

การห่าป้จจ้ยที่มืผลต่อควมหนึคของโซเดียมลอรลอิเทอร์ซัลเฟต  
โดยใช้การออกแบบการทคลงแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระเบับ

นางสาวนันทภรณ์ ต้อยจ้ตุรัส  
นายลวิตร นามวงษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึงของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2557

การหาปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต  
โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ

นางสาวนันทภรณ์ ต้อยจตุรัส  
นายลวิตร นามวงษ์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

**EVALUATION OF FACTORS AFFECTING SODIUM LAURYL ETHER  
SULFATE VISCOSITY BY 2-LEVEL FACTORIAL DESIGN OF EXPERIMENT**

**NANTHAPHORN      TOYJATTURAT  
LAWIT                NAMWONG**

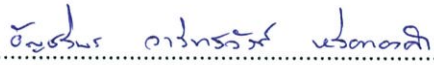


**THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2014**

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การหาปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต โดยใช้  
การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ  
โดย นางสาวนันท์ภรณ์ ต้อยจตุรัส  
นายลวิตร นามวงษ์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ  
ปริญญาานิพนธ์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

---

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
(รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ)  
  
.....กรรมการ  
(ดร. นริศรา ทองบุญชู)  
  
.....กรรมการ  
(ดร. ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์)

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การหาปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตโดยใช้
	การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ
โดย	นางสาวนันทภรณ์ ด้อยจตุรัส
	นายลวิตร นามวงษ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2557
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประเมินปัจจัยที่มีผลต่อการควบคุมความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวสำหรับการผลิตแชมพูไม่ให้เกินพิกัดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ปัจจัยที่ศึกษาเบื้องต้นพิจารณาจากแผนผังแสดงสาเหตุและผล ได้แก่ 1) ความพร้อมใช้ของบีม์ป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2) แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ (ทั้งโซเดียมไฮดรอกไซด์และเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟต) 3) ความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตซึ่งปรับด้วยอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำที่ใช้ทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน และ 4) อุณหภูมิการทำปฏิกิริยา จากการดำเนินงานพบว่าบีม์ที่ป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์ขาดการสอบเทียบ ทำให้อัตราการไหลคลาดเคลื่อนมากกว่า 140% จึงสอบเทียบบีม์ป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์ สามารถลดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากอัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ไม่เกิน 1.14% และพบว่าวัตถุดิบจาก 3 แหล่งผลิตที่ศึกษาไม่มีผลกระทบ สำหรับผลของความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟต และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา วิเคราะห์โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมมินิแทป 17 ที่ 69.5 - 70.5 wt% และ 45 - 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิการทำปฏิกิริยามีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตมากกว่าความเข้มข้น ส่วนอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยทั้งสองแทบไม่แสดงนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟต ผลการทดสอบค่าที่ได้จากการออกแบบการทดลองในกระบวนการผลิต ภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสม คือ ความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตที่ 69.5 wt% และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาที่ 50 องศาเซลเซียส ได้ความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟต 8,220 - 8,550 เซนติพอยส์ คำนวณมูลค่าที่ได้จากการลดโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตที่มีความหนืดไม่ได้ตามข้อกำหนดและค่าบำบัด รวมทั้งค่าเสียโอกาสอื่นๆ ประมาณ 4,500,000 บาทต่อปี

<b>Report Title</b>	Evaluation of Factors Affecting Sodium Lauryl Ether Sulfate Viscosity by 2-level Factorial Design of Experiment
<b>By</b>	Ms. Nanthaphorn Toyjatturat Mr. Lawit Namwong
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2014
<b>Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

## ABSTRACT

This work assessed the factors affecting viscosity of sodium lauryl ether sulfate (SLES), which is a surfactant in shampoo production. The viscosity of SLES must meet its specification. The following factors were initially considered by the cause and effect diagram: 1) integrity of sodium hydroxide pump 2) suppliers of ethoxylated alcohol (sodium hydroxide and ethoxylated alcohol were main raw materials for SLES production) 3) SLES concentration, which was adjusted by mass flow rate of water in sulfation, and 4) reaction temperature. It was found that sodium hydroxide measuring pump lacked of calibration resulting in high flow rate of approximately more than 140% deviation. Hence, the pump was calibrated and the deviation decreased to less than 1.14%. In case of the suppliers of ethoxylated alcohol, 3 different companies showed no effect on SLES viscosity. For SLES concentration and the reaction temperature, the  $2^k$ -full factorial design of experiment by Minitab 17 software was used to analyze the effects of those corresponding factors in the ranges of 69.5 - 70.5 wt% and 45 - 50 °C, respectively. The reaction temperature showed stronger effect on SLES viscosity than SLES concentration. The interaction of the two factors showed almost no significance. The optimal operating conditions obtained from the design of experiments were tested in the process. The SLES viscosity of 8,220 - 8,550 cP was observed at SLES concentration of 69.5 wt% and the reaction temperature of 50 °C. In summary, the calculated profit of relevance to the reduction of highly viscous SLES, the treatment cost of highly viscous SLES, and other opportunity costs was equivalent to 4,500,000 baht/year.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้บริหารของบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด ที่ให้โอกาสทำงานวิจัยร่วมกับทีมงานของบริษัท รวมถึงสนับสนุนวัสดุคืบและเครื่องมือในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณทรงศศิธา อุ่สุวรรณ ผู้จัดการแผนกวิศวกรรมและผู้จัดการแผนกซัลโฟเนชันคุณเอนก ทรัพย์จำนงค์ ผู้ควบคุมการผลิตแผนกซัลโฟเนชัน พนักงานห้องปฏิบัติการควบคุมการผลิต และพนักงานตรวจสอบคุณภาพแผนกซัลโฟเนชัน ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ และอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อัญชติพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ ชี้แนะแนวทางในการทำงาน ในการทำปริญญานิพนธ์ และคณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์ ดร.นริศรา ทองบุญชู และดร.ณัฐพล ฤกษ์เกษมสันต์

กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนามที่อบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจตลอดมา หากปริญญานิพนธ์นี้มีข้อผิดพลาดประการใด คณะทำงานขออ้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้ คุณความดีใดที่จะเกิดจากงานนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

นันทภรณ์ ศ้อยจตุรัส  
ลวิศร นามวงษ์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	vii
สารบัญรูป.....	ix
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 สารลดแรงตึงผิว.....	3
2.1.1 ความหมายของสารลดแรงตึงผิว.....	3
2.1.2 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว.....	3
2.1.2.1 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก.....	3
2.1.2.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ.....	4
2.1.2.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกและลบ.....	4
2.1.2.4 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ.....	4
2.1.3 พฤติกรรมเฟสของสารลดแรงตึงผิว.....	4
2.1.4 โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต.....	9
2.2 ปฏิริยาซัลเฟชัน.....	9
2.3 กระบวนการผลิต โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต.....	9
2.3.1 กระบวนการซัลเฟชัน.....	10
2.3.2 กระบวนการสะเทิน.....	10
2.3.3 กระบวนการกำจัดแก๊สเสีย.....	11
2.4 แผนผังสาเหตุและผล.....	11
2.4.1 ส่วนประกอบของแผนผังแสดงสาเหตุและผล.....	11

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.2 การแบ่งหมวดหมู่ของสาเหตุ .....	12
2.4.3 ขั้นตอนการเขียนแผนผังแสดงสาเหตุและผล .....	13
2.5 T-test แบบ 2 กลุ่มตัวอย่าง.....	13
2.6 การออกแบบการทดลอง.....	14
2.6.1 แบบแฟกทอเรียลเต็มรูป .....	15
2.6.2 แบบแฟกทอเรียลบางส่วน .....	16
2.6.3 แบบ Plackett-Burman .....	18
2.6.4 แบบ Box-Benken .....	20
2.6.5 แบบ Central composite .....	21
2.6.6 แบบทากูชิ.....	22
2.6.7 สรุปข้อดีและข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองแบบต่างๆ.....	24
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	25
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน .....	27
3.1 การศึกษาการผลิตโซเดียมลอร์ลิเทอรัลเฟต .....	27
3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอรัลเฟต .....	27
3.3 การทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอรัลเฟต ในระดับห้องปฏิบัติการ .....	28
3.4 การทดสอบปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอรัลเฟตที่ได้จาก การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับด้วยโปรแกรมมินิแทป .....	28
3.5 การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดและการหาภาวะปฏิบัติการ ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต .....	28
บทที่ 4 ผลการทดลอง .....	29
4.1 ปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอรัลเฟต .....	29
4.1.1 ความพร้อมใช้ของบีม์ป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์ .....	30
4.1.2 แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ .....	30
4.1.3 ความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทอรัลเฟต .....	30
4.1.4 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน .....	31

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ปัจจัยซึ่งคาดว่ามีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ที่ทดลองระดับห้องปฏิบัติการ .....	31
4.2.1 แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ .....	31
4.2.2 ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต .....	32
4.2.3 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน .....	32
4.3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ได้จาก การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมมินิแทป .....	34
4.4 ผลทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดและภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสม ในกระบวนการผลิต.....	35
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ .....	38
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน .....	38
5.2 ข้อเสนอแนะ .....	39
บรรณานุกรม .....	40
ภาคผนวก.....	42
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์พิสัยข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์.....	43
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบ .....	46
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณ .....	51
ประวัติผู้เขียน.....	54



## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ข.9 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 69.5 wt% และอุณหภูมิการทำ ปฏิกิริยาซัลเฟชัน 50 องศาเซลเซียส.....	50

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ประจุลบ ประจุบวกและลบ และไม่มีประจุ...3
2.2	รูปร่างของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ ..... 5
2.3	การเรียงตัวของไมเซลล์แบบ ก) เฮกซะโกนอล ข) ลามลลาร์..... 5
2.4	แผนภูมิเฟสของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต..... 6
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารลดแรงตึงผิวกับความเข้มข้น ..... 6
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารกับอุณหภูมิและความดัน ..... 7
2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลของของเหลวกับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่... 8
2.8	สูตร โครงสร้างของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต..... 9
2.9	แผนภาพอย่างง่ายของกระบวนการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต..... 10
2.10	เครื่องปฏิกรณ์แบบฟิล์ม ..... 11
2.11	โครงสร้างของแผนผังแสดงสาเหตุและผล..... 12
2.12	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ ..... 14
4.1	แผนผังแสดงสาเหตุและผล ..... 29
4.2	T-test ..... 31
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตกับความเข้มข้น ..... 32
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตกับอุณหภูมิ ..... 33
4.5	แผนภูมิพาเรโตแสดงผลของปัจจัยที่ศึกษาต่อความหนืดของ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต..... 34
4.6	ผลของความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน ต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ..... 35
4.7	การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืด ..... 36
4.8	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตในกระบวนการผลิตที่ภาวะปฏิบัติงาน ที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัย ..... 37
ก.1	เครื่องวัดความหนืด Brookfield DV-II+ RVT ..... 44
ก.2	ชนิดของเข็มวัดความหนืด..... 45

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด เป็นบริษัทที่ผลิตสินค้าอุปโภคและบริโภค ผลิตภัณฑ์หลัก ได้แก่ ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ในครัวเรือน เช่น สารซักฟอก น้ำยาล้างจาน ผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคล เช่น แชมพูสระผม สบู่ และผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ไอศกรีม

โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (Sodium lauryl ether sulfate: SLES) เป็นสารลดแรงตึงผิวซึ่งผลิตจากปฏิกิริยาซัลเฟชันระหว่างเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์กับซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ บริษัทผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตสำหรับใช้ในการผลิตแชมพู พิกัดข้อกำหนดเฉพาะของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่บริษัทใช้เป็นเกณฑ์ ได้แก่ ความหนืด ระหว่าง 5,000 - 10,000 เซนติพอยส์ ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตแสดงในรูปของ Active Ingredient (%AI) ระหว่าง 68.5 - 71.5 wt% หากความหนืดสูงกว่าพิกัดข้อกำหนดเฉพาะ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจะอุดตันในท่อจนไม่สามารถส่งโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากถังเก็บไปใช้ผลิตแชมพู ผลิตภัณฑ์ที่อุดตันนี้ไม่สามารถนำกลับผสมใหม่ได้ ต้องส่งไปกำจัด ประมาณต้นปี 2557 พบปัญหา 1 ครั้ง ความสูญเสียที่เกิดขึ้นประกอบด้วย ความสูญเสียผลิตภัณฑ์และค่าบำบัดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ตามพิกัดข้อกำหนดเฉพาะ รวมค่าความสูญเสียเปล่าจากการหยุดปฏิบัติงาน และค่าใช้จ่ายจากการเปลี่ยนระบบท่อส่งจ่ายผลิตภัณฑ์ คิดเป็นมูลค่า 4,500,000 บาท

### 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 หาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ
- 1.2.2 หาภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสมและสมการความหนืด (Viscosity equation) ที่ใช้ควบคุมความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตให้อยู่ในพิกัดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการผลิต โซเดียมลอร์ลิเธออร์ซัลเฟตของแผนกซัลโฟเนชันของบริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โฮลดิ้งส์ จำกัด และวัตถุดิบต่างๆ ที่ใช้
- 1.3.2 หารายจัยที่มีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเธออร์ซัลเฟต ได้แก่
  - ความพร้อมใช้ของเครื่องมือและอุปกรณ์ คือ บั้มป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์
  - แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ จากบริษัทผู้ผลิต 3 บริษัท
  - ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ระหว่าง 69.5 - 70.5 wt%
  - อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน ระหว่าง 45 - 50 องศาเซลเซียส
- 1.3.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเธออร์ซัลเฟตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมมินิแทป 17 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และตรวจสอบค่าของปัจจัยในกระบวนการผลิต เพื่อสร้างสมการความหนืดและกำหนดภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสม
- 1.3.4 ระยะเวลาการดำเนินงานตั้งแต่ มิถุนายน พ.ศ. 2557 ถึง เมษายน พ.ศ. 2558 รวม 10 เดือน

### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ทราบปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเธออร์ซัลเฟต
- 1.4.2 สามารถควบคุมความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเธออร์ซัลเฟตให้อยู่ในพิสัยข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์โดยใช้สมการความหนืดและภาวะปฏิบัติงานที่ได้จากงานวิจัย
- 1.4.3 สามารถลดต้นทุนสูญเสียเปล่าเนื่องจากความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเธออร์ซัลเฟตไม่ได้ตามพิสัยข้อกำหนดเฉพาะ
- 1.4.4 เพิ่มโอกาสการแข่งขันทางธุรกิจ

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

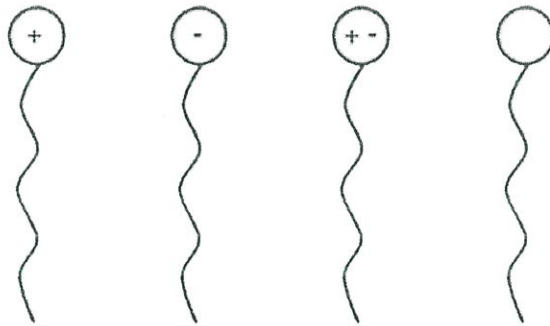
### 2.1 สารลดแรงตึงผิว

#### 2.1.1 ความหมายของสารลดแรงตึงผิว [Rosen MJ and Kunjappu JT. 2012]

สารลดแรงตึงผิวเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ประกอบด้วย 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนหัวที่มีขั้ว (Hydrophilic) ซึ่งเป็นส่วนที่ชอบน้ำ และส่วนหางที่ไม่มีขั้ว (Hydrophobic) ซึ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ ใช้ลดพลังงานระหว่างพื้นผิวระหว่างของเหลวสองชนิดหรือระหว่างของเหลวกับของแข็ง เช่น ใช้ในการผลิตแชมพู น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก เป็นต้น

