

ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมแบบชั้นหนึ่ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Factors Affecting the Efficiency of High Viscosity Syrup Mixing



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

Department of Industrial Engineering

FACULTY OF ENGINEERING

Chulalongkorn University

Academic Year 2021

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมแบบชั้นหนึ่ง
โดย	น.ส.วรกาญจน์ คณกร
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

.....	คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)	
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	
.....	ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์จรัสวัฒน์ เงามะเสถียรวงศ์)	
.....	อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตสิตเจริญ)	
.....	กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)	
.....	กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)	

วราภรณ์ คณกร : ปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมแบบชั้นหนืด. (Factors Affecting the Efficiency of High Viscosity Syrup Mixing) อ.ที่ปรึกษาหลัก : ศ. ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตติเจริญ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมแบบชั้นหนืดด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer (HSVM) โดยตรวจสอบจากการวัดค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรัปสีน้ำตาลต้องไม่เกินเกณฑ์มาตรฐาน 13 มิลลิเมตร และค่าความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการผลิตระยะสั้น (C_{pk}) ของเครื่องจักรต้องไม่ต่ำกว่าเกณฑ์ โดยนำเอาแผนผังก้างปลาควบคู่กับตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลทำการวิเคราะห์ถึงสาเหตุของปัญหา จากนั้นทำการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธี FMEA พร้อมทั้งประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Fraction Design) เพื่อลดปัจจัยหลักที่ไม่มีอิทธิพลออก ทำให้ได้ปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 3 ปัจจัย ได้แก่ 1.ระดับของชุดตะแกรงหัวปั่นผสม 2.ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นผสม และ 3.อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุดิบของเหลว พร้อมทั้งประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Method) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken) เพื่อหาค่าระดับของปัจจัยที่เหมาะสมของทั้ง 3 ปัจจัย โดยค่าความสูงของตะกอนไม่เกิน 10 ± 1 มิลลิเมตร โดยมีค่าก่อนการปรับปรุงกระบวนการผลิตไซรัปสีน้ำตาล มีค่าเฉลี่ยความสูงของตะกอนเป็น 20.89 ± 2.26 มิลลิเมตร และค่า C_{pk} ของเครื่องผสม HSVM นั้นมีค่าเป็น -3.93 ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน จากการวิเคราะห์ผลการทดลองสรุปได้ว่าค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการตั้งเครื่องผสม HSVM มีดังนี้ ระดับของชุดตะแกรงหัวปั่นผสม อยู่ที่ระดับแบบต่ำ ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นผสมอยู่ที่ 2000 รอบ/นาที และอุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุดิบของเหลวอยู่ที่ 72.5 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ทำการยืนยันผลโดยการปรับตั้งค่าเครื่องทำการผลิตจริงพร้อมติดตามผล ผลหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิตไซรัปสีน้ำตาล มีค่าเฉลี่ยความสูงของตะกอนเป็น 10.48 ± 0.32 มิลลิเมตร และค่า C_{pk} ของเครื่องผสม HSVM นั้นมีค่าเป็น 2.56 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดีเกินคาด และยังส่งผลให้ประสิทธิภาพของเครื่องผสมไซรัป HSVM นั้นผลิตไซรัปได้โดยไม่เกิดของเสียจากกระบวนการอีกด้วย



สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา 2564

ลายมือชื่อนิสิต
ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

6270243021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORD: High Viscosity Syrup Mixing, Quality Improvement, Design of Experiment, Response Surface Methodology

Worakarn Kanakorn : Factors Affecting the Efficiency of High Viscosity Syrup Mixing. Advisor: Prof. Somkiat Tangjitsitcharoen, Ph.D.

