

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การปรับปรุงระบบการผสมเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์อุปโภคชนิดเหลว



๒๑  
๒๐๒๑  
๒๑/๒๑

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน.....**62686**  
วัน,เดือน,ปี.....**21 ส.ค. 2549**

.b.....**1-1k29443**  
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Modification of the Mixing Systems for the Production of Home and  
Personal Care Liquids Products**



**A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**


**2005**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

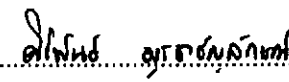
ปริญญานิพนธ์เรื่อง การปรับปรุงระบบการผสมเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์อุปโภค  
ชนิดเหลว  
โดย นายทรงพล โพธาขวัญประชา  
นางสาวนิลวรรณ บุญทวี  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม นาวาเอกพิชเชนทร์ ดันประเสริฐ  
ผู้อำนวยการฝ่ายผลิตกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล  
บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โซลคิงส์ จำกัด

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)

  
.....กรรมการ  
(อ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

  
.....กรรมการ  
(อ.ศิริพันธ์ มุรธาธัญลักษณ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การปรับปรุงระบบการผสมเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์อุปโภค ชนิดเหลว
โดย	นายทรงพล โพธาขวัญประชา นางสาวนิลวรรณ บุญทวี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อัญชสิทธิ์ วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	นาวาเอกพิชเชนทร์ ต้นประเสริฐ ผู้อำนวยการฝ่ายผลิตกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด
ปริญญานิพนธ์	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### บทคัดย่อ

โครงการนี้เสนอแนวทางการปรับปรุงถึงผสมหลักขนาด 10 ตันและหน่วยสนับสนุนที่ใช้ผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทเพื่อผลิตแชมพูชันซิล และถึงผสมหลักขนาด 6 ตันและหน่วยสนับสนุนที่ใช้กับแชมพูชันซิลเพื่อผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ซึ่งเป็นการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรการผลิตที่มีอยู่ตามนโยบายของบริษัทที่ต้องการเพิ่มกำลังการผลิตแชมพูชันซิลซึ่งมีการแข่งขันทางการตลาดสูงและมีราคาขายต่อหน่วยสูงกว่า เพื่อครอบครองส่วนแบ่งทางการตลาดและตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคภายใต้ต้นทุนที่เหมาะสม ในการจำลองกระบวนการผสมใช้โปรแกรม Star CD version 3.24 หาอัตราเร็วการผสมและชนิดของใบกวน ที่จะได้ผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่มีคุณภาพตามมาตรฐานของบริษัท จากผลของการจำลองกระบวนการและการทดสอบในหน่วยทดลองผลิต สรุปได้ว่าสามารถใช้ถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน ซึ่งเป็นถึงผสมแบบมีกรีบผลิตแชมพูชันซิลได้ แต่ถ้าต้องการผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทด้วยถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน จะต้องปรับปรุง โดยติดกรีบ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้อาจเป็นแบบแผ่นหรือแบบมีเปลือกหุ้มก็ได้ เมื่อวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ถ้าต้องลงทุนปรับปรุงระบบการผสมเท่ากับ 5,838,000 บาท จะคืนทุนภายใน 5 เดือน

คำสำคัญ การกวน การผสม ลักษณะการไหล เครื่องผสมแบบกะ การจำลองกระบวนการ

Report Title                    Modification of the Mixing Systems for the Production of Home and  
Personal Care Liquids Products

By                                    Mr. Songphon Phothakwanpracha  
Miss Ninlawan Boontawee

Advisor                         Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

Co-advisor                    Captain Pichayane Tanprasert R.T.N  
Manufacturing Director – Personal Care  
Unilever Thai Holding Limited

Report for                      Bachelor Degree in Chemical Engineering  
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering  
King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang

### Abstract

This project proposes a use of a 10-ton main mixer and its supporting facilities which are used to produce Comfort fabric conditioner to produce Sunsilk shampoo, and a 6-ton main mixer and other facilities which are used to produce Sunsilk shampoo for Comfort fabric conditioner to make the most benefit of the existing production resources. One of the company policies is to increase the production capacity of Sunsilk shampoo which has higher price per unit and is highly competitive in the market of personal care products. In this work, the Star CD version 3.24 was used to simulate the mixing rate and type of impeller for the production of target products within quality standards. The simulation results and the experimental results in the Pilot Plant of the company showed that the 10-ton main mixer with baffles can be shifted to produce Sunsilk shampoo without any modifications. However, for the production of Comfort fabric conditioner in the 6-ton main mixer, the baffles must be installed. Either a plate heat exchanger or a jacket-type one can be used. Based on the calculation, the investment cost of the modifications is about 5,838,000 baht with the payback period of 5 months.

Keywords    Agitation, Mixing, Flow pattern, Batch mixer, Simulation

# กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้บริหาร ทีมงาน และพนักงานทุกท่านของบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด ที่ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาการทำวิจัย คุณคงศักดิ์ พานิช อธิการบดี ผู้อำนวยการฝ่ายผลิต และ ดร. วิวรรณ กฤษณาสิมะ รองประธานกรรมการบริหาร ฝ่ายผลิตที่ให้โอกาสทำโครงการที่บริษัท คุณสุเมธ โรจนดำรงการ ผู้จัดการแผนกผลิตด้านส่วนผสม ผลิตภัณฑ์น้ำยาเครื่องใช้ในครัวเรือนและเครื่องใช้ส่วนบุคคล คุณชัชวาล วรเจริญ หัวหน้าแผนก ผลิตด้านส่วนผสมผลิตภัณฑ์น้ำยาเครื่องใช้ในครัวเรือนและเครื่องใช้ส่วนบุคคล คุณศิริวัชร ทองเกิด และทีมงานที่บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด ที่ให้คำปรึกษา และอำนวยความสะดวก ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ โครงการ โครงการงานอุตสาหกรรมและวิจัยสำหรับนักศึกษาปริญญาตรี (Industrial and Research Projects for Undergraduate Students: IRPUS) ประจำปี 2548 ของ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด และคณะ วิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังที่สนับสนุนเงินทุนในการ ทำวิจัยและเงินทุนการศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล. ที่อนุเคราะห์ การใช้เครื่องวัดความชื้น

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สจล. ผศ.ดร. จารุวัตร เจริญสุข คุณนิวัฒน์ ภูเจริญ คุณวรโรจน์ วุ่นแป้น และสำนักวิจัยและบริการ คอมพิวเตอร์ สจล. ที่อนุเคราะห์การใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรม Star-CD Version 3.24

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา และ นาวาเอกพิชเชนทร์ ต้นประเสริฐ ผู้อำนวยการฝ่ายผลิตกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาในการทำงาน และตรวจ แก้ไขรายงาน ทำให้ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อ.รินฤดี เบญจางคประเสริฐ และ อ.ศิริพันธ์ มุรธาชัยกุลเกษม คณะกรรมการสอบปริญญาานิพนธ์

ความเห็นในรายงานผลการวิจัยนี้เป็นของผู้วิจัย หน่วยงานสนับสนุนทุนวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไปและไม่ต้องรับผิดชอบต่อความเห็นที่เสนอนั้น

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุน ให้กำลังใจ และคำแนะนำตลอดมา หากมีสิ่งผิดพลาดประการใดผู้วิจัยขออภัยมา ณ ที่นี้

นายทรงพล โปธาขวัญประสา

นางสาวนิลวรรณ บุญทวี

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 ความหมายของการกวน และการผสม (Agitation and Mixing).....	6
2.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการกวนผสม.....	6
2.3 กลไกการผสมของเหลวในถังผสมทรงกระบอกแนวตั้ง.....	7
2.4 ตัวอย่างปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบกวนผสม.....	7
2.5 ของเหลวหนืด (Viscous liquid).....	13
2.6 ประเภทของของเหลว.....	13
2.7 รูปแบบต่างๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน.....	16
2.8 การแลกเปลี่ยนความร้อนในถังผสม.....	19
2.9 Computational Fluid Dynamics (CFD).....	20
บทที่ 3 การดำเนินโครงการและผลการดำเนินโครงการ.....	23
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	23
3.2 อุปกรณ์.....	23
3.3 การศึกษาสมบัติต่างๆ ทางกายภาพและทางเคมีของแอมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร และของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร.....	23

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4 การเปรียบเทียบการผสมแซมพูชั้นซึลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทเมื่อใช้ใบกวน ชนิดต่างๆ โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	25
3.5 การจำลองการผสมจากการเปลี่ยนถังผสมด้วย โปรแกรม Star CD version 3.24.....	27
3.6 การทดลองผสมชั้นซึลและคอมฟอร์ทในหน่วยทดลองผลิต.....	39
บทที่ 4 สรุปผลการดำเนินการ.....	44
เอกสารอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก.....	48
ภาคผนวก ก. ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแซมพูชั้นซึล ทั้ง 8 สูตร และน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ทั้ง 4 สูตร.....	48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ประโยชน์จากรูปแบบโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	19
ตารางที่ 3.1 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซัลฟิด ทั้ง 8 สูตร.....	24
ตารางที่ 3.2 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับ ผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร.....	24
ตารางที่ 3.3 ชนิดและขนาดของใบกวนชนิดต่างๆ.....	25
ตารางที่ 3.4 ชนิดของใบกวนต่อสมบัติของแชมพูชั้นซัลฟิด.....	26
ตารางที่ 3.5 ชนิดของใบกวนต่อสมบัติของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท.....	26
ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบสมบัติของแชมพูชั้นซัลฟิดที่ชุดการทดลองต่างๆ.....	40
ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบสมบัติของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทที่ชุดการทดลองต่างๆ.....	42
ตารางที่ 3.8 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในถังผสมต่อสมบัติของ น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท.....	43
ตารางที่ 4.1 รายละเอียดต้นทุนที่ใช้ปรับปรุงระบบการผสม.....	44
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบค่าไรท์ที่เพิ่มขึ้นของแชมพูชั้นซัลฟิดและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท.....	45
ตารางที่ 4.3 รายละเอียดมูลค่าที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตตามแผน.....	46
ตารางที่ ก.1 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชั้นซัลฟิด สูตร SPC.....	49
ตารางที่ ก.2 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชั้นซัลฟิด สูตร SPD.....	50
ตารางที่ ก.3 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชั้นซัลฟิด สูตร SPE.....	51
ตารางที่ ก.4 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชั้นซัลฟิด สูตร SPO.....	52
ตารางที่ ก.5 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชั้นซัลฟิด สูตร SPS.....	53
ตารางที่ ก.6 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชั้นซัลฟิด สูตร SPU.....	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ ก.7 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชันซิด สูตร SPW.....	55
ตารางที่ ก.8 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพู ชันซิด สูตร SPY.....	56
ตารางที่ ก.9 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCB.....	57
ตารางที่ ก.10 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCO.....	58
ตารางที่ ก.11 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCP.....	59
ตารางที่ ก.12 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCV.....	60

# สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 ถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ.....	2
รูปที่ 1.2 ถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ.....	3
รูปที่ 2.1 ลักษณะใบกวนของถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน.....	8
รูปที่ 2.2 ลักษณะใบกวนของถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน.....	8
รูปที่ 2.3 มาตรฐานการออกแบบถึงผสมและใบพัด.....	10
รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์กับตัวเลขกำลัง.....	12
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการทำงานกับความเค้นเฉือนของ ของเหลวประเภทต่างๆ.....	15
รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	17
รูปที่ 2.7 ลักษณะการไหลของของไหลผ่านผิวหน้าของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน.....	18
รูปที่ 3.1 ใบกวนที่ 1 ถึง ใบกวนที่ 5.....	25
รูปที่ 3.2 ถึงผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ถูกขึ้นรูปด้วย โปรแกรม Unigraphics NX 2.....	27
รูปที่ 3.3 ถึงผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ถูกสร้างเมชด้วย โปรแกรม Pro-AM.....	27
รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของความหนืดในถึงผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ความเร็วรอบของใบกวน 30, 45 และ 60 รอบต่อนาที.....	28
รูปที่ 3.5 ถึงผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Toothed ที่ถูกขึ้นรูปด้วย โปรแกรม Unigraphics NX 2.....	29
รูปที่ 3.6 ถึงผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Toothed ที่ถูกสร้างเมชด้วย โปรแกรม Pro-AM.....	29
รูปที่ 3.7 การกระจายตัวของความหนืดในถึงผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Toothed ที่ความเร็วรอบของใบกวน 30, 45 และ 60 รอบต่อนาที.....	30
รูปที่ 3.8 ถึงผสม 6 ตัน แบบไม่มีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ถูกขึ้นรูปด้วย โปรแกรม Unigraphics NX 2.....	31
รูปที่ 3.9 ถึงผสม 6 ตัน แบบไม่มีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ถูกสร้างเมชด้วย โปรแกรม Pro-AM.....	31
รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของความหนืดในถึงผสม 6 ตัน แบบไม่มีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ความเร็วรอบของใบกวน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที.....	32

# สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.11 ถึงผสม 6 ตัน แบบมีครีป ไบควอนชนิด Paddle ที่ถูกขึ้นรูปด้วย โปรแกรม Unigraphics NX 2.....	33
รูปที่ 3.12 ถึงผสม 6 ตัน แบบมีครีป ไบควอนชนิด Paddle ที่ถูกสร้างเมชด้วย โปรแกรม Pro-AM.....	33
รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของความหนืดในถึงผสม 6 ตัน แบบมีครีป ไบควอนชนิด Paddle ที่ความเร็วรอบของไบควอน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที.....	34
รูปที่ 3.14 ถึงผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีป ไบควอนชนิด Intermix ที่ถูกขึ้นรูปด้วย โปรแกรม Unigraphics NX 2.....	35
รูปที่ 3.15 ถึงผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีป ไบควอนชนิด Intermix ที่ถูกสร้างเมชด้วย โปรแกรม Pro-AM.....	35
รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของความหนืดในถึงผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีป ไบควอนชนิด Intermix ที่ความเร็วรอบของไบควอน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที.....	36
รูปที่ 3.17 ถึงผสม 6 ตัน แบบมีครีป ไบควอนชนิด Intermix ที่ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 2.....	37
รูปที่ 3.18 ถึงผสม 6 ตัน แบบมีครีป ไบควอนชนิด Intermix ที่ถูกสร้างเมชด้วย โปรแกรม Pro-AM.....	37
รูปที่ 3.19 การกระจายตัวของความหนืดในถึงผสม 6 ตัน แบบมีครีป ไบควอนชนิด Intermix ที่ความเร็วรอบของไบควอน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที.....	38
รูปที่ 3.20 ถึงผสมหลักขนาด 200 ลิตร และหน่วยสนับสนุน.....	39
รูปที่ 3.21 ถึงผสมหลักขนาด 200 ลิตร.....	39
รูปที่ 3.22 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น.....	41
รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแซมพู ชั้นซิลิโคน SPC.....	49
รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแซมพู ชั้นซิลิโคน SPD.....	50
รูปที่ ก.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแซมพู ชั้นซิลิโคน SPE.....	51
รูปที่ ก.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแซมพู ชั้นซิลิโคน SPO.....	52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
IX

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ ก.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพู ชั้นซิลิโคน SPS.....	53
รูปที่ ก.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพู ชั้นซิลิโคน SPU.....	54
รูปที่ ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพู ชั้นซิลิโคน SPW.....	55
รูปที่ ก.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพู ชั้นซิลิโคน SPY.....	56
รูปที่ ก.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยา ปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCB.....	57
รูปที่ ก.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยา ปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCO.....	58
รูปที่ ก.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยา ปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCP.....	59
รูปที่ ก.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยา ปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCV.....	60

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

โครงการนี้เป็นความร่วมมือกับบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด ซึ่งเป็นโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่ผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคชั้นนำของประเทศ สินค้าที่ผลิตแบ่งเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล (Personal care products) ที่เป็นของแห้งและของเหลว ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน (Home care products) ที่เป็นของแห้งและของเหลว และผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม

Home and personal care products plant (HPC plant) เป็นหน่วยผลิตหลักที่ผลิตผลิตภัณฑ์อุปโภคชนิดเหลว 2 ประเภท คือ

1. ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล ได้แก่ แชมพูและครีมนวดผมคลินิก แชมพูและครีมนวดผมซันซิด แชมพูและครีมนวดผมโดฟ ครีมอาบน้ำโดฟ ครีมอาบน้ำลักซ์ โลชั่นบำรุงผิวชนิดร่า และโลชั่นบำรุงผิววาสลีน

2. ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน ได้แก่ น้ำยาล้างจานชั้นโลด และน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท

ระบบการผสมในหน่วยผลิต HPC ประกอบด้วยถังผสมหลักขนาด 6 ตัน (Universal mixer) จำนวน 5 ถัง ซึ่งเป็นถังแบบไม่ติดครีป (Unbaffled tank) และมีเปลือกหุ้ม (Jacket) และหน่วยสนับสนุนเพื่อใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลชนิดเหลวต่างๆ และถังผสมหลักขนาด 10 ตัน (Flexible agitation system (FAS) mixer) จำนวน 2 ถัง คือ MX 601 และ MX 701 ซึ่งเป็นถังแบบติดครีป (Baffled tank) และไม่มีเปลือกหุ้ม และหน่วยสนับสนุนเพื่อใช้ผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือนโดย 1 ถัง สำหรับผลิตน้ำยาล้างจาน และอีก 1 ถัง สำหรับผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่ม แต่ละถังผสมหลักขนาด 10 ตัน ประกอบด้วยถังผสมรองที่ไม่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง

ถังผสมหลักขนาด 6 ตัน แต่ละถังประกอบด้วยถังผสมรองที่มีและไม่มีเปลือกหุ้มดังนี้

- ถังผสมหลักถังที่ 1 (MX 101) ประกอบด้วยถังผสมรองที่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 103)

- ถังผสมหลักถังที่ 2 (MX 201) ประกอบด้วยถังผสมรองที่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 203)

- ถังผสมหลักถังที่ 3 (MX 301) ประกอบด้วยถังผสมรองที่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 303)

และที่ไม่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 304)

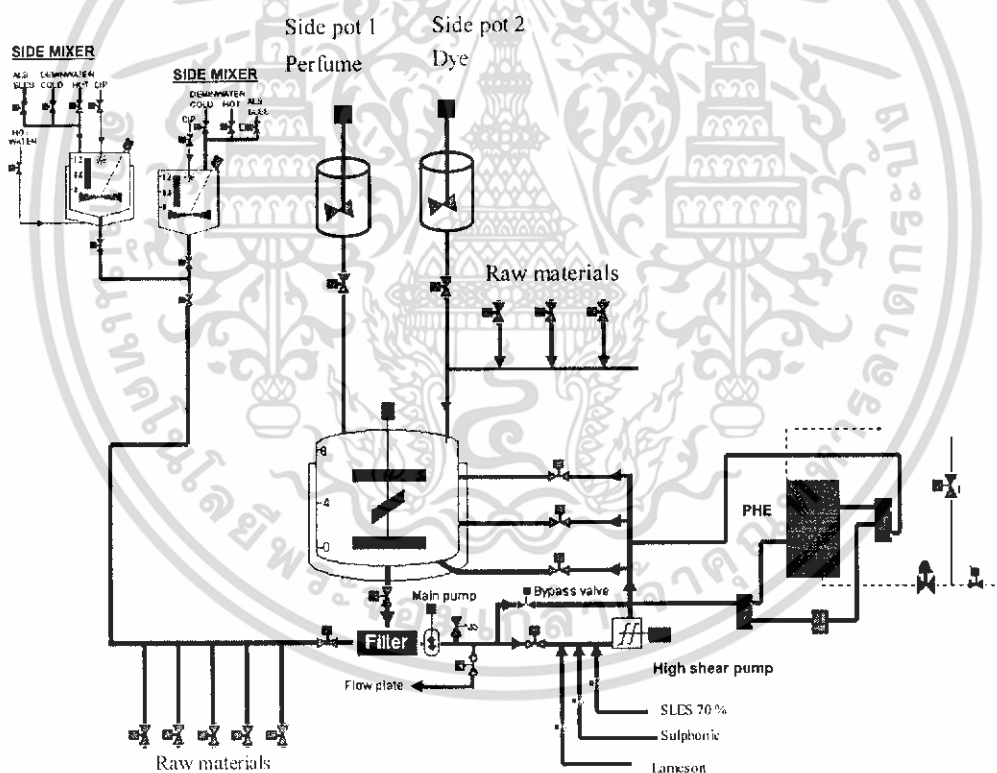
- ถังผสมหลักถังที่ 4 (MX 401) ประกอบด้วยถังผสมรองที่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 403)

และที่ไม่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 404)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