#### 2.1.2 ประเภทของสารลดแรงตึงผิว [Leslie Sarah Nachbar. 2011, Richard J. Farn. 2006]

สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งตามสมบัติทางไฟฟ้าสถิตของส่วนหัวที่มีขั้วจากความแตกต่างของชนิดประจุได้ 4 ชนิด ดังรูปที่ 2.1 ได้แก่ สารลดแรงตึงผิวแบบไอออนิกประเภทประจุบวก และประจุลบ สารลดแรงตึงผิวแบบนอนไอออนิกประเภทประจุบวกและลบ และไม่มีประจุ ส่วนหางที่ไม่มีขั้วโดยส่วนมากเป็นไฮโดรคาร์บอนโซ่ตรงหรือโซ่กิ่ง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก ประจุลบ ประจุบวกและลบ และไม่มีประจุ [Leslie Sarah Nachbar. 2011]

#### 2.1.2.1 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวก (Cationic surfactant)

เมื่อสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ละลายน้ำจะแตกตัวและแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุบวก ทำให้สามารถดูดซับบนพื้นผิวประจุลบ เช่น เสื้อผ้า เส้นผม และเซลล์เมมเบรนของแบคทีเรีย จึงนิยมใช้ในการผลิตน้ำยาปรับผ้านุ่ม ครีมนวดผม และสารยับยั้งแบคทีเรีย ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุบวกที่นิยมใช้ [Thomas M. Schmitt. 2001] เช่น เกลิออลควอเตอร์นารีแอมโมเนียม (Alkyl quaternary ammonium salt) และอะมิโดเอมีนควอเตอร์นารี (Amidoamine quaternary)

### 2.1.2.2 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic surfactant)

เมื่อสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ละลายน้ำจะแตกตัวและแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุลบ นิยมใช้ในการผลิตสารซักฟอกและผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ส่วนบุคคลมากที่สุด ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบที่นิยมใช้ เช่น อัลคิลเบนซีนซัลเฟต (Alkylbenzene sulphonate: ABS) และ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (Sodium lauryl ether sulfate)

### 2.1.2.3 สารลดแรงตึงผิวชนิดประจুবวกและลบ (Amphoteric surfactant)

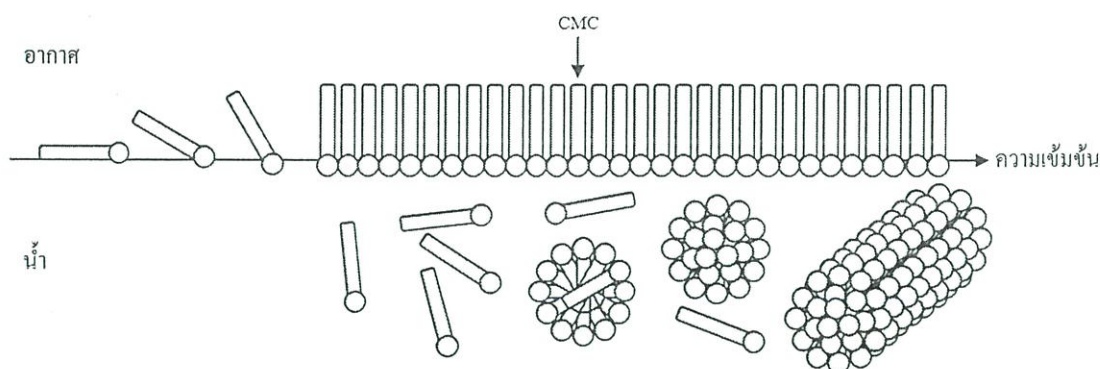
เมื่อสารลดแรงตึงผิวชนิดนี้ละลายน้ำจะสามารถแตกตัวและแสดงสมบัติทางไฟฟ้าได้ทั้งประจুবวกและลบ จะแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจুবวกเมื่ออยู่ในสารละลายกรด และแสดงสมบัติทางไฟฟ้าเป็นประจุลบเมื่ออยู่ในสารละลายเบส นิยมใช้ผลิตแชมพูเด็ก ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจুবวกและลบ เช่น อะมิโนคาร์บอกซิเลต (Amino carboxylate) บีเทน (Betane) และเอมีนออกไซด์ (Amine oxide)

### 2.1.2.4 สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

สารลดแรงตึงผิวชนิดนี้นิยมใช้เป็นตัวกระทำอิมัลชัน (Emulsifier) และตัวกระจาย (Dispersant) ตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ เช่น เอทอกซิเลต (Ethoxylate) และ โพลีกลูโคไซด์ (Polyglucoside) เป็นต้น

## 2.1.3 พฤติกรรมพลของสารลดแรงตึงผิว [Maurice R. Porter. 1994, Richard J. Farn. 2006]

เมื่อพิจารณาปริมาณสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ดังรูปที่ 2.2 สังเกตได้ว่าเมื่อความเข้มข้นและปริมาณสารลดแรงตึงผิวต่ำ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวในแนวราบไปกับผิวน้ำ จากนั้นเมื่อความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวกันในแนวตั้งมากขึ้น จนกระทั่งชิดกัน หากความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นอีก โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเรียงตัวเป็นวงกลม เรียกความเข้มข้นที่จุดนี้ว่า “ความเข้มข้นไมเซลล์วิกฤต (Critical micelle concentration: CMC)” และเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นอีก ไมเซลล์จะเรียงตัวเป็นทรงกลมและทรงกระบอก ขนาดของไมเซลล์แตกต่างกันตั้งแต่ระดับนาโนเมตรไปจนถึงหลายร้อยนาโนเมตรขึ้นกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

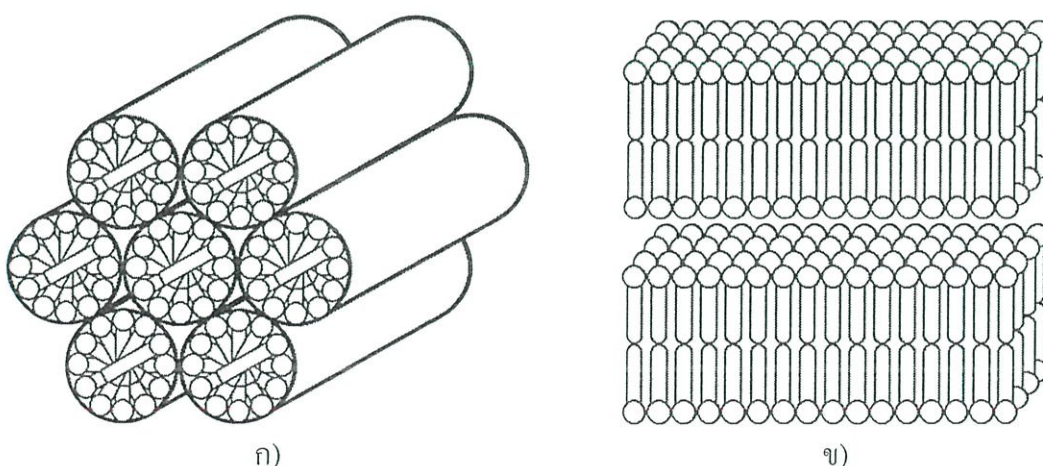


รูปที่ 2.2 รูปร่างของ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่างๆ [ปรับปรุงจาก Maurice R. Porter. 1994]

การรวมตัวของโมเลกุลเป็นทรงกระบอกมีพลังงานที่เกี่ยวข้องสองชนิด คือ Energy of endcap formation และ Energy of lengthening of body

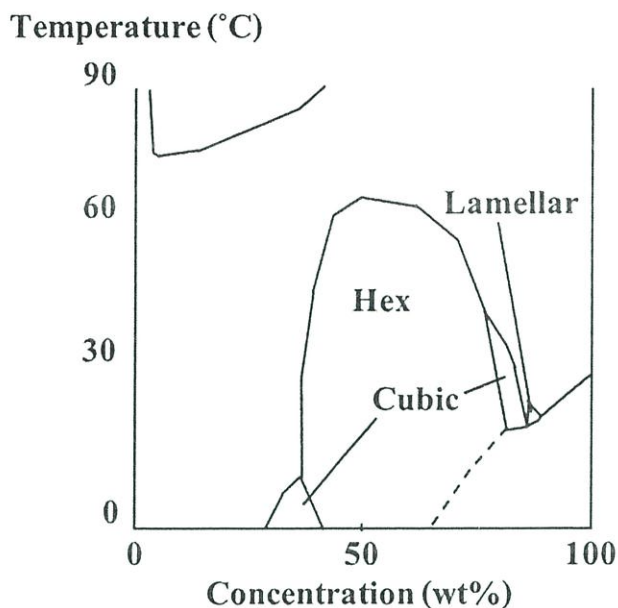
- เมื่อ Energy of lengthening of body สูงกว่า Energy of endcap formation ไมเซลล์จะมีความยาวขึ้น
- เมื่อ Energy of endcap formation สูงกว่า Energy of lengthening of body ไมเซลล์จะมีความยาวคงที่และเริ่มจับตัวกับไมเซลล์รูปทรงกระบอกข้างเคียง แล้วเรียงตัวกันแบบเฮกซะโกนอล (Hexagonal) ดังรูปที่ 2.3ก

หากเติมสารอื่น เช่น เกลือโซเดียม ลงไปในสารละลายของสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ ผลจากประจุของเกลือโซเดียมจะทำให้ความกว้างของส่วนที่ชอบน้ำลดลง จนกระทั่งความกว้างของส่วนที่ชอบน้ำกับส่วนที่ไม่ชอบน้ำใกล้เคียงกัน ทำให้ไมเซลล์เรียงตัวเป็นระนาบ เรียกว่าลามลลาร์ (Lamellar) ดังรูปที่ 2.3ข



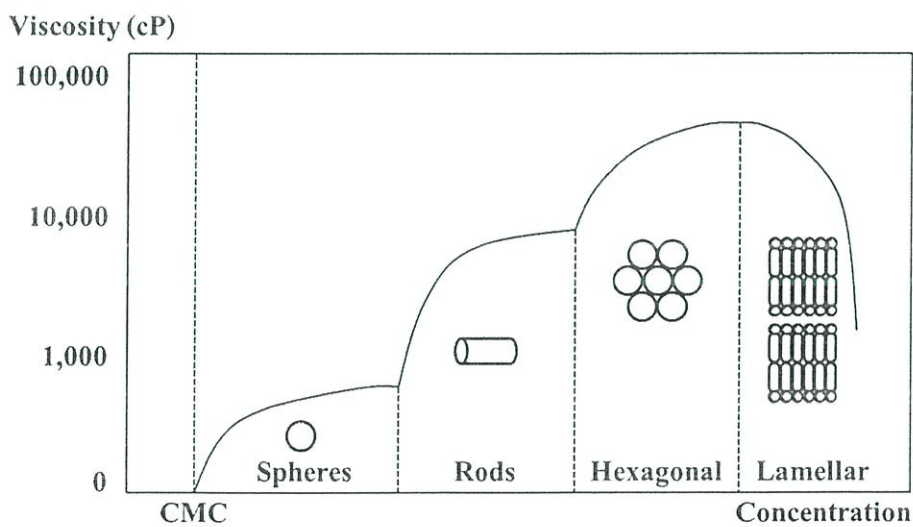
รูปที่ 2.3 การเรียงตัวของไมเซลล์แบบ ก) เฮกซะโกนอล ข) ลามลลาร์ [Maurice R. Porter. 1994]

ลักษณะการเรียงตัวของไมเซลล์นอกจากขึ้นกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแล้วยังขึ้นกับอุณหภูมิ ดังแผนภูมิเฟส (Phase diagram) ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แผนภูมิเฟสของ โพลีดีมิลอริลอีเทอร์ซิลเฟต [Maurice R. Porter. 1994]

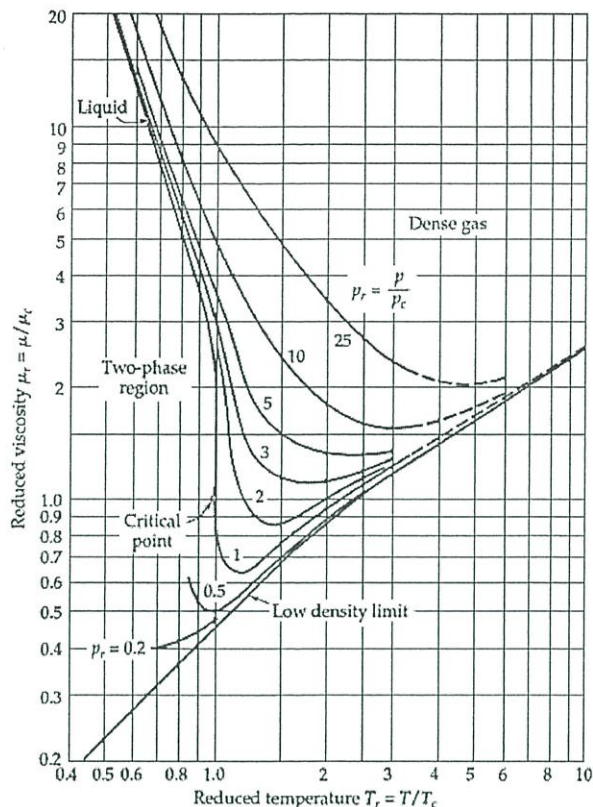
ความหนืดของสารลดแรงตึงผิวจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น จนกระทั่งไมเซลล์เรียงตัวในแบบลามลาร์ และความหนืดของสารลดแรงตึงผิวจะลดลง เนื่องจากลามลาร์มีลักษณะเป็นชั้นซ้อนกัน ช่องว่างระหว่างชั้นจะทำให้ความต้านทานแรงเฉือน (Shear force) ของสารลดแรงตึงผิวลดลง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารลดแรงตึงผิวกับความเข้มข้น

[Maurice R. Porter. 1994]

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับอุณหภูมิในรูปที่ 2.6 สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีปรากฏการณ์การถ่ายเท (Transport phenomena) [R. Byron Bird et al. 2002]



รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารกับอุณหภูมิและความดัน

[R. Byron Bird et al. 2002]

รูปที่ 2.6 เป็นผลการทดลองที่รวบรวมจากหนังสือคู่มือทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม (Science and Engineering Handbooks) ต่างๆ สำหรับแก๊สที่มีความหนาแน่นต่ำ ความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ไม่ขึ้นกับความดัน แสดงดังสมการที่ (2.1)

$$\mu = 2.6693 \times 10^{-5} \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega_\mu} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\mu$  = ความหนืด (g/cm·s)

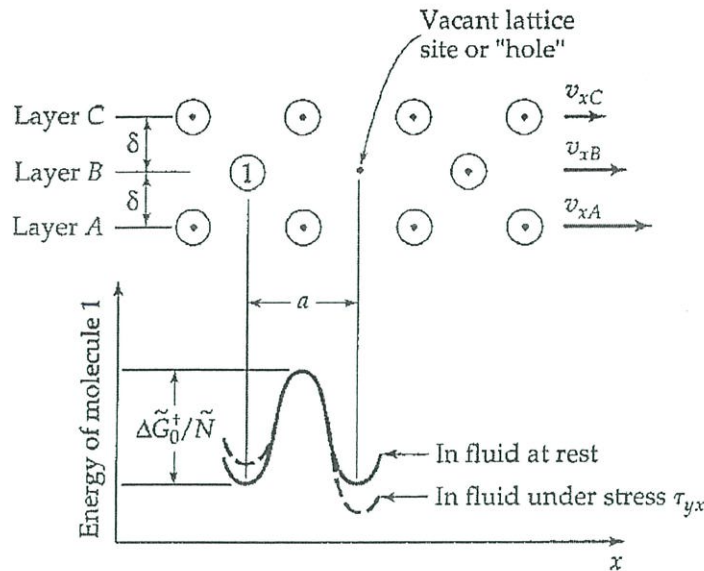
M = มวลโมเลกุล

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$\sigma$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล (Å)

$\Omega_\mu$  = ตัวแปรไร้มิติ ซึ่งสามารถหาได้จากค่า  $\frac{KT}{\epsilon}$

ในทางกลับกัน สำหรับของเหลวความหนืดจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น เนื่องจากความถี่ในการย้ายที่ระหว่างโมเลกุลของสารและช่องว่างเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของของเหลวกับพลังงานที่ใช้ในการเคลื่อนที่