The purpose of this research is studying the factors affecting the efficiency of high viscosity syrup mixing with the Hi-Shear Vacuum Mixer (HSVM) by measuring the height of sediment in brown syrup not exceeding the standard 13 millimeters and the short run process capability index (C_{pk}) of machine must not be lower than the threshold. By using brainstorm and fishbone diagram with the cause effect matrix to analyze the cause of problem. The preliminary factor is screening by FMEA method and applying the Two-level Factorial Fraction Experiment technique (2^k Factorial Fraction Design) is used to reduce the main non-influencing factors. As a result, three significant factors that effected on the height of sediment in syrup which are: 1.the level of sieve shear 2.the speed of shear mixing head and 3.the initial temperature of liquid raw materials. In addition, the Response Surface Methodology (RSM) was applied to determine the optimum level of all three factors, with the height of sediment in syrup is not more than 10 ± 1 millimeters. Before the improvement of high viscosity syrup mixing process, the average height of sediment in brown syrup is 20.89 ± 2.26 millimeters and the C_{pk} of the HSVM mixer is -3.93 that is lower than the benchmark. From the analysis of the results, it can be concluded that shown the appropriate setting HSVM machine value of each factor; 1. the level of sieve shear is low level 2. the speed of shear mixing head is 2000 rounds per minute and 3. the initial temperature of liquid raw materials is 72.5 degree Celsius, which was confirmed by adjusting the actual production machine settings and follow-up. Results after improvement of brown syrup by HSVM machine, the result as the average height of sediment in syrup is 10.48 ± 0.32 millimeters and the C_{pk} of the HSVM machine is 2.56 which is incredibly improved. This also results in the efficiency of the HSVM syrup mixer producing the syrup without any waste from the process.

Field of Study: Industrial Engineering

Student's Signature

Academic Year: 2021

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความอนุเคราะห์ ความช่วยเหลือ การเสียสละ เวลาในการแนะนำในการให้คำปรึกษา คำแนะนำมาเป็นอย่างดีจากอาจารย์ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ให้คำชี้แนะข้อคิดเห็น พร้อมแนะแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้ปลະปรับปรุงใน วิทยานิพนธ์ รวมถึงการติดตามความคืบหน้าของงานเป็นอย่างดีเยี่ยมตลอดช่วงระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยขอถือ โอกาส ณ ที่นี้ กราบขอบคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รอง ศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร กรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสียสละเวลา ชี้แนะ แนะนำแนวทาง ตรวจสอบพร้อมชี้แนะการแก้ไข ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้อง มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดวิชาความรู้ ข้อมูลและการให้คำแนะนำตลอดจน วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเสร็จและสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสในการศึกษาการทำวิจัย รวมทั้ง คุณสมควร พานพิมพ์ คุณนพภูฏ ลอยแก้ว คุณสุนทรี ฤทธิโยธิน และ คุณสุพรรณษา เรืองพานิช ผู้แนะนำและสนับสนุนข้อมูล การทดลอง และเอื้อเฟื้อสถานที่ในห้องปฏิบัติการให้สามารถทำวิจัยสำเร็จลุล่วงตลอดจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แล้วเสร็จและสำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา คุณลุง คุณป้า และครอบครัวพี่น้องที่คอยสนับสนุนและเป็น กำลังใจให้ตลอดการศึกษาและการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ รวมถึงขอบคุณกำลังใจจากเพื่อนๆและพี่น้องในภาควิชา และ ผู้มีส่วนร่วมในงานวิจัยทุกๆด้านที่ไม่ได้กล่าวถึง ณ ที่นี้ด้วย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วรกาญจน์ คณกร

สารบัญ

	หน้า
.....	ค
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูปภาพ.....	ฅ
บทที่ 1.....	1
บทนำ	1
1.1 บทนำ.....	1
1.2 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา.....	2
1.3 สภาพและความเป็นมาของปัญหา.....	3
1.3.1 กระบวนการผงโอวัลติน	8
1.3.2 การศึกษากระบวนการผลิตไซรัป (Mixing)	10
1.3.3 ลักษณะเกณฑ์การวัดคุณภาพของไซรัป	13
1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	19
1.5 ขอบเขตงานวิจัย	19
1.6 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินการ	19
1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับจากการวิจัย.....	20
1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย	21

บทที่ 2.....	22
ทฤษฎีและงานวิจัยที่นำมาใช้.....	22
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับเครื่องผสมแรงเฉือนสูง.....	22
2.2 เบตา-กลูแคน (Beta-glucan).....	23
2.3 การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Denaturation protein).....	28
2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	32
2.4.1 การระดมสมอง (Brainstorming).....	32
2.4.2 แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram).....	32
2.4.3 ตารางแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix).....	35
2.4.4 ผังพาเรโต (Pareto Diagram).....	36
2.4.5 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของปัจจัย (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) (กิตติศักดิ์, 2008).....	37
2.4.6 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis).....	38
2.4.7 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ(Design of Experiment: DOE) (ปารเมศ, 2545).....	38
2.4.8 มิติการออกแบบการทดลอง (Resolution : R) (โรจนโรวรรณ, 2554).....	51
2.4.9 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	52
2.4.10 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis).....	54
2.4.11 พื้นที่ผิวจำเพาะ (SPECIFIC SURFACE AREA).....	54
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	59
บทที่ 3.....	65
วิธีการดำเนินการวิจัย.....	65
3.1 การศึกษากระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM.....	65
3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบกลุ่มของเหลว.....	65

