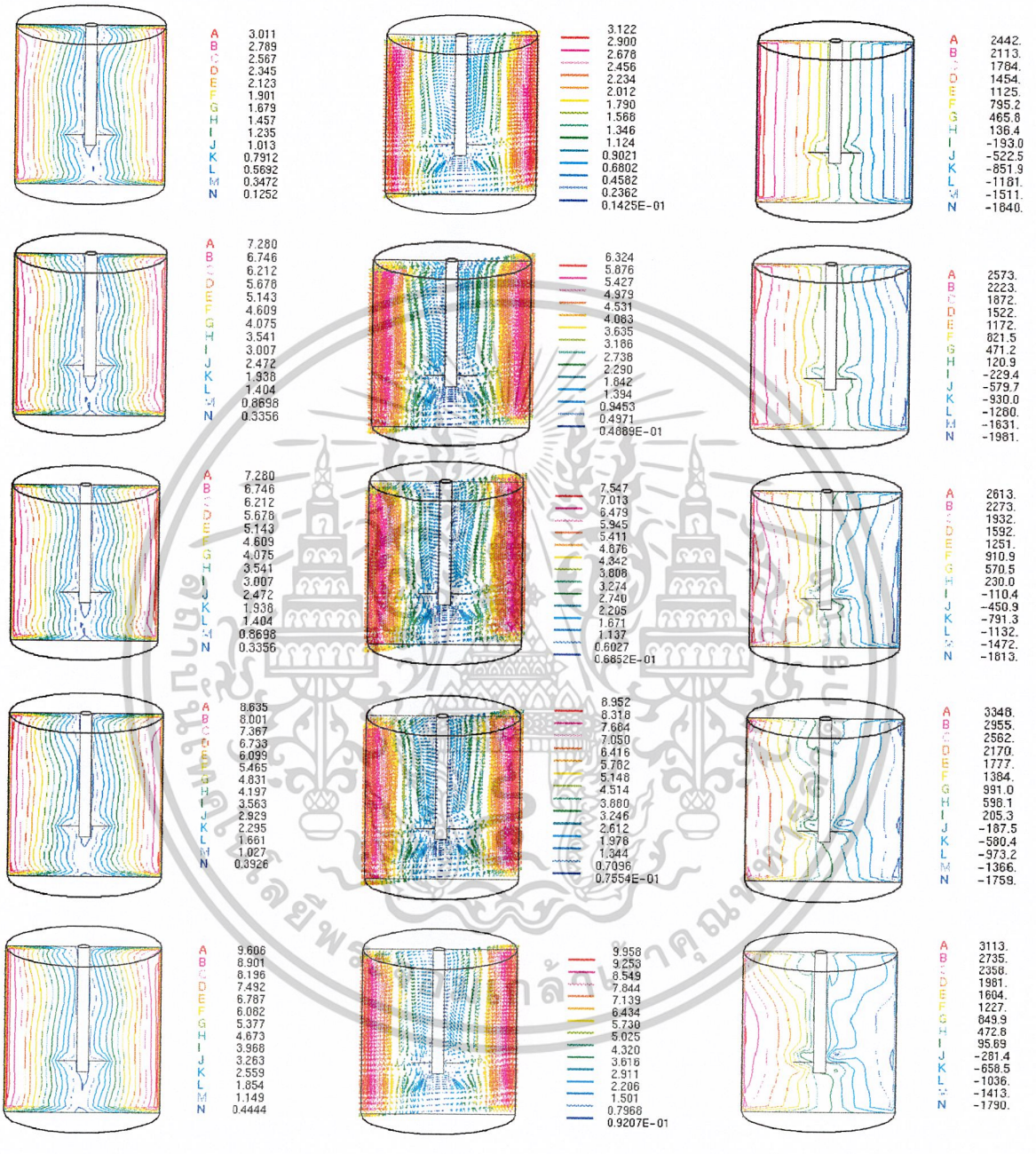
ภาคผนวก ค

ผลการแสดงแบบจำลองถังผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ใบกวนแบบ Helical Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)

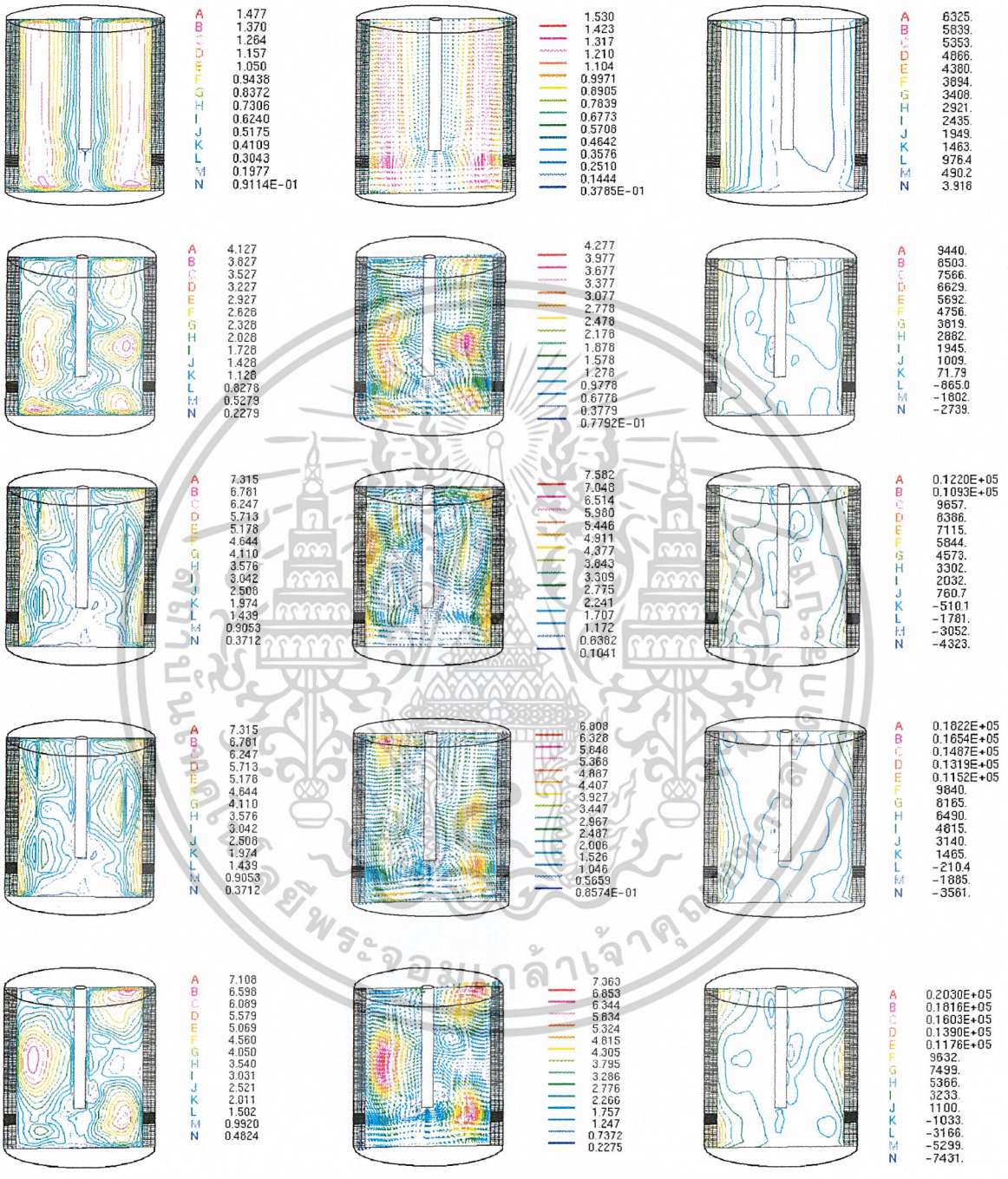


รูปที่ ค1 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250, 300, 350, 400 rpmตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ใบกวนแบบ Helical Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)

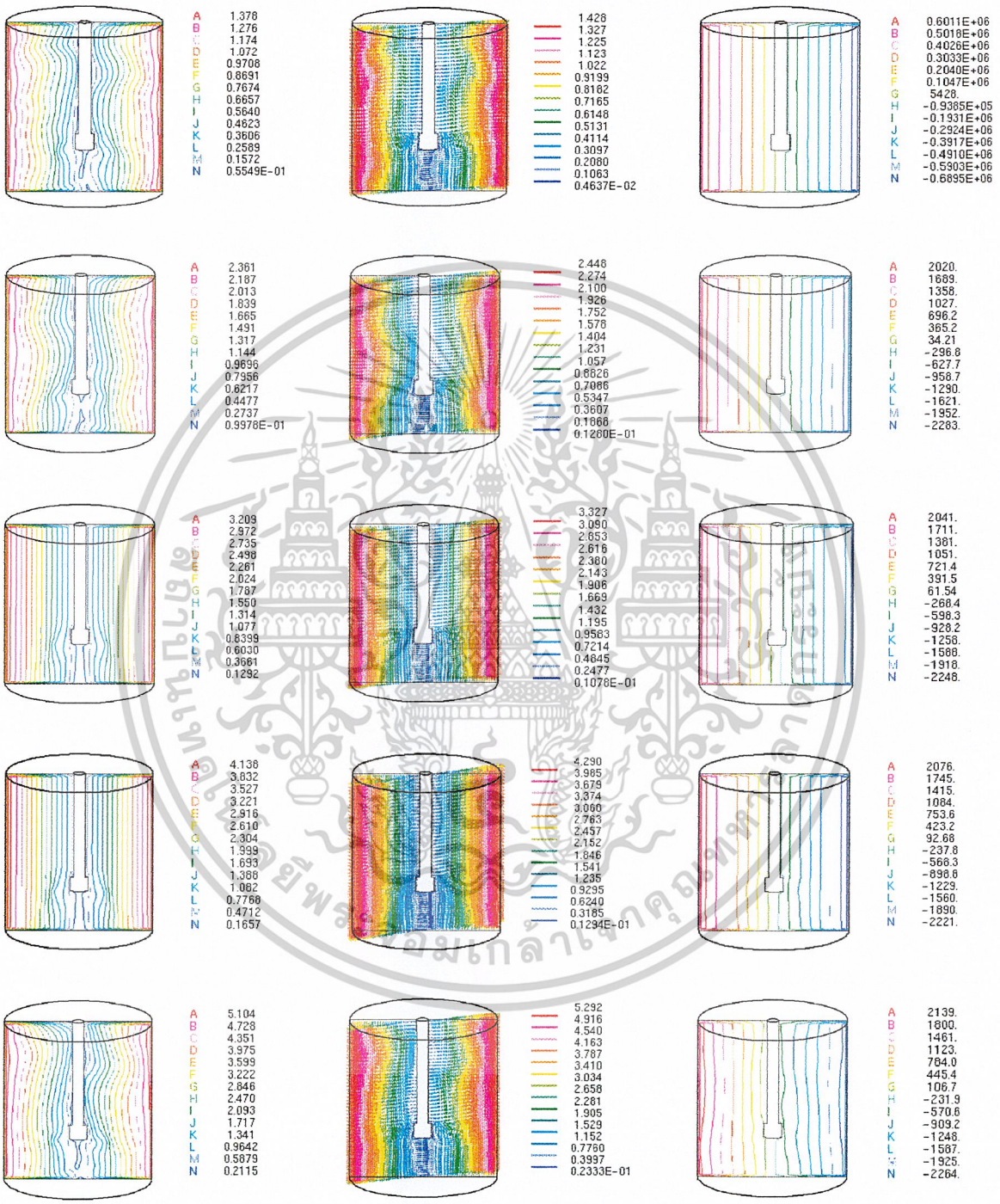


รูปที่ ค2 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250, 300, 350, 400 rตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลแสดงแบบจำลองทาง (Simulation)

โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ใบกวนแบบ Incline Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)