[R. Byron Bird et al. 2002]

จากรูปที่ 2.7 ตามทฤษฎีของ Eyring กล่าวว่า ความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลวจากสภาพหยุดนิ่งไปยังช่องว่างถัดไปได้้อย่างต่อเนื่อง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.2)

$$\nu = \frac{KT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_0^+}{RT}\right) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\nu$  = ความถี่ของการเคลื่อนที่ของของเหลว (Hz)

$K$  = ค่าคงที่ของโบลซ์มานน์ ( $1.381 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} / \text{K} \cdot \text{s}^2$ )

$T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} / \text{s}$ )

$R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส ( $8.314 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{K}$ )

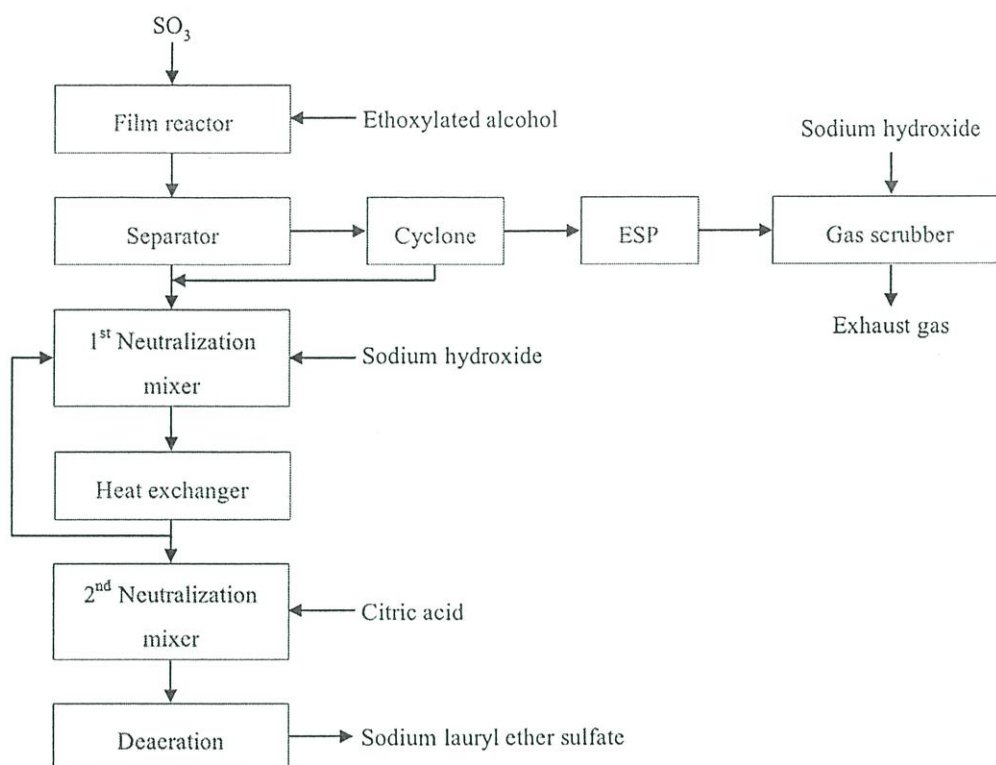
$\Delta G_0^+$  = พลังงานอิสระเชิงโมล (Molar free energy) ของการกระตุ้นของเหลวหยุดนิ่งไปยังช่องว่างถัดไป (J/mol)

จากการพิสูจน์สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเอมพิริคัล (Empirical equation) สำหรับอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของของเหลวกับอุณหภูมิสัมบูรณ์ได้ดังสมการที่ (2.3) พบว่าความหนืดแปรผกผันกับอุณหภูมิสัมบูรณ์

$$\mu = A \exp(B/T) \quad (2.3)$$

อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของสารลดแรงตึงผิวกับอุณหภูมิในสมการที่ (2.3) ได้ว่า เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารลดแรงตึงผิวจะลดลง





รูปที่ 2.9 แผนภาพอย่างง่ายของกระบวนการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต [บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โสลดิงส์ จำกัด. 2556]

### 2.3.1 กระบวนการซัลเฟชัน

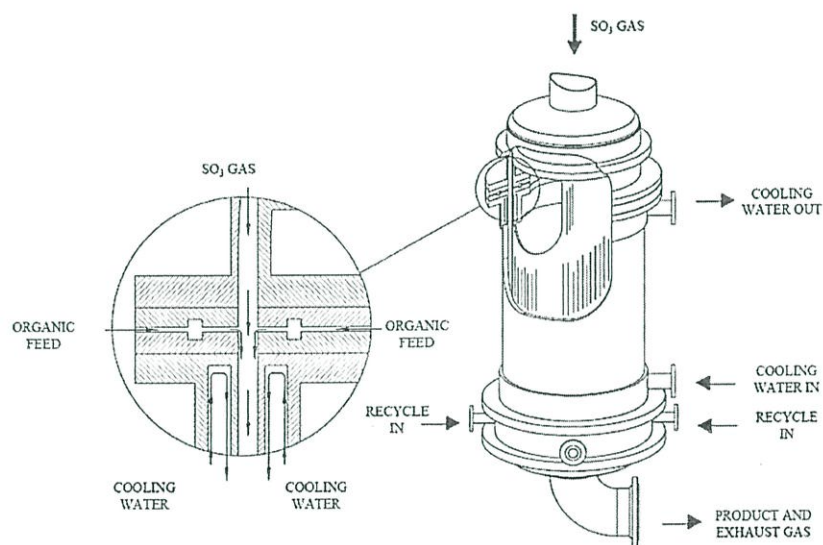
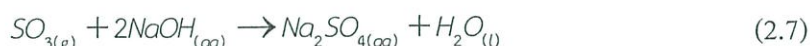
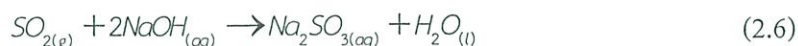
แก๊สซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ที่ผ่านเครื่องกรองดักจับฝุ่นละอองจะทำปฏิกิริยากับแอลกอฮอล์ไขมันที่กระจายเป็นฟิล์มบางรอบผิวท่อภายในเครื่องปฏิกรณ์แบบฟิล์มซึ่งมี 48 ท่อ [บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โสลดิงส์ จำกัด. 2556] ดังรูปที่ 2.10 ได้ลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ดังสมการที่ (2.4) ซึ่งต้องแยกแก๊สเสียออก และป้อนลอริลอีเทอร์ซัลเฟตเข้ากระบวนการสะเทิน

### 2.3.2 กระบวนการสะเทิน

ลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจะถูกผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกิดปฏิกิริยาสะเทิน 1<sup>st</sup> Neutralization ดังสมการที่ (2.5) ได้ผลิตภัณฑ์ คือ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตซึ่งจะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อลดอุณหภูมิ ลอริลอีเทอร์ซัลเฟตบางส่วนจะถูกส่งกลับไปยังหน่วยการผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์อีกครั้ง ส่วนที่เหลือจะถูกส่งไปยังหน่วยการผสมกับกรดซิตริกเกิดปฏิกิริยาสะเทิน 2<sup>nd</sup> Neutralization เพื่อปรับสภาพความเป็นกรด-เบสของผลิตภัณฑ์ แล้วจึงส่งไปแยกอากาศออกที่หน่วยกำจัดอากาศ (Deaeration)

### 2.3.3 กระบวนการกำจัดแก๊สเสีย

แก๊สเสียที่แยกออกจากกระบวนการซัลเฟชันประกอบด้วยแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์และแก๊สซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ ซึ่งหากปล่อยออกสู่บรรยากาศจะเกิดมลภาวะ จึงบำบัดด้วยเครื่องดักฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator: ESP) โดยใช้ระบบสนามไฟฟ้าสถิตจับฝุ่นที่อยู่ในแก๊สเสียให้ตกกลับลงมาในถังที่รอง ส่วนแก๊สเสียจะถูกส่งไปไซโคลนเพื่อแยกของเหลวออกจากแก๊สเสียและส่งกลับเข้าสู่กระบวนการ และส่งแก๊สเสียต่อไปยังหอscrubเบอร์ (Gas scrubber) และกำจัดกลิ่นด้วยการทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังสมการที่ (2.6) และ (2.7)



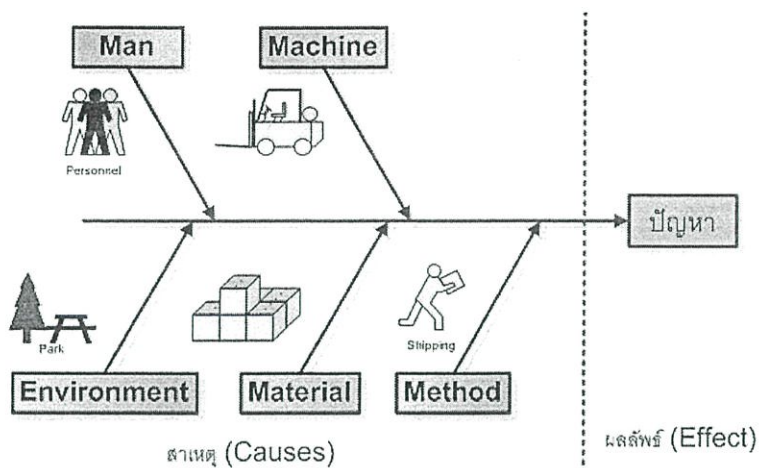
รูปที่ 2.10 เครื่องปฏิกรณ์แบบฟิล์ม [Norman C. Foster. 1997]

## 2.4 แผนผังแสดงสาเหตุและผล [Gregory B. Hutchins. 1991]

การศึกษาคุณภาพ คือ การศึกษาการกระจายและความผันแปรของข้อมูล แผนผังแสดงสาเหตุและผล (Cause-and-effect diagram) หรือ แผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) เป็นวิธีการระบุผลกระทบและหาสาเหตุหลักของการกระจายของข้อมูลนั้น ดังนั้นถ้าสามารถระบุสาเหตุของการกระจายของข้อมูลได้ จะสามารถลดผลกระทบหรือปัญหาที่เกิดขึ้น กล่าวโดยสรุป แผนผังแสดงสาเหตุและผลเป็นวิธีอย่างง่ายสำหรับการทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลกระทบ

### 2.4.1 ส่วนประกอบของแผนผังแสดงสาเหตุและผล

ลักษณะของแผนผังแสดงสาเหตุและผลคล้ายกับก้างปลา ทางด้านขวาคือหัวปลาซึ่งระบุปัญหาหรือผลกระทบ ก้างใหญ่เป็นแกนเชื่อมระหว่างผลกระทบที่หัวของปลาและประเภทของสาเหตุทางด้านซ้ายที่เป็นก้างเล็กกว่าที่ยื่นออกมา ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 โครงสร้างของแผนผังแสดงสาเหตุและผล [ประชาสารณ์ แสนภักดี. 2546]

#### 2.4.2 การแบ่งหมวดหมู่ของสาเหตุ

การแบ่งหมวดหมู่ของสาเหตุขึ้นอยู่กับธรรมชาติของปัญหา นิยมใช้หลักการ 4M 1E ในการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา กล่าวคือ

**M - Man** เกิดจากพนักงานหรือบุคลากร เช่น ใช้วิธีการปฏิบัติงานที่ต่างกัน หรือมีระดับความสามารถต่างกัน สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากสาเหตุนี้ได้ด้วยวิธีการปฏิบัติงานที่เหมาะสมและการฝึกอบรมพนักงาน

**M - Machine** เกิดจากการติดตั้ง การสั่น และการใช้เครื่องจักรหรืออุปกรณ์อย่างไม่ถูกวิธี หรือเกิดจากประสิทธิภาพของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ที่ลดลง สามารถลดผลกระทบที่เกิดจากสาเหตุนี้ได้โดยการบำรุงรักษาที่ถูกต้องและเหมาะสม การใช้งานเครื่องจักรหรืออุปกรณ์อย่างเหมาะสม หรือการสอบเทียบอุปกรณ์ตามกำหนดเวลา

**M - Material** เกิดจากความต่างทางเคมี (Chemical) ทางอุณหภูมิ (Thermal) และทางกายภาพ (Physical) ของวัตถุดิบ สามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากสาเหตุนี้ได้โดยการประเมินคุณภาพของวัตถุดิบและคัดเลือกบริษัทผู้ผลิต

**M - Method** เกิดจากวิธีการปฏิบัติงานที่ต่างวิธีกัน หรือการใช้ซอฟต์แวร์ที่ไม่สอดคล้องกัน สามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากสาเหตุนี้ได้โดยการฝึกอบรมการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ การจัดการวัตถุดิบ และการวัด

**E - Environment** เกิดจากการที่มีปริมาณสารอันตรายและฝุ่นเกินกฎหมายและข้อกำหนดต่างๆ หรืออาจรวมถึงปริมาณความชื้นและอุณหภูมิด้วย สามารถแก้ไขผลกระทบที่เกิดจากสาเหตุนี้ได้ด้วยการดูแลและควบคุมภาวะปฏิบัติการ

การแบ่งหมวดหมู่ของสาเหตุไม่จำเป็นต้องใช้หลักการ 4M 1E เสมอไป อาจใช้หลักการอื่นๆ เช่น หลักการ 4P ได้แก่ Place, Procedure, People และ Policy หรือหลักการ MILK ได้แก่ Management, Information, Leadership และ Knowledge เป็นต้น

### 2.4.3 ขั้นตอนการเขียนแผนผังแสดงสาเหตุและผล

การเขียนแผนผังแสดงสาเหตุและผลมีขั้นตอนดังนี้ 1) การระบุปัญหาหรือผลกระทบ 2) การระบุสาเหตุ 3) การสร้างแผนผัง และ 4) การวิเคราะห์แผนผัง

การระบุปัญหาหรือผลกระทบ ต้องชัดเจนและมีความเป็นไปได้ ซึ่งหากกำหนดปัญหาไม่ชัดเจนอาจทำให้หาสาเหตุของปัญหาได้ไม่ถูกต้อง หรืออาจใช้เวลานาน ตัวอย่างการระบุปัญหาที่หวัปลา เช่น บั๊จจยของคั้นทุนต่อหน่วยของสินค้ำ เป็นต้น

การระบุสาเหตุ เริ่มจากการแบ่งหมวดหมู่ของสาเหตุหลัก เช่น 4M 1E หรือใช้หลักการอื่นคั้งที่ได้กล่าวไปข้างคั้ แต่ละสาเหตุหลัก สาเหตุย่อยจะถูกระบุโดยการระดมสมอง (Brainstorming) โดยบุคลากรที่มีความรู้ความสามารถ จึงทำให้ได้แนวคิดจ้านวนมาก

การสร้างแผนผัง แต่ละแนวคิดจะถูกเขียนภายในสาเหตุหลักของแผนผังแสดงสาเหตุและผล

การวิเคราะห์แผนผัง หลังจากระบุสาเหตุทั้งหมดแล้ว จะเลือกสาเหตุที่สำคัญที่สุด และอาจใช้แผนภูมิพาเรโต (Pareto chart) ช่วยวิเคราะห์ต่อ หรืออาจใช้การตั้งคำถาม เช่น สาเหตุนี้เป็นคั้เหตุให้เกิดสาเหตุอื่นๆ ต่อหรือไม่ มีแนวทางในการลดผลกระทบจากสาเหตุนี้หรือแนวทางในการป้องกันปัญหาหรือไม่ มีความคู้้ค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ในการแก้ปัญหหรือไม่

### 2.5 T-test แบบ 2 กลุ่มตัวอย่าง

T-test แบบ 2 กลุ่มตัวอย่าง [Douglas C. Montgomery. 2013] ใช้ทดสอบความแตกต่างหรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ที่มีการแจกแจงปกติ (Normal distribution) ซึ่งสามารถคำนวณ  $t_0$  ได้จาก

$$t_0 = \frac{\bar{y}_1 - \bar{y}_2}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\bar{y}_1, \bar{y}_2$  = ค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง

$n_1, n_2$  = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

$S_p^2$  = ค่าประมาณของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (2.9)$$