3.1.2	การเตรียมวัตถุดิบกลุ่มผง	66
3.1.3	การผสมไซรป์.....	66
3.1.4	การตรวจสอบตะกอนในไซรป์.....	68
3.2	การศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variables).....	72
3.2.1	การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง	73
3.2.2	การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง.....	76
3.2.3	การกำหนดระดับของปัจจัยเบื้องต้น	77
3.3	การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง.....	77
3.3.1	แผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....	77
3.3.2	หลักที่ใช้ในการการออกแบบการทดลอง	78
3.4	การเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการเก็บข้อมูลและการวิจัย	79
3.5	การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง.....	79
3.5.1	โปรแกรมช่วยสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล	79
3.5.2	การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	80
3.5.2.1	การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (Normality Assumption)	80
3.5.2.2	การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence).....	80
3.5.2.3	การทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)	80
3.5.3	การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของผลการทดลองแกรม	81
3.6	สรุปขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพสำหรับกระบวนการผลิตไซรป์ด้วยเครื่อง HSVM ...	81
บทที่ 4	.....	82
	ผลการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัย	82
4.1	การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรป์	82

4.2	การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัป	89
4.3	การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัป	99
4.3.1	การกำหนดระดับของปัจจัยเบื้องต้น	99
4.3.2	ตัวแปรตอบสนอง	102
4.3.3	สรุปแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น	102
4.3.4	ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น	106
4.3.5	การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง	107
4.3.1.1	การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (Normality Assumption)	107
4.3.1.2	การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence) ...	108
4.3.1.3	การทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)	109
4.3.6	ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้น	110
4.3.7	การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้น	111
4.4	การออกแบบการทดลองวิธีพินผิวตอบสนอง เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในไซรัป	114
4.4.1	การกำหนดตัวแปรควบคุมที่สำคัญในการทดลอง	118
4.4.2	การกำหนดแผนและช่วงการทดลอง เพื่อไม่ให้กระทบกับแผนการผลิต	119
4.4.3	ผลการทดลองการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตผสมไซรัป	120
4.4.4	การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบจำลองความสูงของตะกอน	120
4.4.4.1	การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (Normality Assumption)	120
4.4.4.2	การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence) ...	121

4.4.4.3	การทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)	122
4.4.5	การวิเคราะห์ผลการทดลองของการหาสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผสมไซรัป	123
บทที่ 5	.....	133
	การปรับปรุงแก้ไขแก้ไขกระบวนการ	133
5.1	การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง	133
5.2	ผลการทดลองหลังการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์	134
5.3	การสรุปผลการทดลอง	137
5.4	การตรวจติดตามผลหลังการปรับพารามิเตอร์การใช้งาน	138
บทที่ 6	.....	142
	สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ	142
6.1	สรุปการดำเนินงานวิจัย	142
6.1.1	สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไซรัป	142
6.1.2	สรุปสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไซรัป	142
6.1.3	สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ปัจจัยและแก้ไขปัญา.....	143
6.1.4	สรุปขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ	144
6.2	ข้อจำกัด	144
6.3	ข้อเสนอแนะ	145
ภาคผนวก	.....	146
ภาคผนวก ก	.....	147
ภาคผนวก ข	.....	150
ภาคผนวก ค	.....	152
บรรณานุกรม	.....	157