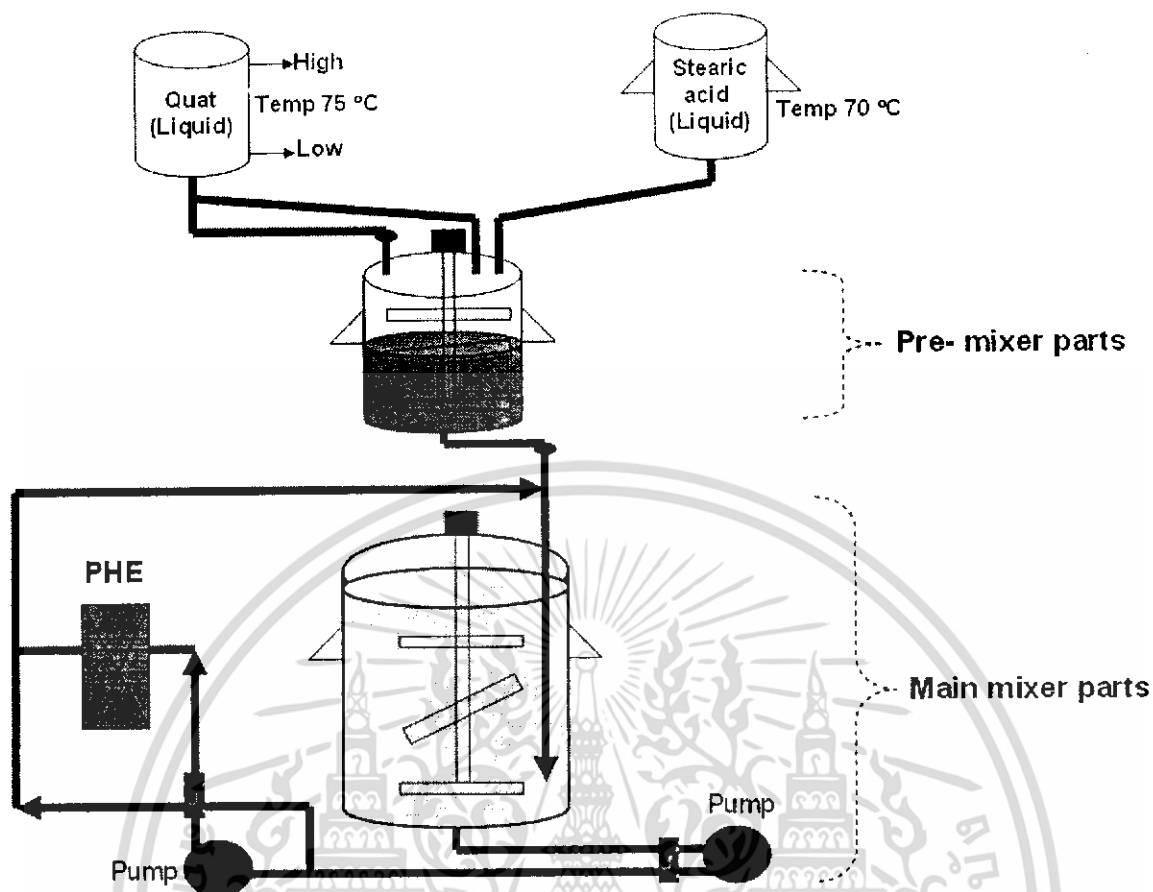
- ถังผสมหลักถังที่ 5 (MX 501) ประกอบด้วยถังผสมรองที่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 503) และที่ไม่มีเปลือกหุ้ม 1 ถัง (MX 504)

ถังผสมหลักขนาด 6 ตัน ทั้ง 5 ถัง และถังผสมหลักขนาด 10 ตัน ทั้ง 2 ถัง มีลักษณะเหมือนกันทุกประการในส่วนจากรูปร่างของถังผสม ตำแหน่งและลักษณะของการติดตั้งใบกวนชนิดของใบกวนแบบใบพาย (Paddle) 3 ใบ นอกจากนี้ยังมีหน่วยสนับสนุนของกระบวนการผสม เช่น ถังผสมรอง (Side mixer) เพื่อเตรียมวัตถุดิบบางชนิดในขั้นตอนย่อยก่อนการผสมในถังผสมหลัก เครื่องกรอง (Filter) และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger: PHE) ซึ่งจะเลือกใช้ตามคุณสมบัติของวัตถุดิบและกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด กำลังการผลิตเฉลี่ยต่อถังของถังผสมหลักขนาด 6 ตัน คือ 10,000 ตันต่อปี และของถังผสมหลักขนาด 10 ตัน คือ 71,500 ตันต่อปี รูปที่ 1.1 และ 1.2 แสดงถังผสมหลักขนาด 6 ตัน และ 10 ตัน พร้อมหน่วยสนับสนุนต่างๆ



รูปที่ 1.1 ถังผสมหลักขนาด 6 ตัน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ [1]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ถังผสมหลักขนาด 10 ตัน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ [1]

เนื่องจากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลชนิดเหลวมีราคาขายต่อหน่วยสูงกว่าผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือนชนิดเหลว และเป็นกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีการแข่งขันทางการตลาดค่อนข้างสูง ความต้องการของตลาดต่อผลิตภัณฑ์ประเภทนี้มีสูงถึง 1,000 ตันต่อสัปดาห์ ในขณะที่กำลังการผลิตของบริษัทมีเพียง 555 ตันต่อสัปดาห์ ดังนั้นเพื่อครอบคลุมส่วนแบ่งทางการตลาดและตอบสนองให้ทันต่อความต้องการของผู้บริโภคภายใต้ต้นทุนที่เหมาะสม บริษัทจึงมีนโยบายเพิ่มกำลังการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลชนิดเหลว คือ แชมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร ในหน่วยผลิต HPC และอาจให้บริษัทภายนอกรับช่วงผลิตผลิตภัณฑ์น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทจำนวนหนึ่งแทน

ในกระบวนการผสมผลิตภัณฑ์น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทแต่ละขั้นตอนย่อยประกอบด้วยกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิหรือการให้ความร้อนแก่ระบบ (Heating หรือ Hot process) และกระบวนการลดอุณหภูมิของระบบ (Cooling หรือ Cold process) แต่สำหรับแชมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร จะเป็นกระบวนการลดอุณหภูมิอย่างเดียว ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทั้งสองลักษณะมีความสำคัญต่อระบบการผสมและรอบเวลาของการผสมวัตถุดิบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอบเวลาของการผสมวัตถุดิบ (Mixing cycle time) หมายถึง รอบระยะเวลาที่ใช้ในการผสมเพื่อผลิตสินค้าหนึ่งหน่วยตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งได้ผลิตภัณฑ์ออกจากขั้นตอนการผสมวัตถุดิบ [2] โดยปกติอุณหภูมิของของผสมในถังผสมหลักที่เหมาะสมเป็นปัจจัยสำคัญต่อคุณสมบัติและเวลาในการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลและผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือนชนิดเหลว วัตถุดิบบางชนิดต้องผสมที่อุณหภูมิที่สูงหรือที่อุณหภูมิต่ำตามกำหนด เช่น การเติมน้ำหอมจะต้องรอให้อุณหภูมิต่ำลง ถ้าผสมที่อุณหภูมิสูงอาจเสียคุณสมบัติได้ การตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต้องลดอุณหภูมิ จึงต้องมีขั้นตอนของการเพิ่มและลดอุณหภูมิอย่างเหมาะสม

โครงการนี้จะปรับปรุงถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน จำนวน 1 ถัง และหน่วยสนับสนุนที่ใช้ผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทอยู่ในปัจจุบันให้มีความเหมาะสมกับกระบวนการผลิตแชมพูชั้นซิลทั้ง 8 สูตร และปรับปรุงถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน จำนวน 1 ถัง และหน่วยสนับสนุนที่ใช้ผสมผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลชนิดเหลวเพื่อใช้ผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร แทน ทั้งนี้เพื่อให้ทรัพยากรการผลิตที่มีอยู่ให้เกิดมูลค่าและประโยชน์สูงสุด โดยไม่จำเป็นต้องซื้อถังผสมใหม่ ซึ่งจะต้องวิเคราะห์ความเหมาะสมเชิงเศรษฐศาสตร์ [3-4] หาข้อมูลประกอบการตัดสินใจ และประเมินความคุ้มค่าในการลงทุนปรับปรุงถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน จำนวน 1 ถัง และหน่วยสนับสนุนสำหรับผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท และปรับปรุงถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน จำนวน 1 ถัง และหน่วยสนับสนุนสำหรับผลิตแชมพูชั้นซิล โดยไม่มีปัญหาเรื่องการผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ หรืออาจต้องปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตบางส่วน แต่อย่างไรก็ตามบริษัทก็ต้องพิจารณาให้มีความยืดหยุ่นและคำนวณความคุ้มค่าในกรณีที่ใช้ถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน ไม่เต็มกำลังการผลิต เช่น กรณีใช้ผลิตเพียง 7-9 ตัน เพื่อการผลิตตามปริมาณที่ตลาดต้องการอย่างเหมาะสม

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

หาแนวทางการใช้ถึงผสมหลักและหน่วยสนับสนุนต่างๆ ที่มีอยู่เพื่อการผลิตสินค้าอุปโภคบริโภคเหลวตามนโยบายของบริษัท ดังนี้

- 1.2.1 ใช้ถึงผสมขนาด 6 ตัน จำนวน 1 ถัง ผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท
- 1.2.2 ใช้ถึงผสมขนาด 10 ตัน จำนวน 1 ถัง ผสมแชมพูชั้นซิล

## 1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีระบบการกวนผสมและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ
- 1.3.2 วิเคราะห์ลักษณะของถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน และ 10 ตัน ชนิดใบกวน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.3 ศึกษาข้อมูลเบื้องต้น กระบวนการและขั้นตอนการผลิต รอบเวลาการผสม และสมบัติต่างๆ ทางกายภาพและทางเคมีของแชมพูชั้นซัลทั้ง 8 สูตร และของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร

1.3.4 จำลองการผสมจากการเปลี่ยนถึงผสมด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 เพื่อศึกษาอัตราเร็วการกวนหรือความเร็วรอบของใบกวน และชนิดของใบกวน ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแชมพูชั้นซัลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ที่ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์

1.3.5 ทำการทดลองโดยใช้ถึงผสมขนาด 200 ลิตรในหน่วยทดลองผลิต และตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้

1.3.5.1 ผสมแชมพูชั้นซัล

1.3.5.2 ผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท

1.3.6 ประเมินความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ และเสนอแนวทาง

1.3.6.1 การใช้ถึงผสมขนาด 10 ตัน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ เพื่อการผลิตแชมพูชั้นซัลทั้ง 8 สูตร

1.3.6.2 การใช้ถึงผสมขนาด 6 ตัน และหน่วยสนับสนุนต่างๆ เพื่อการผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร

## 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 ระบบการกวนผสมและหน่วยสนับสนุนที่เกี่ยวข้องสำหรับแชมพูชั้นซัลทั้ง 8 สูตร จากการปรับปรุงใช้ถึงผสมหลักขนาด 10 ตัน และระบบการผสมและหน่วยสนับสนุนที่เกี่ยวข้องสำหรับน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร จากการปรับปรุงใช้ถึงผสมหลักขนาด 6 ตัน

1.4.2 ข้อมูลที่บริษัทสามารถนำไปประกอบการพิจารณาตัดสินใจ ปรับปรุง และเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มกำลังการผลิตแชมพูชั้นซัลทั้ง 8 สูตร

1.4.3 ฐานข้อมูลที่สามารถนำไปประยุกต์กับหน่วยการผลิตอื่นๆ ของบริษัท หรือระบบการผลิตของบริษัทอื่นที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน

1.4.4 เพิ่มความสามารถในการแข่งขันทางธุรกิจให้แก่บริษัท

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง [5-10]

#### 2.1 ความหมายของการกวน และการผสม (Agitation and Mixing)

การกวน คือ การทำให้สารในภาชนะมีการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง ซึ่งมักเกิดขึ้นในลักษณะที่เป็นวงกลม

การผสม คือ การทำให้เนื้อสารแต่ละส่วนกระจายทั่วกัน การผสมสามารถแบ่งออกได้หลายระดับตามความเข้ากันของเนื้อสาร พิจารณาการปล่อยก๊าซ 2 ชนิดลงในภาชนะเดียวกัน และการใส่ทราย หิน ปูนซีเมนต์ และน้ำลงเพื่อผสมกันเป็นคอนกรีต กรณีทั้งสองถือว่าเป็นการผสม แต่ต่างกันที่การกระจายและความเป็นเนื้อเดียวกันของเนื้อสาร

#### 2.2 อุปกรณ์หลักที่ใช้ในการกวนผสม

2.2.1 ถังผสม (Mixing tank) มีหน้าที่เป็นภาชนะรองรับสารในการกวนผสม ส่วนใหญ่เป็นถังผสมรูปทรงกระบอกวางในแนวตั้ง ด้านบนอาจเปิดหรือปิด กันถังผสมมีหลายแบบ เช่น ก้นรูปกรวย ก้นโค้ง และก้นแบน

2.2.2 ใบกวน (Impeller) มีหน้าที่ปั่นกวนของไหลให้เกิดการกวนผสม แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ตามรูปแบบการไหลของของเหลวที่เกิดขึ้น การใช้งาน และลักษณะพิเศษ ตัวอย่างชนิดของใบกวน เช่น

- ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน (Axial flow impeller) เช่น ใบกวนชนิดใบพัด (Propeller) เหมาะสำหรับผสมของเหลวที่มีความหนืดไม่มาก และของเหลวที่มีของแข็งแขวนลอย

- ใบกวนที่ทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมี (Radial flow impeller) เช่น ใบกวนชนิดกังหันแบบใบแบน (Flat-blade turbine) เหมาะสำหรับใช้ผสมก๊าซกับของเหลว

- ใบกวนที่ออกแบบมาให้มีลักษณะเฉพาะกับการใช้งาน (Specialty impeller) เช่น ใบกวนชนิดใบพาย (Paddle) เหมาะสำหรับกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดค่อนข้างสูง เช่น สี น้ำมัน และกากน้ำตาล เป็นต้น

การออกแบบและเลือกใบกวนที่มีความเหมาะสมกับของไหลรวมทั้งตำแหน่งในการติดตั้งและความเร็วใบกวนที่ใช้เป็นปัจจัยสำคัญต่อประสิทธิภาพของการกวนผสม

2.2.3 กรีบ (Baffle) มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ ติดอยู่บริเวณด้านข้างภายในของถังผสม ช่วยบังคับทิศทางของของไหลให้เกิดการผสมได้ดีขึ้น ในกรณีการผสมแบบปั่นป่วน (Turbulent

mixing) การตีคกริบจะช่วยป้องกันการเกิดการหมุนวน (Vortex) ซึ่งไม่ก่อให้เกิดการผสม แต่สำหรับการผสมของเหลวหนืด (Viscous mixing) หรือการผสมแบบราบเรียบ (Laminar mixing) ไม่เกิดการหมุนวนจึงไม่มีความจำเป็นต้องตีคกริบ

## 2.3 กลไกการผสมของเหลวในถังผสมทรงกระบอกแนวตั้ง

ของเหลวที่บริเวณใบกวนจะถูกปั่นกวนทำให้เกิดกระแสของเหลวพุ่งออกไปสู่บริเวณของเหลวส่วนใหญ่ในถังผสม (Bulk liquid) ด้วยรูปแบบการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของใบกวน การผสมจะเกิดได้มากที่บริเวณใกล้กับใบกวนเนื่องจากมีความเร็วของการปั่นกวนสูง ที่ระยะห่างจากใบกวนออกไปความเร็วของกระแสของเหลวจะลดลงพร้อมกับชักนำของเหลวใกล้เคียงให้ไหลไปด้วย ทำให้กระแสสวน (Eddy current) ขนาดใหญ่แตกตัวกลายเป็นกระแสสวนขนาดเล็กซึ่งทำให้เกิดการกวนผสมขึ้น เมื่อกระแสของเหลวเคลื่อนที่ไปจนชนผนังของถังผสมแล้วก็จะไหลวนกลับเข้าสู่บริเวณ ใบกวน และเกิดการกวนผสมแบบเดิมอีกในลักษณะที่เป็นวงจร

## 2.4 ตัวอย่างปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการออกแบบระบบกวนผสม [5-6]

### 2.4.1 ชนิดของใบกวน

ใบกวนถูกออกแบบมาเพื่อสร้างระบบการไหลให้กับของเหลว โดยของเหลวจะถูกเหวี่ยงออกจากจุดศูนย์กลางของถังผสมออกไปชนผนังแล้วย้อนกลับมาที่ใบกวนอีกครั้งหมุนเวียนไปเรื่อยๆ ชนิดของใบกวนที่ใช้อยู่ทั่วไปได้แก่

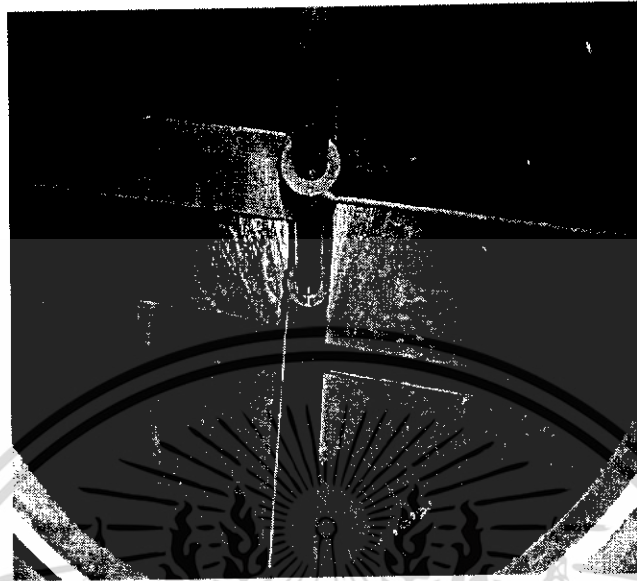
- ใบพัด (Propeller) ใบกวนชนิดนี้ทำให้เกิดการไหลในแนวแกน สามารถกวนของเหลวความหนืดต่ำได้ด้วยความเร็วสูง ลักษณะการทำงานของเหลวจะไหลผ่านใบพัดและพุ่งตรงออกไปเป็นเส้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ของเหลวที่ไหลผ่านนั้นถูกตัดและเฉือนกับใบพัดอย่างรวดเร็ว จึงเหมาะสำหรับใช้กับชุดถังผสมขนาดใหญ่

- ใบพาย (Paddle) ใบกวนชนิดนี้เหมาะสำหรับงานที่กวนด้วยความเร็วต่ำๆ แบ่งเป็นใบพายแบบตั้งตรง และแบบลาดเอียง (Pitch) เส้นการไหลของเหลวจากถูกผลักออกจากศูนย์กลางใบพายออกไปชนผนังของถังผสม จากนั้นจึงแยกออกเป็น 2 ส่วนไหลขึ้นและลงขนานไปกับผนัง สำหรับถังผสมที่มีความลึกมากๆ อาจติดตั้งใบพายได้มากกว่า 1 ใบ เรียงตามแนวเดียวกัน

- กังหัน (Turbine) ตัวใบอาจมีลักษณะแบบตั้งตรง โคน หรือแบบลาดเอียงก็ได้ ใบกวนชนิดนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าใบกวนแบบใบพาย ใช้กับของเหลวได้หลายช่วงความหนืด สำหรับของเหลวที่มีความหนืดต่ำ จะทำให้เกิดการไหลปะทะกับผนังถังผสมอย่างรุนแรง โดยของเหลวจะพุ่งออกทางแนวรัศมีและหมุนวนรอบถังผสมลักษณะการหมุนดังกล่าวทำให้เกิดการหมุนวนขึ้นได้ง่าย แต่อาจป้องกันโดยติดตั้งคกริบไว้ในถังผสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับใบกวนของถังผสมหลักขนาด 6 และ 10 ตัน ของบริษัท เป็นใบกวนชนิดใบพาย มีลักษณะ ดังรูปที่ 2.1 และ 2.2



รูปที่ 2.1 ลักษณะใบกวนของถังผสมหลักขนาด 6 ตัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะใบกวนของถังผสมหลักขนาด 10 ตัน

#### 2.4.2 ชนิดของถังผสม

ชนิดของถังผสมมีทั้งแบบคิตคริบ และแบบไม่คิตคริบ ถังผสมที่มีขนาดใหญ่หลายๆ อาจมีคริบถึง 4 ใบ ในถังผสมที่มีคริบและใช้ใบกวนชนิดก้านตันต้องมีความกว้างของคริบไม่เกิน 1/12 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง และในถังผสมที่มีคริบและใช้ใบกวนแบบใบพัดต้องมีความกว้างของคริบไม่เกิน 1/18 ของเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ใบกวนชนิดใบพายเป็นใบกวนที่ผลึกของเหลวออก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทางแนวรัศมีได้ดี ทำให้ของเหลวพุ่งออกชนผนังของถัง จากนั้นจึงแยกออกเป็น 2 ส่วนไหลขึ้นและลงจนวนไปกับผนังถังแล้วย้อนกลับสู่ใบกวนอีกครั้ง สำหรับถังที่ไม่มีครีบบใบกวนแบบใบพายจะทำให้เกิดการหมุนวนอย่างรุนแรง แต่หากมีครีบบจะทำให้เกิดการไหลในแนวแกนได้ดีและทำให้ของเหลวสามารถผสมกันได้ดีขึ้น

- ถังผสมหลักขนาด 6 ตัน ของบริษัท เป็นแบบไม่ติดครีบบ
- ถังผสมหลักขนาด 10 ตัน ของบริษัท เป็นแบบติดครีบบ

#### 2.4.3 รูปร่างของถังผสม

ถังผสมทรงสี่เหลี่ยมจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลแบบเดียวกับถังผสมทรงกระบอกแนวตั้งติดครีบบ ถังผสมก้นแบนไม่เหมาะสมกับการผสมของเหลวที่มีของแข็งแขวนลอยเนื่องจากจะทำให้เกิดการสะสมของของแข็งที่บริเวณมุมของก้นถังผสม การใช้ถังผสมก้นโค้งจะเหมาะสมกว่าเป็นต้น ถังผสมหลักขนาด 6 ตัน และ 10 ตัน ของบริษัท เป็นแบบถังผสมก้นโค้ง