สมมติฐานที่ใช้ 2 ชนิด ได้แก่ Null hypothesis เขียนแทนด้วย  $H_0$  และ Alternative hypothesis เขียนแทนด้วย  $H_1$  ซึ่งมีหลายกรณีดังตารางที่ 2.1

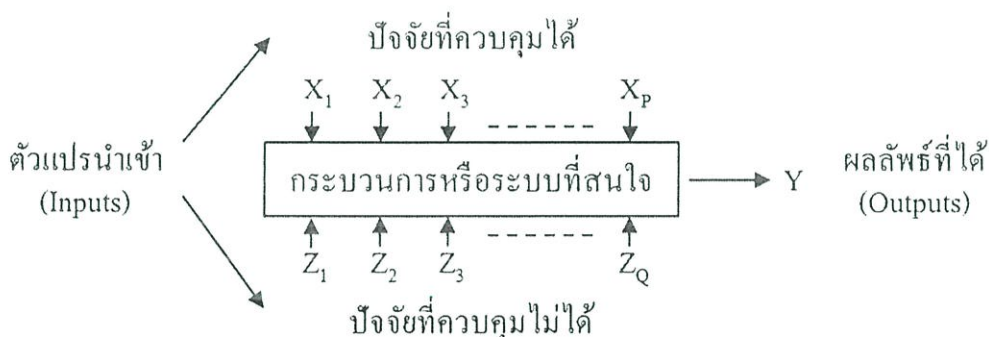
ตารางที่ 2.1 สมมติฐานสำหรับ T-test แบบ 2 กลุ่มตัวอย่าง กรณีต่างๆ

กรณี	Null hypothesis	Alternative hypothesis	Number of tails
1	$\mu_1 - \mu_2 = d$	$\mu_1 - \mu_2 \neq d$	2
2	$\mu_1 - \mu_2 \geq d$	$\mu_1 - \mu_2 < d$	1
3	$\mu_1 - \mu_2 \leq d$	$\mu_1 - \mu_2 > d$	1

การทดสอบจะปฏิเสธ Null hypothesis ก็ต่อเมื่อ  $|t_0| > t_{\alpha/2}$  หรือ P-value  $< \alpha$  เมื่อ  $\alpha$  คือระดับความน่าเชื่อถือ โดยปกติกำหนดให้มีค่า 0.05 แสดงถึงความเชื่อมั่น 95%

## 2.6 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง [ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. 2551] คือ การทดสอบเพียงกระบวนการเดียวหรือต่อเนื่อง โดยทำการเปลี่ยนแปลงตัวแปรนำเข้า (Input variables) ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจศึกษา เพื่อให้สามารถสังเกตและระบุสาเหตุต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนองที่ได้ (Outputs or responses) จากกระบวนการหรือระบบนั้น ตัวแปรนำเข้าแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable factors) และปัจจัยรบกวนหรือปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Noise or uncontrollable factors) ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

[ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบุลย์. 2551]

การกำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้ เช่น ที่มาของวัตถุดิบ เครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต อุณหภูมิที่ใช้ในการผลิต และปัจจัยรบกวนขึ้นอยู่กับระบบ ซึ่งโดยหลักแล้ว ปัจจัยรบกวนมักเกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติ เช่น ลม ฝุ่นละออง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิภายนอก หรือส่วนของอุปกรณ์หรือระบบที่ยากแก่การควบคุม เนื่องจากในการควบคุมต้องใช้ความระมัดระวังสูง เพราะเมื่อชำรุดอาจส่งผลถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

การออกแบบการทดลอง [Douglas C. Montgomery. 2013] มีวัตถุประสงค์ที่สำคัญสรุปได้เป็น 4 ส่วน คือ

- 1) กำหนดปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์หรือตัวแปรตอบสนอง (Y)
- 2) กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้โอกาสที่ผลของค่าตัวแปรตอบสนอง (Y) มีค่าใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายที่ต้องการมากที่สุด
- 3) กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) โดยทำให้ค่าความแปรปรวนของตัวแปรตอบสนอง (Y) มีค่าต่ำที่สุด
- 4) กำหนดค่าของปัจจัยที่ควบคุมได้ (X) ที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Y) เพื่อให้ผลกระทบของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Z) มีค่าน้อยที่สุด

การออกแบบการทดลองสามารถแบ่งย่อยได้หลายประเภท ในทางปฏิบัติการออกแบบการทดลองสองปัจจัยขึ้นไปที่นิยมใช้ มีดังนี้

### 2.6.1 แบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full factorial design)

การทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สามารถศึกษาผลกระทบของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไปได้ทุกกรณีที่เป็นไปได้ นั่นคือ สามารถศึกษาผลกระทบหลัก (Main effect) ซึ่งเป็นผลกระทบของปัจจัยเดี่ยว (Main factors) และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (Interaction factors) เช่น กรณีศึกษา 3 ปัจจัย (A, B และ C) แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 2 ระดับ ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล ( $2^3$  full factorial experiment) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ผลกระทบทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ  $2^3$  แฟกทอเรียล

ผลกระทบหลัก (Main effects)	อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย (2-way interactions)	อันตรกิริยาระหว่าง 3 ปัจจัย (3-way interactions)
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้ของการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบมีค่าเท่ากับ  $a^k$  เมื่อ a คือจำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา และ k คือจำนวนปัจจัย เช่น ในกรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 2 ระดับ คือ ค่าต่ำ (-) และค่าสูง (+) จำนวนการทดลองทั้งหมด คือ  $2^3$  การทดลอง ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 จำนวนการทดลองทั้งหมดที่เป็นไปได้สำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป  $2^3$  แฟกทอเรียล

ผลการทดลอง (Runs)	Factors						
	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	+	+	+	-
2	-	-	+	+	-	-	+
3	-	+	-	-	+	-	+
4	-	+	+	-	-	+	-
5	+	-	-	-	-	+	-
6	+	-	+	-	+	-	+
7	+	+	-	+	-	-	+
8	+	+	+	+	+	+	-

จากตารางที่ 2.3 จะเห็นได้ว่า ผลรวมของปัจจัยในแต่ละสดมภ์ (Column) เท่ากับ 0 ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่า มีความเป็นออร์ทอกอนัล (Orthogonality) ทำให้สามารถตีความหมายผลกระทบของปัจจัยได้อย่างอิสระ โดยไม่มีผลกระทบแฝง (Confounding effect)

ข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป คือ มีความเป็นออร์ทอกอนัล โครงสร้างไม่ซ้ำซ้อน และสามารถศึกษาได้ทั้งปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้ทั้งหมด อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่เห็นได้ชัดเจน คือ ค่าใช้จ่ายสูง ต้องใช้เวลาและทรัพยากรมาก หากมีจำนวนปัจจัยมาก เนื่องจากจำนวนการทดลองที่ใช้แปรผันตามจำนวนปัจจัยที่ศึกษาและจำนวนระดับของปัจจัย เช่น กรณีศึกษา 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยศึกษาที่ 2 ระดับ ทำการทดลองโดยไม่ทำซ้ำ ต้องทำการทดลองทั้งหมด 8 การทดลอง แต่หากมีปัจจัยเพิ่มขึ้นเป็น 10 ปัจจัย จำนวนการทดลองทั้งหมดจะเพิ่มเป็น 1,024 การทดลอง

### 2.6.2 แบบแฟกทอเรียลบางส่วน (Fractional factorial design)

นิยมใช้ในกรณีที่เวลางบประมาณ และทรัพยากรที่ใช้ในการทดลองมีจำกัด การออกแบบการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปทำให้เสียเวลาและมีจำนวนการทดลองมาก จึงลดจำนวนการทดลองโดยทำเพียงบางส่วน การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน สามารถศึกษาผลกระทบหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้เช่นกัน แต่ไม่ทั้งหมด โดยทั่วไปนิยมใช้ศึกษาที่ 2 ระดับ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.4 ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน  $2^{3-1}$  แฟกทอเรียล

ตารางที่ 2.4 การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน  $2^{3-1}$  แฟกทอเรียล

ผลการทดลอง (Runs)	Factors		
	A	B	C = AB
1	-	-	+
2	-	-	+
3	-	+	-
4	-	+	-
5	+	-	-
6	+	-	-
7	+	+	+
8	+	+	+

จากตารางที่ 2.4 จะเห็นได้ว่า ปัจจัยหลักมีความสัมพันธ์กับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่ซ้ำซ้อนกัน เรียกว่า โครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias structure) ซึ่งในที่นี้คือ  $C = AB$  หรือมีโครงสร้างซ้ำซ้อนอื่นๆ ดังสรุปในตารางที่ 2.5 และเพื่อไม่ให้ผลกระทบหลักซ้ำซ้อนกันเองจึงมีการกำหนดค่า Resolution ซึ่งบอกถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย ยกตัวอย่างเช่นในตัวอย่างข้างต้นจะมี Resolution เป็น III

ตารางที่ 2.5 โครงสร้างซ้ำซ้อนของผลกระทบสำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน  $2^{3-1}$  แฟกทอเรียล

ผลกระทบ	โครงสร้างซ้ำซ้อน
A	BC
B	AC
C	AB
AB	C
AC	B
BC	A
ABC	I

ข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วนจะช่วยลดเวลาและค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง เนื่องจากใช้การทดลองที่ลดรูปลงจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป กล่าวคือ จาก  $a^k$  เหลือเพียง  $a^{k-p}$  เมื่อ  $p$  แสดงการลดลงของจำนวนการทดลองจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป เช่น เมื่อ  $p = 1$  จำนวนการทดลองจะลดลงเหลือครึ่งหนึ่งของ

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบเป็นต้น ในทางตรงกันข้าม การตีความจะซับซ้อนขึ้น เนื่องจากในการทดลองเกิดโครงสร้างซ้ำซ้อนของผลกระทบ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.5 จึงต้องเลือกศึกษาโดยกำหนดค่า Resolution ที่เหมาะสมตามวัตถุประสงค์ของการศึกษา ซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 2.6

ข้อจำกัดอีกประการหนึ่งสำหรับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน คือ การลดจำนวนการทดลองทำได้ในสัดส่วนของการยกกำลังของระดับปัจจัยที่ใช้ เช่น การทดลอง 7 ปัจจัย 2 ระดับ เมื่อ  $p = 1$  จำนวนการทดลองจะลดลงเหลือ  $2^{7-1} = 64$  การทดลอง  
 $p = 2$  จำนวนการทดลองจะลดลงเหลือ  $2^{7-2} = 32$  การทดลอง  
 $p = 3$  จำนวนการทดลองจะลดลงเหลือ  $2^{7-3} = 16$  การทดลอง

ตารางที่ 2.6 แนวทางการกำหนดค่า Resolution สำหรับแผนการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน

Resolution	สรุปรายละเอียดความสัมพันธ์ของผลกระทบ
III	ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกันเอง แต่ซ้ำซ้อนกับอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการคัดเลือกปัจจัยในการทดลองในกรณีที่มีจำนวนปัจจัยมาก
IV	ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกันเอง และไม่ซ้ำซ้อนกับอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย แต่อันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยซ้ำซ้อนกันเอง ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ศึกษาปัจจัยหลักและสามารถนำผลสร้างเป็นสมการพยากรณ์ในกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการโดยใช้ Resolution V ได้
V	ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกันเอง และไม่ซ้ำซ้อนกับอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย และอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยไม่ซ้ำซ้อนกันเองด้วย ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ศึกษาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย และเหมาะสมที่สุดในการสร้างเป็นสมการพยากรณ์ในกรณีที่ไม่สนใจอันตรกิริยาระหว่าง 3 ปัจจัยขึ้นไป

กรณีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วนที่มี Resolution III จะเห็นว่าอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย ซ้ำซ้อนกับผลกระทบหลัก ซึ่งสามารถแก้ปัญหาคือได้โดยเพิ่มจำนวนปัจจัยใหม่อีก 1 ปัจจัย สำหรับพิจารณาผลต่างระหว่างแผนการทดลองเริ่มต้นกับส่วนที่เพิ่มใหม่ เรียกว่า Foldover ซึ่งเป็นการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วนที่มี Resolution IV และทำให้สามารถวิเคราะห์ผลกระทบหลักได้อย่างละเอียดขึ้น โดยไม่เกิดความซ้ำซ้อนกับอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย

### 2.6.3 แบบ Plackett-Burman

การออกแบบการทดลองนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดย Plackett และ Burman ในปี ค.ศ. 1946 [Plackett, R.L. and J.P. Burman. 1946] เพื่อใช้ในการคัดเลือกปัจจัย (Screening factors) และลดจำนวนปัจจัยให้เหลือเฉพาะปัจจัยที่สำคัญ จากข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล

บางส่วน จำนวนการทดลองจะลดลงในสัดส่วนของการยกเลิกกำลังของระดับปัจจัยดังที่ได้กล่าวข้างต้น Plackett-Burman อาศัยหลักการที่ต่างออกไป คือ หลักการของเมทริกซ์ Hadamard ซึ่งจำนวนการทดลองจะเปลี่ยนไปเป็นจำนวนเท่าของ 4 นั่นคือ 4, 8, 12, 16, 20, 24, ... สามารถสร้างการทดลองแบบ Plackett-Burman ได้ดังนี้

1) สร้างเวกเตอร์ของค่าในสดมภ์แรกขนาดเท่ากับ  $n-1$  โดยที่  $n$  คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ใช้ในการออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman เช่น

$n = 8$       เวกเตอร์ในสดมภ์แรกคือ (+ + + - - -)

$n = 12$       เวกเตอร์ในสดมภ์แรกคือ (+ + - + + + - - - +)

$n = 16$       เวกเตอร์ในสดมภ์แรกคือ (+ + + + - - + + - - + -)

$n = 20$       เวกเตอร์ในสดมภ์แรกคือ (+ + - - + + + + - - + - - - + + -)

2) สร้างเวกเตอร์สำหรับสดมภ์ที่เหลือ โดยการใช้ค่าในแถวที่  $n-1$  ของเวกเตอร์ในสดมภ์ก่อนหน้า เลื่อนมาเป็นค่าเริ่มต้นในแถวแรก และเลื่อนค่าลงไป 1 ตำแหน่ง นั่นคือ ค่าสุดท้ายของปัจจัย A แถวที่  $n-1$  จะเท่ากับค่าแรกของปัจจัย B

3) เพิ่มแถวสุดท้ายโดยใส่ค่า “-” ทุกสดมภ์ ดังตัวอย่างในตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 การออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman กรณีศึกษา 7 ปัจจัย 8 การทดลอง

ผลการทดลอง (Runs)	ปัจจัย						
	A	B	C	D	E	F	G
1	+	-	-	+	-	+	+
2	+	+	-	-	+	-	+
3	+	+	+	-	-	+	-
4	-	+	+	+	-	-	+
5	+	-	+	+	+	-	-
6	-	+	-	+	+	+	-
7	-	-	+	-	+	+	+
8	-	-	-	-	-	-	-

ข้อดีที่เห็นได้ชัดสำหรับการออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman คือ การกำหนดจำนวนการทดลองที่จำกัดในการศึกษาปัจจัยได้เป็นจำนวนมากพร้อมๆ กัน เช่น การทดลอง 12 ครั้ง ศึกษาได้สูงสุด 11 ปัจจัย ในทางตรงข้าม เนื่องจากการออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman เป็นการทดลองที่มี Resolution III จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีนัยสำคัญสูง กล่าวคือ อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยต้องไม่มีอิทธิพลพอที่จะกลบอิทธิพลหลักของปัจจัยหลัก แต่

อย่างไรก็ตาม สามารถปรับการออกแบบการทดลองแบบ Plackett-Burman ที่มี Resolution III ให้เป็น Resolution IV ได้โดยใช้หลักของ Foldover

#### 2.6.4 แบบ Box-Behnken

การออกแบบการทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษา 3 ปัจจัย โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการถดถอยของปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative factors) เช่น เวลา อุณหภูมิ ความดัน ความเข้มข้น เป็นต้น ลักษณะของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken จะใช้หลักการการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป  $2^2$  แฟกทอเรียล ร่วมกับค่ากึ่งกลาง (Center point) ซึ่งสามารถใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แสดงดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 การออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