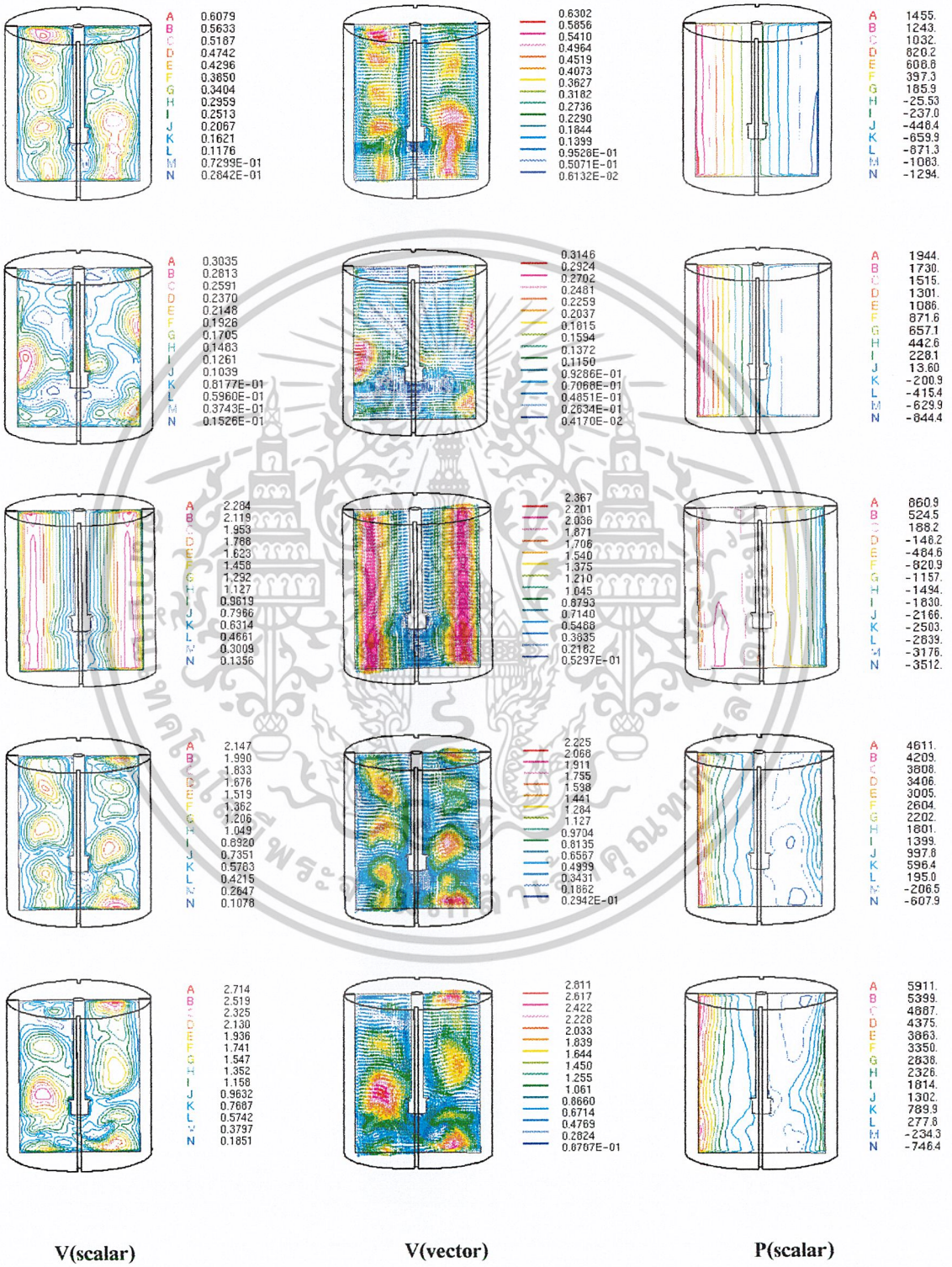


รูปที่ ค3 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ใบกวนแบบ Incline Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



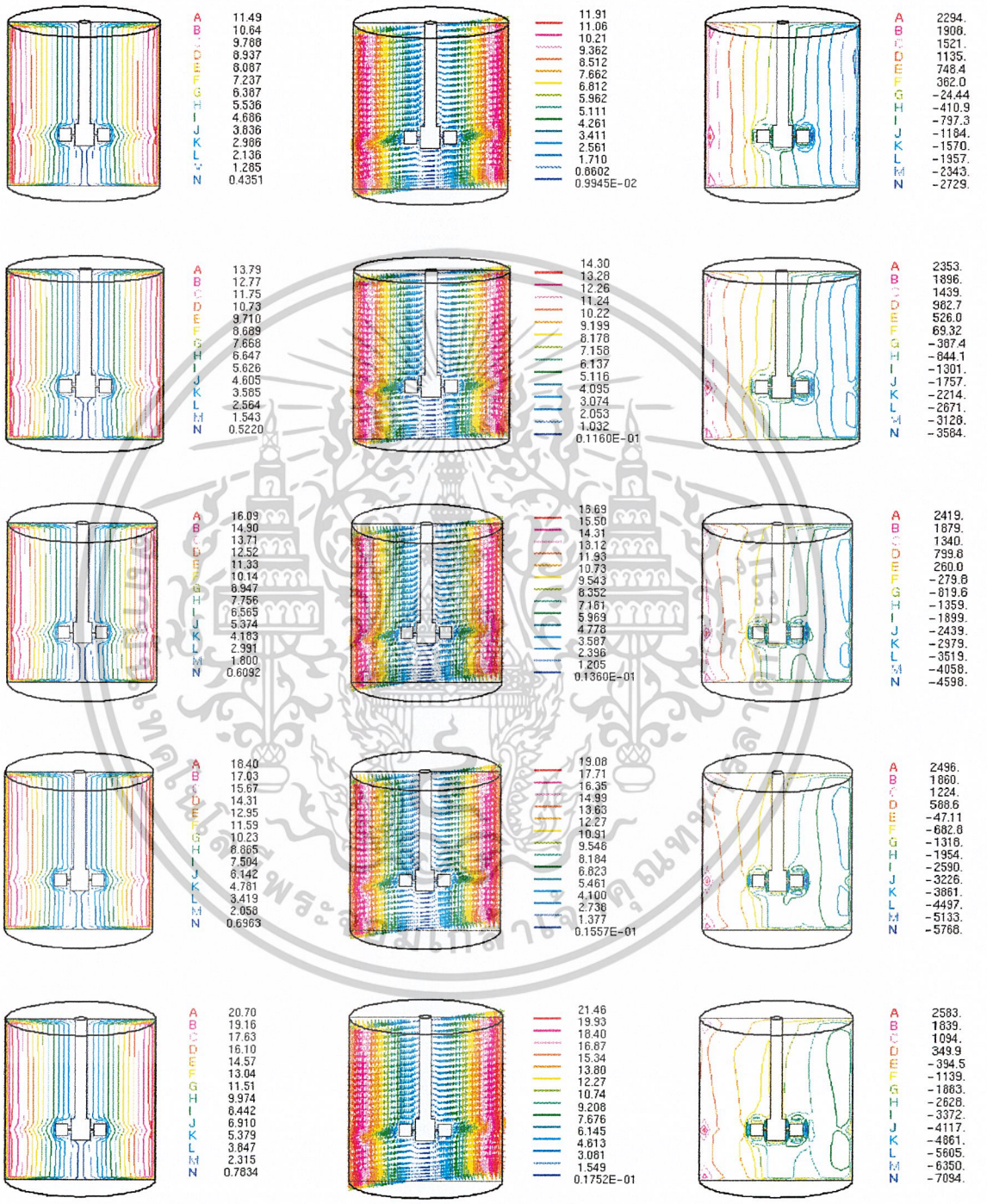
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค4 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ ใบกวนแบบ Turbine Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)



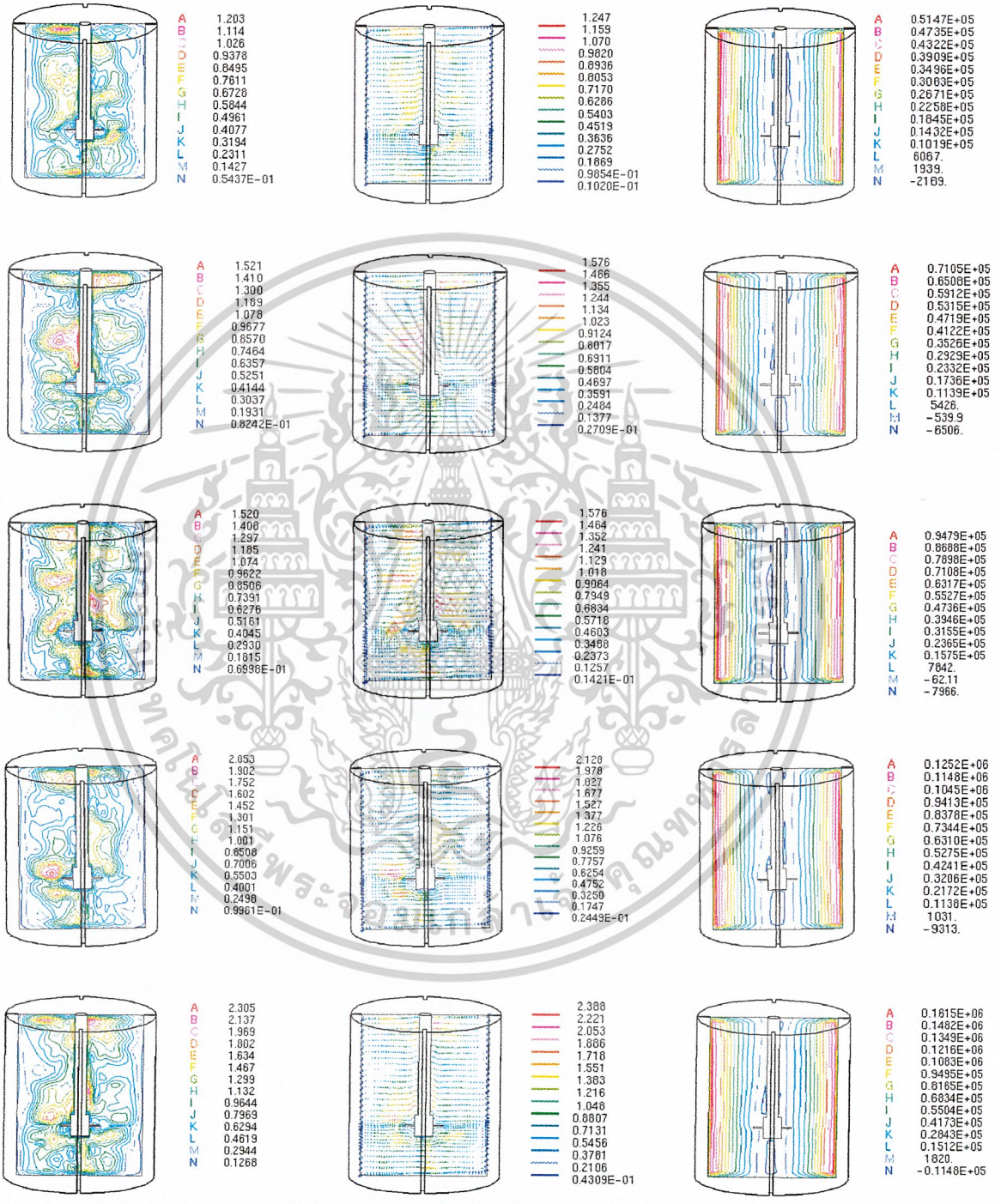
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค5 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้น้ำ เป็นผลิตภัณฑ์ ใบกวนแบบ Turbine Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