#### 2.4.4 ขนาด และสัดส่วนของใบกวน ครีบบ และถังผสม

อัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม และอัตราส่วนความกว้างของครีบบต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม มีผลต่อความเร็วของใบกวนในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number:  $N_{Re}$ ) และกำลังที่ใช้ในเทอมของตัวเลขกำลัง (Power number:  $N_p$ ) ตัวอย่างอัตราส่วนดังกล่าวที่นิยมใช้สำหรับระบบถังผสมทรงกระบอกแนวตั้งที่ใช้ใบกวนชนิดก้นห้น จะมีค่าเท่ากับ 0.3-0.6 และ 0.1 ตามลำดับ

ตัวเลขเรย์โนลด์ คำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความเร็วรอบของใบกวน ดังสมการ

$$N_{Re} = nD_1^2 \rho / \mu \quad (2.1)$$

- เมื่อ
- $n$  = ความเร็วรอบของใบกวน (rpm)
  - $D_1$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน (m)
  - $\rho$  = ความหนาแน่นของของเหลว ( $\text{kg/m}^3$ )
  - $\mu$  = ความหนืดของของเหลว (Pa s)

ตัวเลขกำลัง คือ อัตราส่วนระหว่างแรงภายนอกต่อความเฉื่อยของของเหลว ดังสมการ

$$N_p = P g_c / n^3 D_1^5 \rho \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- $P$  = กำลัง (Power, kW)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

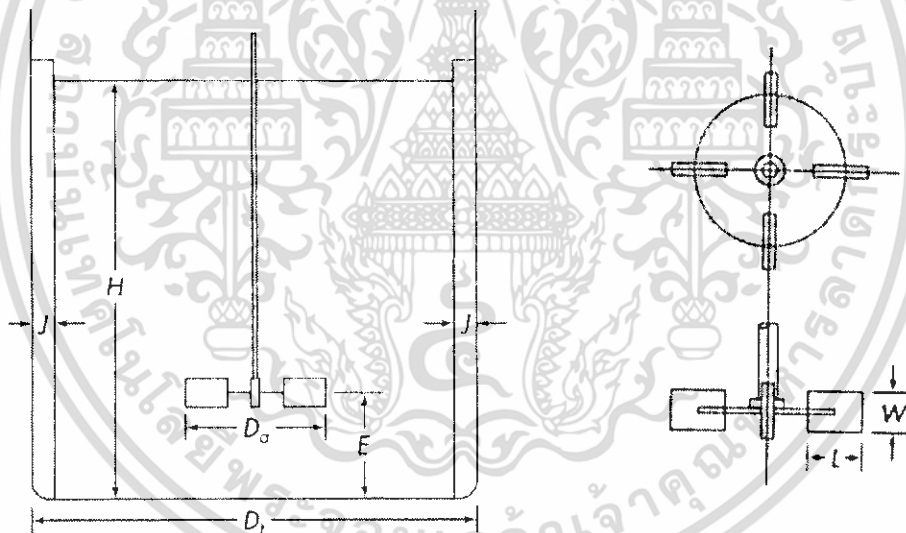
$g_c$  = แฟกเตอร์สัดส่วนของกฎของนิวตัน (Newton's-law proportionality factor)

มีค่าเท่ากับ  $1 \text{ kg m / N s}^2$

#### 2.4.5 ตำแหน่งและลักษณะของการติดตั้งใบกวน

การติดตั้งใบกวนให้เอียงหรือเอียงไปจากศูนย์กลางของถังผสม (Off-center mounting) สามารถป้องกันการเกิดการหมุนวนในถังผสมทรงกระบอกแนวตั้งได้ แต่สำหรับถังผสมขนาดใหญ่ การติดตั้งใบกวนแบบนี้จะทำให้เสียกำลังในการกวนมาก นอกจากนี้การติดตั้งใบกวนชนิดเดียวกันให้มีระดับความสูงจากก้นถังผสมต่างกันจะทำให้เกิดรูปแบบการไหลของของเหลวในถังผสมแตกต่างกัน เช่น ใบกวนชนิดใบพัด ซึ่งโดยปกติจะทำให้เกิดการไหลในแนวแกน ถ้าถูกติดตั้งให้อยู่ชิดกับก้นถังผสมจะทำให้เกิดการไหลในแนวรัศมีขึ้นแทน เป็นต้น

การออกแบบชุดถังผสมจะพิจารณาชนิดของใบกวน ครีบ ขนาด และสัดส่วนของถังผสม (Tank configuration) เป็นต้น รูปที่ 2.3 แสดงรูปแบบชุดถังผสมมาตรฐาน (Standard tank configuration) ซึ่งมีใบกวนแบบกึ่งหัน



รูปที่ 2.3 มาตรฐานการออกแบบถังผสมและใบพัด [6]

- J = ความกว้างของครีบ (Width of baffles)
- H = ระดับของเหลวในถังผสม (Depth of liquid in vessel)
- E = ระยะห่างระหว่างใบกวนกับก้นถังผสม (Height of impeller above vessel floor)
- $D_a$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของใบกวน (Diameter of impeller)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$D_t$	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของถังผสม (Tank diameter)
$L$	=	ความยาวของใบกวน (Length impeller blade)
$W$	=	ความกว้างของใบกวน (Width impeller blade)

โดยทั่วไปมาตรฐานการออกแบบชุดถังผสมเป็นดังนี้

$$\begin{array}{ccc} \frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} & \frac{H}{D_t} = 1 & \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \\ \frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} & \frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} & \frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \end{array}$$

#### 2.4.6 อัตราเร็วของการผสมหรือความเร็วรอบของใบกวน

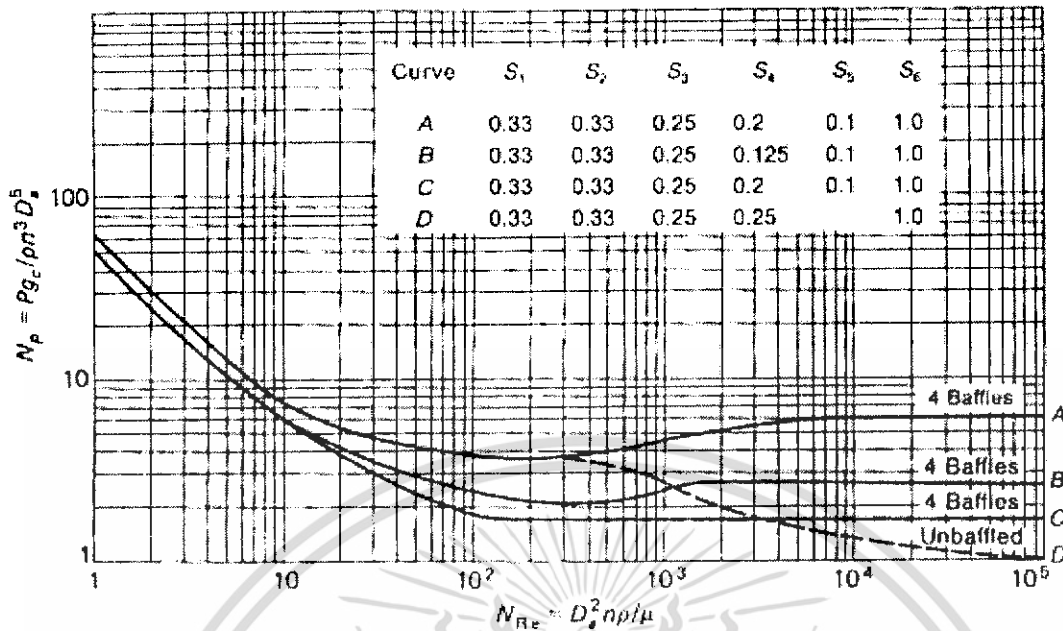
เมื่ออัตราเร็วของการผสมสูง การผสมจะเกิดได้เร็วขึ้นแต่กำลังที่ใช้ในการกวนจะเพิ่มขึ้น ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องหาอัตราเร็วของการผสมที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการผสมที่รวดเร็วและใช้กำลังน้อยที่สุด รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ของอัตราเร็วของการผสมในเทอมของตัวเลขเรย์โนลด์กับกำลังที่ใช้ในเทอมของตัวเลขกำลัง กรณีถังผสมแบบติดครีปและไม่ติดครีป เส้น A, B และ D สำหรับใบกวนชนิดกึ่งหันตัวใบแบบตั้งตรง (Vertical blade turbine) เส้น C สำหรับใบกวนชนิดกึ่งหันตัวใบลาดเอียง (Pitched-blade turbine)

S คือ แฟกเตอร์รูปร่าง (Shape factor) ดังนี้

$$\begin{array}{ccc} S_1 = D_a/D_t & S_2 = E/D_t & \\ S_3 = L/D_a & S_4 = W/D_a & \\ S_5 = J/D_t & S_6 = H/D_t & \end{array}$$

#### 2.4.7 สมบัติทางกายภาพของวัสดุคืบและของเหลว

สมบัติทางกายภาพที่มีผลต่อการออกแบบระบบกวนผสม เช่น ความหนืด ความหนาแน่น สำหรับระบบกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดสูงจะมีระยะห่างระหว่างใบกวนกับผนังของถังผสมน้อย มีอัตราเร็วของการผสมก่อนข้างต่ำ และใช้กำลังในการกวนสูง เป็นต้น



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์กับตัวเลขกำลัง [6]

#### 2.4.8 สถานะของระบบ

สถานะของระบบที่มีผลต่อการออกแบบระบบการกวนผสม เช่น อุณหภูมิ และความดันของเหลวชนิดหนึ่งๆ ที่อุณหภูมิต่างกันจะมีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความหนืด แตกต่างกัน การกวนผสมของเหลวที่มีความหนืดสูงจะใช้กำลังในการกวนสูงดังที่กล่าวแล้ว การพิจารณาหาสถานะของระบบที่เหมาะสมมีความสำคัญต่อการออกแบบระบบการผสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้น

อิทธิพลของอุณหภูมิและความดันต่อระบบการกวนผสม

- อิทธิพลของอุณหภูมิในของเหลวบริสุทธิ์ (Pure liquid) อิทธิพลของอุณหภูมิต่อความหนืดของของเหลวเป็นไปตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) สำหรับของไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian fluid)

$$\mu = \mu_0 e^{E_a/RT} \quad (2.3)$$

สำหรับของไหลแบบนอนนิวโทเนียน (Non-newtonian fluid)

$$K = K_0 e^{E_a/RT} \quad (2.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$\mu$ และ $K$	= Consistency index มีความสัมพันธ์กับความหนืดของของเหลว แสดงหน่วยเป็นความดันคูณกับเวลายกกำลัง $n$ เช่น $\text{Pa s}^n$
	$\mu_0$ และ $K_0$	= Frequency factor มีหน่วย $\text{Pa s}$ และ $\text{Pa s}^n$ ตามลำดับ
	$E_a$	= Activation energy สำหรับการไหลแบบหนืด ( $\text{kJ/mol}$ )
	$R$	= ค่าคงที่ของก๊าซ ( $8.314 \text{ kJ/kmol K}$ )
	$T$	= อุณหภูมิสัมบูรณ์ ( $\text{K}$ )

อุณหภูมิมีผลต่อลักษณะการไหลด้วยเช่นกัน โดยค่า flow behavior index จะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

- อิทธิพลของความดันต่อระบบการกวนผสม

ความหนืดของของเหลวเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential) กับความดันแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) ยกเว้นน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ซึ่งพบว่าในช่วงแรกความหนืดจะลดลง แล้วจึงเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โปเนนเชียล โดยทั่วไปผู้ใช้เครื่องวัดความหนืดจะไม่คิดผลของความดัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความหนืดจะเกิดขึ้นน้อยมากที่ความดันบรรยากาศ

ในโครงการนี้จะจำลองผลของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ต่อการผสม เช่น Configuration ของถังผสม อัตราเร็วของการกวน ชนิดของใบกวน โดยจำลองด้วยใบกวนชนิดใบพายซึ่งเป็นแบบที่บริษัทใช้อยู่ และใบกวนชนิดอื่น เช่น ใบกวนชนิดใบพัด ใบกวนชนิดก้าน ฯลฯ ต่อการผสมแบบพวชนชั้นที่ 8 สูตร และน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร

## 2.5 ของเหลวหนืด (Viscous liquid)

ของเหลวหนืด หมายถึง ของเหลวที่มีความหนืดเกินกว่า  $10 \text{ Pa s}$  ( $10,000 \text{ cP}$ ) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [5] ตัวอย่างของของเหลวหนืด เช่น สีนํ้ามัน นํ้ามันเครื่อง นํ้าผึ้ง และกากนํ้าตาล สำหรับแชมพูโดยทั่วไปมีความหนืดอยู่ในช่วง  $2.5 - 6.5 \text{ Pa s}$  จึงไม่จัดว่าเป็นของเหลวหนืด นํ้ายาปรับผ้านุ่มมีความหนืดประมาณ  $0.06 - 0.14 \text{ Pa s}$  จึงไม่จัดว่าเป็นของเหลวหนืดเช่นกัน

## 2.6 ประเภทของของเหลว [5, 7, 11]

การแบ่งประเภทของของเหลวพิจารณาจากค่าความหนืดและลักษณะการไหลเป็นหลัก มี 2 ประเภท คือ

2.6.1 ของเหลวแบบนิวโทเนียน คือ ของเหลวที่ความหนืดไม่ขึ้นกับอัตราการเฉือน (Shear rate) ความหนืดของของเหลวประเภทนี้ขึ้นกับอุณหภูมิและองค์ประกอบของของเหลวเท่านั้น ความเค้นเฉือน (Shear stress) และอัตราการเฉือน มีความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$\tau = \mu\gamma \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\tau$  = ความเค้นเฉือน มีหน่วยเป็นความดัน เช่น Pa

$\mu$  = ความหนืดของของเหลว มีหน่วยเป็นความดันคูณกับเวลา เช่น Pa s

$\gamma$  = อัตราการเฉือน มีหน่วยเป็นส่วนกลับของเวลา เช่น 1/s

2.6.2 ของเหลวแบบนอนนิวโทเนียน คือ ของเหลวที่ความหนืดแปรตามอัตราการเฉือน แบ่งเป็น

2.6.2.1 Time-independent non-newtonian fluid คือ ของเหลวแบบนอนนิวโทเนียนที่ความหนืดไม่ขึ้นกับเวลา แบ่งเป็น

- Bingham plastic คือ ของเหลวที่มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือน ดังสมการ

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\tau_0$  = ความเค้นเฉือนที่จุดคราก (Yield stress) คือ ความเค้นที่ต้องเอาชนะก่อนที่ของไหลจะเริ่มไหล

หลังจากของเหลว Bingham plastic fluid เริ่มไหลแล้ว อาจประพฤติตัวเป็นของเหลวแบบนิวโทเนียน หรือ Pseudo plastic fluid หรือ Dilatant fluid ก็ได้ [11]

- Pseudo plastic fluid หรือ Shear thinning fluid คือ ของเหลวที่ความหนืดลดลงเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น

- Dilatant fluid หรือ Shear thickening fluid คือ ของเหลวที่ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเฉือนเพิ่มขึ้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเฉือนของ Pseudo plastic fluid และ Dilatant fluid แสดงดังสมการ

$$\tau = K\gamma^n \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	$K =$	Consistency index มีความสัมพันธ์กับความหนืดของของเหลว ( $\text{Pa s}^n$ )
	$n =$	Flow behavior index เป็นค่าที่บ่งลักษณะการไหลของของเหลว
		Newtonian fluid $n = 1$
		Pseudo plastic fluid $n < 1$
		Dilatant fluid $n > 1$

ในกรณีของเหลวที่มีความเค้นเฉือนที่จุดคราก ความสัมพันธ์ดังสมการ

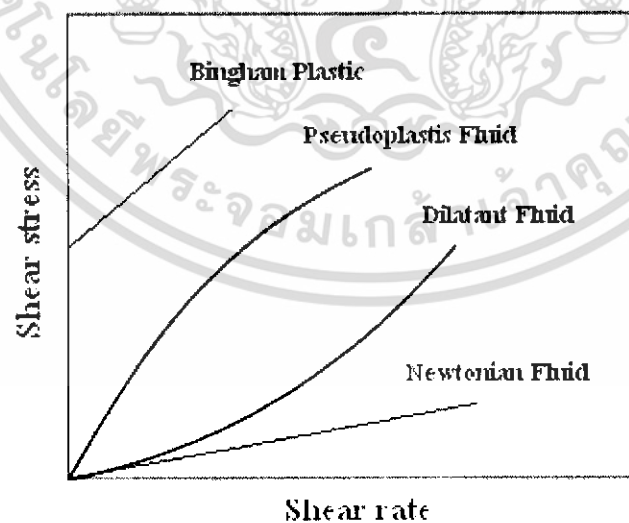
$$\text{Herschel – Bulk model: } \tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (2.8)$$

สามารถคำนวณความหนืดปรากฏ (Apparent viscosity,  $\mu_a$ ) ของ Pseudo plastic fluid และ Dilatant fluid ได้ ดังนี้

$$\mu_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.9)$$

2.6.2.2 Time-dependent non-newtonian fluid คือ ของเหลวแบบอนนิวโทเนียนที่ความหนืดขึ้นกับเวลา แบ่งเป็น

- Thixotropic fluid คือ ของเหลวที่ความหนืดลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่อัตรา
- การเฉือนคงที่
- Rheopectic fluid คือ ของเหลวที่ความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ที่อัตรา
- การเฉือนคงที่



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเฉือนกับความเค้นเฉือนของของเหลวประเภทต่างๆ

[11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7 รูปแบบต่างๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [12-15]

ตามปกติเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะแบ่งตามการจัดการไหล (Flow arrangement) และรูปแบบการก่อสร้าง (Type of construction) ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ง่ายที่สุด คือ ชนิดที่ของไหลร้อนและเย็นเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน (Parallel flow) หรือสวนทางกัน (Counter flow) ในท่อกลมซึ่งสวมกัน (Concentric tube) หรือแบบไหลตั้งฉากกัน (Cross flow)

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นกระบวนการทำงานที่อุณหภูมิต่ำไม่สูงมากจึงพิจารณาเฉพาะการนำความร้อน และการพาความร้อน ไม่พิจารณาการแผ่รังสีความร้อน

หลังจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำงานไปแล้วระยะเวลาหนึ่ง ที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจถูกเคลือบด้วยสิ่งสกปรกหรือตะกรัน เรียกว่าเกิดตะกรัน ทำให้เกิดการอุดตันภายในระบบการไหลได้ หรือที่ผิวอาจเกิดการกัดเซาะจากการทำปฏิกิริยากันระหว่างของไหลกับวัสดุที่ใช้ทำเป็นโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งการอุดตันและการกัดเซาะจะทำให้สมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง

ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

### 2.7.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double pipe heat exchanger) [12]

เป็นชนิดที่มีโครงสร้างง่ายที่สุดและมีราคาค่อนข้างถูก เหมาะสำหรับงานที่มีปริมาณการถ่ายเทความร้อนน้อย นั่นคือ พื้นที่การถ่ายเทความร้อนน้อย ตามปกติเราจะให้ของไหลที่มีความดันสูงและมีความกัดกร่อนสูงอยู่ในท่อชั้นใน

### 2.7.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (Shell-and-tube heat exchanger) [12]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้มีการใช้งานในอุตสาหกรรมมากที่สุด เนื่องจากมีความยืดหยุ่นทั้งในด้านแบบ วัสดุที่ใช้สร้าง ช่วงของอุณหภูมิและความดันในการทำงาน ตลอดจนความสะดวกในการประกอบและบำรุงรักษา

### 2.7.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Heat Exchanger: PHE) [14]

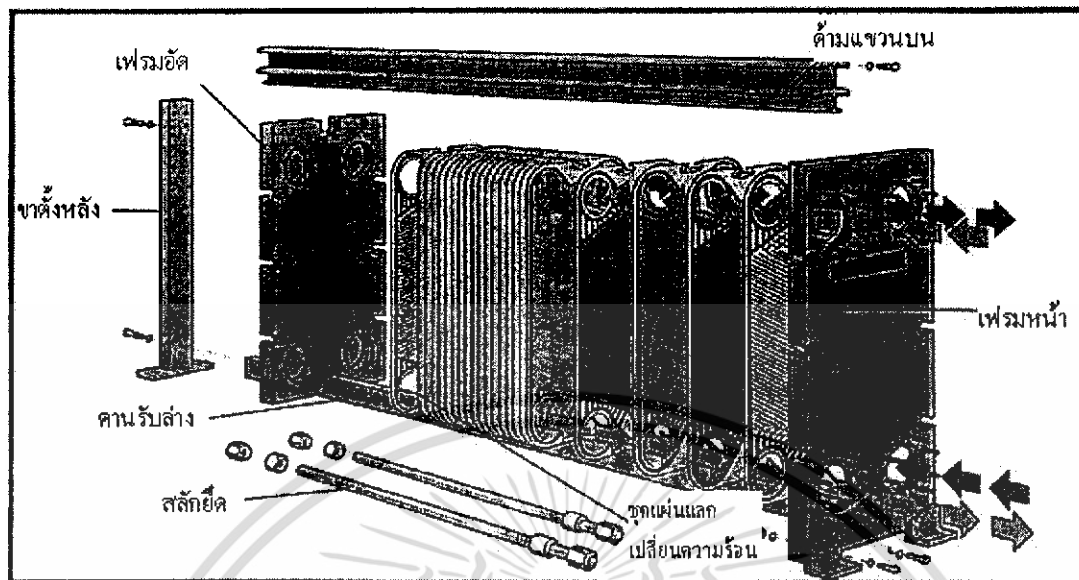
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อให้ความร้อน หรือทำความเย็น หรือเพื่อการนำความร้อนกลับมาใช้อีก เช่น