ผลการทดลอง (Runs)	ปัจจัย		
	A	B	C
1	-	-	0
2	-	+	0
3	+	-	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	-	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	+
11	0	-	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

ข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken คือ มี Resolution IV ทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น (Linear effects) ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง (Quadratic effects) และอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยได้ แต่มีข้อจำกัด คือ จำนวนครั้งในการทดลองมากและไม่สามารถลดได้ ไม่ว่าจะต้องการศึกษาผลกระทบที่เกินกว่าผลกระทบเชิงเส้นหรือไม่ นอกจากนี้การออกแบบการทดลองแบบ

Box-Behnken มีประสิทธิภาพน้อยกว่าการออกแบบการทดลองแบบ Central composite เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป

### 2.6.5 แบบ Central composite

การออกแบบการทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับใช้ศึกษาหรือสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสอง (Second-order or quadratic equation) จากงานวิจัยต่างๆ พบว่า การออกแบบการทดลองแบบ Central composite มีความยืดหยุ่นในการใช้งานและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับ การออกแบบการทดลองแบบอื่นที่ใช้ในการศึกษาสมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสอง ตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบ Central composite กรณีศึกษา 3 ปัจจัย แสดงดังตารางที่ 2.9 [Box, George E.P., and Norman R. Drapner. 1987]

ข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบ Central composite มีหลายประการ ดังนี้

- 1) เหมาะในการศึกษาสมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสอง กรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ
- 2) มีความยืดหยุ่นในการใช้สูง เนื่องจากมีค่า Resolution ให้เลือกได้ครอบคลุมทุกค่า ทั้งในส่วนการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ และการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน
- 3) โครงสร้างซ้ำซ้อนสำหรับ Resolution III หรือ IV สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน  $2^{k-p}$  แฟกทอเรียล
- 4) สามารถแยกทดลองได้เป็นส่วนๆ ตามลำดับ คือ ทำการทดลองส่วนของแฟกทอเรียลและค่ากึ่งกลางก่อน จากนั้นสร้างสมการถดถอยเชิงเส้นสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 2 ระดับ และพยากรณ์ส่วนของค่ากึ่งกลาง ถ้าสมการถดถอยเชิงเส้นไม่เหมาะสมจึงทำการทดลองเพิ่มในส่วนของจุดแกน (Axial portion) จะได้สมการถดถอยเชิงเส้นกำลังสอง

ข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองแบบ Central composite คือ เหมาะสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ ดังนั้นในกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพ (Qualitative factors) จะต้องทำการปรับการทดลอง โดยเฉพาะกรณีที่มีปัจจัยเชิงคุณภาพมากกว่า 1 ปัจจัย ต้องใช้การออกแบบการทดลองแบบอื่น เช่น การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลบางส่วน หรือ D-optimal

ตารางที่ 2.9 การออกแบบการทดลองแบบ Central composite กรณีศึกษา 3 ปัจจัย

ผลการทดลอง (Runs)	ปัจจัย			หมายเหตุ
	A	B	C	
1	-	-	-	Factorial portion
2	-	-	+	
3	-	+	-	
4	-	+	+	
5	+	-	-	
6	+	-	+	
7	+	+	-	
8	+	+	+	
9	0	0	0	Centerpoint portion
10	0	0	0	
11	0	0	0	
12	0	0	0	
13	0	0	0	
14	0	0	0	
15	$\alpha$	0	0	Axial portion
16	$-\alpha$	0	0	
17	0	$\alpha$	0	
18	0	$-\alpha$	0	
19	0	0	$\alpha$	
20	0	0	$-\alpha$	

### 2.6.6 แบบทากูชิ (Taguchi design)

การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ [Taguchi, G. and S. Konishi. 1987] มีลักษณะเป็น ออร์ทอกอนัล เหมาะสำหรับการศึกษาผลกระทบของปัจจัยหลัก แต่เนื่องจากมี Resolution III กล่าวคือ ผลกระทบหลักไม่ซ้ำซ้อนกันเอง แต่ซ้ำซ้อนกับอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย จึงเหมาะสำหรับการคัดเลือกปัจจัยเท่านั้น สัญลักษณ์ที่ใช้เรียกการออกแบบการทดลองนี้คือ  $L_A B^C$

เมื่อ A คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดโดยไม่รวมการทำซ้ำ

B คือ จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยที่ศึกษา

C คือ จำนวนปัจจัยสูงสุดที่มีได้ในการทดลอง มีค่าเท่ากับผลรวมของปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

ข้อดีของการออกแบบการทดลองแบบนี้คือ มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้ รูปแบบการออกแบบการทดลองแบบทากูจิและตัวอย่างการออกแบบการทดลองแบบทากูจิ  $L_4^3$  แสดงดังตารางที่ 2.10 และ 2.11 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.10 รูปแบบการออกแบบการทดลองแบบทากูจิ

การทดลอง	จำนวนระดับของปัจจัย	จำนวนปัจจัยสำหรับแฟกทอเรียลเต็มรูป	จำนวนปัจจัยเพื่อคง Resolution V	จำนวนปัจจัยสำหรับการตัดปัจจัยทิ้ง
$L_4$	2	2	2	3
$L_8$	2	3	3	7
$L_9$	3	2	-	4
$L_{12}$	2	-	-	11
$L_{16}$	2	4	5	15
$L_{18}$	Mixed	-	-	8
$L_{27}$	3	3	-	13

ตารางที่ 2.11 การออกแบบการทดลองแบบทากูจิ  $L_4^3$

ผลการทดลอง (Runs)	การทดลองแบบทากูจิ $L_4$		
	1	2	3
1	-	-	-
2	-	+	+
3	+	-	+
4	+	+	-
ปัจจัย	a	b	-ab

จุดเด่นที่สำคัญที่สุดของการออกแบบการทดลองแบบทากูจิ คือ การหาฟังก์ชันความสูญเสีย (Loss function) และการกำหนดค่า (Settings) ที่เหมาะสม โดยอาศัยอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal-to-noise ratios) ซึ่งแบ่งตามลักษณะทางคุณภาพได้เป็น 3 กรณี คือ

- 1) กรณีค่ายิ่งมากยิ่งดี (Larger-the better) เช่น ระยะทางที่รถวิ่งได้ต่อลิตร หรือผลผลิตที่ได้
- 2) กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the better) เช่น ความเข้มข้นของแก๊สพิษในอากาศ หรือของเสียในกระบวนการ
- 3) กรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target-the better) เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของงานเจาะ ปริมาตรบรรจุแป้งเด็ก หรือค่าความต้านทานแรงดึงของใยผ้า

ในทางตรงข้าม จะเห็นว่ากรออกแบบการทดลองแบบทากูจิใช้จำนวนการทดลองน้อยมากเมื่อเทียบกับการออกแบบการทดลองแบบอื่นๆ ที่จำนวนปัจจัยเท่ากัน ซึ่งทำให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือทางสถิติลดลง

## 2.6.7 ข้อดีและข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองแบบต่างๆ

จากหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นว่า การออกแบบการทดลองแบบต่างๆ มีทั้งข้อดีและข้อจำกัด ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.12

ตารางที่ 2.12 ข้อดีและข้อจำกัดของการออกแบบการทดลองแบบต่างๆ

การออกแบบการทดลอง	ข้อดี	ข้อจำกัด
แบบแฟกทอเรียลเต็มรูป	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นออร์ทอกอนัล</li> <li>- โครงสร้างไม่ซับซ้อน</li> <li>- ศึกษาทั้งปัจจัยหลักและอันตรกิริยาได้ทั้งหมด</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายสูง</li> <li>- ใช้เวลาและทรัพยากรมาก</li> </ul>
แบบแฟกทอเรียลบางส่วน	ลดระยะเวลาและค่าใช้จ่ายลงจากการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป	มีโครงสร้างซับซ้อน
แบบ Plackett-Burman	สามารถกำหนดจำนวนการทดลองที่จำกัดในการศึกษาปัจจัยจำนวนมากๆ พร้อมกัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- จำนวนปัจจัยหลักสูงสุดไม่เกิน <math>n-1</math> ปัจจัย</li> <li>- ไม่เหมาะสำหรับกรณีที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีนัยสำคัญสูง</li> </ul>
แบบ Box-Benken	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีประสิทธิภาพมากสำหรับการศึกษา 3 ปัจจัย</li> <li>- สามารถศึกษาได้ทั้งผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสอง และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย</li> </ul>	จำนวนการทดลองมากและไม่สามารถลดได้ ไม่ว่าจะสนใจผลกระทบที่เกินกว่าผลกระทบเชิงเส้นหรือไม่
แบบ Central composite	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เหมาะสำหรับการศึกษาปัจจัยเชิงปริมาณ</li> <li>- สามารถแบ่งส่วนการทดลองได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- การศึกษาปัจจัยเชิงคุณภาพมากกว่า 1 ปัจจัย จะต้องใช้การออกแบบการทดลองวิธีอื่นแทน</li> </ul>
แบบทากูชิ	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เหมาะสำหรับการคัดเลือกปัจจัย</li> <li>- มีตารางสำเร็จรูปให้เลือกใช้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มีความน่าเชื่อถือทางสถิติ น้อย เนื่องจากจำนวนการทดลองน้อย</li> </ul>

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Leslie Sarah Nachbar [Leslie Sarah Nachbar. 2011] ศึกษาความเข้มข้นของเกลือ โซเดียมคลอไรด์ ที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายผสม Sodium Lauryl Ether Sulfate (SLES) กับ Lauramidopropyl Butaine (LAPB) ทำการทดลองที่สภาพความเป็นกรด-เบสของสารละลาย 6.3 ปรับความเข้มข้นของสารละลายระหว่าง 0.04 - 0.30 โมลาร์ และอัตราส่วนความเข้มข้นของ NaCl : SLES/LAPB 0:1 - 0.3:1 จากนั้นวิเคราะห์โครงสร้างไมเซลล์ของสารละลายนี้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope: TEM) และวัดความหนืดของสารละลาย สรุปผลการทดลองได้ว่า ที่สารละลาย SLES/LAPB เจือจาง ไมเซลล์ไม่สามารถเรียงตัวเป็นโครงสร้างทรงกระบอก เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย SLES/LAPB เพิ่มขึ้น ไมเซลล์จะเริ่มเรียงตัวเป็นทรงกระบอกและยาวขึ้น ทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น การเติมสารละลาย โซเดียมคลอไรด์ ไม่มีผลต่อการเรียงตัวของไมเซลล์ แต่จะทำให้ไมเซลล์เรียงตัวยาวขึ้น และความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้น

M. Galan Vallejo และ M.A. Lopez Torres [M. Galan Vallejo and M.A. Lopez Torres. 1987] ศึกษาความหนืดของสารละลาย โซเดียมอัลคิลอีเทอร์ซัลเฟต (Sodium alkyl ether sulfate) ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 - 30 wt% สารละลาย โซเดียม โดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate) ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 10 - 30 wt% และสารละลาย โซเดียม โดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (Sodium dodecyl benzene sulfonate) ที่ความเข้มข้น 10 - 20 wt% อุณหภูมิ 278 - 313 เคลวิน พบว่าระบบที่ศึกษาทั้งหมดมีพฤติกรรมการไหลแบบนิวโทเนียน (Newtonian rheological behavior) สารละลาย โซเดียมอัลคิลอีเทอร์ซัลเฟตที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 20 wt% มีความหนืดมากกว่าสารละลาย โซเดียม โดเดซิลซัลเฟต ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิเดียวกัน และมีความหนืดน้อยกว่าเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 20 wt% เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย โซเดียมอัลคิลอีเทอร์ซัลเฟตและสารละลาย โซเดียม โดเดซิลซัลเฟต ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิเดียวกัน สารละลาย โซเดียม โดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนตมีความหนืดสูงที่สุด

Monhamed Ahmed Siddig และคณะ [Monhamed Ahmed Siddig et. al. 2005] ศึกษาพฤติกรรมการไหลของระบบสารลดแรงตึงผิว Glucopone-water-hydrocarbon ที่มีรูปร่างแบบเฮกซะโกนอลและลามลลาร์ โดยศึกษาผลของไฮโดรคาร์บอนสายยาวที่ต่างกัน 4 ชนิด คือ เฮปเทน ออกเทน โดเดเคน และเททระเดเคน และผลของอุณหภูมิ จากการทดลองพบว่าพื้นที่ส่วนชอบน้ำ (Area head group) ของสารลดแรงตึงผิวที่มีรูปร่างแบบเฮกซะโกนอลไม่ขึ้นกับความยาวของไฮโดรคาร์บอน ในขณะที่พื้นที่ส่วนชอบน้ำของสารลดแรงตึงผิวที่มีรูปร่างแบบลามลลาร์เพิ่มขึ้น เมื่อความยาวของไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น และพบว่าจุดหลอมเหลวของสารลดแรงตึงผิวที่มีรูปร่างแบบเฮกซะโกนอลและลามลลาร์มีค่าใกล้เคียงกันมาก อุณหภูมิมีผลต่อพฤติกรรมการไหลของสารลดแรงตึงผิว ความหนืดของสารลดแรงตึงผิวลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

จักกฤษ คำชาติชาย และคณะ [จักกฤษ คำชาติชาย จักรกฤษณ์ ถาวร และชวกร ภักดิ์สรสิทธิ์. 2554] ศึกษาวิธีการลดรอบเวลาการผลิตของเวลาสูญเปล่าที่ใช้ในการปรับลดความหนืดของแอมพูให้อยู่ในช่วง 6,000 ถึง 8,000 เซนติพอยส์ วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแอมพู โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมมินิแทปในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของแอมพู ได้แก่ ปริมาณสารละลายน้ำเกลือ สารเพิ่มฟอง และสารลดแรงตึงผิว จากการปฏิบัติงานตามภาวะปฏิบัติงานที่ได้จากสมการถดถอย พบว่าสามารถควบคุมความหนืดของแอมพูให้อยู่ระหว่าง 6,240 ถึง 6,780 เซนติพอยส์ ซึ่งอยู่ในพิสัยข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ และลดเวลาสูญเปล่าก่อนการปฏิบัติงานที่ต้องปรับลดความหนืด ได้ 30 นาทีต่อเบทซ์

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต หากความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตสูงกว่าพิกัดข้อกำหนดเฉพาะ (5,000 - 10,000 เซนติพอยส์) จะเกิดการอุดตันในท่อจนไม่สามารถส่งโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากถังเก็บไปใช้ผลิตแชมพูได้ ดังนั้นจึงต้องควบคุมความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตให้อยู่ในพิกัดข้อกำหนดเฉพาะ การดำเนินงานแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอน เริ่มจากการศึกษาการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต การวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต โดยใช้แผนผังแสดงสาเหตุและผลการทดสอบปัจจัยในระดับห้องปฏิบัติการ การทดสอบปัจจัยในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ หาสมการความหนืด และสุดท้ายการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดที่ได้และหาภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 3.1 การศึกษาการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

3.1.1 ศึกษาชนิดและแหล่งที่ซื้อวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ได้แก่ เอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำ และกำมะถันเหลว

3.1.2 ศึกษากระบวนการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

#### 3.2 การวิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

วิเคราะห์ปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากการระดมสมองและแผนผังแสดงสาเหตุและผล

ปัจจัยที่พิจารณา ได้แก่

- ความพร้อมใช้ของเครื่องมือและอุปกรณ์ ได้แก่ บั้มป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์
- แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์จากบริษัทผู้ผลิต 3 บริษัท
- ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์
- อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน

### 3.3 การทดสอบปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ในระดับห้องปฏิบัติการ

พิจารณาปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากแผนผังแสดงสาเหตุและผล แล้วทดสอบในระดับห้องปฏิบัติการ หลังจากนั้นนำไปทดสอบในกระบวนการผลิตเพื่อหาสมการความหนืดในขั้นต่อไป