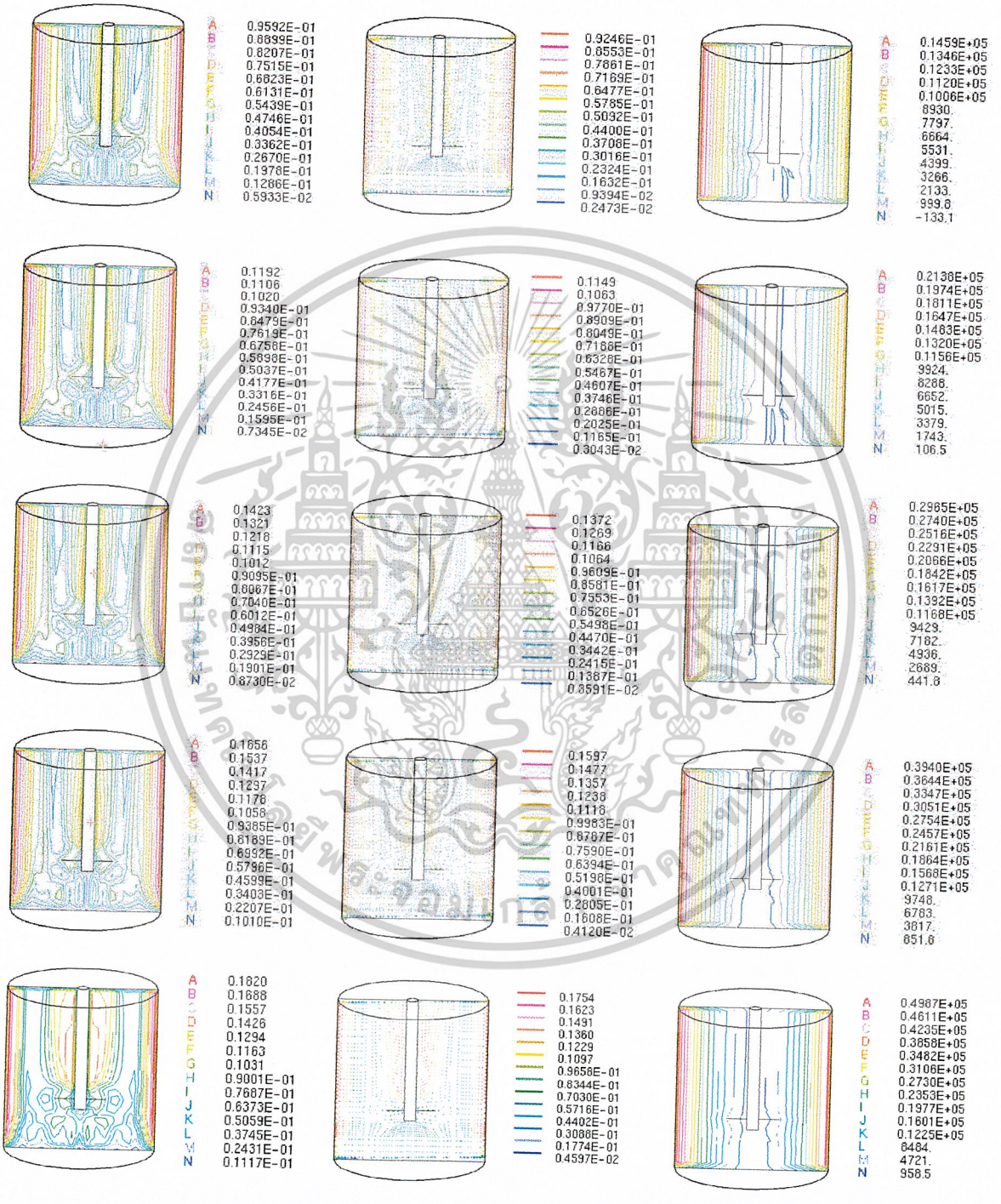
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค6 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Ketchup เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Helical Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)

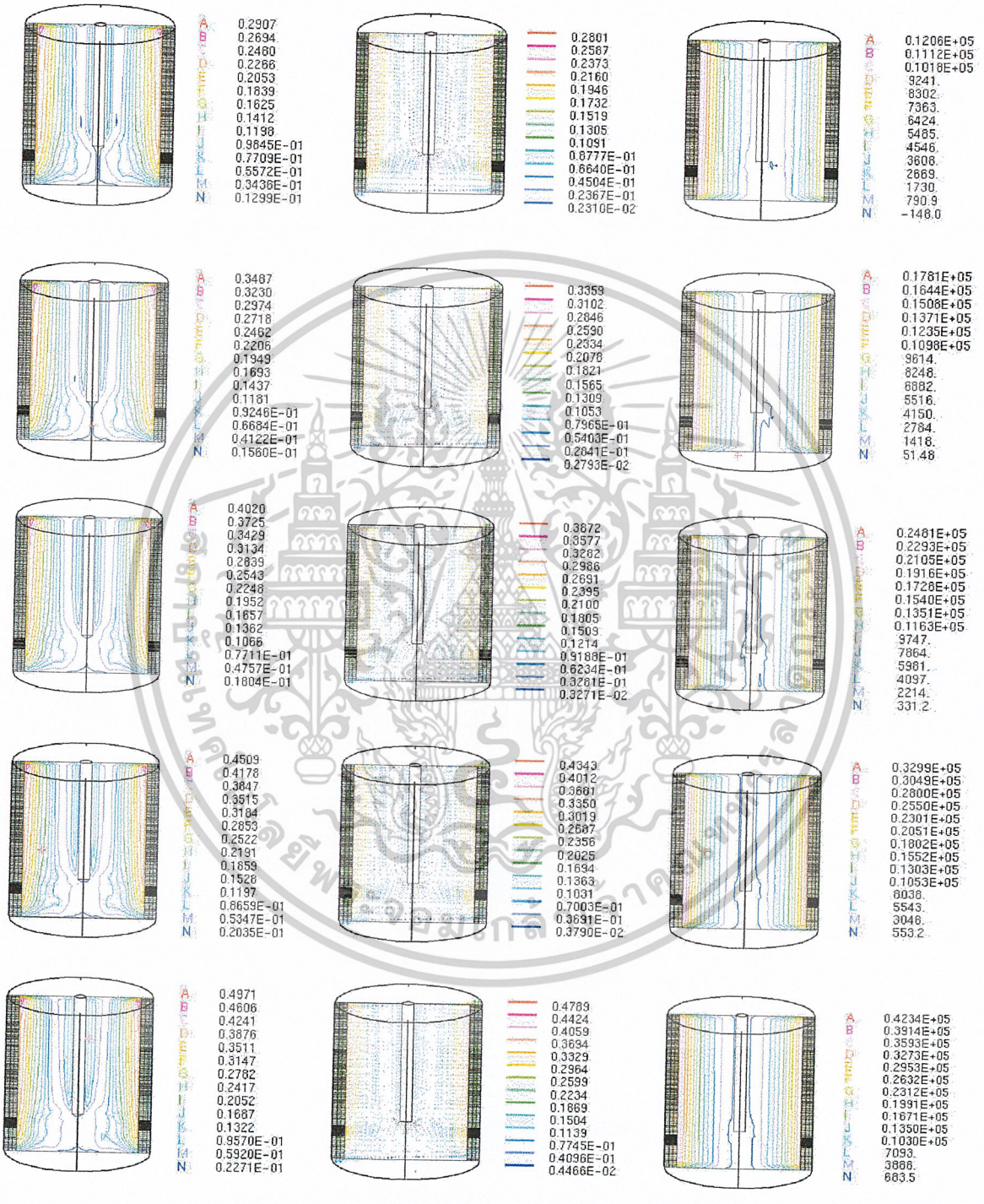


V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค7 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250,300, 350, 400 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)
โดยใช้ Ketchup เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Helical Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



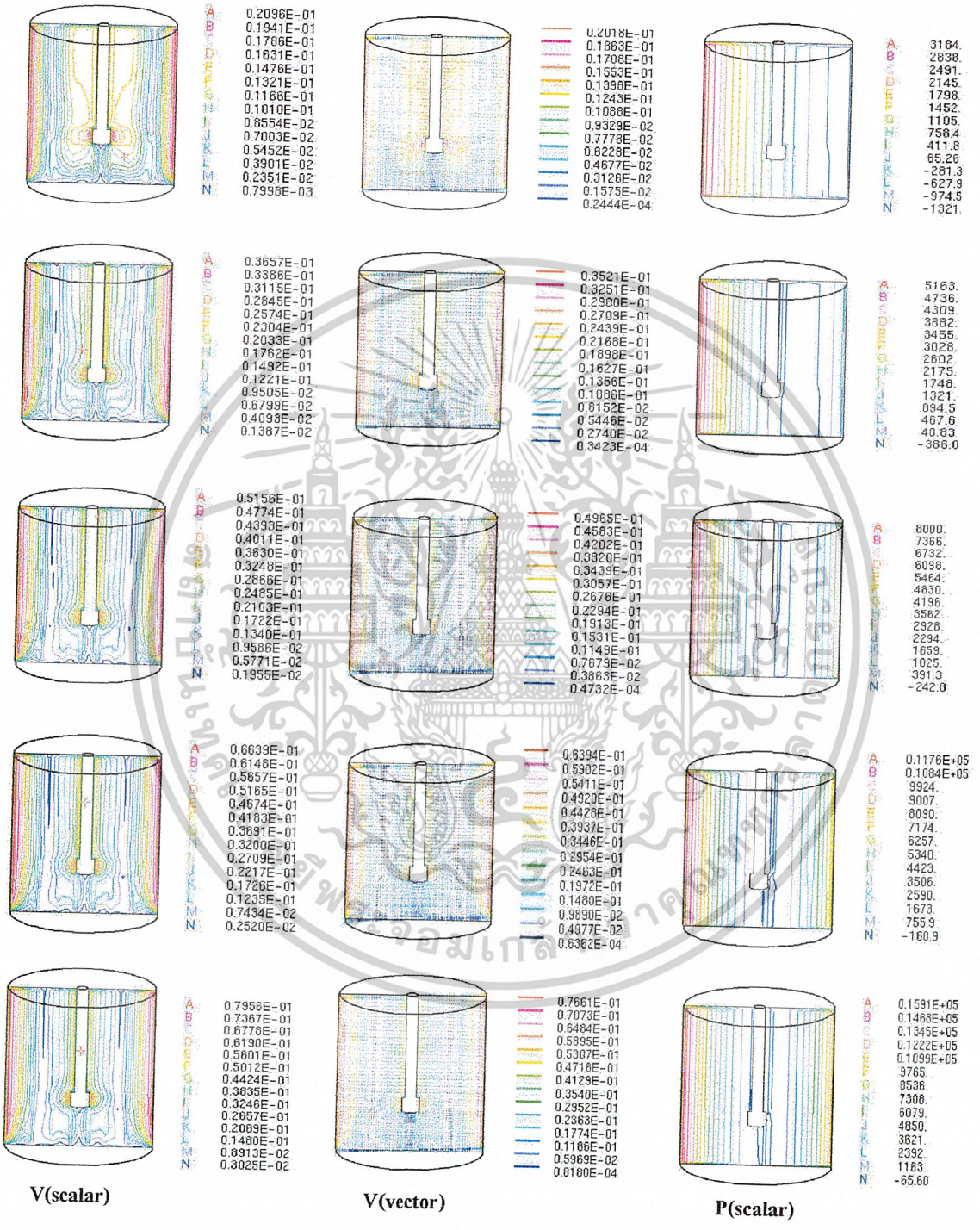
V(scalar) V(vector) P(scalar)

รูปที่ ค 8 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250,300, 350, 400 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง(Simulation)

โดยใช้ Ketchup เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Incline Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)