- อุตสาหกรรมเคมี
- อุตสาหกรรมอาหาร
- อุตสาหกรรมจักรกล
- อุตสาหกรรมปิโตรเลียม ปิโตรเคมี
- อุตสาหกรรมกระดาษ
- ระบบปรับอากาศ
- อุตสาหกรรมเหล็ก
- โรงไฟฟ้า

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้มีน้ำหนักเบาและมีประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนสูง โดยให้ค่าการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ 5 เท่า รูปที่ 2.6 แสดง โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.6 ลักษณะโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น [14]

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นในรูปที่ 2.6 ประกอบด้วย

1. ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน มีลักษณะเป็นลอนใช้เป็นตัวกลางแลกเปลี่ยนความร้อนของของไหลสองด้าน ชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะถูกประกอบอยู่ระหว่างเฟรมหน้าและเฟรมอัด โดยมีชุดสลักยึดให้แน่นอีกที่หนึ่ง บนแผ่นโลหะนี้จะมีปะเก็นอยู่รอบแผ่น เพื่อป้องกันการรั่วออกและช่วยบังคับทิศทางการไหลของของไหล

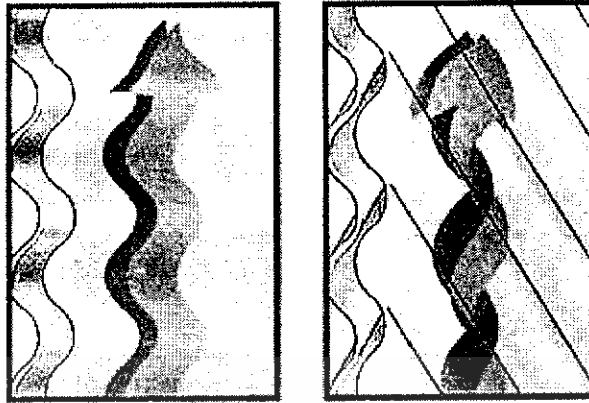
การกำหนดจำนวนแผ่นที่จะใช้ขึ้นอยู่กับอัตราการไหล คุณสมบัติทางกายภาพของของไหล ความดันลด อุณหภูมิของของไหลขาเข้า และอุณหภูมิของของไหลขาออกที่ต้องการ เช่น ถ้าอัตราการไหลและความดันสูงจะใช้จำนวนแผ่นมาก หรือความแตกต่างของอุณหภูมิของของไหลขาเข้ากับอุณหภูมิขาออกที่ต้องการสูงจะใช้จำนวนแผ่นมาก ทั้งนี้ลักษณะแผ่นที่เป็นลอนจะทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนและทนความดันได้สูง

แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เป็นชิ้นส่วนสำคัญทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดพลังงาน ลักษณะของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่

2.7 ข

62686

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) แบบลายกระดานซีกฟ้า (ข) แบบลายก้างปลา

### รูปที่ 2.7 ลักษณะการไหลของของไหลผ่านผิวหน้าของแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน [14]

แผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนมี 2 รูปแบบ คือ แบบลายกระดานซีกฟ้า (รูปที่ 2.7 ก) ลักษณะนี้จะสร้างการไหลแบบปั่นป่วน โดยการเปลี่ยนทิศทางการไหลและความเร็ว ส่วนแบบลายก้างปลา (รูปที่ 2.7 ข) เมื่อประกอบเข้าด้วยกันจะมีจุดสัมผัสของส่วนนูนทำให้เกิดการไหลแบบควงสวนขึ้น ลักษณะทั้งสองแบบจะสร้างการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งจะจัดการเกิดตะกรันได้

2. ปะเก็น ทำหน้าที่ซีลระหว่างแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นตัวกำหนดทิศทางการไหลของของไหลให้ไหลสลับกันระหว่างแผ่น นอกจากนี้บริเวณช่องว่างระหว่างปะเก็นที่แบ่งทิศทางการไหลจะมีปะเก็นที่มีรูระบายเพื่อป้องกันของไหลไหลปะปนกัน การเลือกวัสดุที่ใช้ทำปะเก็นจะพิจารณาจากคุณสมบัติทางกายภาพของของไหล อุณหภูมิ และความดัน และจะต้องเป็นวัสดุพวกยืดหยุ่นได้ เช่น ยางไนไตรล์ ยาง EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) เป็นต้น

3. เฟรม จะประกอบด้วยเฟรมหน้าและเฟรมอัด ทำหน้าที่ประกอบชุดแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อนเข้าด้วยกัน ความแข็งแรงของเฟรมเกิดจากการยึดเฟรมด้วยสลักยึด ดังนั้นจึงทำให้สามารถถอดประกอบชิ้นส่วนเมื่อมีการเพิ่มหรือลดขนาดความจุของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทนี้ หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลง หรือตรวจซ่อมและทำความสะอาด

ประโยชน์ของรูปแบบ โครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นสรุปในตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 ประโยชน์จากรูปแบบโครงสร้างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น [14]

รูปแบบ	ประโยชน์	ผลที่ได้
โครงสร้างถอดเปลี่ยนได้	ปรับปรุงได้	ลดค่าก่อสร้างเนื่องจากใช้ฐานรองรับขนาดเล็ก
มีเฟรมหน้าตั้งอยู่กับที่ส่วนเฟรมอัดเลื่อนได้	สะดวกในการตรวจสอบแผ่นแลกเปลี่ยนความร้อน	สะดวกต่อการปรับใช้งานในแต่ละหน่วยหน้าที่
มีจุดสัมผัสระหว่างแผ่นโลหะ	เกิดการสั่นน้อยที่สุด	ลดเวลาที่ใช้ในการซ่อมแซมอุปกรณ์ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาลดลง

#### 2.7.4 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นวน (Spiral plate heat exchanger) [12]

ประกอบด้วยแผ่นถ่ายเทความร้อนหนึ่งคู่ซึ่งถูกม้วนให้เกิดเป็นช่องทางไหลหมุนวนเหมือนกัน หอยข้อดีของอุปกรณ์ชนิดนี้คือความกะทัดรัด การหมุนวนของของไหลทำให้เกิดการชะล้าง จึงมีการตกตะกอนหรือมีคราบสกปรกน้อย

ข้อเสียที่สำคัญ คือ การซ่อมบำรุงจะทำได้ยาก มีข้อจำกัดด้านความดันและไม่เหมาะกับการถ่ายเทความร้อนปริมาณสูงๆ

#### 2.7.5 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผงท่อติดครีป (Fin-and-Tube heat exchanger) [12]

ตัวอย่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ได้แก่ ตัวคอนเดนเซอร์ และเครื่องระเหยในระบบตัวปรับอากาศและหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น โดยมีลักษณะสำคัญ คือ มีน้ำยาหรือน้ำไหลอยู่ในท่อ และมีอากาศพัดผ่านแผงท่อ เพื่อระบายความร้อนหรือรับความเย็นจากท่อ ตามปกติสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของของเหลวในท่อมักสูงกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของอากาศนอกท่อมาก ดังนั้นเพื่อเพิ่มสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนจึงออกแบบให้มีครีปอยู่โดยรอบของท่อ

## 2.8 การแลกเปลี่ยนความร้อนในถังผสม [15]

ถังผสมที่มีเปลือกหุ้มจะใช้ทั้งการให้ความร้อนหรือทำความเย็นแก่ของเหลวในถังผสม โดยการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวในถังผสมกับของเหลวที่ไหลผ่านเปลือกหุ้มของถังผสมจากการนำความร้อน และการพาความร้อนแบบบังคับ สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนได้จากการประยุกต์กฎการถ่ายเทความร้อนของนิวตัน (Newton's law of heat transfer) คือ "อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของเหลวในถังผสมกับของเหลวที่ไหลผ่านเปลือกหุ้มของถังผสม เป็นปฏิภาคโดยตรงกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม พื้นที่ผิวสัมผัสของการถ่ายเท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน และอุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิของของเหลวในถังผสมกับอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลผ่านเปลือกหุ้ม”

การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน คือ การทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น จะเห็นว่าตัวแปรที่สามารถปรับปรุงเพื่อทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนดีขึ้น เช่น

- อุณหภูมิที่แตกต่างกันระหว่างอุณหภูมิของของเหลวในถังผสมกับอุณหภูมิของของเหลวที่ไหลผ่านเปลือกหุ้มของถังผสม ซึ่งหากความแตกต่างนี้มีค่ามากจะทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนเพิ่มมากขึ้น

- ลักษณะการไหลของของเหลวโดยการไหลแบบปั่นป่วนทำให้อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงกว่าการไหลแบบราบเรียบ

## 2.9 Computational Fluid Dynamics (CFD) [16]

Computational Fluid Dynamics หรือ CFD คือ การวิเคราะห์ระบบที่เกี่ยวข้องกับการไหลของของไหล ความร้อน หรือปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมี โดยการสร้างแบบจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เทคนิคนี้เป็นประโยชน์อย่างยิ่งและใช้กันอย่างกว้างขวางรวมทั้งในภาคอุตสาหกรรม ตัวอย่างที่มีการประยุกต์ใช้ เช่น

- พลศาสตร์การไหลของอากาศยานและยานพาหนะ เช่น แรงยกกับแรงต้าน
- พลศาสตร์ของน้ำที่เกิดขึ้นที่เกือรอบๆ ลำเรือ
- โรงจักรผลิตกำลัง เช่น การผสมและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง การไหลของสารทำงาน
- เครื่องจักรกังหัน เช่น การเคลื่อนไหวยภายในช่องที่มีการหมุน และการไหลผ่าน Diffuser
- งานวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เช่น การทำความเย็นบนอุปกรณ์รวมทั้งวงจรไมโครอิเล็กทรอนิกส์
- งานวิศวกรรมเคมี เช่น การผสมและการแยกสาร การไหลและการขึ้นรูปพลาสติก
- สภาพแวดล้อมภายในและภายนอกของอาคารที่เกี่ยวข้องกับแรงลมที่กระทำกับอาคารและการระบายอากาศ
- งานวิศวกรรมทางทะเล เช่น ภาระของกระแสน้ำใต้ทะเลต่อโครงสร้างใต้น้ำ
- งานวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เช่น การกระจายตัวของมลพิษ

โดยทั่วไป โปรแกรมทางด้านวิเคราะห์ผลมีราคาค่อนข้างสูง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการพิเศษต่างๆ หรือลักษณะการใช้เฉพาะเรื่องๆ ที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการลงทุนของ CFD จะมีมูลค่าไม่น้อย แต่ก็ไม่มากนักเมื่อเทียบกับการทดลองที่ต้องการคุณภาพสูง นอกจากนี้ CFD ยังมีข้อได้เปรียบในการออกแบบระบบหรืออุปกรณ์ต่างๆ กว่าทดลอง สรุปโดยสังเขปดังนี้

- ลดเวลาและต้นทุนของการออกแบบใหม่
- สามารถศึกษาระบบที่การทดลองควบคุมได้ยากหรือเป็นไปได้ เช่น ในระบบใหญ่ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สามารถศึกษาระบบที่มีภาวะเสี่ยงอันตรายหรือที่มีสมรรถนะนอกเหนือข้อจำกัดปกติที่ระบบนั้นๆ ทำงานอยู่ (เช่นการศึกษาความปลอดภัยและอุบัติเหตุ)
- ไม่จำกัดรายละเอียดของผลลัพธ์

ต้นทุนของการทดลองโดยทั่วไปมักเพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งในการทดสอบและเก็บข้อมูล แต่หากใช้ CFD ในการวิเคราะห์ผลนั้น เราจะสามารถสร้างผลลัพธ์ในลักษณะต่างๆ ที่เสมือนจริงได้ โดยไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นหรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น CFD ยังสามารถนำไปใช้ในการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตำแหน่งที่ซับซ้อนมากๆ ได้ ซึ่งทำให้สามารถออกแบบเพื่อให้อุปกรณ์นั้นทำงานในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดได้

ดังที่กล่าวไว้ว่านอกจากค่าใช้จ่ายในการลงทุนแล้ว องค์กรจำเป็นต้องมีบุคลากรที่สามารถใช้งานโปรแกรมและอธิบายผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้ รวมทั้งสามารถสรุปขีดความสามารถของแบบจำลองได้ด้วย

ปัญหาที่เกิดจากการแก้คำตอบด้วย CFD ในปัญหาการไหลนั้นเป็นที่ตระหนักดีว่ากายภาพพื้นฐานที่เกี่ยวข้องนั้นเป็นสิ่งที่ซับซ้อน ดังนั้นผลที่เกิดจากโปรแกรม CFD ที่มีการกำหนดรอบการศึกษาภายใต้สมมุติฐานที่เหมาะสมกับปัญหา และมีการป้อนข้อมูลเพื่อการคำนวณ ได้ถูกต้อง จะให้ผลเฉลยออกมาดีเทียบเคียงได้กับผลจากการสังเกตจากปรากฏการณ์ทางกายภาพจริง แต่หากผู้ใช้ไม่สามารถกำหนดเงื่อนไขหรือข้อมูลดังกล่าวมาแล้วนั้น ได้อย่างเหมาะสม หรือเป็นด้วยปรากฏการณ์ทางกายภาพหรือทางเคมีที่กำลังศึกษาอยู่นั้นมีความซับซ้อนเกินกว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีอยู่ ผลการคำนวณก็จะไม่สามารถสะท้อนปรากฏการณ์ที่แท้จริงได้

นอกจากที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ผู้ใช้ยังต้องมีความเข้าใจข้อจำกัดต่างๆ ของกระบวนการวิธในการหาคำตอบ เช่น กระบวนการวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ ผลของการปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ต่อสมรรถนะในการลู่เข้าหาคำตอบ หรือเงื่อนไขที่เป็นจุดอ่อน ฯลฯ สรุปได้ว่าหลักที่สำคัญในการประเมินสมรรถนะของกระบวนการวิธีเชิงตัวเลข คือ

1. การลู่เข้าหาคำตอบ (Convergence) เป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงการที่ผลเฉลยของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นๆ จะมีค่าใกล้เคียงกับคำตอบแม่นยำมากขึ้นเมื่อจำนวนครั้งของการทำซ้ำ (Iteration) มากขึ้น หรือสามารถกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า เป็นการที่กระบวนการวิธีเชิงตัวเลขนั้นให้ผลเฉลยใกล้เคียงกับผลเฉลยแบบแม่นยำ เมื่อขนาดของปริมาตรเล็กๆ ที่ใช้ในการสร้างสมการแปลงรูปนั้นมีขนาดเล็กเข้าใกล้ศูนย์

2. ความสม่ำเสมอ (Consistency) เป็นลักษณะที่บ่งชี้ถึงการที่ผลเฉลยของวิธีการเชิงตัวเลขนั้นๆ จะลู่เข้าหาคำตอบที่เป็นคำตอบแม่นยำ ไม่ลู่เข้าหาค่าอื่นหรือในอีกนัยหนึ่งก็คือ สมการพีชคณิตที่ถูกสร้างขึ้นจากสมการแปลงรูปนั้นจะต้องมีโครงสร้างและสัดส่วนเหมือนกับสมการอนุพันธ์ที่ควบคุมปรากฏการณ์ทางกายภาพหรือปฏิกิริยาเคมีที่กำลังสนใจอยู่นั่นเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ความเสถียร (Stability) หมายถึง การรองรับความผิดพลาดของค่าที่เกิดจากกระบวนการทำซ้ำของตัวแปรอื่น เนื่องจากโดยทั่วไปจะเกิดกระบวนการทำซ้ำของผลเฉลยหลายตัวที่ส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกัน หากเทคนิคนั้นไม่มีความเสถียรก็จะเกิดปรากฏการณ์การกระจายออกของผลเฉลย (Diverge)

ในงานนี้จำลองการผสมด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ระบบและสร้างผลลัพธ์ในลักษณะต่างๆ ที่เสมือนจริงได้ตามหลักการ Computational Fluid Dynamics เพื่อคาดการณ์การผสมในเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ได้ผลิตภัณฑ์ตามมาตรฐาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินโครงการและผลการดำเนินโครงการ

การศึกษาการปรับปรุงระบบการผสมเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์อุปโภคชนิดเหลว มีขั้นตอนการดำเนินโครงการดังนี้

1. ศึกษาสมบัติต่างๆ ทางกายภาพและทางเคมีของแชมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร และของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร
2. เปรียบเทียบการผสมแชมพูชันซิลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทเมื่อใช้ใบกวนชนิดต่างๆ โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ
3. จำลองการผสมจากการเปลี่ยนดังผสมด้วย โปรแกรม Star CD version 3.24
4. ทดลองผสมชันซิลและคอมฟอร์ทในหน่วยทดลองผลิตของบริษัท

#### 3.1 วัสดุและสารเคมี

- 3.1.1 แชมพูชันซิล 8 สูตร (บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด)
- 3.1.2 น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท 4 สูตร (บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด)

#### 3.2 อุปกรณ์

- 3.2.1 เครื่อง Rotational viscometer ของบริษัท Brookfield Engineering Labs รุ่น LVDV-E
- 3.2.2 เครื่อง Rotational viscometer ของบริษัท Haake รุ่น VT 500
- 3.2.3 โปรแกรม Star CD version 3.24
- 3.2.4 คอมพิวเตอร์รุ่น Sun Sunfire V40z server

#### 3.3 การศึกษาสมบัติต่างๆ ทางกายภาพและทางเคมีของแชมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร และของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร

3.3.1 หาค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร โดยเครื่อง Rotational viscometer ของบริษัท Brookfield Engineering Labs รุ่น LVDV-E ใช้ Spindle No.64 ช่วงของความหนืดที่วัดได้ 2,000 – 2,000,000 เซนติพอยส์ ได้ผลในตารางที่ 3.1 วิธีการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแฉมพูชันชนิด ทั้ง 8 สูตร

สูตร	K	n
SPC	6.3812	0.7502
SPD	5.8264	0.8008
SPE	6.9135	0.7697
SPO	5.7201	0.7647
SPS	7.2527	0.7948
SPU	6.2690	0.7879
SPW	5.8304	0.8198
SPY	6.7967	0.7929
ค่าเฉลี่ย	6.3738	0.7851

จากการทดสอบวัดความหนืดและค่าเปอร์เซ็นต์ทอร์ค พบว่าแฉมพูชันชนิดทั้ง 8 สูตร มีค่า n เฉลี่ย เท่ากับ 0.8 จัดเป็นของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid

3.3.2 หากค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่ม คอมฟอร์ท โดยเครื่อง Rotational viscometer ของบริษัท Haake รุ่น VT 500 ใช้ Spindle No. MV1 ช่วงความหนืดที่วัดได้ 3 -10,000 เซนติพอยส์ ได้ผลในตารางที่ 3.2 วิธีการคำนวณแสดงใน ภาคผนวก ก.