### 3.4 การทดสอบปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ได้จาก การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมมินิแทป

นำปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการ มาวิเคราะห์ในการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ โดยใช้โปรแกรมมินิแทป 17 เก็บตัวอย่างและวัดความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากกระบวนการผลิตที่ค่าของปัจจัยต่างๆ เพื่อสร้างสมการความหนืดที่แสดงความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัย

จำนวนตัวอย่างในการทดลองทั้งหมดที่ใช้สำหรับการสร้างสมการความหนืดมาจากการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ 2 ปัจจัย คิดเป็น  $2^2 = 4$  การทดลอง และทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง รวมทั้งสิ้น 12 การทดลอง

### 3.5 การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดและการหาภาวะปฏิบัติการที่ เหมาะสมในกระบวนการผลิต

- 1) สุ่มเก็บตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากกระบวนการผลิตเพิ่ม (จำนวน 3 ตัวอย่าง โดยทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด 9 การทดลอง) และวัดความหนืด
- 2) เปรียบเทียบความหนืดของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากกระบวนการผลิตในข้อ 1) กับความหนืดที่คำนวณได้จากสมการความหนืด (ความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดยอมรับได้ที่ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า 5%)
- 3) หาภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมในการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต โดยใช้โปรแกรมมินิแทป 17 ภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมจะเป็นค่าของปัจจัยที่ทำให้ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตมีค่าต่ำที่สุดในพิสัยที่กำหนดเฉพาะ (5,000 - 10,000 เซนติพอยส์)

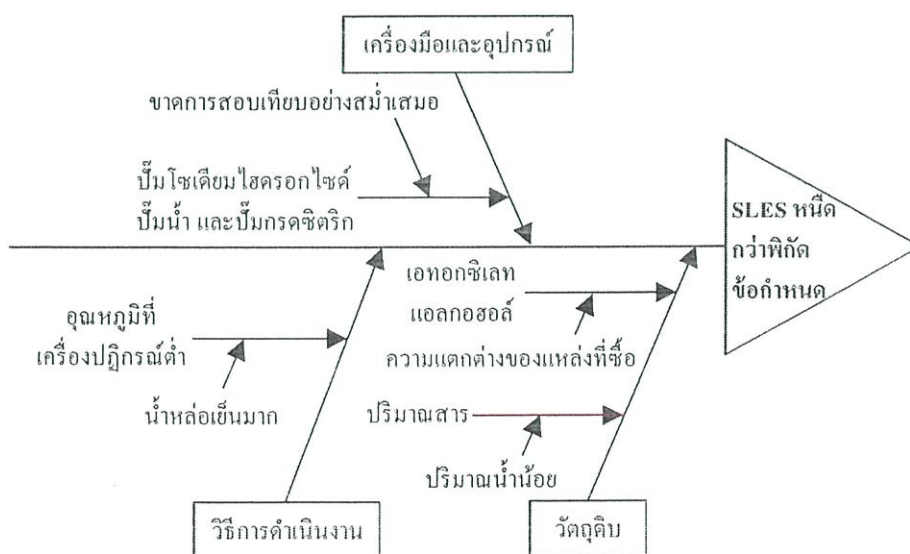
## บทที่ 4

### ผลการดำเนินงาน

วัตถุดิบที่ใช้ผลิตโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟต (SLES) ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวสำหรับผลิตแชมพู ประกอบด้วย เอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ น้ำ และกำมะถันเหลว การควบคุมความหนืดของ SLES ให้อยู่ในพิสัยข้อกำหนดเฉพาะ (5,000 - 10,000 เซนติพอยส์) มีความสำคัญต่อการผลิตมาก หากความหนืดของ SLES สูงกว่าพิสัยข้อกำหนดเฉพาะ SLES จะอุดตันในท่อ ไม่สามารถส่งไปใช้งานและนำกลับผสมใหม่ได้ ต้องส่งจ้างบำบัด และเปลี่ยนระบบท่อส่งง่าย ทำให้เกิดต้นทุนสูญเปล่า ในบทนี้สรุปผลการศึกษาปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของ SLES และทดสอบปัจจัยนั้นๆ ในระดับห้องปฏิบัติการและในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมมินิแทป 17 สร้างสมการทำนายความหนืดของ SLES หลังจากนั้นทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการและกำหนดภาวะปฏิบัติการที่เหมาะสมเพื่อควบคุมความหนืดของ SLES ผลการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 ปัจจัยที่คาดว่ามีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟต

จากการวิเคราะห์ปัจจัยในกระบวนการผลิตโซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตที่คาดว่ามีนัยสำคัญต่อความหนืดของ โซเดียมลอร์ลิเทอร์ซัลเฟตด้วยการระดมสมอง สามารถเขียนแผนผังแสดงสาเหตุและผลได้ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนผังแสดงสาเหตุและผล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากแผนผังแสดงสาเหตุและผล มีดังนี้

#### 4.1.1 ความพร้อมใช้ของบีม์ป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์

หากอัตราการป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เข้าถังผสมที่ 1 สำหรับใช้ทำปฏิกิริยาสะเทินไม่คงที่ ทำให้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ผสมกับลอริลอีเทอร์ซัลเฟตในปริมาณที่ไม่เหมาะสม ส่งผลให้ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตไม่คงที่ จึงตั้งสมมติฐานว่าบีม์ป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีนัยสำคัญ สามารถตรวจสอบสมมติฐาน โดยเปรียบเทียบอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากข้อมูลการสอบเทียบครั้งล่าสุด (24 เมษายน 2551) กับอัตราการไหลที่วัดได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล ซึ่งแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.1 พบว่าอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความคลาดเคลื่อนมากกว่า 140% จึงทำการสอบเทียบบีม์ (Calibration) ผลการสอบเทียบแสดงในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.2 พบว่าอัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.4% กล่าวได้ว่า สามารถตัดปัจจัยของบีม์ป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ออกจากปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

#### 4.1.2 แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์

เนื่องจากเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตในแผนกซัลโฟเนชันสั่งซื้อจากผู้ผลิต 3 บริษัท จึงตั้งสมมติฐานว่าเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์จากแต่ละแหล่งผลิตอาจมีองค์ประกอบต่างกันและมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

ทำการตรวจสอบสมมติฐาน โดยวัดความหนืดของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ผลิตจากเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ของ 3 บริษัท ที่อุณหภูมิเดียวกัน

#### 4.1.3 ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

จากทฤษฎีเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น ความหนืดของไมเซลล์ทรงกลมและทรงกระบอกจะเพิ่มขึ้น แต่ความหนืดของไมเซลล์ทรงลาเมลลาร์ จะลดลง จึงตั้งสมมติฐานว่าความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตมีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

ทำการตรวจสอบสมมติฐาน โดยเติมน้ำปริมาณต่างๆ ลงในตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตซึ่งใช้เอทอกซิเลตแอลกอฮอล์จากบริษัท A ที่เก็บจากกระบวนการผลิต ลดความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต จากนั้นวัดความเข้มข้นและความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

#### 4.1.4 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน

จากทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารลดแรงตึงผิวจะลดลง จึงตั้งสมมติฐานว่าอุณหภูมิของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตมีนัยสำคัญต่อความหนืด

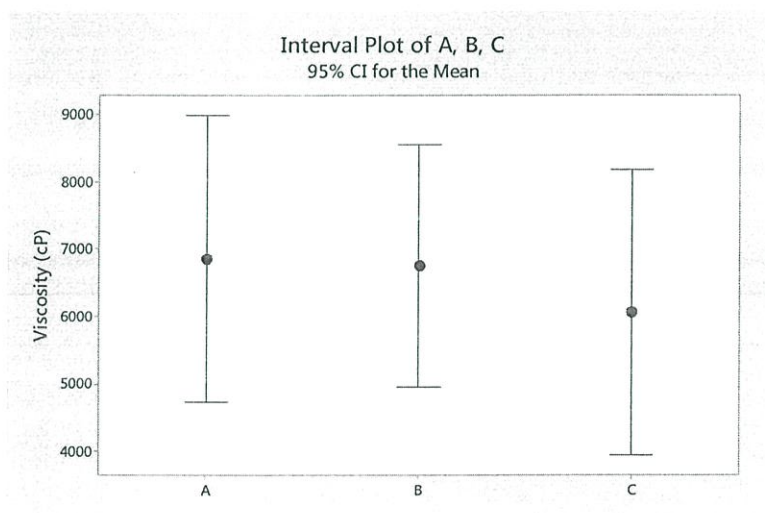
ทำการตรวจสอบสมมติฐานที่ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตคงที่ ปรับอุณหภูมิของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตซึ่งใช้เอทอกซิเลตแอลกอฮอล์จากบริษัท A ที่เก็บจากกระบวนการผลิต โดยใช้อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) ตั้งแต่ 20 ถึง 60 องศาเซลเซียส และวัดความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

## 4.2 ปัจจัยซึ่งคาดว่ามีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

การลดโอกาสการสูญเสียที่จะเกิดขึ้นกับกระบวนการ ได้ตรวจสอบปัจจัยที่คาดว่ามีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากข้อ 4.1.2, 4.1.3 และ 4.1.4 ในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งแสดงผลดังนี้

### 4.2.1 แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์

วัดความหนืดของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ใช้เอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ของผู้ผลิตทั้ง 3 บริษัท ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แสดงรายละเอียดในภาคผนวก ข ตารางที่ ข.3 และวิเคราะห์ T-test ได้ดังรูปที่ 4.2



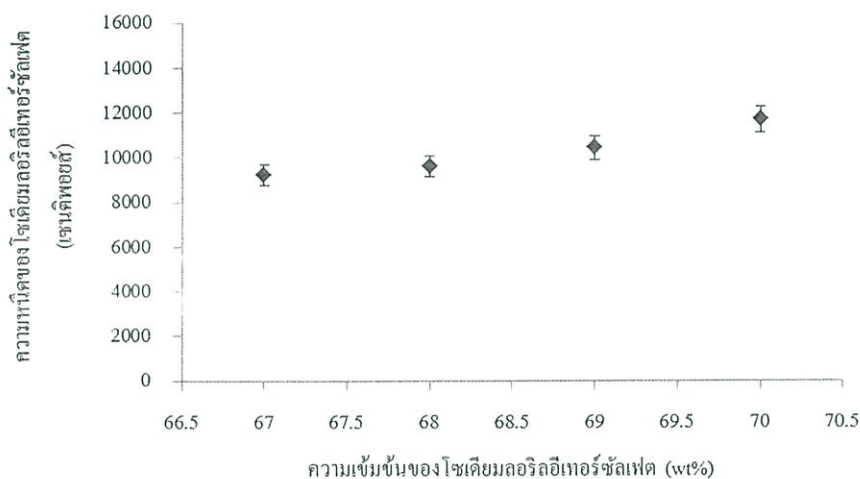
รูปที่ 4.2 T-test

จากรูปที่ 4.2 ค่า P-value ของ T-test ระหว่างความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากผู้ผลิตทั้ง 3 บริษัท มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์จากผู้ผลิตทั้ง 3 บริษัท ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทั้งนี้เพราะมีการตรวจสอบองค์ประกอบของ

เอทอกซิเลตแอลกอฮอล์จากทั้ง 3 บริษัท ก่อนการรับซื้อ ดังนั้นสามารถตัดปัจจัยความแตกต่างของแหล่งที่ซื้อวัตถุดิบออกจากปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

#### 4.2.2 ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

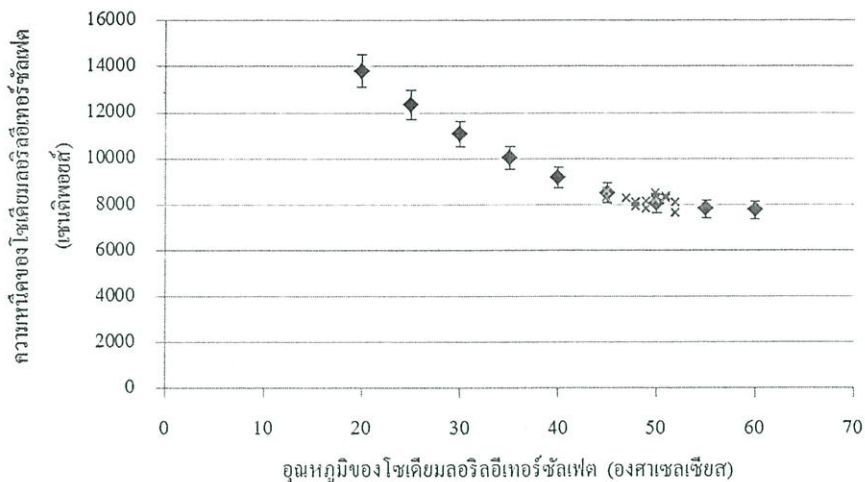
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตกับความเข้มข้น จากรูปเห็นได้ถึงความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตสูงขึ้นตามความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีในรูปที่ 2.5 ที่ได้กล่าวมา เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นการเรียงตัวของไมเซลล์จะเป็นทรงกลม ทรงกระบอก และเฮกซะโกนอล และมีความหนืดสูงขึ้นตามลำดับ อธิบายได้ว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตประมาณ 67 - 70 wt% และอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ไมเซลล์มีการเรียงตัวในลักษณะเฮกซะโกนอล ดังนั้นความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจึงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตกับความเข้มข้น

#### 4.2.3 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน

ในการทดลองปรับอุณหภูมิและวัดความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น (จุด ♦ ในรูปที่ 4.4) จากนั้นทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตและอุณหภูมิที่เก็บตัวอย่างจากระบวนการผลิต (จุด × ในรูปที่ 4.4) พบว่าความหนืดของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตมีค่า  $\pm 5\%$  ของค่าความหนืดที่ได้จากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งสอดคล้องว่า ความหนืดของของเหลวแปรผกผันกับอุณหภูมิ [Eyring, 1941] และงานวิจัยของ Monhamed Ahmed Siddig และคณะ [2005] ที่กล่าวว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารลดแรงตึงผิวที่มีรูปร่างแบบเฮกซะโกนอลและลามลาร์จะลดลง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตกับอุณหภูมิ (♦ คือ ค่าที่ได้จากการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ (ภาคผนวก ข.5) สำหรับพิจารณาแนวโน้ม และ × คือ ค่าจากกระบวนการ (ภาคผนวก ข.6) สำหรับตรวจสอบแนวโน้ม)

ผลการตรวจสอบในระดับห้องปฏิบัติการ สามารถตั้งสมมติฐานได้ว่าปัจจัยที่มีนัยสำคัญทำให้ความหนืดของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตเกินพิกัดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน

เนื่องจากจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีเพียง 2 ปัจจัย คือ ความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน จึงเลือกใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ ซึ่งมีการทดลอง  $2^2 = 4$  การทดลอง ทำซ้ำการทดลองละ 3 ครั้ง รวม 12 การทดลอง ค่าต่ำ (-) และค่าสูง (+) มาจากพิกัดข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ ดังนี้คือ

ความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตตามข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์มีค่าระหว่าง 68.5 - 71.5 wt% แต่ในทางปฏิบัติควบคุมระหว่าง 69.5 - 70.5 wt% เนื่องจากเป้าหมายของโรงงานที่ใช้กับผลิตภัณฑ์คือ 70.0 wt% ถ้าความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตสูงกว่า 70.5 wt% บริษัทจะ Give away

สำหรับอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันตามข้อกำหนดเฉพาะของกระบวนการอยู่ระหว่าง 45 - 50 องศาเซลเซียส (โพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตอาจเกิดการอุดตันในท่อหากอุณหภูมิต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส และโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟตมีสีเหลืองเกินมาตรฐานข้อกำหนดเฉพาะเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 50 องศาเซลเซียส)

ดังนั้นขอบเขตของปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ ความเข้มข้นของโพลีเอทิลีนเทอริอเทอร์ซัลเฟต 69.5 - 70.5 wt% และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน 45 - 50 องศาเซลเซียส