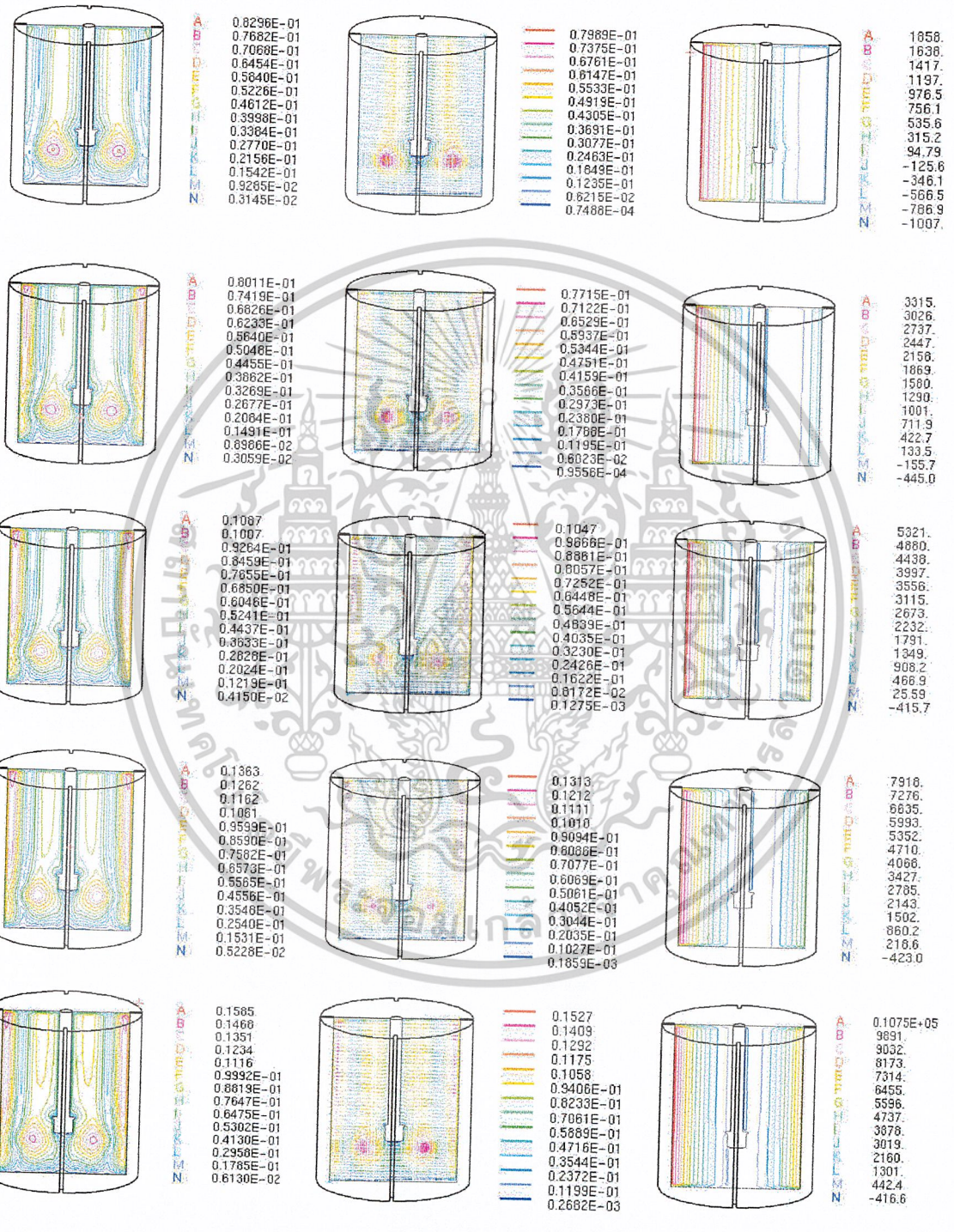


รูปที่ ค 9 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง(Simulation)

โดยใช้ Ketchup เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Incline Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



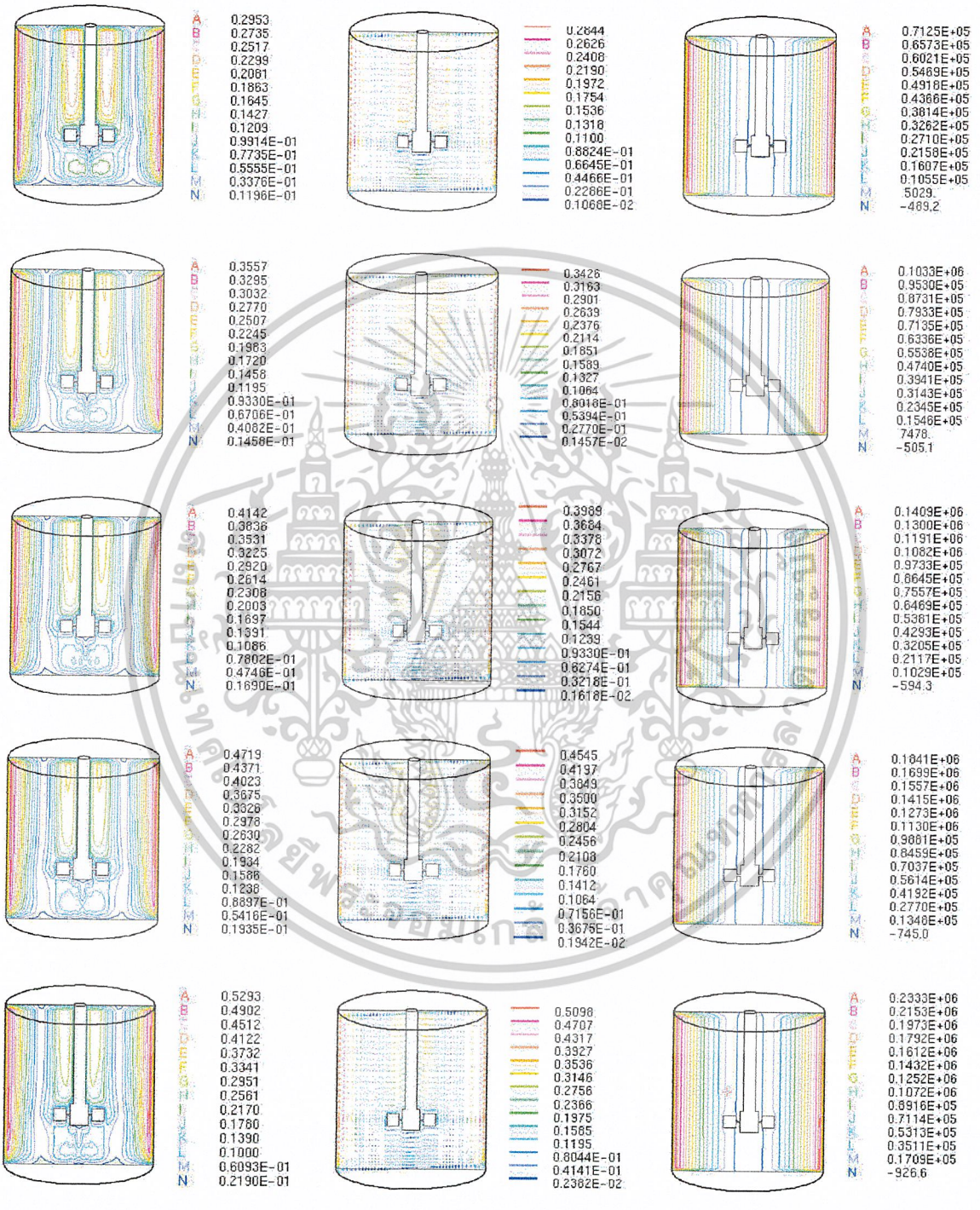
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 10 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Ketchup เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Turbine Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)



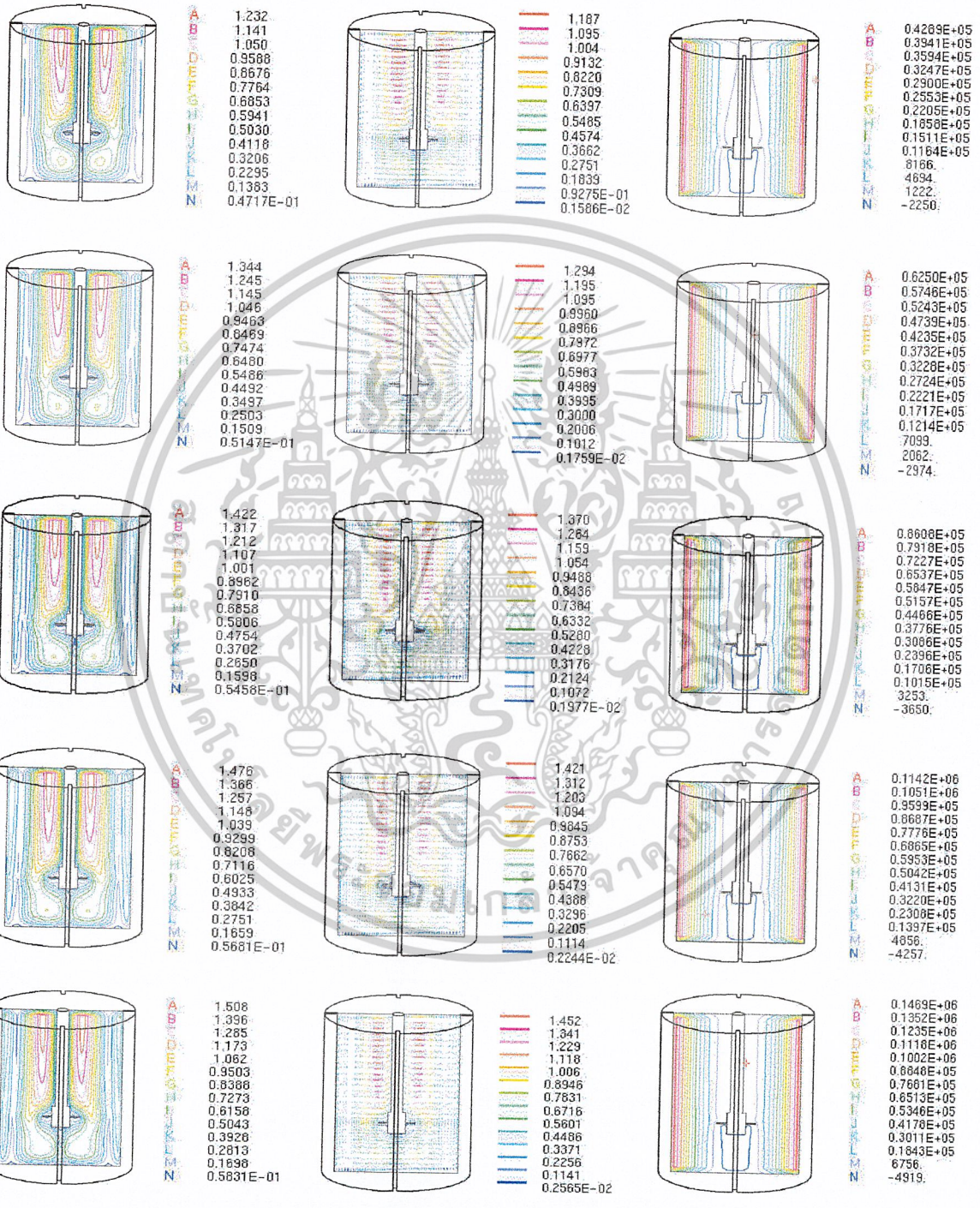
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 11 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Ketchup เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Turbine Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



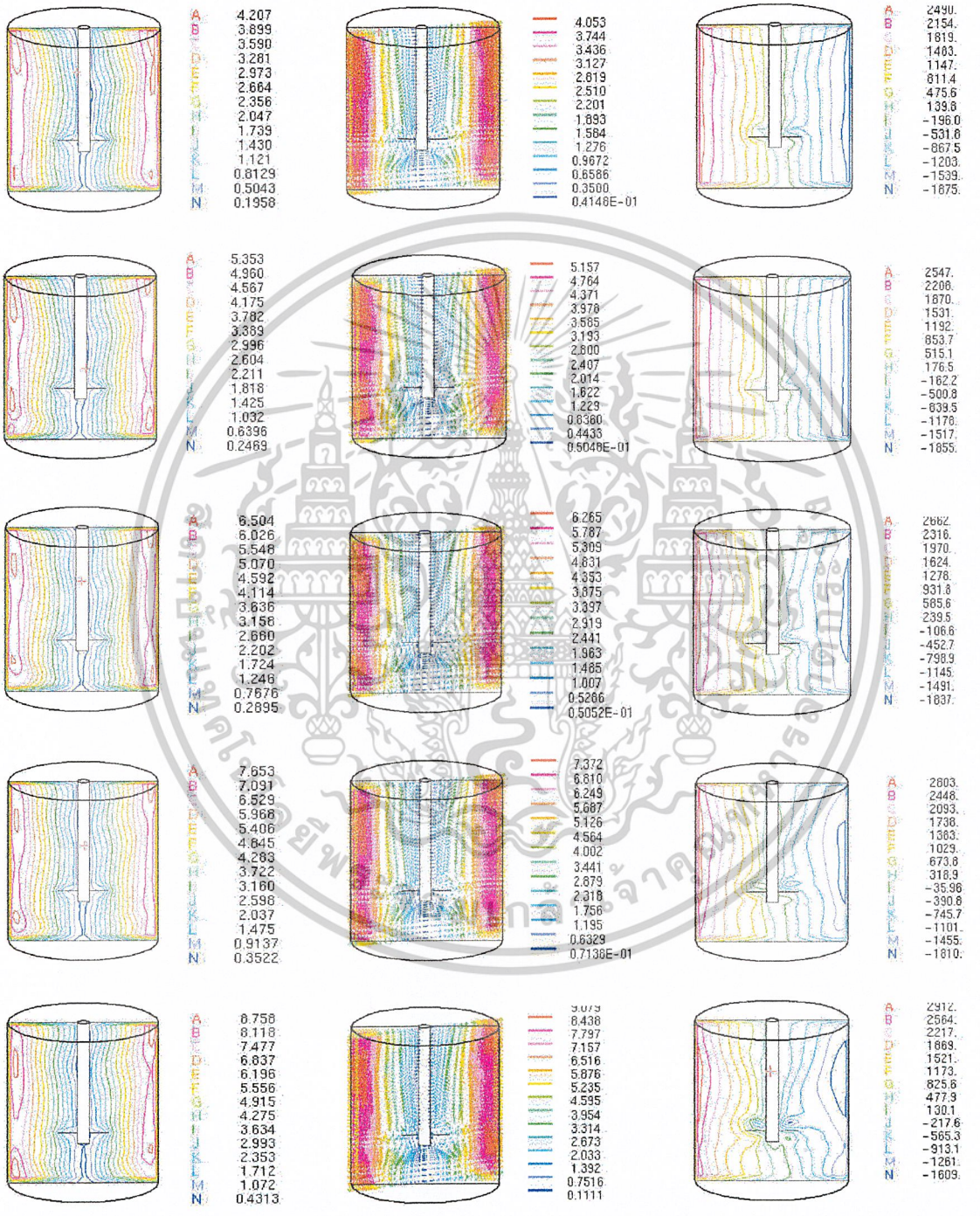
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 12 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวนที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Cream เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Helical Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)