ตารางที่ 3.2 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่ม คอมฟอร์ททั้ง 4 สูตร

สูตร	K	n
BCB	0.8576	0.4114
BCO	2.1067	0.3487
BCP	2.755	0.2841
BCV	1.8707	0.3255
ค่าเฉลี่ย	1.8976	0.3424

จากการทดลองวัดความหนืดโดยการปรับอัตราการเฉือน พบว่าน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ทั้ง 4 สูตร มีค่า n เฉลี่ย เท่ากับ 0.3 จัดเป็นของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid

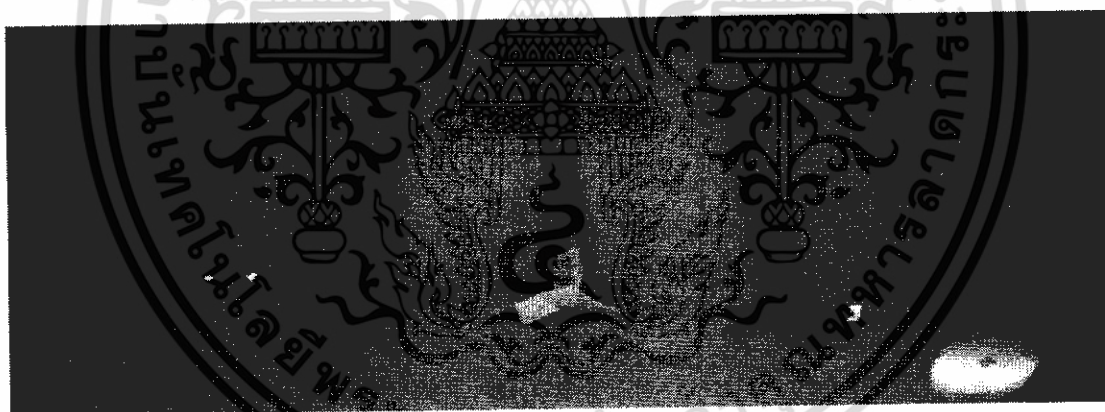
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การเปรียบเทียบการผสมแซมพูชันซิลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทเมื่อใช้ใบกวนชนิดต่างๆ โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ

3.4.1 การศึกษาผลของใบกวนชนิดต่างๆ ต่อคุณภาพการผสมของแซมพูชันซิลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท โดยทดลองในห้องปฏิบัติการเนื่องจากสามารถเปลี่ยนใบกวนได้และผสมสารในบีกเกอร์ ขนาด 3 ลิตร

ตารางที่ 3.3 ชนิดและขนาดของใบกวนชนิดต่างๆ

ใบกวนที่	ชนิดใบกวน	D <sub>a</sub> (mm)	L (mm)	W (mm)
1	4-pitched blade	80.08	33.65	15.33
2	4-pitched blade	71.92	24.11	19.16
3	3-pitched blade	75.02	32.67	17.95
4	Intermix	89.62	37.16	15.11
5	Toothed or Dissolver disk	97.98	-	-



รูปที่ 3.1 ใบกวนที่ 1 ถึง ใบกวนที่ 5 จากตารางที่ 3.5 (เรียงลำดับจาก ซ้าย - ขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลการทดลองตอนที่ 3.4.1

ตารางที่ 3.4 ชนิดของใบกวนต่อสมบัติของแอมพูชันซิล

คุณสมบัติ	มาตรฐาน ของ ผลิตภัณฑ์	ใบกวนที่ 1	ใบกวนที่ 2	ใบกวนที่ 3	ใบกวนที่ 4	ใบกวนที่ 5
ลักษณะที่ มองเห็น	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ
ค่าความเป็น กรด-เบส	5.5 - 6.5	6.15	6.27	5.98	6.18	6.28
ความหนืด (เซนติพอยส์)	4,000 - 6,000	8,388	8,668	7,818	9,188	5,519

จากตารางที่ 3.4 พบว่าใบกวนที่ 5 คือ ใบกวนชนิด Toothed หรือ Dissolver disk เท่านั้นที่ได้ผลิตภัณฑ์แอมพูชันซิลตามมาตรฐาน ใบกวนชนิดนี้มีลักษณะเด่นที่ตรงปลายใบกวนมีลักษณะเป็นฟันสลับกันบนล่างทำให้กววัตถุคิบที่มีลักษณะเป็นเม็ดได้ดี และผลิตภัณฑ์เป็นเนื้อเดียว

ตารางที่ 3.5 ชนิดของใบกวนต่อสมบัติของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท

คุณสมบัติ	มาตรฐาน ของ ผลิตภัณฑ์	ใบกวนที่ 1	ใบกวนที่ 2	ใบกวนที่ 3	ใบกวนที่ 4	ใบกวนที่ 5
ลักษณะที่ มองเห็น	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุคิบ หลงเหลือ
ค่าความเป็น กรด-เบส	2.5 - 2.9	2.78	2.80	2.80	2.79	2.80
ความหนืด (เซนติพอยส์)	60 - 140	256	190	169	85	177

จากตารางที่ 3.5 พบว่าใบกวนที่ 4 คือ ใบกวนชนิด Intermix ได้ผลิตภัณฑ์น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การจำลองการผสมจากการเปลี่ยนถังผสมด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24

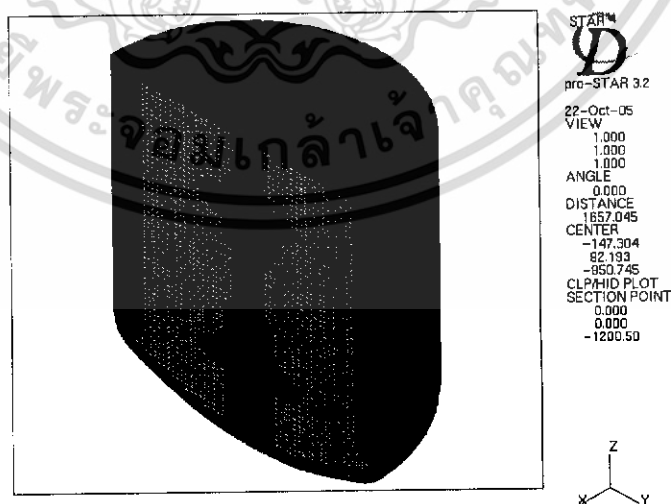
จำลองการผสมด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 เพื่อศึกษาอัตราเร็วของการผสมหรือความเร็วรอบของใบกวน และชนิดของใบกวนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแชมพูชั้นซิติลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทที่ได้มาตรฐานผลิตภัณฑ์ จากการเปลี่ยนถังผสม

3.5.1 จำลองการผสมแชมพูชั้นซิติลในถังผสม 10 ตัน แบบมีครีป 4 ใบ ใบกวนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24

ผลการขึ้นรูปและสร้างเมชของถังผสม 10 ตัน ใบกวนชนิด Paddle แสดงดังรูปที่ 3.2 – 3.3



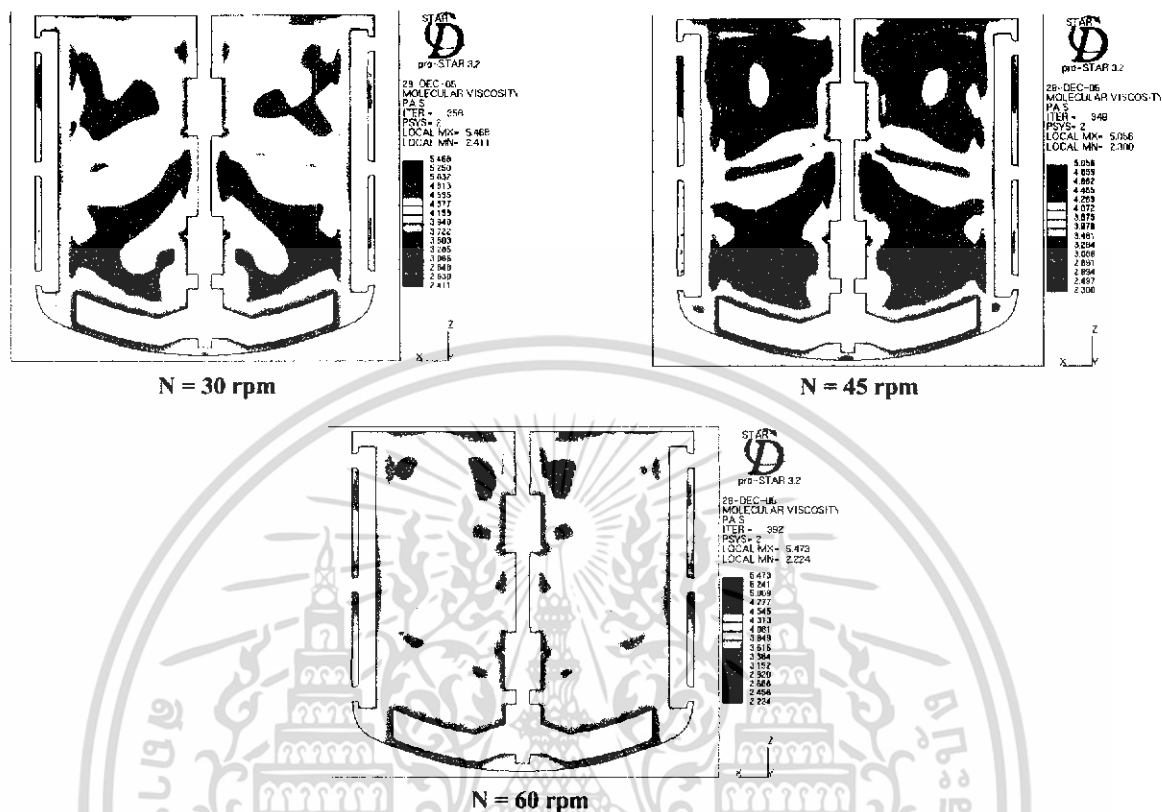
รูปที่ 3.2 ถังผสม 10 ตัน แบบมีครีป ใบกวนชนิด Paddle ที่ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 2



รูปที่ 3.3 ถังผสม 10 ตัน แบบมีครีป ใบกวนชนิด Paddle ที่ถูกสร้างเมชด้วยโปรแกรม Pro-AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการผสมแขมพูชันซิลในถังผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle  
ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังรูปที่ 3.4

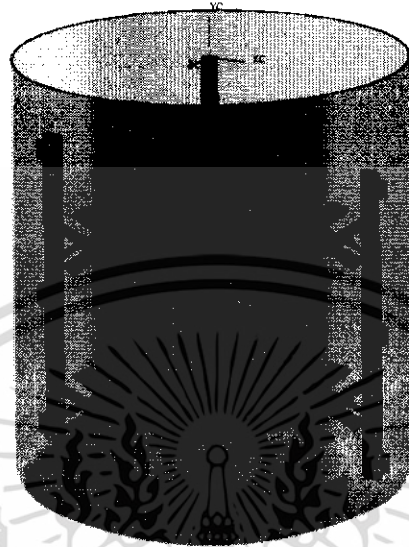


รูปที่ 3.4 การกระจายตัวของความหนืดในถังผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ความเร็วรอบของใบกวน 30, 45 และ 60 รอบต่อนาที

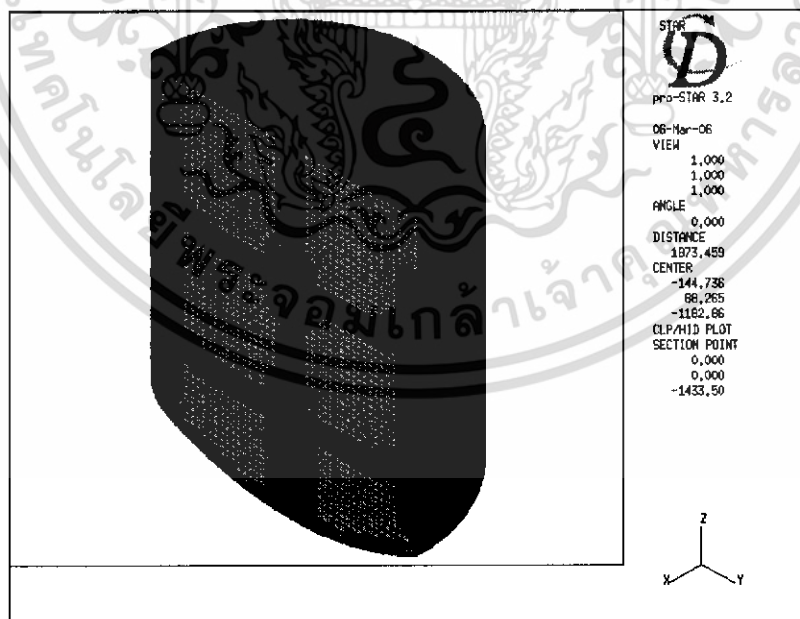
จากผลการจำลองการผสมแขมพูชันซิลในถังผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ 4 ใบ ใบกวนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 พบว่าที่ความเร็วรอบของใบกวน 45 รอบต่อนาที ผลิตภัณฑ์ที่ความหนืด 5,000 เซนติพอยส์ มีการกระจายตัวดีที่สุด พิจารณาจากสีตามค่าความหนืด (มาตรฐานของแขมพูชันซิล: ความหนืด 4,000 – 6,000 เซนติพอยส์)

3.5.2 จำลองการผสมแชนพูนซ์ซิลในถังผสม 10 ตัน แบบมีครีป 4 ใบ ใบกวนชนิด Toothed ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24

ผลการขึ้นรูปและสร้างเมชของถังผสม 10 ตัน ใบกวนชนิด Toothed แสดงดังรูปที่ 3.5 – 3.6



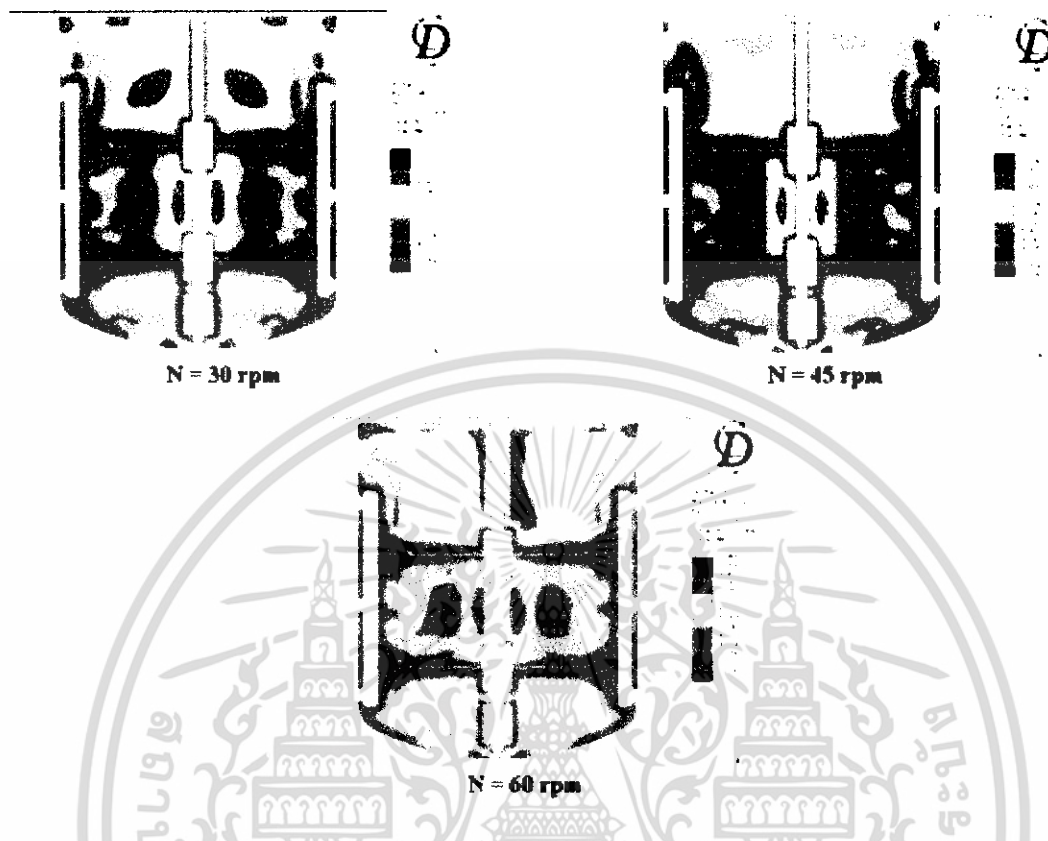
รูปที่ 3.5 ถังผสม 10 ตัน แบบมีครีป ใบกวนชนิด Toothed ที่ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 2



รูปที่ 3.6 ถังผสม 10 ตัน แบบมีครีป ใบกวนชนิด Toothed ที่ถูกสร้างเมชด้วยโปรแกรม Pro-AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการผสมแขมพูชันซิลในถังผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Toothed ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 การกระจายตัวของความหนืดในถังผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Toothed ที่ความเร็วรอบของใบกวน 30, 45 และ 60 รอบต่อนาที

จากผลการจำลองการผสมแขมพูชันซิลในถังผสม 10 ตัน แบบมีคิริบ 4 ใบ ใบกวนชนิด Toothed ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 พบว่าที่ความเร็วรอบของใบกวน 45 รอบต่อนาที ผลิตภัณฑ์ที่ความหนืด 5,000 เซนติพอยส์ มีการกระจายตัวที่ดีที่สุด พิจารณาจากสีตามค่าความหนืด (มาตรฐานของแขมพูชันซิล: ความหนืด 4,000 – 6,000 เซนติพอยส์)

เนื่องจากในขั้นตอนย่อยของกระบวนการผสมผลิตภัณฑ์น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทมีกระบวนการเพิ่มอุณหภูมิหรือการให้ความร้อนแก่ระบบ และกระบวนการลดอุณหภูมิของระบบ แต่โปรแกรม Star CD version 3.24 ไม่มีฟังก์ชันในการจำลองระบบที่มีการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลการจำลองการผสมของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท จะพิจารณาได้เพียงการกระจายตัวของความหนืดและสภาวะที่ใช้จำลองขณะนั้น เช่น ชนิดและความเร็วรอบของใบกวน ทั้งนี้เนื่องจากความหนืดในผลของการจำลองไม่ได้ตรงค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทเพราะข้อจำกัดของโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังกล่าว ดังนั้นจะต้องนำสภาวะที่ใช้จำลอง เช่น ชนิดและความเร็วรอบของใบกวน ไปทดลองในห้องปฏิบัติการหรือหน่วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

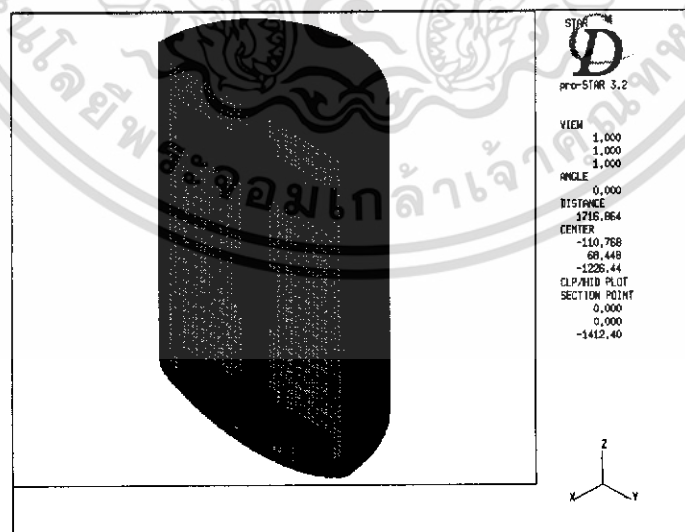
ทดลองผลิต และตรวจสอบความหนืด ซึ่งถ้าความหนืดอยู่ในมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ก็จะยอมรับสถานะในการจำลองที่ใช้ นั้น

3.5.3 จำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์ในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบวกวนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24

ผลการขึ้นรูปและสร้างเมชของถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบวกวนชนิด Paddle แสดงดังรูปที่ 3.8 – 3.9



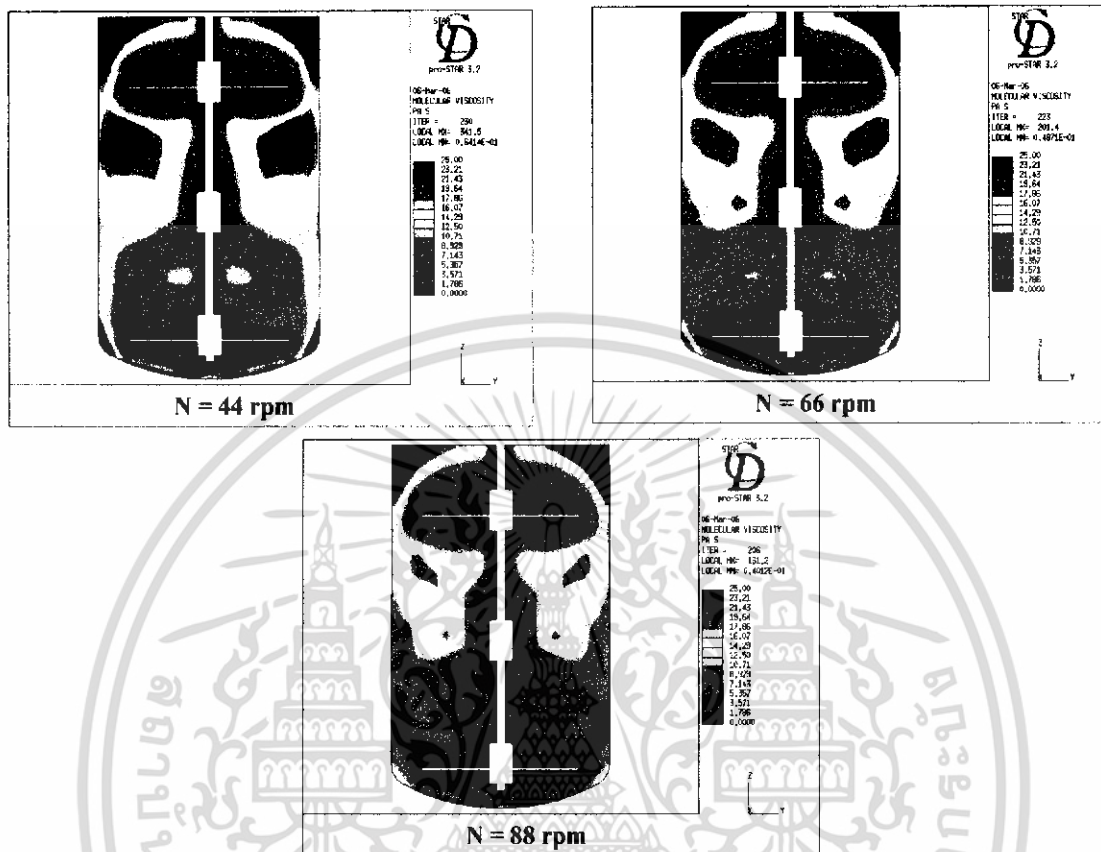
รูปที่ 3.8 ถังผสม 6 ตัน แบบ ไม่มีครีบบวกวนชนิด Paddle ที่ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 2



รูปที่ 3.9 ถังผสม 6 ตัน แบบ ไม่มีครีบบวกวนชนิด Paddle ที่ถูกสร้างเมชด้วยโปรแกรม Pro-AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีคิริบ ไบควอนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังรูปที่ 3.10