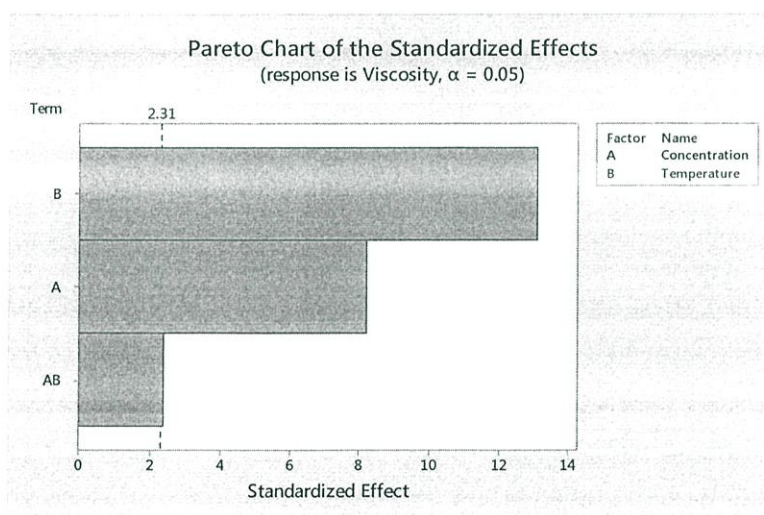
### 4.3 ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ได้จาก

การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ด้วยโปรแกรมมินิแทป

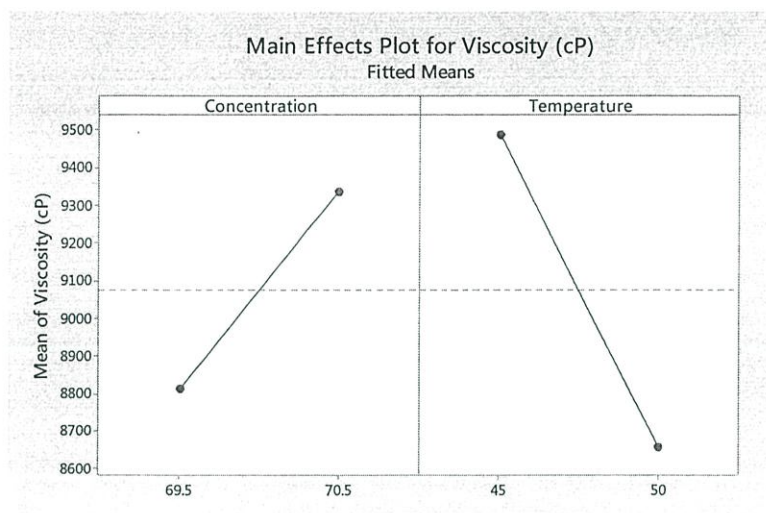
การวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตด้วยโปรแกรมมินิแทป 17 แสดงผลดังรูปที่ 4.5 และ 4.6

จากแผนภูมิพารेटอ ดังรูปที่ 4.5 อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันและความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ส่งผลต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนอันตรกิริยาของทั้ง 2 ปัจจัย แทบไม่มีผลกระทบ อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันมีผลต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตมากที่สุด

เมื่อพิจารณา Main effects plot ดังรูปที่ 4.6 พบว่าความชันของกราฟความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตเป็นบวก แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตเพิ่มขึ้น ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจะเพิ่มขึ้น ในทางตรงข้ามความชันของกราฟอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันเป็นลบ แสดงว่าเมื่ออุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันเพิ่มขึ้น ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจะลดลง



รูปที่ 4.5 แผนภูมิพารेटอแสดงผลของปัจจัยที่ศึกษาต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตกับความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตและอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน ที่ค่าความเชื่อมั่น  $R^2 = 96.85\%$  แสดงดังสมการที่ (4.1)

$$\text{Viscosity} = -221,258 + 3,403X_1 + 4,080X_2 - 60.7X_1X_2 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $X_1$  = ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)

$X_2$  = อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน (องศาเซลเซียส)

หน่วยของค่าคงที่จากสมการ (4.1) ได้แก่

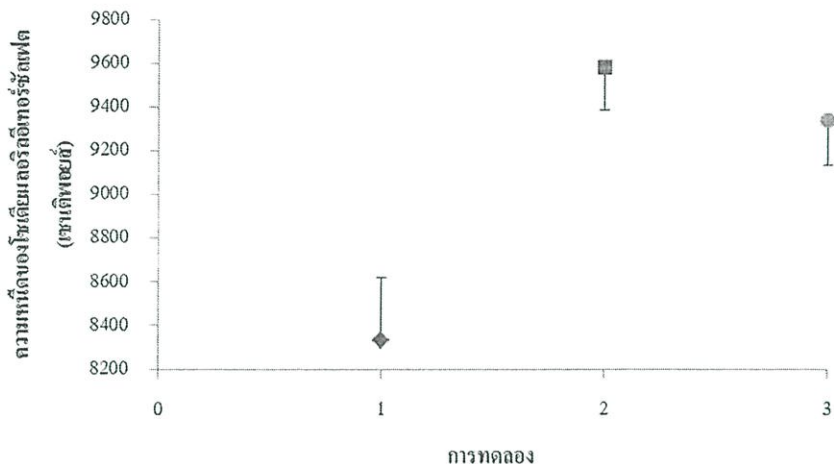
-221,258	มีหน่วยเป็น cP
3,403	มีหน่วยเป็น cP/wt%
4,080	มีหน่วยเป็น cP/°C
-60.7	มีหน่วยเป็น cP/(wt% °C)

#### 4.4 ผลทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดและภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต

การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืดใช้จำนวน 3 ตัวอย่าง ทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง แสดงผลดังรูปที่ 4.7 ที่ภาวะปฏิบัติงานดังนี้

- 1) ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต 69.5 wt% และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน 50 องศาเซลเซียส

- 2) ความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟต 70.0 wt% และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน 45 องศาเซลเซียส
- 3) ความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟต 70.5 wt% และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน 48 องศาเซลเซียส

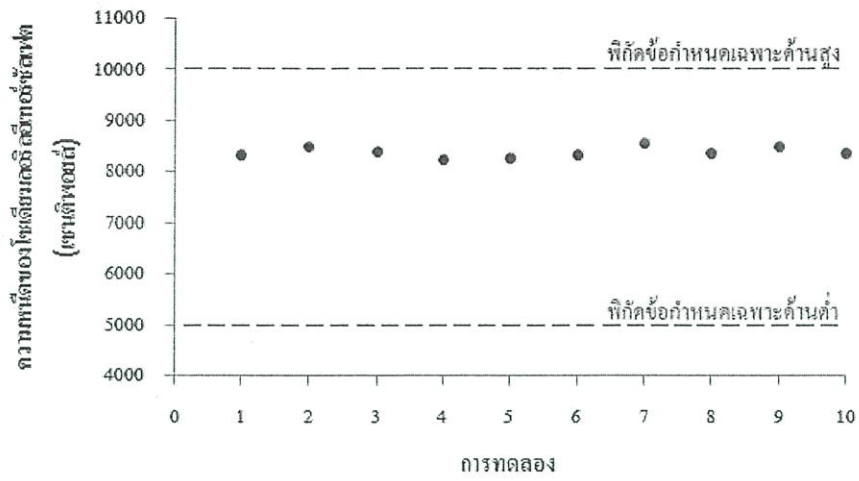


รูปที่ 4.7 การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืด (◆ความเข้มข้น 69.5 wt% อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ■ ความเข้มข้น 70.0 wt% อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส และ ● ความเข้มข้น 70.5 wt% อุณหภูมิ 48 องศาเซลเซียส)

จากรูปที่ 4.7 ความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟตที่ได้จากการทดลองมีค่า  $\pm 5\%$  ของค่าที่ทำนายจากสมการความหนืด แสดงว่าสมการความหนืดที่ได้มีความน่าเชื่อถือ

ในการหาภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสม พบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟต 69.5 wt% และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน 50 องศาเซลเซียส โซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟตจะมีความหนืดต่ำที่สุดในขอบเขตที่ศึกษาเท่ากับ 8,473 เซนติพอยต์

รูปที่ 4.8 แสดงความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟตที่ภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัย พบว่าความหนืดของโซเดียมลอร์ลิเทออร์ซัลเฟตมีค่าระหว่าง 8,220 - 8,550 เซนติพอยต์ และทุกค่าของความหนืดอยู่ในพิสัยที่กำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์



รูปที่ 4.8 ความหนืดของโซเดียมคลอไรด์ไฮดรอกไซด์ในกระบวนการผลิตที่ภาวะปฏิบัติงานที่เหมาะสมที่ได้จากงานวิจัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประเมินปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อการควบคุมความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตให้อยู่ในพิสัยที่กำหนดเฉพาะ (5,000 - 10,000 เซนติพอยส์) ซึ่งปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ 1) ความพร้อมใช้ของบีม์ป้อนโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2) แหล่งที่ซื้อเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ 3) ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต และ 4) อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน สรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้

#### 5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

หลังจากการสอบเทียบบีม์ป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อัตราการไหลของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เกือบคงที่ ดังนั้นบีม์ป้อนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จึงไม่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

ในการทดสอบระดับห้องปฏิบัติการพบว่าบริษัทผู้ผลิตเอทอกซิเลตแอลกอฮอล์ที่ต่างกันไม่เป็นปัจจัยที่มีนัยสำคัญ

ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ได้แก่

- อุณหภูมิของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต 45 - 50 องศาเซลเซียส
- ความเข้มข้นความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต 69.5 - 70.5 wt%

หลังการทดสอบในกระบวนการผลิต โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ พบว่าปัจจัยที่ทำให้ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตสูงขึ้น ได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต และอุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน ซึ่งสัมพันธ์ตามสมการความหนืด ดังสมการที่ (4.1) (ความเชื่อมั่น  $R^2 = 96.85\%$ )

$$\text{Viscosity} = -221,258 + 3,403X_1 + 4,080X_2 - 60.7X_1X_2 \quad (4.1)$$

เมื่อ  $X_1$  = ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)

$X_2$  = อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน (องศาเซลเซียส)

การทดสอบความน่าเชื่อถือของสมการความหนืด โดยสุ่มเก็บตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากกระบวนการผลิตเพิ่ม พบว่าความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ได้มีค่า  $\pm 5\%$  ของค่าที่ทำนายจากสมการความหนืด แสดงว่าสมการความหนืดมีความน่าเชื่อถือ

ภาวะปฏิบัติการณ์ที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรมมินิแทป 17 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตต่ำที่สุดเท่ากับ 8,473 เซนติพอยส์ คือ

- ความเข้มข้นของ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต 69.5 wt%
- อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน 50 องศาเซลเซียส

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การหาค่าภาวะปฏิบัติการณ์ที่เหมาะสมควรทำการทดลองแบบ Central composite เพิ่มเติม เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำมากขึ้น

5.2.2 ควรกำหนดให้ความหนืดเป็นข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตซึ่งใช้เป็นมาตรฐานก่อนการจัดจำหน่าย

5.2.3 ควรติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำที่ป้อนเข้าเข้าถังผสมทำปฏิกิริยาสะเทินถึงที่ 1 เพื่อควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้ในการผสมได้ถูกต้องมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- จักกฤษ เค้าชาติชาย จักรกฤษณ์ ฉาวร และ ชวกร ภักดิ์ศรีสิทธิ์. 2554. “ปัจจัยที่ส่งผลต่อความหนืดของแชมพูและรอบเวลาการผลิต.” ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
- บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โซลคิงส์ จำกัด. 2556. กรรมวิธีการผลิต คู่มือการเดินเครื่องจักร.
- บริษัท ยูนิลีเวอร์ ไทย โซลคิงส์ จำกัด. 2557. **SLES Properties Comparison ULT vs. TAYCA vs. BASF.**
- ประชาธรรม์ แสนภักดี. 2546. “ฟังก์ชันปลา กับแผนภูมิความคิด.” [Online]. Available: <http://www.prachasan.com/mindmapknowledge/fishbonemm.htm>. (10/1/2558)
- ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพฯ : ท็อป.
- Box, George E.P., and Norman R. Draper. 1987. **Empirical Model - Building and Response Surfaces.** New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Douglas C. Montgomery. 2013. **Design and Analysis of Experiments.** New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Glasstone, K. J. Laidler, and H. Eyring. 1941. **Theory of Rate Processes.** New York : McGraw-Hill.
- Gregory B. Hutchins. 1991. **Introduction to Quality Control, Assurance, and Management.** New York : Macmillan Publishing Company.
- Leslie Sarah Nachbar. 2011. “Effect of Formulation Conditions on Micellar Interactions and Solution Rheology in Multi-Component Micellar Systems.” The Degree of Master of Science in Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology.
- M. Galan Vallejo and M.A. Lopez Torres. 1987. “Anionic Surfactants - Water Systems: Specific Refractive Index, Specific Volume and Viscosity.” **Journal of Colloids and Surfaces.** 24(1) : 59-67.
- Maurice R. Porter. 1994. **Handbook of Surfactants.** London : Blackie Academic and Professional.

- Monhamed Ahmed Siddig et. al. 2005. "Rheological behaviours of the hexagonal and lamellar phases of glucohone (APG) surfactant." **Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects.** 145(1) : 107-109.
- Norman C. Foster. 1997. "Sulfonation and Sulfation Processes." Washington D.C.
- Plackett, R.L. and J.P. Burman. 1946. "The Design of Optimum Multifactoria Experiments." **Biometricka.** 33 : 305-325.
- R. Byron Bird et al. 2002. **Transport Phenomena.** New York : John Wiley and Sons, Inc.
- Richard J. Farn. 2006. **Chemistry and Technology of Surfactants.** New Delhi : Blackwell Publishing.
- Rosen MJ and Kunjappu JT. 2012. **Surfactants and Interfacial Phenomena.** 4th ed. Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons, Inc.
- Taguchi, G. and S. Konishi. 1987. **Taguchi Methods: Orthogonal Arrays and Linear Graphs.** American Supplier Institute, Inc.
- Thomas M. Schmitt. 2001. **Analysis of Surfactants.** New York : Marcel Dekker, Inc.