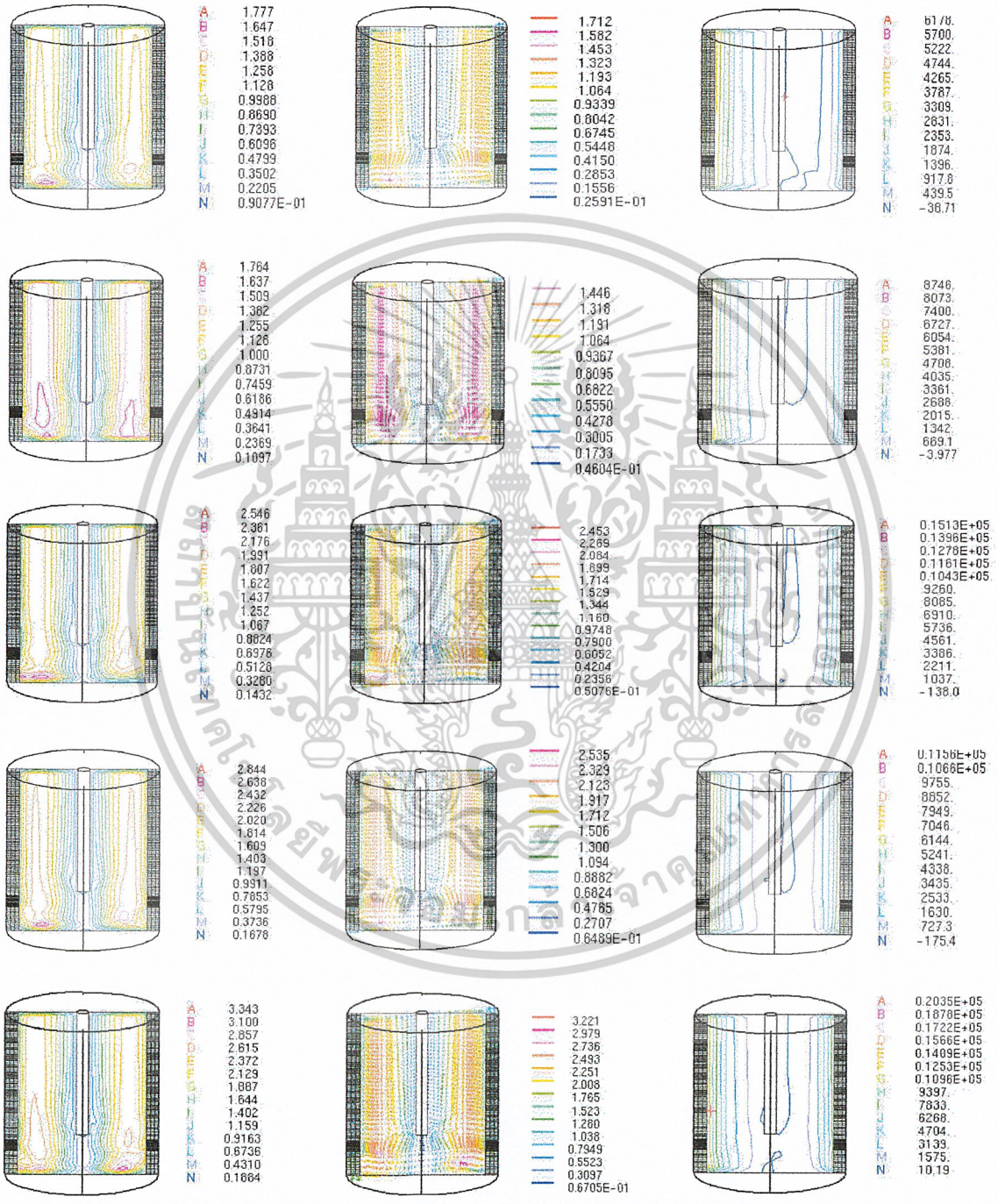
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 13 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250, 300, 350, 400 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Cream เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใบกวน Helical Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



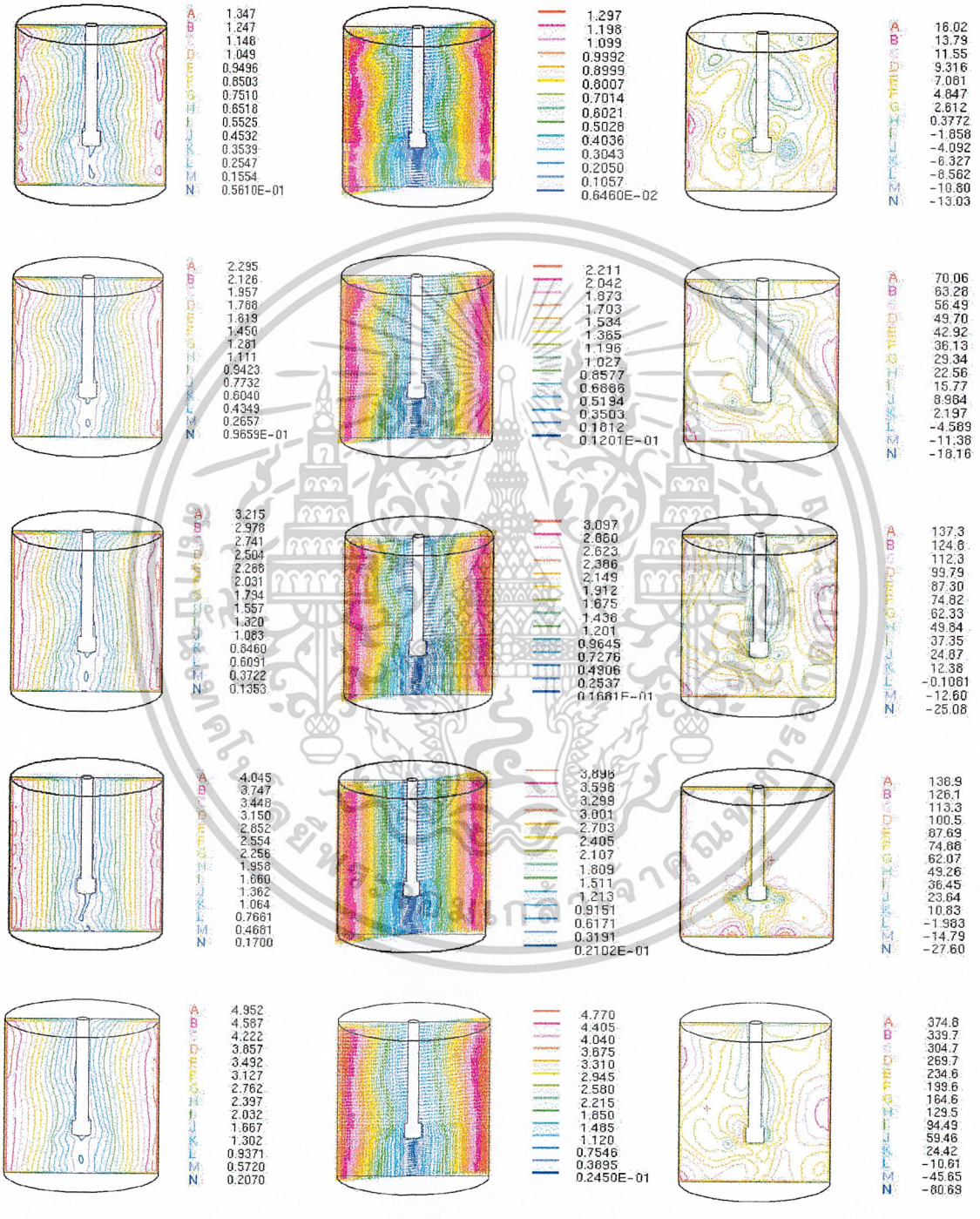
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 14 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250, 300, 350, 400 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง(Simulation)

โดยใช้ Cream เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Incline Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น (Unbaffle)



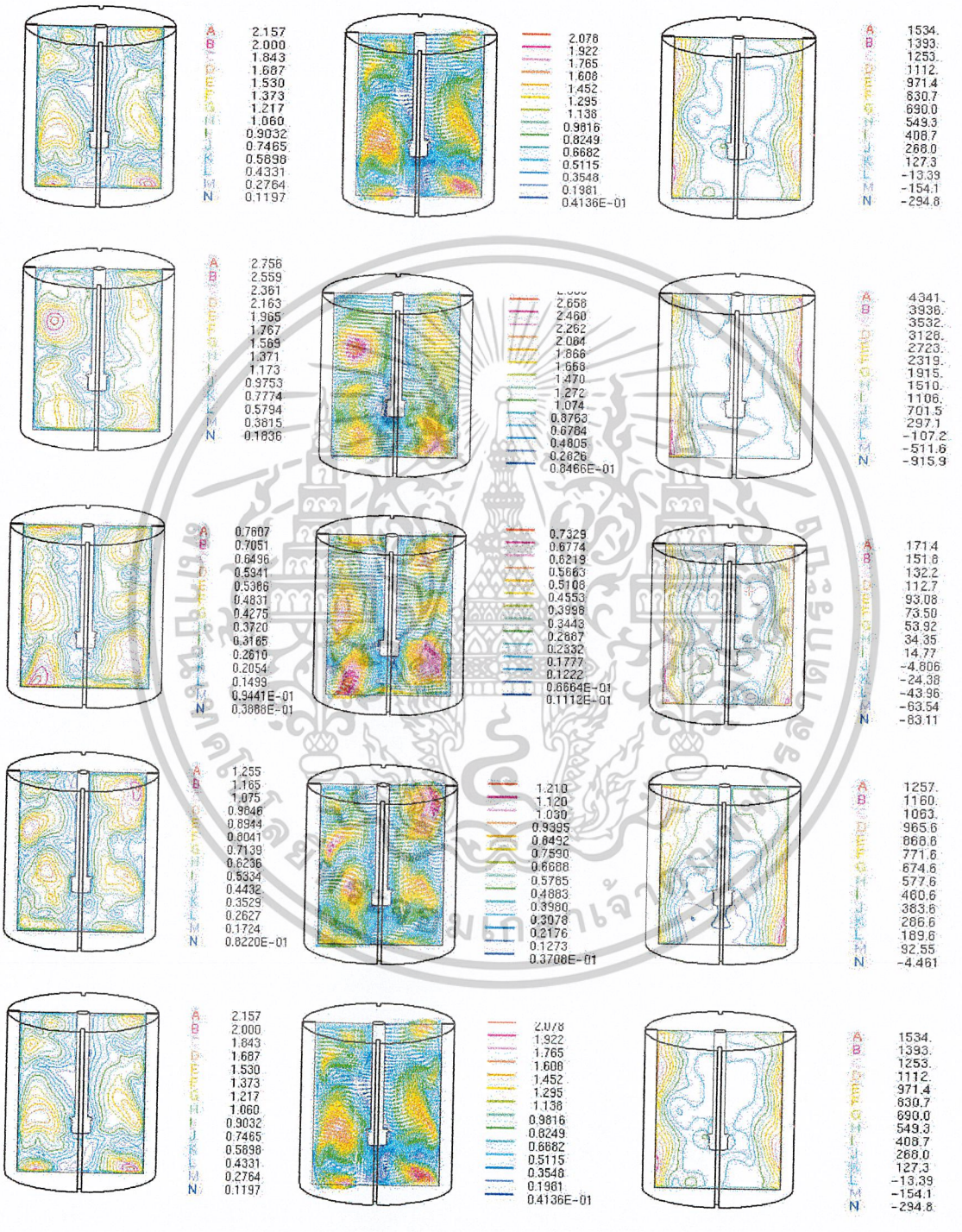
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 15 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการแสดงแบบจำลอง(Simulation)