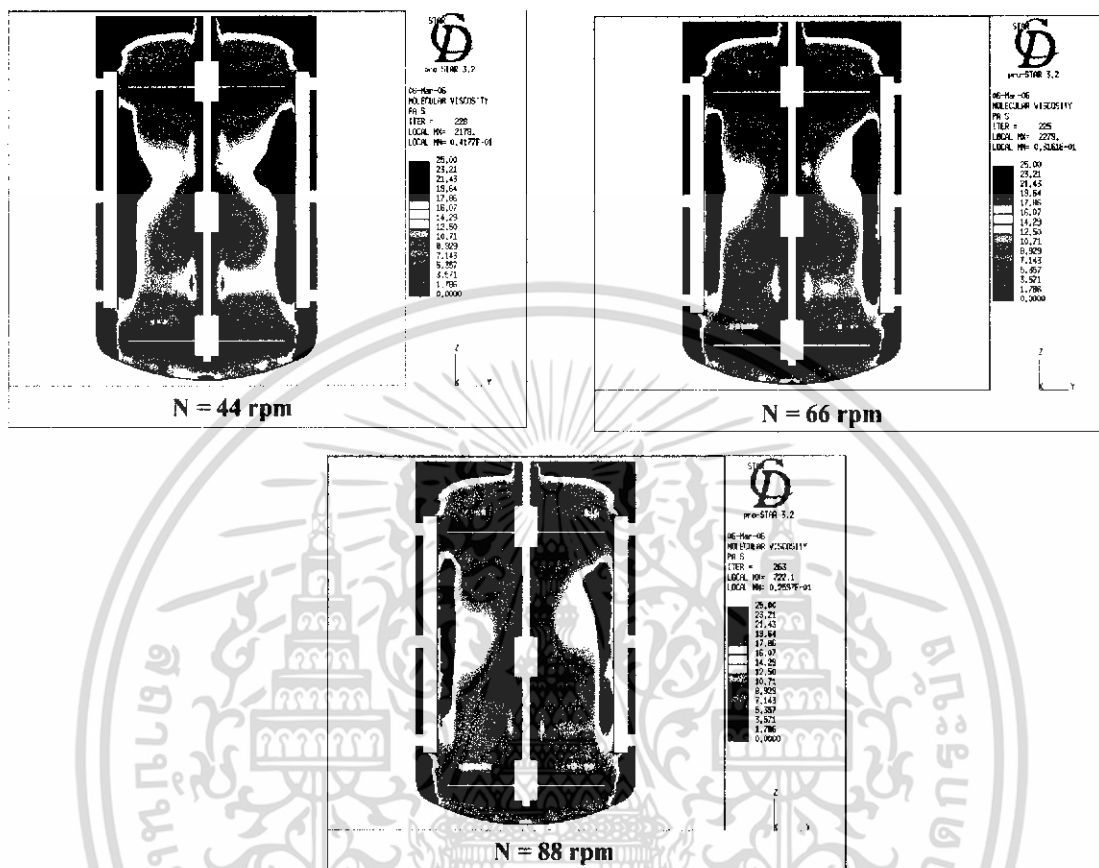


รูปที่ 3.10 การกระจายตัวของความหนืดในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีคิริบ ไบควอนชนิด Paddle ที่ความเร็วรอบของไบควอน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที

จากผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีคิริบ ไบควอนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 พบว่าที่ความเร็วรอบของไบควอน 88 รอบต่อนาที มีการกระจายตัวของความหนืดดีที่สุด ต้องนำสภาวะที่ใช้จำลองต่างๆ และความเร็วรอบของไบควอน 88 รอบต่อนาที ไปทดลองในหน่วยทดลองผลิต เพื่อตรวจสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และสรุปแบบและสภาวะการผสม (มาตรฐานของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท: ความหนืด 60 - 140 เซนติพอยส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบมีครีบบ  
ใบกวนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังรูปที่ 3.13



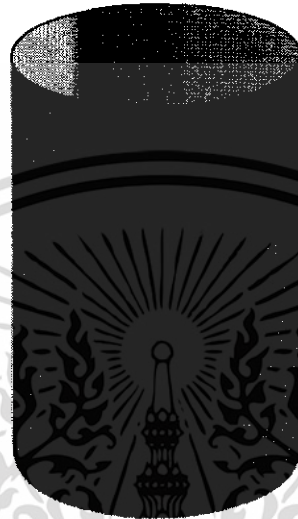
รูปที่ 3.13 การกระจายตัวของความหนืดในถังผสม 6 ตัน แบบมีครีบบ ใบกวนชนิด Paddle ที่ความเร็วรอบของใบกวน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที

จากผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบมีครีบบ 4 ใบ ใบกวนชนิด Paddle ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 พบว่าที่ความเร็วรอบของใบกวน 88 รอบต่อนาทีที่มีการกระจายตัวของความหนืดดีที่สุด ต้องนำสภาวะที่ใช้จำลองต่างๆ และความเร็วรอบของใบกวน 88 รอบต่อนาที ไปทดลองในหน่วยทดลองผลิต เพื่อตรวจสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และสรุปแบบและสภาวะการผสม (มาตรฐานของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท: ความหนืด 60 - 140 เซนติพอยส์)

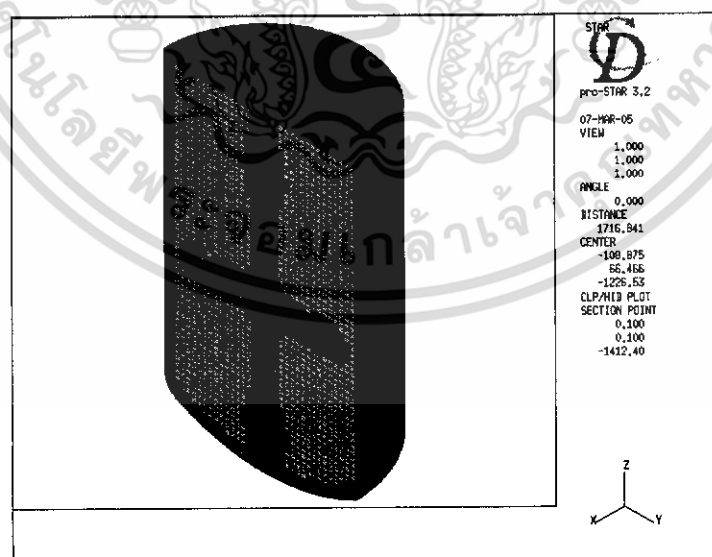
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 จำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์ในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบวกวนชนิด Intermix ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24

ผลการขึ้นรูปและสร้างเมชของถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบวกวนชนิด Intermix แสดงดังรูปที่ 3.14 – 3.15



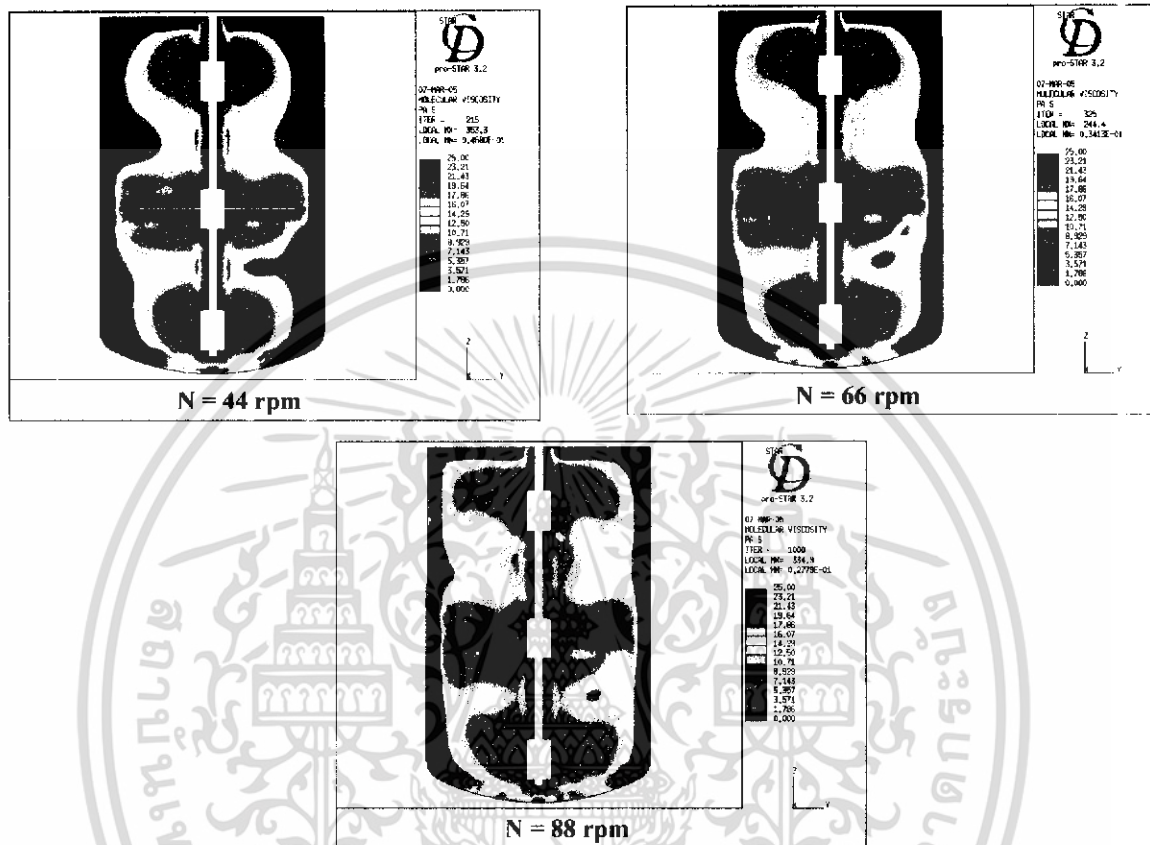
รูปที่ 3.14 ถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบวกวนชนิด Intermix ที่ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม Unigraphics NX 2



รูปที่ 3.15 ถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบวกวนชนิด Intermix ที่ถูกสร้างเมชด้วยโปรแกรม Pro-AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบ  
ใบกวนชนิด Intermix ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังรูปที่ 3.16



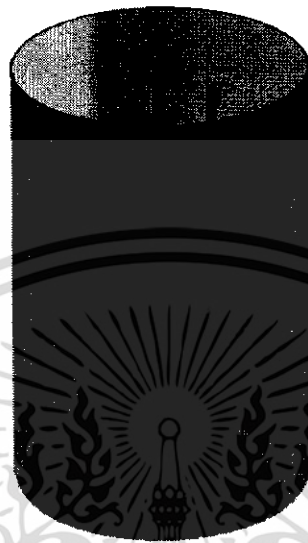
รูปที่ 3.16 การกระจายตัวของความหนืดในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบ ใบกวนชนิด Intermix ที่ความเร็วรอบของใบกวน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที

จากผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบไม่มีครีบบ ใบกวนชนิด Intermix ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 พบว่าที่ความเร็วรอบของใบกวน 66 รอบต่อนาที มีการกระจายตัวของความหนืดดีที่สุด ต้องนำสภาวะที่ใช้จำลองต่างๆ และความเร็วยรอบของใบกวน 66 รอบต่อนาที ไปทดลองในห้องปฏิบัติการและในหน่วยทดลองผลิต เพื่อตรวจสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และสรุปแบบและสภาวะการผสม (มาตรฐานของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท: ความหนืด 60 - 140 เซนติพอยส์)

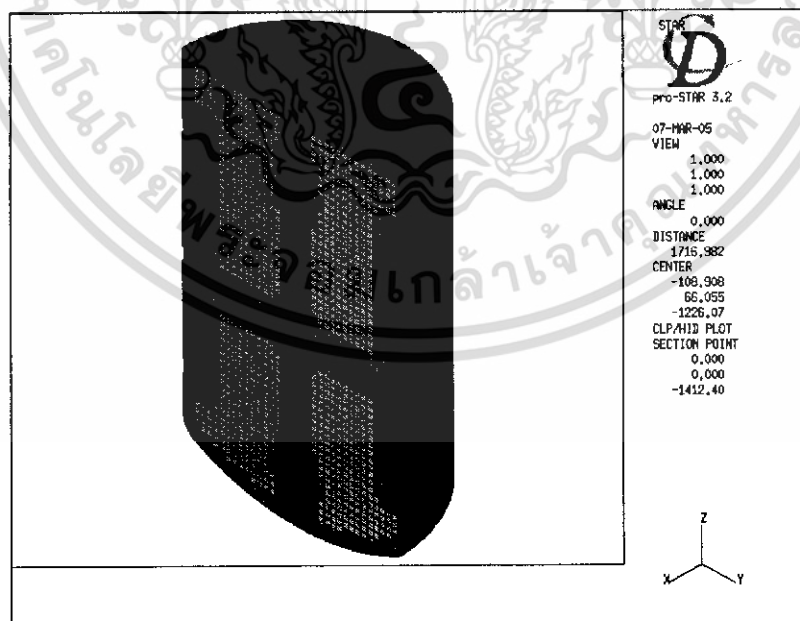
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.6 จำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์ในถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ 4 ใบ  
 ใบกวนชนิด Intermix ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24

ผลการขึ้นรูปและสร้างเมชของถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Intermix แสดง  
 ดังรูปที่ 3.17 – 3.18



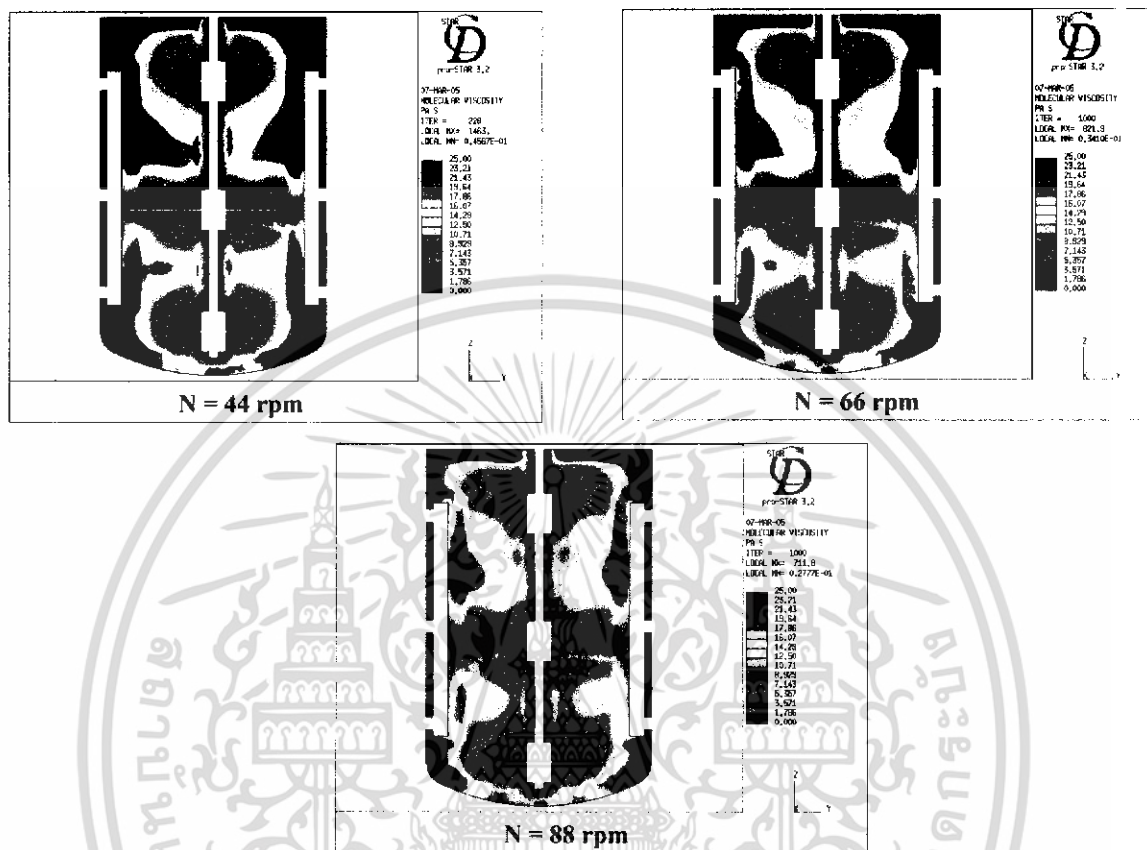
รูปที่ 3.17 ถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Intermix ที่ถูกขึ้นรูปด้วยโปรแกรม  
 Unigraphics NX 2



รูปที่ 3.18 ถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ ใบกวนชนิด Intermix ที่ถูกสร้างเมชด้วยโปรแกรม Pro-AM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ ไบคอนชนิด Intermix ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 ดังรูปที่ 3.19



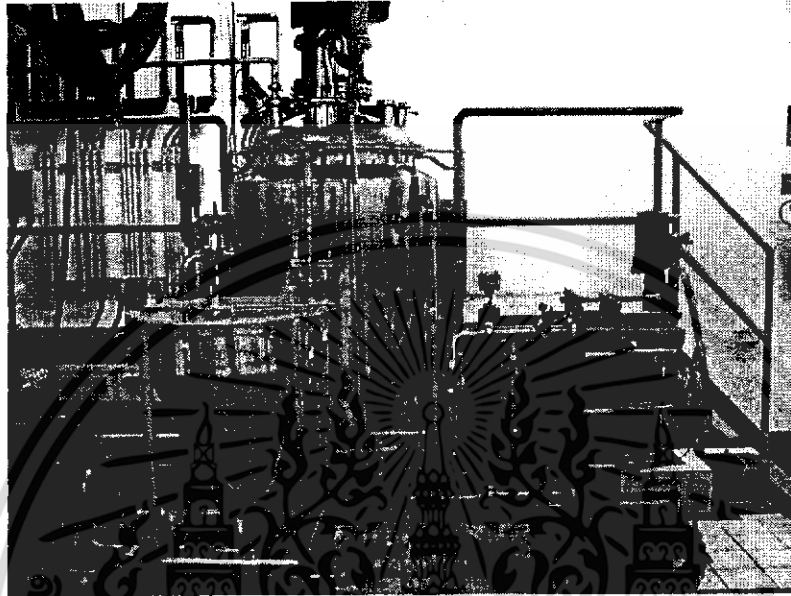
รูปที่ 3.19 การกระจายตัวของความหนืดในถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ ไบคอนชนิด Intermix ที่ความเร็วรอบของไบคอน 44, 66 และ 88 รอบต่อนาที

จากผลการจำลองการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสม 6 ตัน แบบมีคิริบ 4 ไบคอนชนิด Intermix ด้วยโปรแกรม Star CD version 3.24 พบว่าที่ความเร็วรอบของไบคอน 66 รอบต่อนาที มีการกระจายตัวของความหนืดดีที่สุด ต้องนำสภาวะที่ใช้จำลองต่างๆ และความเร็วรอบของไบคอน 66 รอบต่อนาที ไปทดลองในห้องปฏิบัติการและในหน่วยทดลองผลิต เพื่อตรวจสอบความหนืดของผลิตภัณฑ์ที่ได้ และสรุปแบบและสภาวะการผสม (มาตรฐานของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท: ความหนืด 60 - 140 เซนติพอยส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การทดลองผสมชั้นซิลและคอมฟอร์ทในหน่วยทดลองผลิต

3.6.1 ทดลองผสมแซมพูชั้นซิล ในหน่วยทดลองผลิตด้วยถังผสมหลักแบบมีคิริบ 3 ใบ และไม่มีคิริบขนาด 200 ลิตร ใบกวนชนิด Paddle ดังรูปที่ 3.20 และ 3.21 โดยใช้สภาวะจากการจำลองการผสมจากถังผสม 10 ตัน และทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.20 ถังผสมหลักขนาด 200 ลิตร และหน่วยสนับสนุน



รูปที่ 3.21 ถังผสมหลักขนาด 200 ลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองตอนที่ 3.6.1 ประกอบด้วยชุดการทดลองต่างๆ ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1

- ถึงผสมหลักขนาด 200 ลิตร แบบไม่มีครีบริบ

ชุดการทดลองที่ 2

- ถึงผสมหลักขนาด 200 ลิตร แบบมีครีบริบ 3 ใบ

ชุดการทดลองใช้ปริมาณวัตถุดิบคงที่ เช่น น้ำ สารชะล้าง ต่าง น้ำหอม และสี เพื่อดูอิทธิพลของถึงผสมแบบมีครีบริบและไม่มีครีบริบต่อคุณภาพการผสม ผลการทดสอบสมบัติของแชมพูชั้นซิดิลแสดงดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบสมบัติของแชมพูชั้นซิดิลที่ชุดการทดลองต่างๆ

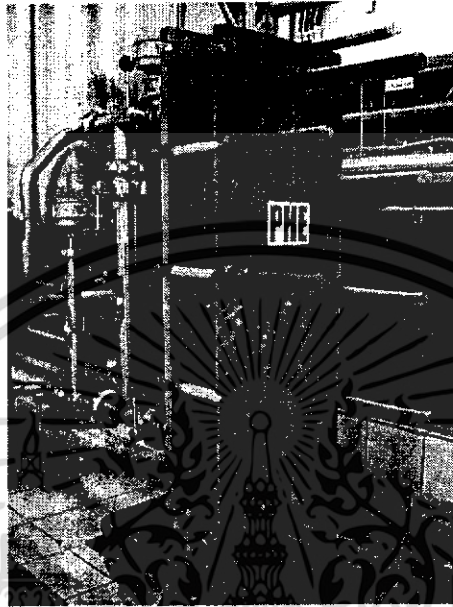
คุณสมบัติ	มาตรฐานของผลิตภัณฑ์	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2
ลักษณะที่มองเห็น	ไม่มีก้อนวัตถุดิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อนวัตถุดิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อนวัตถุดิบ หลงเหลือ
ค่าความเป็นกรด-เบส	5.5 - 6.5	6.17	6.31
ความหนืด (เซนติพอยส์)	4,000 - 6,000	5,210	5,360

สรุปผลการทดลองตอนที่ 3.6.1

จากตารางที่ 3.6 ชุดการทดลองทั้งสองชุดไม่มีก้อนวัตถุดิบหลงเหลือ ค่าความเป็นกรด-เบสและความหนืดอยู่ในค่ามาตรฐาน แสดงว่าคุณภาพการผสมและการกระจายตัวของวัตถุดิบในแชมพูชั้นซิดิลในถึงผสมแบบมีครีบริบและแบบไม่มีครีบริบดี

ดังนั้นคาดว่าจะสามารถใช้ถึงผสมหลักขนาด 10 ตันซึ่งเป็นถึงผสมแบบมีครีบริบที่บริษัทมีอยู่ผสมแชมพูชั้นซิดิลได้