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 1-1 แสดงลำดับความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการแบะระยะสั้น (C_{pk}) (กิตติศักดิ์, 2549).....	17
ตาราง 1-2 แสดงค่าแนะนำสำหรับค่าที่ต่ำที่สุดของดัชนี (C_{pk}) (กิตติศักดิ์, 2549).....	18
ตาราง 2-1 ค่า α ของการการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย.....	48
ตาราง 2-2 เมทริกซ์การทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนกรณีมี 3 ปัจจัย.....	49
ตาราง 2-3 สรุปคุณสมบัติของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	50
ตาราง 3-1 ตารางผลการทดลองการปรับระยะเวลาในการสกัด LME.....	71
ตาราง 4-1 ตาราง Cause and Effect Matrixจากการให้คะแนนของคณะที่มีผู้เชี่ยวชาญ.....	83
ตาราง 4-2 แสดงลำดับคะแนนของปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อด้วยการวิเคราะห์ FMEA ทั้ง 11 ปัจจัย ..	85
ตาราง 4-3 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ เบื้องต้น.....	88
ตาราง 4-4 กฎเกณฑ์การประเมินค่าผลความรุนแรงของผลกระทบ (Severity) (กิตติศักดิ์, 2008)	90
ตาราง 4-5 กฎเกณฑ์การประเมินค่าโอกาสของผลกระทบที่เกิดขึ้น (Occurrence) (กิตติศักดิ์, 2008)	92
ตาราง 4-6 กฎเกณฑ์การประเมินค่าการตรวจจับของระบบควบคุม (Detection) (กิตติศักดิ์, 2008). 92	92
ตาราง 4-7 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยการวิเคราะห์หาการขัดข้องและผลกระทบ FMEA.....	95
ตาราง 4-8 แสดงลำดับค่า RPN ของแต่ละปัจจัยที่วิเคราะห์ได้จากตาราง FMEA.....	97
ตาราง 4-9 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น.....	98
ตาราง 4-10 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลองเบื้องต้น.....	98
ตาราง 4-11 สรุปการกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น.....	102
ตาราง 4-12 สรุปแผนการออกแบบการทดลอง.....	103
ตาราง 4-13 การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2^{k-p} Fractional Factorial Design แบบ 1 เรพลิเคต จากโปรแกรม Minitab 19.....	105

ตาราง 4-14 การกำหนดระดับปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลอง 2^{k-p} Fractional Factorial Design	105
ตาราง 4-15 ผลการทดลองคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น.....	110
ตาราง 4-16 ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลของการปั่นผสมไซรีป	112
ตาราง 4-17 ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลของการปั่นผสมไซรีปหลังปรับลดเทอมที่ไม่มีผลออก.....	113
ตาราง 4-18 สรุปแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม.....	114
ตาราง 4-19 การออกแบบการทดลองโดยวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน แบบ 1 เพรลิกเกต จากโปรแกรมMinitab 19	117
ตาราง 4-20 ลำดับและค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตผสมไซรีปให้มีค่าความสูงของตะกอนที่ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร.....	118
ตาราง 4-21 ผลค่าความสูงของตะกอนจากการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตผสมไซรีป.....	120
ตาราง 4-22 ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ของการผลิตผสมไซรีป.....	124
ตาราง 4-23 ตารางการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมให้ได้ค่าความสูงของตะกอนในค่ากลางของการควบคุม.....	129
ตาราง 4-24 ตารางการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมให้ได้ค่าความสูงของตะกอนในค่ากลางของการควบคุม หลังปรับตั้งค่าปัจจัย A.....	132
ตาราง 4-25 ระดับที่เหมาะสมในการนำไปตั้งค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลอง .	132
ตาราง 5-1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการศึกษาปัจจัย	133
ตาราง 5-2 ค่าพารามิเตอร์ตัวแปรควบคุม.....	134
ตาราง 5-3 ตารางเปรียบเทียบผลของค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผสมไซรีปก่อนและหลังการปรับปรุง.....	137