โดยใช้ Cream เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Incline Blade แบบติดแผ่นกั้น (Baffle)



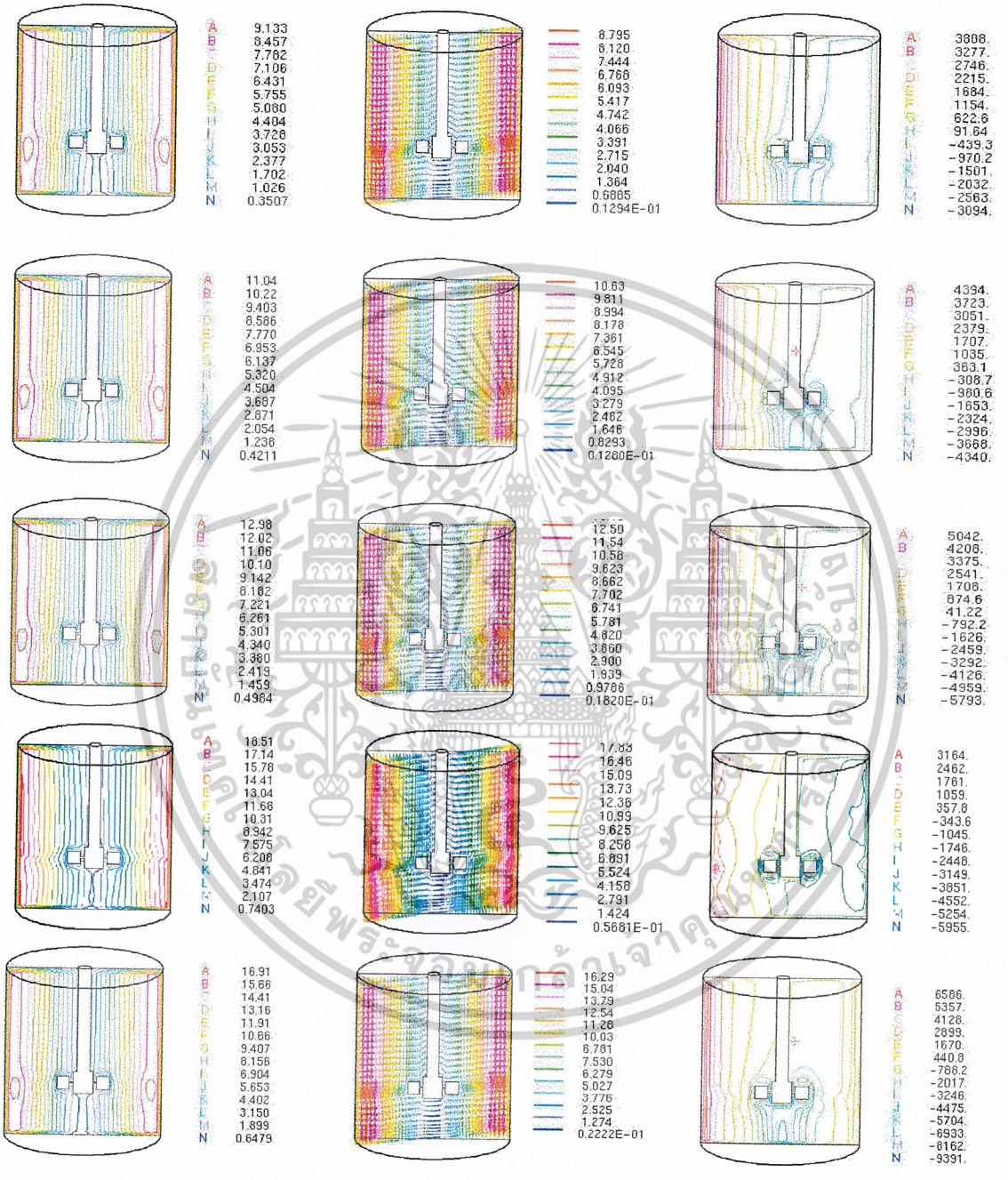
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค 16 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Cream เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Turbine Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น(Unbaffle)



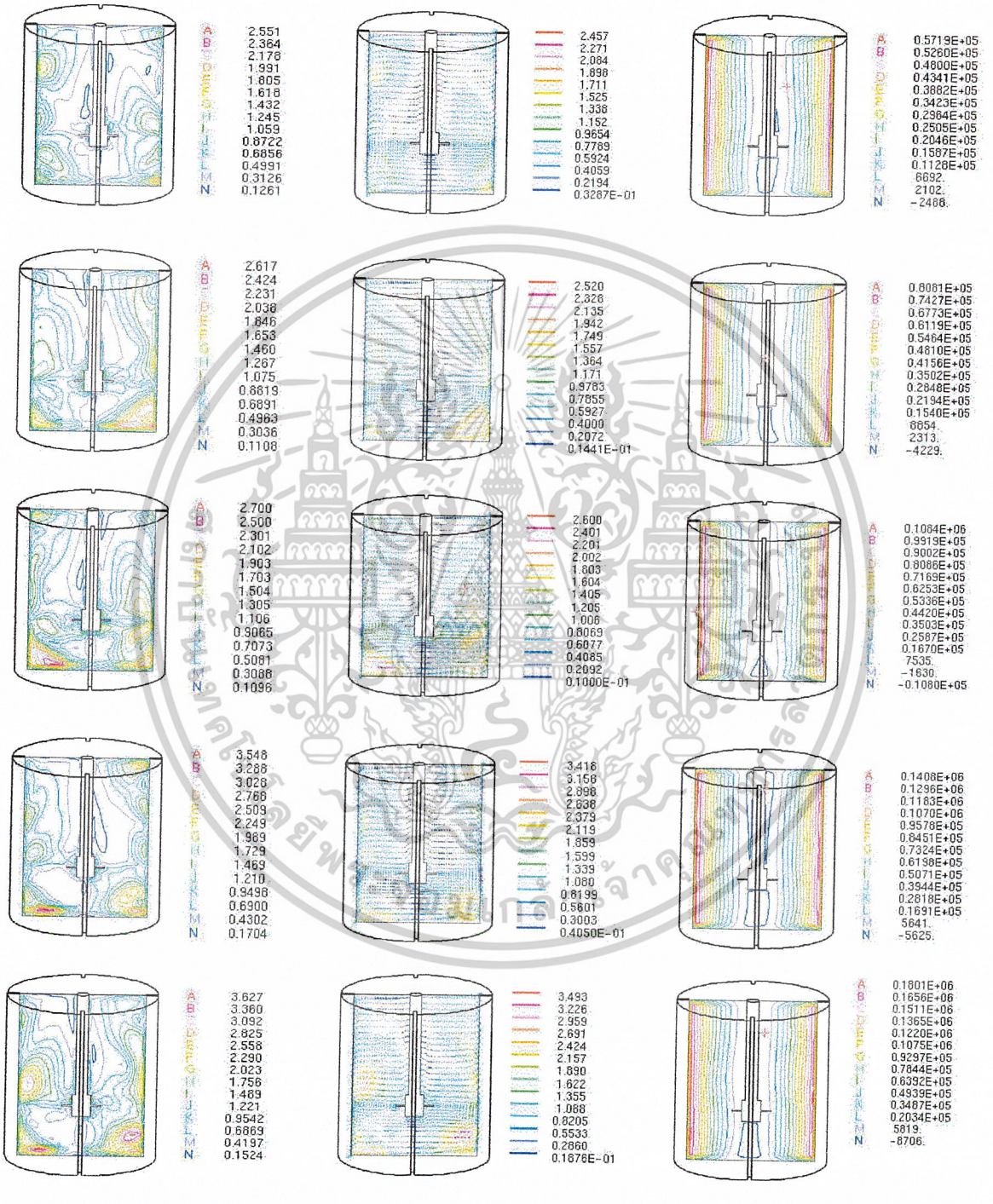
V (scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค17 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Cream เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Turbine Blade แบบติดแผ่นกั้น(Baffle)



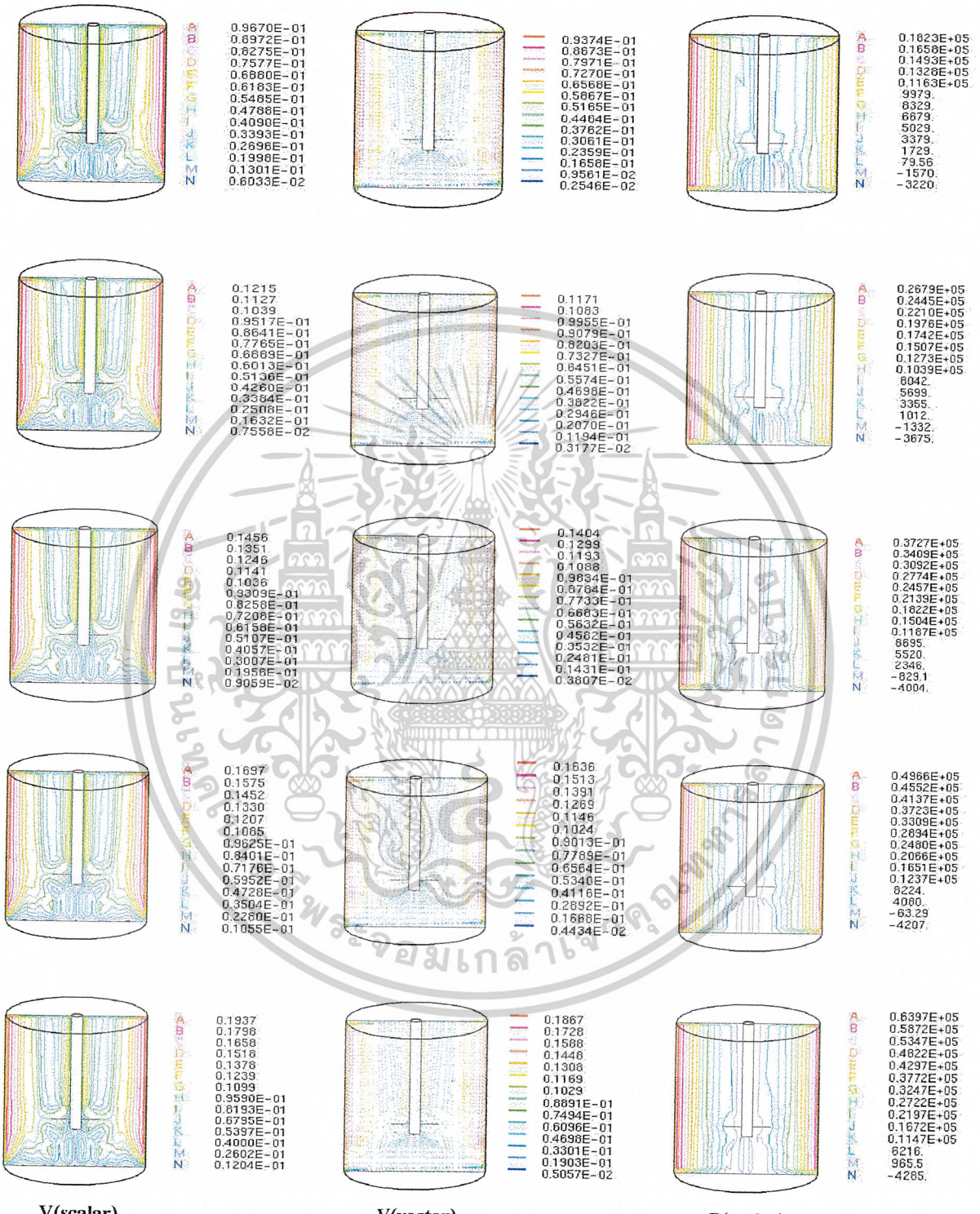
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค18 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Peanut Butterเป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Helical Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น(Unbaffle)