3.6.2 ทดลองผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ในหน่วยทดลองผลิตด้วยถังผสมหลักแบบมีครีป 3 ใบและไม่มีครีปขนาด 200 ลิตร ใบกวนชนิด Paddle (รูปที่ 3.20 และ 3.21) ด้วยเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น ดังรูปที่ 3.22 และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีเปลือกหุ้ม โดยใช้สภาวะจากการจำลองการผสมจากถังผสม 6 ตัน และทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์



รูปที่ 3.22 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

การทดลองที่ 3.6.2 ประกอบด้วยชุดการทดลองต่างๆ ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1

- ถังผสมหลักขนาด 200 ลิตร แบบมีครีป 3 ใบ
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ชุดการทดลองที่ 2

- ถังผสมหลักขนาด 200 ลิตร แบบมีครีป 3 ใบ
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีเปลือกหุ้ม

ชุดการทดลองที่ 3

- ถังผสมหลักขนาด 200 ลิตร แบบไม่มีครีป
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

ชุดการทดลองที่ 4

- ถังผสมหลักขนาด 200 ลิตร แบบไม่มีครีป
- เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีเปลือกหุ้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้าที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในการผสม คือ เพื่อดึงความร้อนออกจากระบบ ให้ได้อุณหภูมิของของผสมตามที่ต้องการสำหรับเติมวัตถุดิบในขั้นตอนต่อไป

ทุกชุดการทดลองใช้ปริมาณวัตถุดิบคงที่ เช่น น้ำ กรดฟอสฟอริก พอลิเมอร์ และสารยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย เพื่อดูอิทธิพลของชนิดของถังผสม และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนต่อคุณภาพการผสม ผลการทดสอบคุณสมบัติของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท แสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ผลการทดสอบสมบัติของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทที่ชุดการทดลองต่างๆ

คุณสมบัติ	มาตรฐานของผลิตภัณฑ์	ชุดการทดลองที่ 1	ชุดการทดลองที่ 2	ชุดการทดลองที่ 3	ชุดการทดลองที่ 4
ลักษณะที่มองเห็น	ไม่มีก้อน วัตถุดิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุดิบ หลงเหลือ	ไม่มีก้อน วัตถุดิบ หลงเหลือ	มีก้อน วัตถุดิบ หลงเหลือ	มีก้อน วัตถุดิบ หลงเหลือ
ค่าความเป็นกรด-เบส	2.5 - 2.9	2.76	2.76	2.76	2.76
ความหนืด (เซนติพอยส์)	60 - 140	110	80	118	124

สรุปผลการทดลองตอนที่ 3.6.2

1. จากตารางที่ 3.7 มีเพียงชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 เท่านั้นที่ไม่มีก้อนวัตถุดิบหลงเหลือ แสดงว่าคุณภาพการผสมและการกระจายตัวของวัตถุดิบในน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทในถังผสมแบบมีครีบริบดีกว่าแบบไม่มีครีบริบ

2. จากชุดการทดลองที่ 1 และชุดการทดลองที่ 2 พบว่าที่เวลาผสมเท่ากัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นมีความหนืดสูงกว่าเมื่อใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีเปลือกหุ้ม ซึ่งสอดคล้องว่า เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีเปลือกหุ้มมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น [15] จึงใช้เวลาในการผสมนานกว่า และเนื่องจากน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทเป็นของเหลวประเภท Pseudoplastic fluid เมื่อมีการผสมนานจะได้รับความหนืดมากกว่าทำให้มีความหนืดลดลง

ดังนั้นถ้าต้องการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทด้วยถังผสมหลักขนาด 6 ตันจะต้องติดครีบริบ ทั้งนี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจเป็นแบบแผ่นหรือแบบมีเปลือกหุ้มก็ได้ เพราะค่าความหนืดจากทั้งสองชุดการทดลองอยู่ในค่ามาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 การเปรียบเทียบการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทที่ในถังผสมหลักต่างๆ โดยทดลองในห้องปฏิบัติการ

การศึกษาผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำต่อคุณภาพการผสมของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยผสมสารในบีกเกอร์ ขนาด 3 ลิตร และทดสอบคุณภาพผลิตภัณฑ์

ตารางที่ 3.8 ผลของอุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำในถังผสมต่อสมบัติของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท

อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ (องศาเซลเซียส)	ความหนืดหลังการผสม (เซนติพอยส์)
44	78
46	77
47	53
48	46
50	18

สรุปผลการทดลองตอนที่ 3.6.3

จากตารางที่ 3.8 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำที่ 44 และ 46 องศาเซลเซียส จะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความหนืดตามมาตรฐาน คือ 60 – 140 เซนติพอยส์

ดังนั้น การผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ควรใช้อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำไม่เกิน 46 องศาเซลเซียส

## บทที่ 4

### สรุปผลการดำเนินการ

1. คาดว่าสามารถใช้ถังผสมหลักขนาด 10 ตันซึ่งเป็นถังผสมแบบมีครีบทึ่บริษัทมีอยู่ผสมแชมพูชันซิลได้

2. ถ้าต้องการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทด้วยถังผสมหลักขนาด 6 ตัน จะต้องติดครีบทึ่นี้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจเป็นแบบแผ่นหรือแบบมีเปลือกหุ้มก็ได้

รายละเอียดและค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงระบบการผสมของถังผสมหลักขนาด 10 ตันเพื่อการผสมแชมพูชันซิล และถังผสมหลักขนาด 6 ตัน เพื่อการผสมน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดต้นทุนที่ใช้ปรับปรุงระบบการผสม

ลำดับที่	รายละเอียด	ค่าแรง	ค่าวัสดุ
1	ถังผสมหลักติดครีบทึ่ขนาด 6 ตัน และใบกวน		2,500,000
2	ระบบท่อหุ้มฉนวนและวาล์วขนาด 2 นิ้ว		500,000
3	ระบบควบคุมอัตโนมัติ		2,000,000
4	ค่าแรง	300,000	
5	ถังผสมรอง ขนาด 300 กิโลกรัม และใบกวน		200,000
6	ระบบท่อและวาล์ว ขนาด 2 นิ้ว		60,000
		300,000	5,260,000
	รวมค่าแรงงานและวัสดุ	5,560,000	
	ค่าเผื่อ 5 %	278,000	
	สรุปยอดรวม (บาท)	5,838,000	

ต้นทุนที่ใช้ปรับปรุงระบบการผสม เท่ากับ 5,838,000 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบกำไรที่เพิ่มขึ้นของแชมป์ูนชีลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์

ผลิตภัณฑ์	แชมป์ูนชีล		น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์		แชมป์ูนชีล
	ปัจจุบัน	แผน	ปัจจุบัน	แผน	
ขนาดถังผสม (ตัน/รอบการผสม)	6	10	10	6	6+10
ต้นทุนผลิตภัณฑ์ของเหลว (บาท/ตัน)					
กำไรที่ต้องการ (%)					
รอบเวลาในการผสม* (นาที/รอบการผสม)					
1 วัน ผสมได้ (รอบการผสม/วัน)					
1 วัน ได้ผลิตภัณฑ์ (ตัน/วัน)					
1 วัน กำไร (บาท/วัน)					
1 ปี** กำไร (บาท/ปี)	A	B	C	D	E
จำนวนกำไรที่เพิ่มขึ้น(+) หรือลดลง(-) เมื่อเปลี่ยนถึงผสมตามแผน (บาท/ปี)		B-A		D-C	E-(A+C)
จำนวนกำไรทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเปลี่ยนถึงผสมตามแผน (บาท/ปี)			13,680,000		34,200,000

รอบเวลาในการผสม\* (นาที/รอบการผสม) ในที่นี้หมายถึง เวลาตั้งแต่เริ่มใส่วัตถุดิบลงไปถึงผสมหลักจนกระทั่งถ่ายผลิตภัณฑ์และล้างถังผสมเสร็จ  
 ทั้งนี้รอบเวลาในการผสมแชมป์ูนชีลและน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์ไม่ว่าจะใช้ถังผสมขนาด 10 ตัน หรือ 6 ตัน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

1 ปี\*\* ในที่นี้คิดวันปฏิบัติงาน 360 วัน/ปี

จากตารางที่ 4.2 ถ้าผลิตตามแผน 1 ปี คือ ใช้ถังผสมขนาด 10 ตัน ผลิตแชมป์ูนชีล และใช้น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมพิวเตอร์

จะได้กำไรเพิ่มขึ้นเท่ากับ  $(B-A) + (D-C) = 13,680,000$  บาท/ปี

แต่ถ้าผลิตแชมป์ูนชีลเพียงอย่างเดียว ทั้งในถังผสมหลักขนาด 6 ตัน และ 10 ตัน อย่างละ 1 ถึง จะได้กำไรเพิ่มขึ้นเท่ากับ 34,200,000 บาท/ปี

ตารางที่ 4.3 รายละเอียดมูลค่าที่เพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์เมื่อผลิตตามแผน

ผลิตภัณฑ์	แชมพูชันซิล	น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท
มูลค่าผลิตภัณฑ์ที่เพิ่มขึ้นขั้นต่ำสุดเมื่อผลิตตามแผน (บาท/วัน)	G	H
จำนวนกำไรทั้งหมดที่เพิ่มขึ้นขั้นต่ำสุดเมื่อผลิตตามแผน (บาท/วัน)	G + H	

หมายเหตุ การผลิตตามแผน คือ ใช้ถังผสมขนาด 10 ตัน ผลิตแชมพูชันซิล และใช้ถังผสมขนาด 6 ตัน ผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท

$$\begin{aligned}
 \text{จำนวนวันที่คืนทุน} &= \text{ต้นทุนในการปรับปรุงระบบการผสม} / (\text{กำไรของแชมพูชันซิล} \\
 &\quad \text{ต่อวัน} + \text{กำไรของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทต่อวัน}) \\
 &= 5,838,000 / (G+H) \\
 &= 154 \text{ วัน}
 \end{aligned}$$

จากการวิเคราะห์เทียบกับต้นทุนการผลิตของบริษัท ถ้าลงทุนในการปรับปรุงระบบการผสมจำนวน 5,838,000 บาท จะคืนทุนที่ 154 วัน หรือประมาณ 5 เดือน โดยต้องผลิตทั้งแชมพูชันซิลที่ถังผสมขนาด 10 ตัน และน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ทที่ถังผสมขนาด 6 ตัน

## เอกสารอ้างอิง

- [1] บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด. เอกสารการปฏิบัติงานของ HPC Liquids & Soap.
- [2] นรากร จันทรประเสริฐ และไพศาล สุวัฒน์ชินเจริญ. การลดรอบเวลาการผสมวัตถุดิบในการผลิตผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดชนิดเหลว. ปรียญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [3] วันชัย ริจิรวนิช และช่อม พลอยมีค่า. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2537.
- [4] กิตติ อินทรานนท์. เศรษฐศาสตร์วิศวกรรม. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2531.
- [5] Paul E. L., Atiemo-Obeng V. A. and Kresta S. M. **Handbook of Industrial Mixing**. John Wiley & Sons. 2004.
- [6] McCabe W. L., Smith J. C. and Harriott P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. Sixth Edition. Singapore: McGraw-Hill. 2001.
- [7] UHL V. W. and Gray J. B. **Mixing Theory and Practice. Volume 1**. New York: Academic Press. 1973.
- [8] Tatterson G. B. **Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks**. McGraw-Hill. 1991.
- [9] N. Kuzmanic and B. Ljubicc. "Suspension of floating solids with up-pumping pitched-blade impellers; Mixing time and power characteristics". **Chemical Engineering Journal**, vol.84, December 2001, pp.325-333.
- [10] A. S. Khare and K. Niranjana. "An experimental investigation into the effect of impeller design on gas hold-up in a highly viscous Newtonian liquid". **Chemical Engineering Science Journal**, vol.54, April 1999, pp.1093-1100.
- [11] Brookfield Engineering Labs. Inc., **Technical Papers on Viscosity Measurement and Control**.
- [12] 66 เรื่องนำรู้เทคนิคเครื่องกล (ชุดที่ 4). กรุงเทพฯ เอ็มแอนดีอี
- [13] Perry, Robert H., Green, Don W., Maloney, James O., **Perry's Chemical Engineers' Handbook**, International Edition, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [14] [www2.dede.go.th/training/dataenergy/DocEnergy/energy%20saving%20technology13.htm](http://www2.dede.go.th/training/dataenergy/DocEnergy/energy%20saving%20technology13.htm)
- [15] 65 เรื่องนำรู้เทคนิคเครื่องกล (ชุดที่ 3). กรุงเทพฯ เอ็มแอนดีอี. 2534.
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซิติทั้ง 8 สูตร  
และน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ทั้ง 4 สูตร

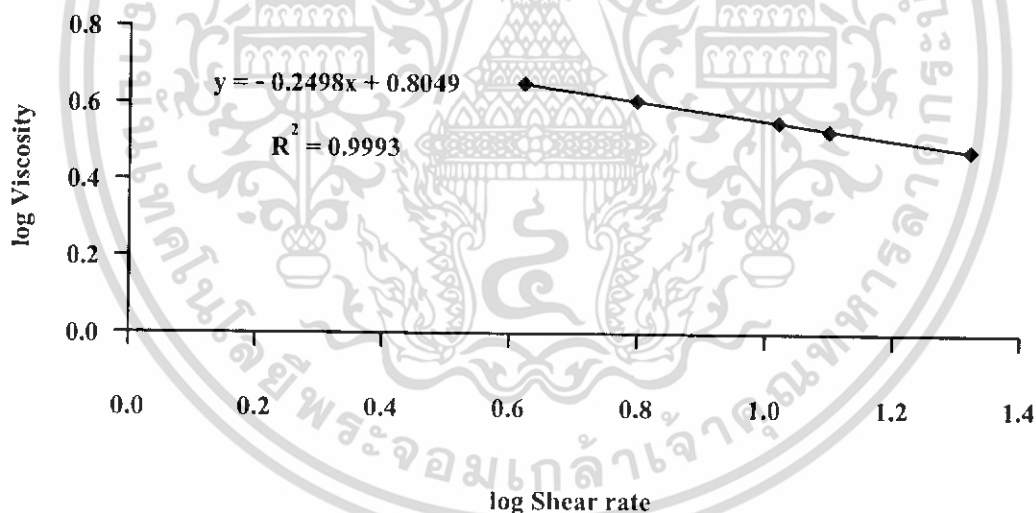
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ภาคผนวก ก.

1. หาค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแอมพูชันซิลทั้ง 8 สูตร โดยเครื่อง Rotational viscometer ของบริษัท Brookfield Engineering Labs รุ่น LVDV-E ใช้ Spindle No.64 ช่วงของความหนืดที่วัดได้ 2,000 – 2,000,000 เซนติพอยส์ ได้ผลในตารางที่ ก.1 ถึง ก.8 รูปที่ ก.1 ถึง ก.8

ตารางที่ ก.1 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแอมพูชันซิลสูตร SPC

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	14.9	4.469	4.18	0.6502	0.6212
30.0	20.2	4.039	6.27	0.6063	0.7973
50.0	29.6	3.551	10.45	0.5504	1.0191
60.0	33.7	3.369	12.54	0.5275	1.0983
100.0	50.0	2.999	20.90	0.4770	1.3201



รูปที่ ก.1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแอมพูชันซิลสูตร SPC

ตัวอย่างการคำนวณ

$$\mu_a = K\gamma^{n-1} \quad (2.9)$$

$$\log \mu_a = (n-1) \log \gamma + \log K$$

$$y = -0.2498x + 0.8049$$

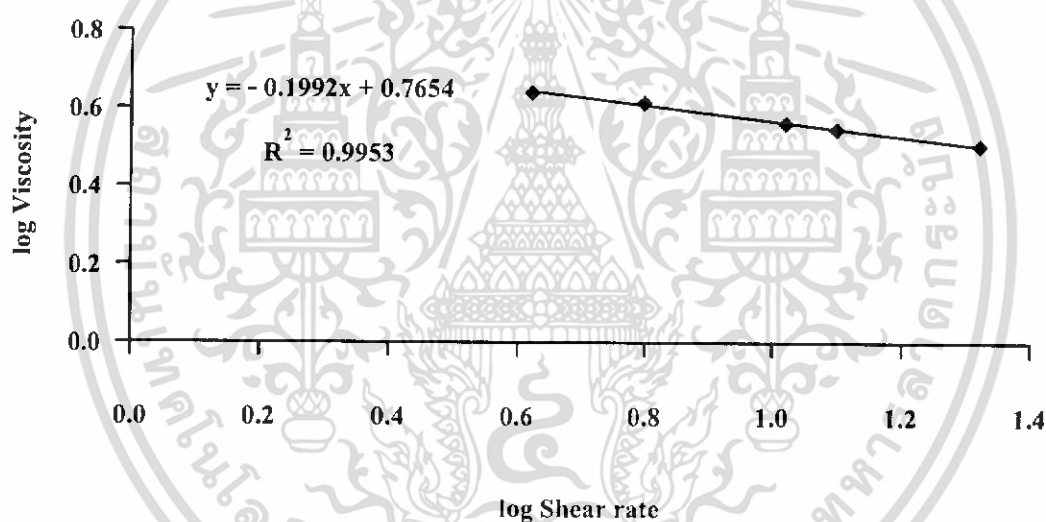
$$\log K = 0.8049$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 K &= 6.3812 \\
 n-1 &= -0.2498 \\
 n &= 0.7502
 \end{aligned}$$

ตารางที่ ก.2 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแอมพูชันซิลิستر SPD

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	14.5	4.349	4.18	0.6384	0.6212
30.0	20.5	4.099	6.27	0.6127	0.7973
50.0	34.3	3.635	10.45	0.5605	1.0191
60.0	35.1	3.506	12.54	0.5448	1.0983
100.0	53.1	3.185	20.90	0.5031	1.3201



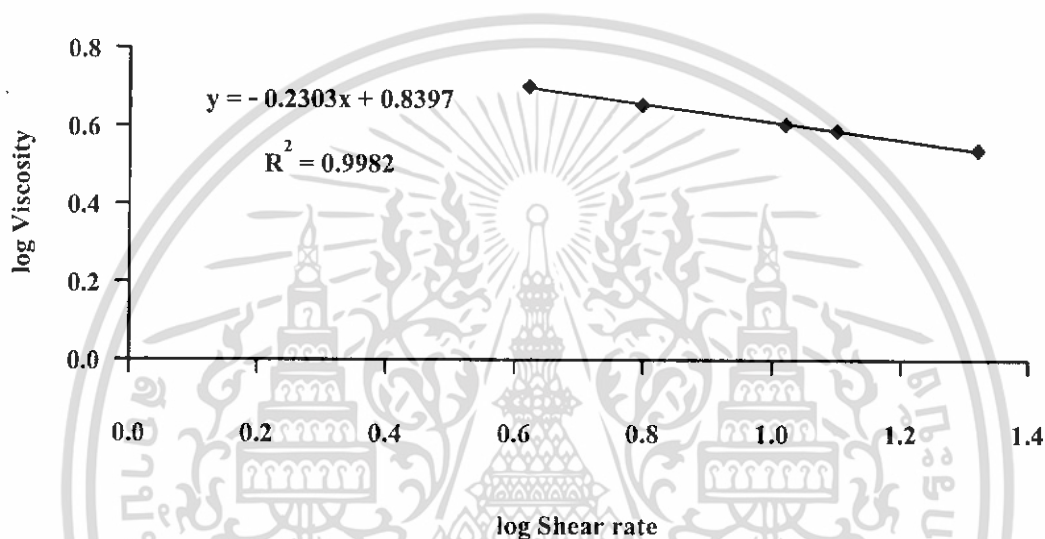
รูปที่ ก.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแอมพูชันซิลิستر SPD

$$\begin{aligned}
 \log K &= 0.7654 \\
 K &= 5.8264 \\
 n-1 &= -0.1992 \\
 n &= 0.8008
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแอมพูชันซิลิستر SPE

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	16.7	5.009	4.18	0.6998	0.6212
30.0	22.5	4.499	6.27	0.6531	0.7973
50.0	33.4	4.007	10.45	0.6028	1.0191
60.0	38.6	3.859	12.54	0.5865	1.0983
100.0	57.5	3.449	20.90	0.5377	1.3201



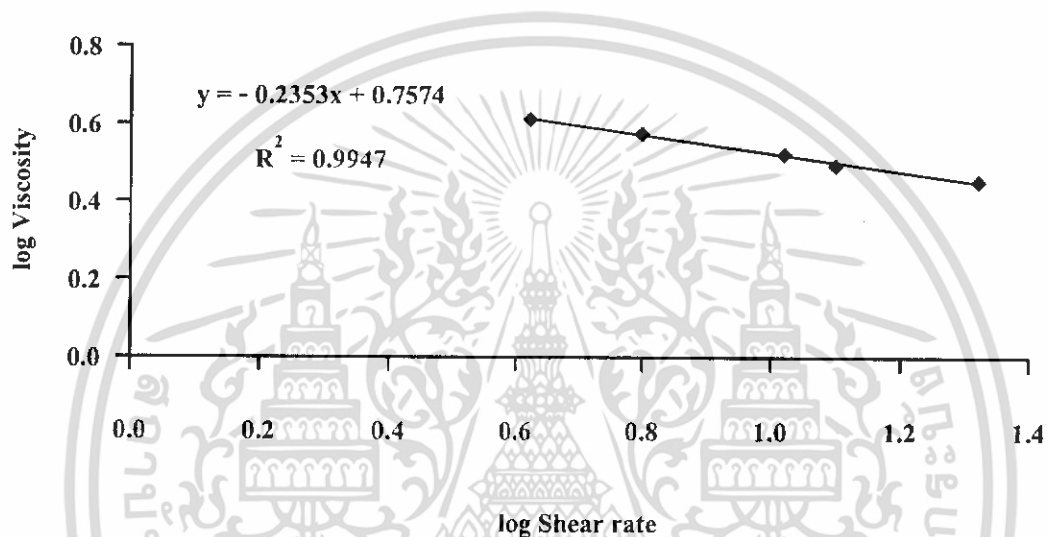
รูปที่ ก.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแอมพูชันซิลิستر SPE

$$\begin{aligned} \log K &= 0.8397 \\ K &= 6.9135 \\ n-1 &= -0.2303 \\ n &= 0.7697 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซิลิโคน SPO