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การวิเคราะห์ข้อกำหนดเฉพาะของผลิตภัณฑ์

ภาคผนวก ก.1 การวิเคราะห์ความหนัก

ภาคผนวก ก.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้น

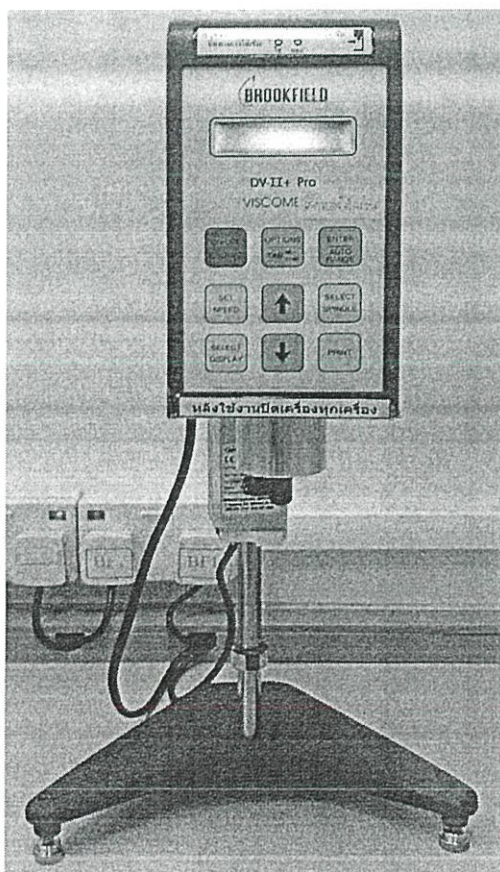
## ภาคผนวก ก.1 การวิเคราะห์ความหนืด

### วิธีวิเคราะห์ความหนืดด้วยเครื่องวัดความหนืด Brookfield DV-II+ RVT

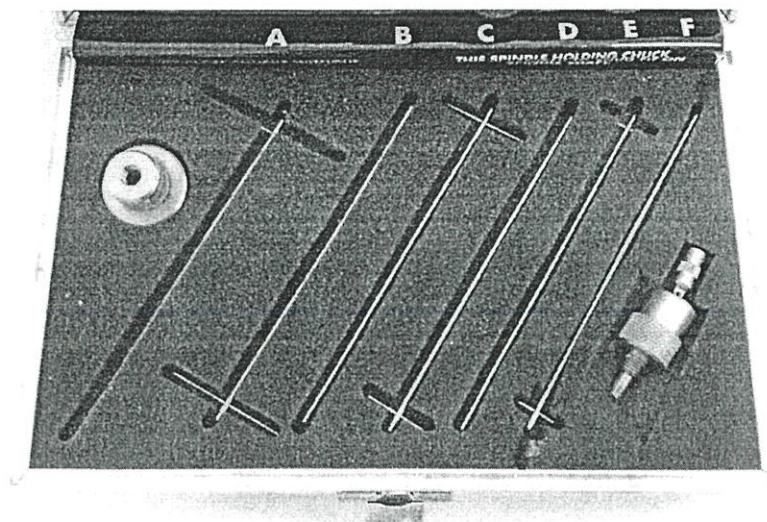
1. เปิดเครื่องวัดความหนืด
2. ติดตั้งเข็มวัดความหนืดชนิด D
3. ปรับความเร็วรอบของเข็มเท่ากับ 100 รอบต่อนาที
4. ตั้งเวลาสำหรับวัดความหนืด 1 นาที
5. ใส่โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตในบีกเกอร์ขนาด 150 มิลลิลิตร
6. ใช้พายปาดหน้าโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตเพื่อนำฟองออกจากโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตก่อนวัดความหนืด
7. รอเครื่องทำงานครบ 1 นาที อ่านค่าความหนืดจากหน้าจอแสดงผล

### ข้อควรระวังในการใช้เครื่องมือวัดความหนืด Brookfield DV-II+ RVT

1. เช็คนิคมของเข็มก่อนวัดความหนืด
2. ยกแกนขึ้นก่อนใส่หรือถอดเข็ม
3. ก่อนใช้เครื่องวัดความหนืด ควรปรับระดับฟองน้ำบนแป้นของเครื่องก่อนเสมอ



รูปที่ ก.1 เครื่องวัดความหนืด Brookfield DV-II+ RVT



รูปที่ ก.2 ชนิดของเข็มวัดความแข็ง

## ภาคผนวก ก.2 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

### วิธีวิเคราะห์ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

1. ชั่งตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (W) หนัก 2.00x กรัม ในบีกเกอร์ ขนาด 150 มิลลิลิตร บนที่ก้นน้ำหนักที่ใด
2. ละลายโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตด้วยน้ำกลั่นต้ม
3. เติมน้ำละลายโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตในขวดวัดปริมาตร ขนาด 500 มิลลิลิตร ปรับปริมาตร และเขย่าให้เข้ากัน
4. บีบสารละลายโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต จำนวน 10 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดสำหรับไทเทรต
5. เติมน้ำละลาย Acid indicator และคอลโรฟอร์ม อย่างละ 10 มิลลิลิตร ลงในขวดสำหรับไทเทรต
6. ไทเทรตด้วยสารละลายไฮยามีน เข้มข้นประมาณ 0.004 โมลาร์ ที่ละเอียด ปิดด้วยจุกยางแล้ว เขย่าขวด เมื่อถึงจุดยุติสารละลายในชั้นคอลโรฟอร์มจะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีฟ้าอมเทา
7. บันทึกปริมาตรของสารละลายไฮยามีนที่ใช้ไทเทรต (V)

### การคำนวณ

$$\text{Concentration} = \frac{10 \times V \times M \times MW}{W} \quad (\text{ก.1})$$

เมื่อ V คือ ปริมาตรของสารละลายไฮยามีนที่ใช้ไทเทรต (mL)

M คือ ความเข้มข้นของสารละลายไฮยามีน (M)

MW คือ มวลโมเลกุลของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ซึ่งมีค่า 340

W คือ น้ำหนักของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (g)

ภาคผนวก ข

ข้อมูลดิบ

ตารางที่ ข.1 อัตราการไหลของปั๊มโซเดียมไฮดรอกไซด์จากข้อมูลการสอบเทียบปั๊มกับอัตราการไหล  
ก่อนการดำเนินงาน (25/9/2557)

อัตราการไหลของ ปั๊มโซเดียมไฮดรอกไซด์	ครั้งที่		
	1	2	3
รายละเอียด	- ปั๊ม C เปิด 55 % - ปั๊ม D เปิด 5 %	- ปั๊ม C เปิด 55 % - ปั๊ม D เปิด 99 %	- ปั๊ม C เปิด 65 % - ปั๊ม D เปิด 5 %
จากข้อมูลการสอบเทียบ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	520.80	599.76	591.60
จากเครื่องวัดอัตราการไหล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	193.10	214.35	246.50
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	169.70	180.26	140.10

ตารางที่ ข.2 อัตราการไหลของปั๊มโซเดียมไฮดรอกไซด์จากค่าออกแบบและการวัด หลังการสอบเทียบ  
(7/1/2558)

อัตราการไหลของ ปั๊มโซเดียมไฮดรอกไซด์	ครั้งที่		
	1	2	3
จากค่าออกแบบ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	264.00	264.00	264.00
จากการวัดจริง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	261.00	264.00	264.00
ร้อยละความคลาดเคลื่อน	1.14	0	0

ตารางที่ ข.3 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากเอทอกซีเลตแอลกอฮอล์ 3 บริษัทผู้ผลิต  
(20/10/2557)

บริษัท	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (เซนติพอยส์)					
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 4	ครั้งที่ 5	เฉลี่ย
A	7,600	7,600	7,390	-	4,860	6,862.50
B	8,210	6,980	6,320	5,540	-	6,762.50
C	6,980	3,020	6,750	6,900	6,700	6,070.00

ตารางที่ ข.4 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่ความเข้มข้น  
ต่างๆ (25/10/2557)

ความเข้มข้นของโซเดียม ลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (เซนติพอยต์)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
67	9,230	9,350	9,080	9,220
68	9,620	9,420	9,770	9,603
69	10,360	10,500	10,400	10,420
70	11,860	11,650	11,490	11,667

ตารางที่ ข.5 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ทดลองระดับห้องปฏิบัติการที่อุณหภูมิต่างๆ  
(15/10/2557)

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (เซนติพอยต์)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
20	13,820	13,900	13,710	13,810
25	12,240	12,430	12,350	12,340
30	11,150	11,080	11,000	11,077
35	10,000	9,840	10,220	10,020
40	9,060	9,330	9,170	9,187
45	8,360	8,650	8,500	8,503
50	8,050	7,950	8,140	8,047
55	7,760	7,800	7,830	7,797
60	7,810	7,750	7,690	7,750

ตารางที่ ข.6 ความหนืดของตัวอย่างโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตจากกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)
1	47	8,200
2	45	8,280
3	45	8,520
4	48	8,040
5	49	7,780
6	51	8,200

ตัวอย่าง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)
7	50	8,440
8	51	8,320
9	49	8,100
10	48	8,040
11	50	8,180
12	50	8,260
13	48	7,840
14	52	8,040
15	52	7,580

ตารางที่ ข.7 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ภาวะปฏิบัติงานต่างๆ สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตด้วยโปรแกรมมินิแทป 17 (3/2/2558)

ร้อยละการเปิดปั๊มน้ำ (%)	อัตราการไหลของน้ำ (kg/h)	ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)	อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน (องศาเซลเซียส)	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (เซนติพอยส์)		
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3
48	216.0	69.5	45	9,160	9,060	9,240
40	180.0	70.5	45	9,840	9,990	9,650
48	216.0	69.5	50	8,560	8,400	8,460
40	180.0	70.5	50	8,900	8,770	8,860

ตารางที่ ข.8 ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ภาวะปฏิบัติงานต่างๆ สำหรับใช้ตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการถดถอย (26/3/2558)

ร้อยละการเปิดปั๊มน้ำ (%)	อัตราการไหลของน้ำ (kg/h)	ความเข้มข้นของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (wt%)	อุณหภูมิการทำปฏิกิริยาซัลเฟชัน (องศาเซลเซียส)	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (เซนติพอยส์)			
				ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
40	180.0	70.5	48	9,140	9,410	9,470	9,340
48	216.0	69.5	50	8,220	8,410	8,360	8,330
44	198.0	70.0	45	9,570	9,690	9,480	9,580

ตารางที่ ข.9 ความหนืดของ โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ความเข้มข้น 69.5 wt% และอุณหภูมิการทำ  
ปฏิกิริยาซัลเฟชัน 50 องศาเซลเซียส

ตัวอย่าง	ความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต (เซนติพอยส์)
1	8,330
2	8,490
3	8,380
4	8,220
5	8,270
6	8,320
7	8,550
8	8,370
9	8,490
10	8,350

ภาคผนวก ก  
ตัวอย่างการคำนวณ

- ภาคผนวก ก.1 การคำนวณอัตราการไหลของปั๊มโซเดียมไฮดรอกไซด์จากข้อมูลการสอบเทียบ
- ภาคผนวก ก.2 การคำนวณต้นทุนสูญเสียเปล่าเพราะความหนืดของโซเดียมลอร์ลือเทอร์ซัลเฟตไม่ได้ตามพิกัดข้อกำหนดเฉพาะที่ลดได้

## ภาคผนวก ค.1 การคำนวณอัตราการไหลของปั๊มโซเดียมไฮดรอกไซด์จากข้อมูลการ สอบเทียบ

### ตัวอย่างการทดลองครั้งที่ 1

ปั๊ม C เปิด 55 %

จากกราฟการสอบเทียบปั๊มของปั๊ม C พบว่า

- เปิดปั๊ม 50 % อัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 352.8 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

- เปิดปั๊ม 60 % อัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 423.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ดังนั้นการเปิดปั๊ม 55 % อัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ

$$352.8 + \left( \frac{55 - 50}{60 - 50} \right) (423.6 - 352.8) = 388.2 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

- ปั๊ม D เปิด 5 %

จากกราฟการสอบเทียบปั๊มของปั๊ม D พบว่า

- เปิดปั๊ม 40 % อัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 162.0 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

- เปิดปั๊ม 50 % อัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 170.4 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ดังนั้นการเปิดปั๊ม 5 % อัตราการไหลของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ

$$162.0 + \left( \frac{5 - 40}{50 - 40} \right) (170.4 - 162.0) = 132.6 \text{ กิโลกรัมต่อชั่วโมง}$$

ดังนั้นอัตราการไหลรวมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ คือ  $388.2 + 132.6 = 520.8$  กิโลกรัมต่อชั่วโมง

## ภาคผนวก ค.2 การคำนวณต้นทุนสูญเสียเปล่าเพราะความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ ซัลเฟตไม่ได้ตามพิกัดข้อกำหนดเฉพาะที่ลดได้

1) ความสูญเสียจากการทิ้งผลิตภัณฑ์โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่มีความหนืดสูงเกินพิกัด  
ข้อกำหนดเฉพาะ

### ข้อมูล

- ความถี่ของการเกิดปัญหาการอุดตันในถังเก็บสารเฉลี่ย 1 ครั้งต่อปี (1 ถัง)

- ถังเก็บสารบรรจุโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตได้ 100 ตัน

- โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ราคาตันละ Y บาท

### การคำนวณ

$$\begin{aligned} \text{มูลค่าความสูญเสีย} &= 1 \text{ ถัง / ปี} \times 100 \text{ ตัน / ถัง} \times Y \text{ บาท / ตัน} \\ &= 100Y \text{ บาท / ปี} \end{aligned}$$

## 2) ความสูญเสียจากการบำบัดผลิตภัณฑ์โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่มีความหนืดสูงเกินพิกัด ข้อกำหนดเฉพาะ

### ข้อมูล

- ความถี่ของการเกิดปัญหาการอุดตันในถังเก็บสารเฉลี่ย 1 ครั้งต่อปี (1 ถัง)
- ถังเก็บสารบรรจุโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตได้ 100 ตัน
- ค่าบำบัดผลิตภัณฑ์โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตที่ไม่ได้คุณภาพ ราคาตันละ 6,000 บาท

### การคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{มูลค่าความสูญเสีย} &= 1 \text{ ถัง / ปี} \times 100 \text{ ตัน / ถัง} \times 6,000 \text{ บาท / ตัน} \\ &= 600,000 \text{ บาท / ปี}\end{aligned}$$

## 3) ค่าเสียโอกาสของการไม่ได้ผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต

### ข้อมูล

- ความถี่ของการเกิดปัญหาการอุดตันในกระบวนการเฉลี่ย 1 ครั้งต่อปี
- เวลาในการแก้ปัญหาเมื่อโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตอุดตันในกระบวนการ 1 วันต่อครั้ง
- กำลังการผลิต 30 ตันต่อวัน
- โซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต ราคาตันละ Y บาท

### การคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{มูลค่าความสูญเสีย} &= 1 \text{ ครั้ง / ปี} \times 1 \text{ วัน / ครั้ง} \times 30 \text{ ตัน / วัน} \times Y \text{ บาท / ตัน} \\ &= 30Y \text{ บาท / ปี}\end{aligned}$$

ความสูญเสียหรือต้นทุนสูญเสียเปล่าที่เกิดจากความหนืดของโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟตไม่ได้ตามพิกัดข้อกำหนดเฉพาะที่สามารถลดได้ทั้งหมด = 1) + 2) + 3)

หมายเหตุ จำนวนที่กำลังการผลิตโซเดียมลอริลอีเทอร์ซัลเฟต 30 ตัน / วัน ระหว่างการทำวิจัย ตั้งแต่ มิถุนายน พ.ศ. 2557 ถึง เมษายน พ.ศ. 2558

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวนันทภรณ์ ต้อยจตุรัส  
 วัน เดือน ปีเกิด 16 พฤศจิกายน 2535  
 ที่อยู่ 79/6 หมู่ 4 ซอยนารายณ์ อำเภอชัยบาดาล จังหวัดลพบุรี 15130  
 Email nanthaphorn\_pn@hotmail.com โทรศัพท์ 09-7163-4578

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551-2553 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนจุฬารัตนราชวิทยาลัย จังหวัดลพบุรี  
 พ.ศ. 2554-2557 ปริญญาตรี วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับ 2)  
 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การฝึกงานและผลงานวิจัย

1 เมษายน ถึง 27 มิถุนายน 2557  
 นักศึกษาฝึกงานส่วนโรงงาน โพลีสไตรีน  
 บริษัท ดาว เคมิคอล ประเทศไทย จำกัด นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด จังหวัดระยอง

ชื่อ-นามสกุล นายลวิตร นามวงษ์  
 วัน เดือน ปีเกิด 29 มกราคม 2536  
 ที่อยู่ 297/1 ถนนเทศบาลสาย 2 ตำบลขลุง อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี 22110  
 Email l.namwong@hotmail.co.th โทรศัพท์ 09-2414-5509

### ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2551-2553 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนเบญจมราชูทิศ จังหวัดจันทบุรี  
 พ.ศ. 2554-2557 ปริญญาตรี วศ.บ. (เกียรตินิยมอันดับ 1)  
 สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประสบการณ์การฝึกงานและผลงานวิจัย

- นักศึกษาฝึกงานที่บริษัท สยามมิทซูชิ พีทีเอ จำกัด นิคมอุตสาหกรรมตะวันออก จังหวัดระยอง ในโครงการ SCG Excellent Internship Program ระหว่างวันที่ 17 มีนาคม ถึง 23 พฤษภาคม 2557
- นักศึกษาฝึกงานที่บริษัท เทคนิป เอ็นจิเนียริง (ประเทศไทย) จำกัด ในโครงการ Power You Program ระหว่างวันที่ 7 พฤศจิกายน 2557 ถึง 30 เมษายน 2558
- ศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรตรีเก้าวหน้า