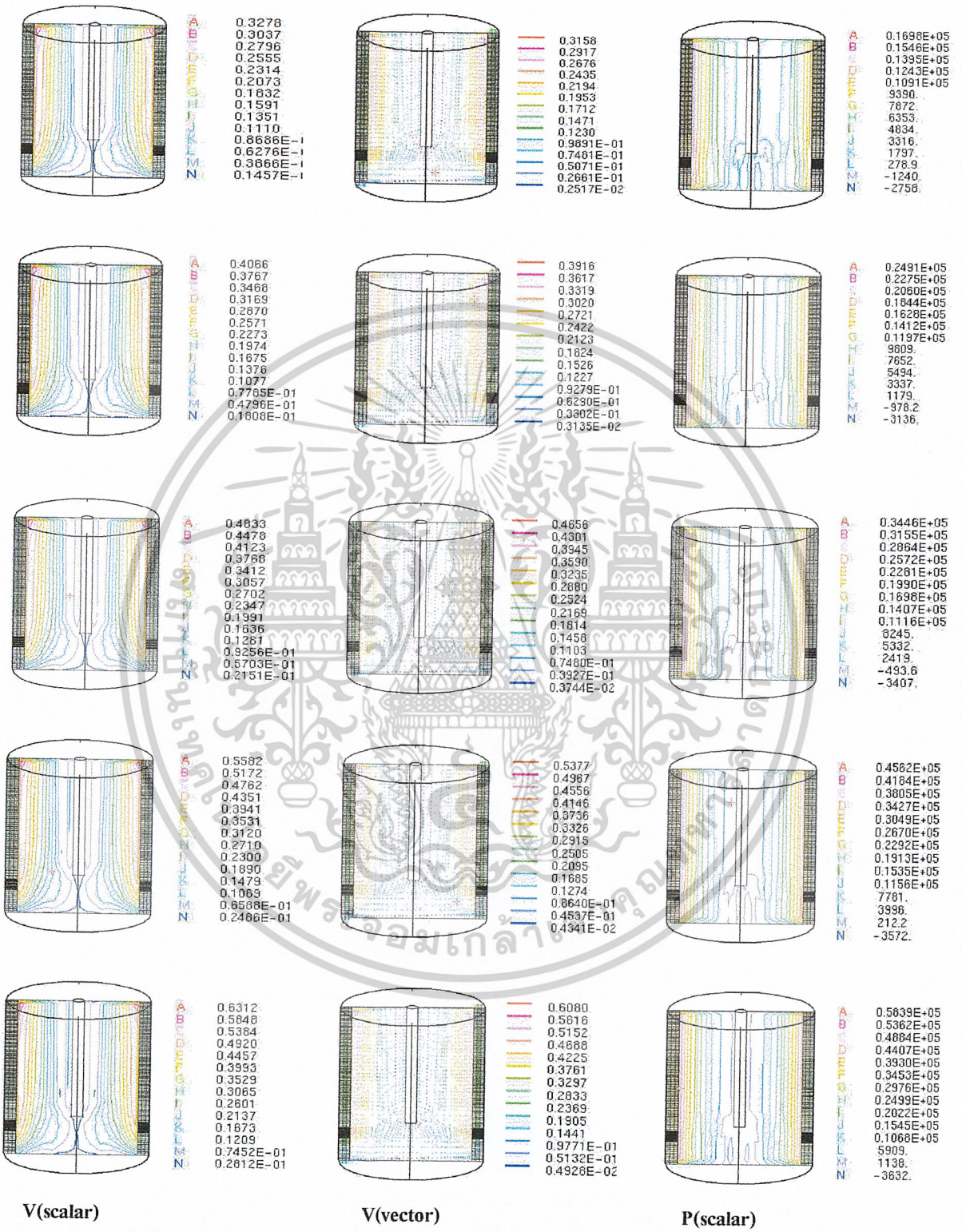


รูปที่ ค19 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250, 300, 350, 400 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Peanut Butter เป็นผลิตภัณฑ์ที่ใบกวน Helical Blade แบบติดแผ่นกั้น(Baffle)

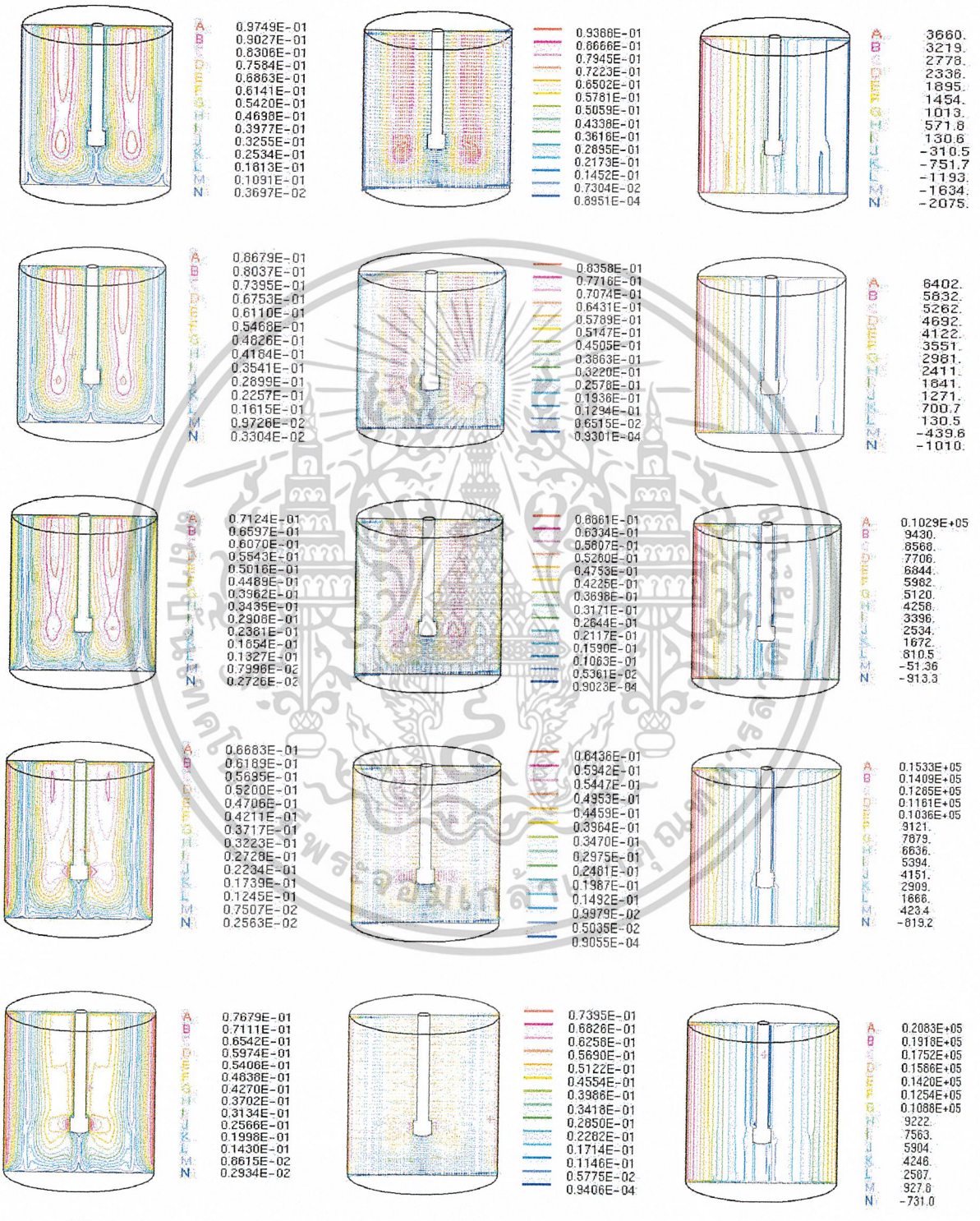


รูปที่ ค20 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 200, 250, 300, 350, 400 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Peanut Butter เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Incline Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น(Unbaffle)

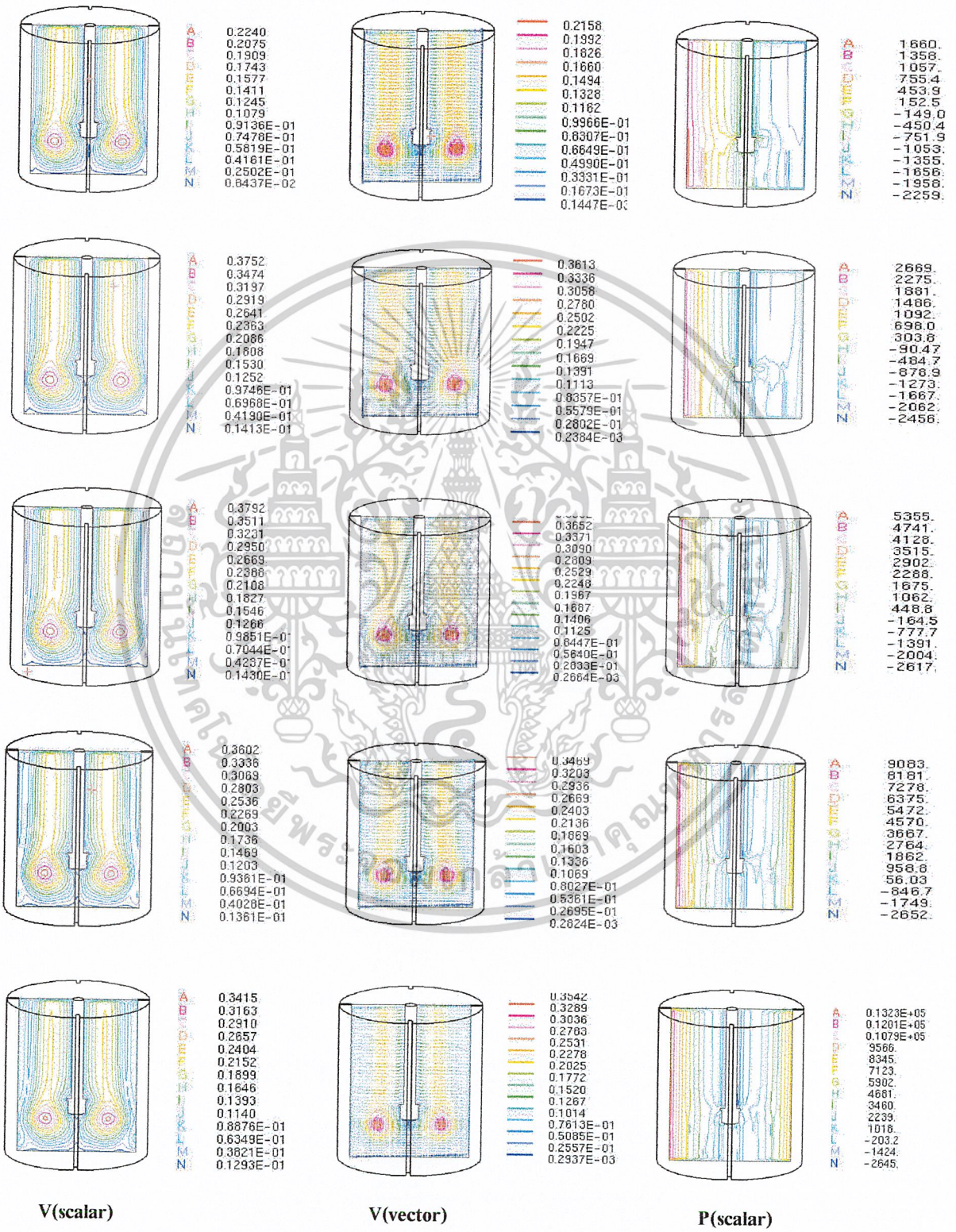


รูปที่ ค21 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Peanut Butter เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Incline Blade แบบติดแผ่นกั้น(Baffle)