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	13.6	4.079	4.18	0.6106	0.6212
30.0	18.7	3.739	6.27	0.5728	0.7973
50.0	27.6	3.311	10.45	0.5200	1.0191
60.0	31.0	3.099	12.54	0.4912	1.0983
100.0	47.0	2.819	20.90	0.4501	1.3201



รูปที่ ก.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพูชั้นซิลิโคน SPO

$$\log K = 0.7574$$

$$K = 5.7201$$

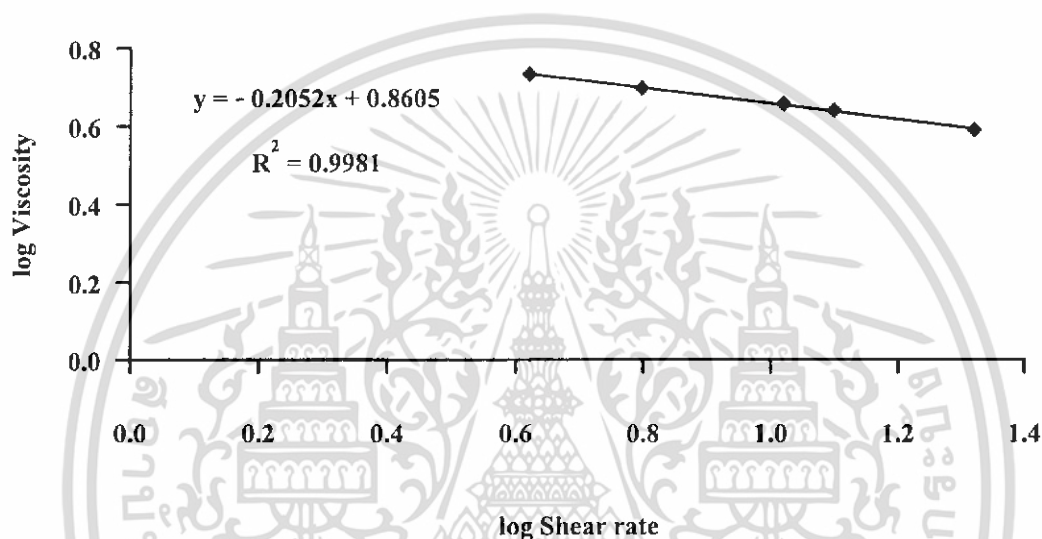
$$n-1 = -0.2353$$

$$n = 0.7647$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซิดสูตร SPS

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	18.0	5.399	4.18	0.7323	0.6212
30.0	24.8	4.959	6.27	0.6954	0.7973
50.0	37.6	4.511	10.45	0.6543	1.0191
60.0	43.4	4.339	12.54	0.6374	1.0983
100.0	64.4	3.863	20.90	0.5869	1.3201



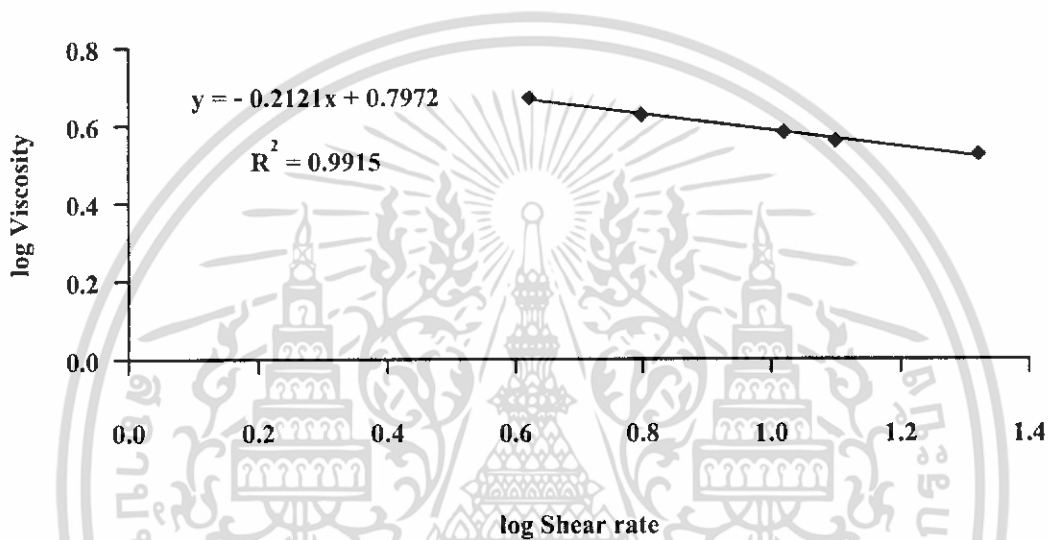
รูปที่ ก.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพูชั้นซิดสูตร SPS

$$\begin{aligned} \log K &= 0.8605 \\ K &= 7.2527 \\ n-1 &= -0.2052 \\ n &= 0.7948 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.6 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซัลฟูร SPU

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	15.6	4.679	4.18	0.6702	0.6212
30.0	21.1	4.219	6.27	0.6252	0.7973
50.0	31.7	3.803	10.45	0.5801	1.0191
60.0	36.1	3.609	12.54	0.5574	1.0983
100.0	55.6	3.335	20.90	0.5231	1.3201



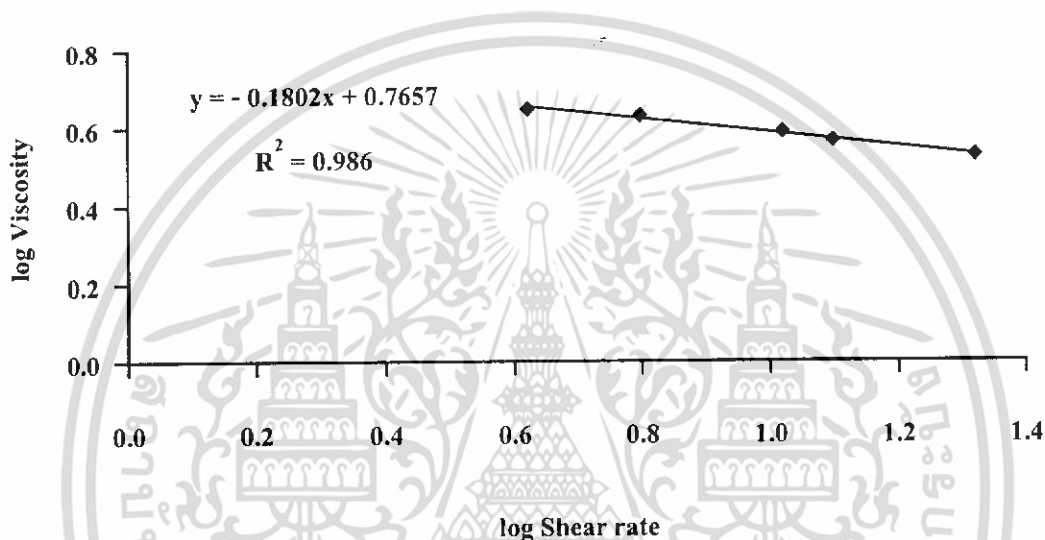
รูปที่ ก.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพูชั้นซัลฟูร SPU

$$\begin{aligned} \log K &= 0.7972 \\ K &= 6.2690 \\ n-1 &= -0.2121 \\ n &= 0.7879 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซิลิโคน SPW

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	14.8	4.439	4.18	0.6473	0.6212
30.0	21.3	4.259	6.27	0.6293	0.7973
50.0	32.2	3.863	10.45	0.5869	1.0191
60.0	36.7	3.669	12.54	0.5645	1.0983
100.0	55.9	3.353	20.90	0.5254	1.3201



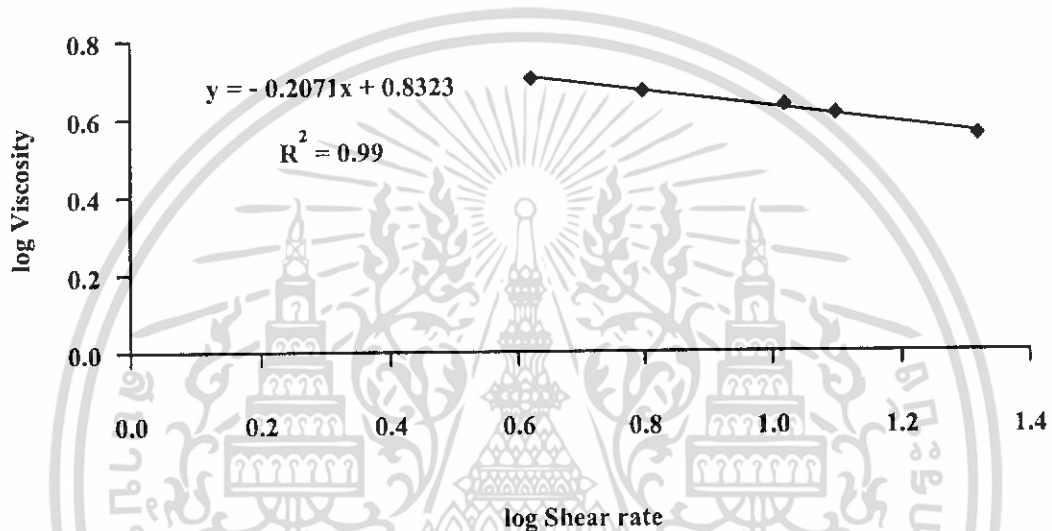
รูปที่ ก.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพูชั้นซิลิโคน SPW

$$\begin{aligned} \log K &= 0.7657 \\ K &= 5.8304 \\ n-1 &= -0.1802 \\ n &= 0.8198 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.8 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของแชมพูชั้นซิลิโคน SPY

N (rpm)	% Torque	Viscosity (Pa s)	Shear rate (1/s)	log Viscosity	log Shear rate
20.0	16.7	5.009	4.18	0.6998	0.6212
30.0	23.2	4.639	6.27	0.6664	0.7973
50.0	35.5	4.259	10.45	0.6293	1.0191
60.0	40.5	4.049	12.54	0.6073	1.0983
100.0	59.5	3.569	20.90	0.5525	1.3201



รูปที่ ก.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของแชมพูชั้นซิลิโคน SPY

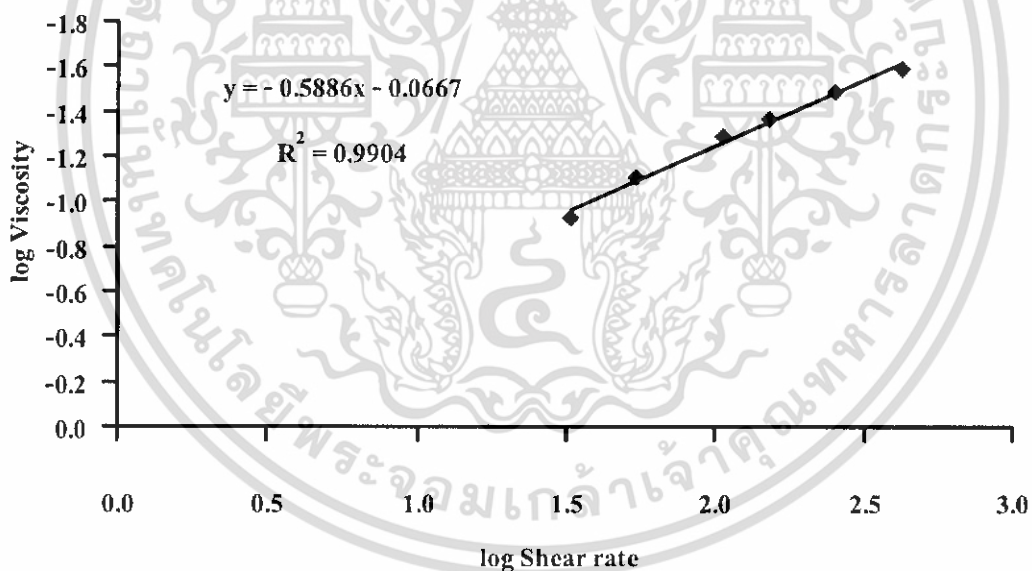
$$\begin{aligned} \log K &= 0.8323 \\ K &= 6.7967 \\ n-1 &= -0.2071 \\ n &= 0.7929 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หาค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท ทั้ง 4 สูตรโดยเครื่อง Rotational viscometer ของบริษัท Haake รุ่น VT 500 ใช้ Spindle No. MV1 ช่วงความหนืดที่วัดได้ 3 -10,000 เซนติพอยส์ ได้ผลในตารางที่ ก.9 ถึง ก.12 รูปที่ ก.9 ถึง ก.12

ตารางที่ ก.9 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n) ของ  
น้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCB

Shear rate (1/s)	Viscosity (Pa s)	log Shear rate	log Viscosity
32.53	0.119	1.5123	-0.9245
54.29	0.079	1.7347	-1.1024
106.01	0.052	2.0253	-1.2840
151.10	0.043	2.1793	-1.3665
252.20	0.033	2.4017	-1.4815
420.20	0.026	2.6235	-1.5850



รูปที่ ก.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยาปรับผ้านุ่ม  
คอมฟอร์ท สูตร BCB

$$\log K = -0.0667$$

$$K = 0.8576$$

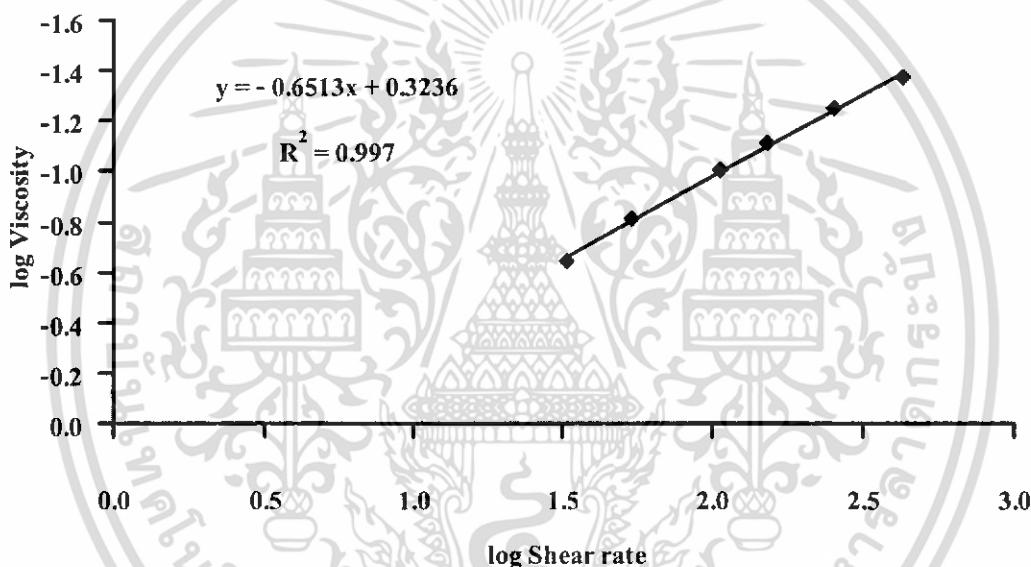
$$n-1 = -0.5886$$

$$n = 0.4114$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.10 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n)  
ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCO

Shear rate (1/s)	Viscosity (Pa s)	log Shear rate	log Viscosity
32.53	0.227	1.5123	-0.6440
54.29	0.154	1.7347	-0.8125
106.01	0.099	2.0253	-1.0044
151.10	0.077	2.1793	-1.1135
252.20	0.057	2.4017	-1.2441
420.20	0.043	2.6235	-1.3665



รูปที่ ก.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยาปรับผ้านุ่ม  
คอมฟอร์ท สูตร BCO

$$\log K = 0.3236$$

$$K = 2.1067$$

$$n-1 = -0.6513$$

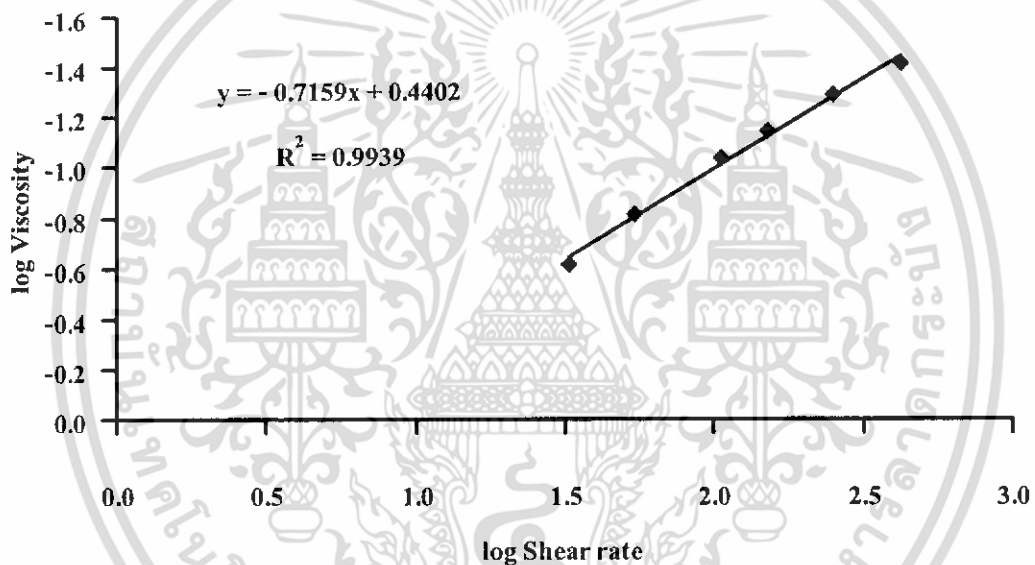
$$n = 0.3487$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.11 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n)

ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCP

Shear rate (1/s)	Viscosity (Pa s)	log Shear rate	log Viscosity
32.53	0.243	1.5123	-0.6144
54.29	0.155	1.7347	-0.8097
106.01	0.093	2.0253	-1.0315
151.10	0.072	2.1793	-1.1427
252.20	0.052	2.4017	-1.2840
420.20	0.039	2.6235	-1.4089



รูปที่ ก.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCP

$$\log K = 0.4402$$

$$K = 2.7555$$

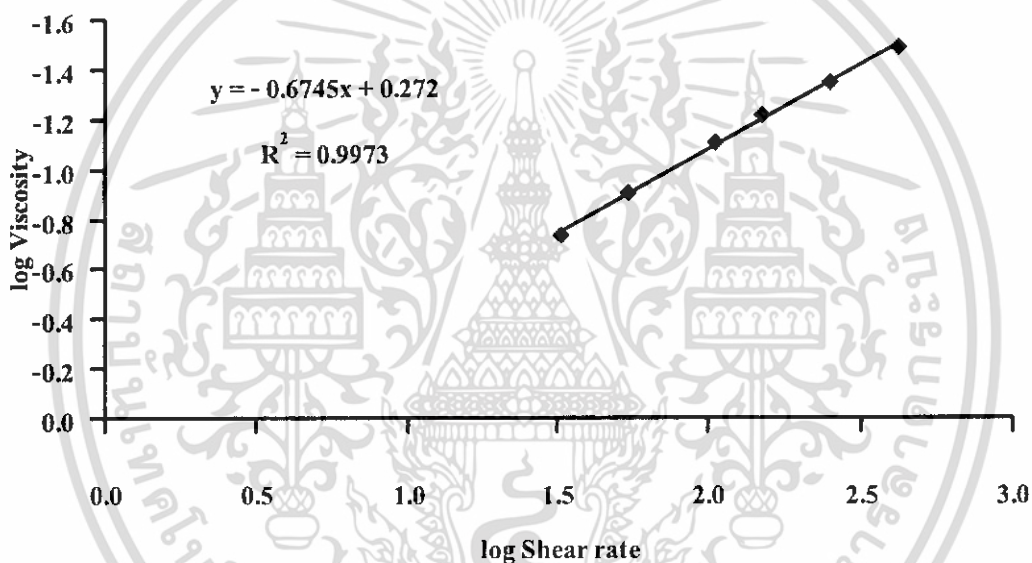
$$n-1 = -0.7159$$

$$n = 0.2841$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.12 ค่า Consistency index (K) และ Flow behavior index (n)  
ของน้ำยาปรับผ้านุ่มคอมฟอร์ท สูตร BCV

Shear rate (1/s)	Viscosity (Pa s)	log Shear rate	log Viscosity
32.53	0.186	1.5123	-0.7305
54.29	0.125	1.7347	-0.9031
106.01	0.078	2.0253	-1.1079
151.10	0.061	2.1793	-1.2147
252.20	0.045	2.4017	-1.3468
420.20	0.033	2.6235	-1.4815



รูปที่ ก.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง log Shear rate กับ log Viscosity ของน้ำยาปรับผ้านุ่ม  
คอมฟอร์ท สูตร BCV

$$\log K = 0.2720$$

$$K = 1.8707$$

$$n-1 = -0.6745$$

$$n = 0.3255$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้