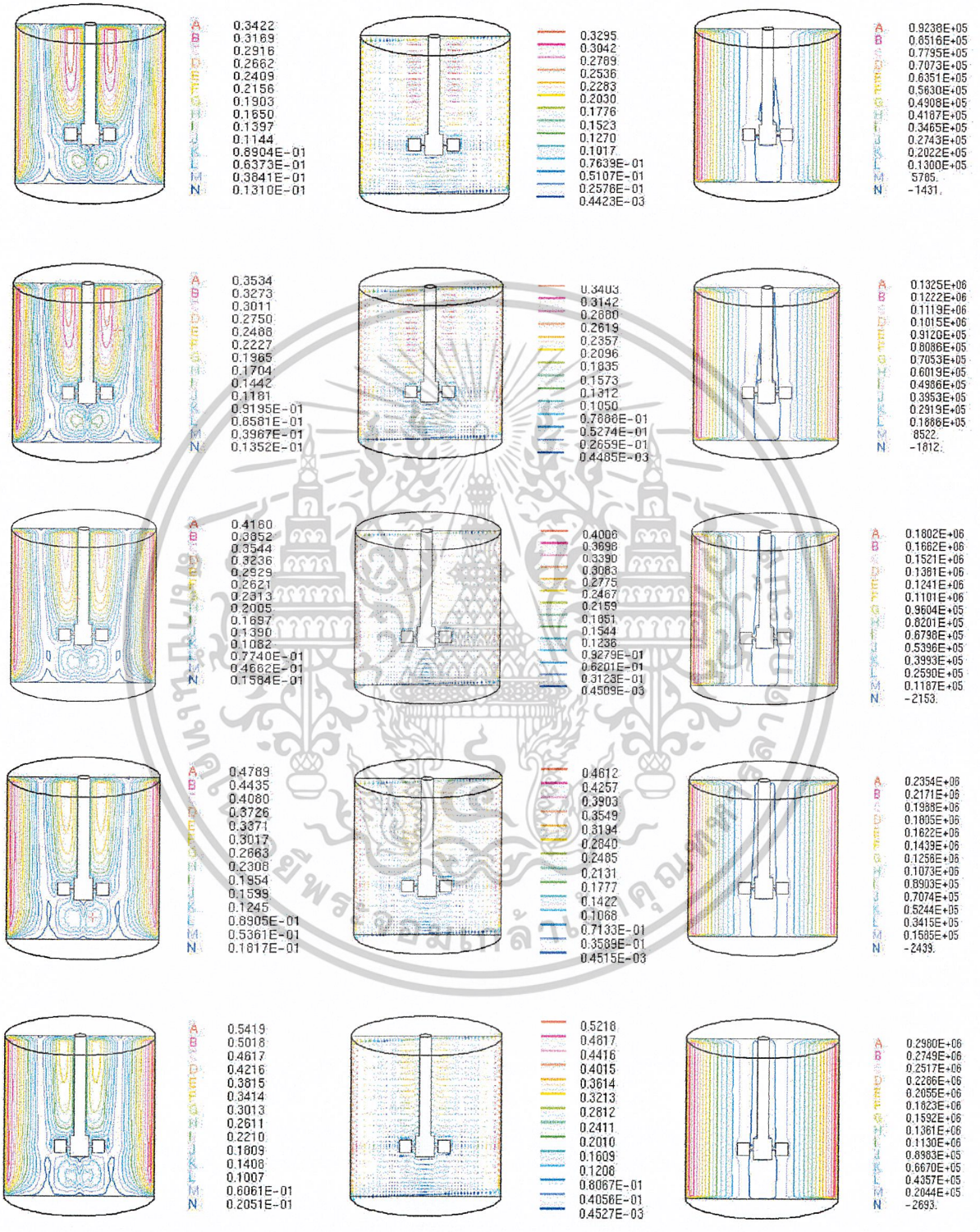


รูปที่ ค22 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 57, 97, 136, 175, 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Peanut Butter เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวนแบบ Turbine Blade แบบไม่ติดแผ่นกั้น(Unbaffle)



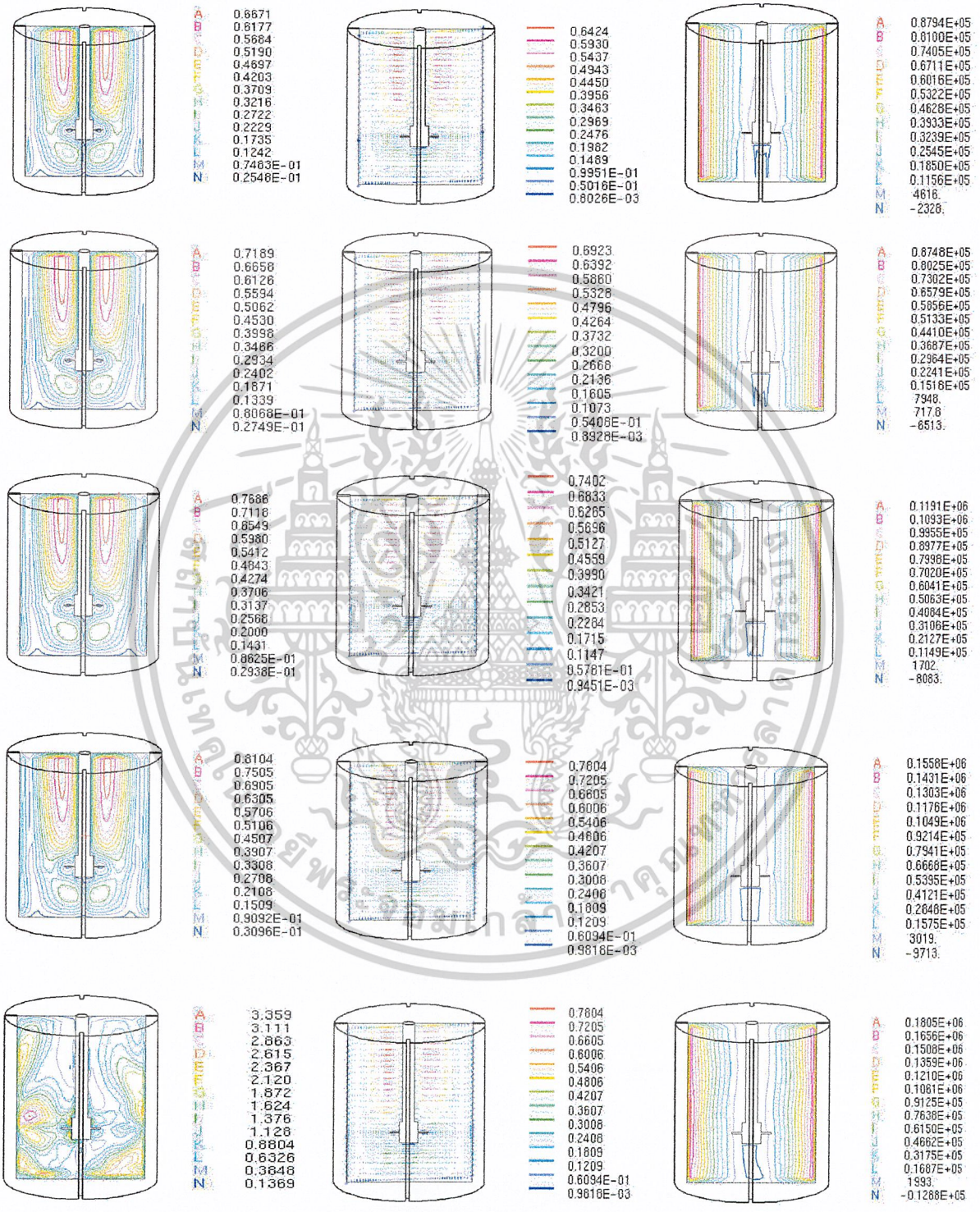
V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

รูปที่ ค23 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการแสดงแบบจำลอง (Simulation)

โดยใช้ Peanut Butter เป็นผลิตภัณฑ์ ที่ใบกวน Turbine Blade แบบติดแผ่นกั้น(Baffle)



V(scalar) **V(vector)** **P(scalar)**

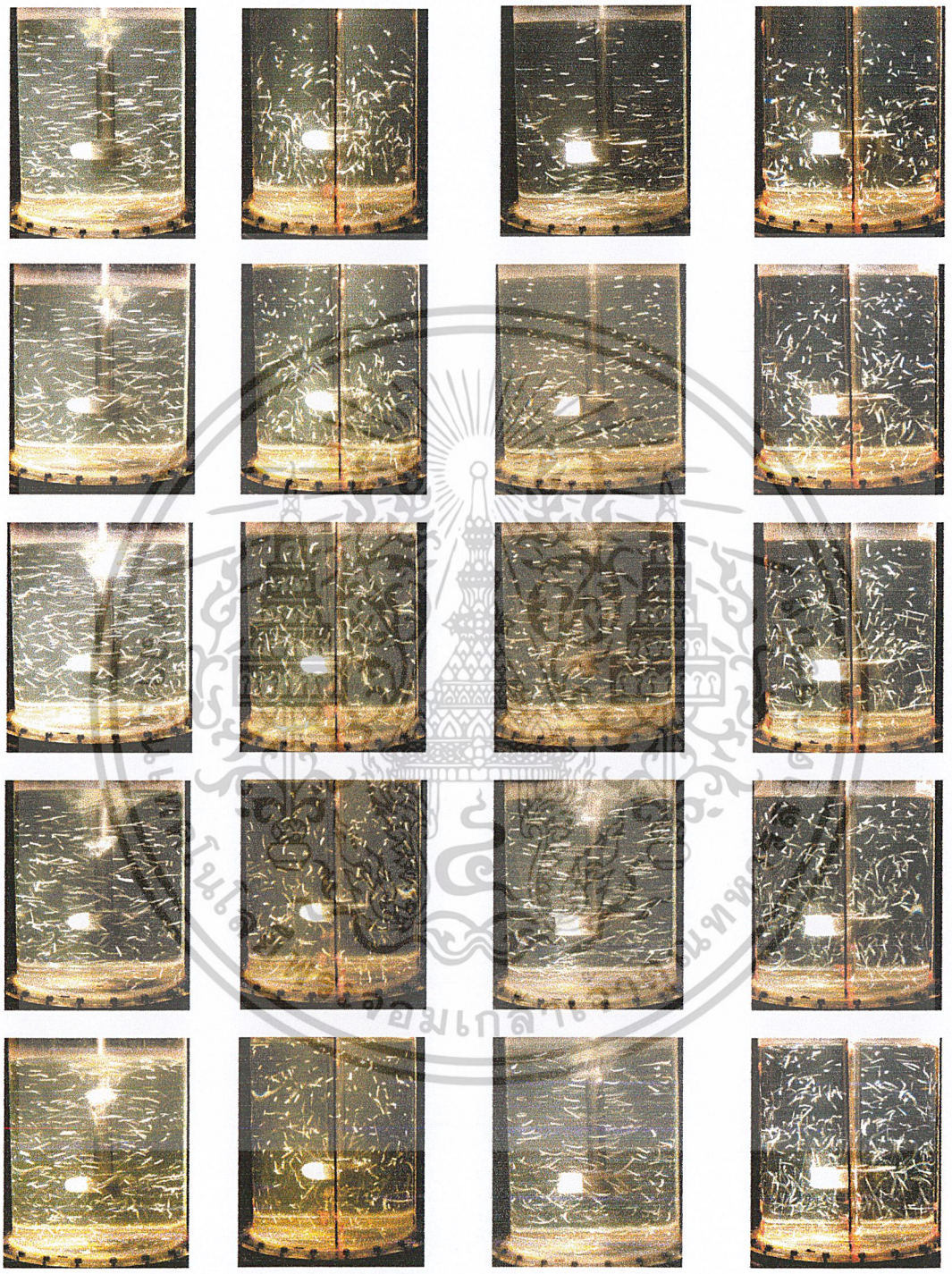
รูปที่ ค24 แสดงผลของความเร็วและความดันภายในถังกวน ที่ 500, 600, 700, 800, 900 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง
ผลของการทดลองจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลของการทดลองหาลักษณะเส้นการไหลของใบกวน Helial และ Incline ตามลำดับ



รูปที่ ง1 แสดงผลการทดลองจริงของใบ Helial ที่ไม่ติดและติดแผ่นกั้นที่ 200 250 300 350 และ400 rpm ตามลำดับ และใบ Incline ไม่ติดและติดแผ่นกั้นที่ 57 97 136 175 210 rpm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้