ตาราง 5-4 ตารางยอดการผลิต และร้อยละของเสียของไซรัปที่ผลิตด้วยเครื่อง HSVM ก่อนปรับปรุง และหลังปรับปรุง.....	139
ตาราง 5-5 ผลการปรับปรุงค่าของปัจจัย ในการผลิตขั้นตอนการผลิตไซรัป CFO ด้วยเครื่อง HSVM	140
ตาราง 5-6 แบบฟอร์มการควบคุมการผลิตและคุณภาพไซรัปที่ผลิตด้วยเครื่อง HSVM	141
ตาราง ก-1 ข้อมูลค่าความสูงของตะกอนที่วัดได้จากการชั่งไซรัปของการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM (ก่อนปรับปรุง).....	147
ตาราง ก-2 ข้อมูลค่าความสูงของตะกอนที่วัดได้จากการชั่งไซรัปของการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM ผ่านการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธีบ็อก-ค็อก (ก่อนปรับปรุง).....	148
ตาราง ก-3 ผลการทดลองหลังปรับปรุงเพื่อยืนยัน	149
ตาราง ข-1 ตารางการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล (2k Fractional Factorial Design).....	150
ตาราง ข-2 ตารางการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน.....	151
ตาราง ค-1 แบบฟอร์มการให้คะแนนสาเหตุและผลกระทบ.....	152
ตาราง ค-2 ผลคะแนนการให้คะแนนสาเหตุและผลกระทบ.....	153
ตาราง ค-3 ตารางค่าวิกฤตการแจกแจงแบบ F	154

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูป 1-1 ผลิตภัณฑ์กลุ่มผงเฉพาะสูตร.....	2
รูป 1-2 ผลิตภัณฑ์กลุ่มผง 3 in 1.....	3
รูป 1-3 ผลิตภัณฑ์กลุ่มผงอัดเม็ดและแปรรูป.....	3
รูป 1-4 ผลิตภัณฑ์กลุ่มยูเอชทีพร้อมทาน.....	3
รูป 1-5 กราฟวงกลมแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ประเภทกลุ่มสินค้าที่ผลิตทั้งหมด.....	4
รูป 1-6 แสดงเปรียบเทียบปริมาณการผลิตแต่ละกลุ่มผงระหว่างช่วงปี ก.ย. 2561 - ส.ค. 2562 กับ ช่วงปี ก.ย. 2562 - ส.ค. 2563.....	5
รูป 1-7 การแสดงสัดส่วนของเสียของกลุ่มผงแต่ละชนิด.....	5
รูป 1-8 การแสดงสัดส่วนของเสียแต่ละประเภทของกลุ่มผง CFO.....	6
รูป 1-9 กราฟพาริตโตของสัดส่วนของเสียของแต่ละประเภทในกลุ่มผง CFO.....	6
รูป 1-10 ลักษณะการจับตัวของตัวตะกอน (ก) และลักษณะความสูงของตะกอนและการแยกชั้น (ซ้าย) จากไซร์ปี่สีน้ำตาลรหัส 4003 ของชุดผลิตที่มาจากเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer.....	8
รูป 1-11 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โอวัลติน.....	8
รูป 1-12 แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตไซร์ปี่ในปัจจุบัน.....	10
รูป 1-13 แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตไซร์ปี่ด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer แบบ ใหม่.....	12
รูป 1-14 (ก) เกณฑ์ความสูงของตะกอนที่ผ่านมาตรฐาน (ข) เกณฑ์ความสูงของตะกอนที่ไม่ผ่าน มาตรฐาน.....	13
รูป 1-15 ลักษณะการเกิดตะกอนของไซร์ปี่ โดย (1) ลักษณะที่เกิดหลังจากยกช้อนกลุ่มสารแขวนลอย จะจับตัวเป็นรึ้ว (2) ลักษณะรึ้วตะกอนที่จับตัวกันจะเริ่มตกเป็นปุยๆลงด้านล่าง และ (3) ลักษณะ ตะกอนที่แพคตัวกันหลังจากตั้งวางทิ้งไว้ยังไม่ถึง 1 นาที.....	14
รูป 1-16 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความสูงตะกอนของไซร์ปี่ที่ผลิตจากกระบวนการผสม ด้วยเครื่อง HSVM.....	14

รูป 1-17 ผลการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธี Box-Cox	15
รูป 1-18 ผลการตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test)	16
รูป 1-19 ความสามารถของกระบวนการผลิต (Process Capability) ของกระบวนการผสมไซร์ปด้วยเครื่อง HSVM	17
รูป 2-1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ เบตา-กลูแคน.....	24
รูป 2-2 แหล่งที่มาของ เบตา-กลูแคน (Kaur et al., 2019).....	25
รูป 2-3 แสดงส่วนประกอบของ เบตา-กลูแคน จากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน.....	25
รูป 2-4 โครงสร้างทางเคมีของเบตา-กลูแคนจากแหล่งต่างๆ	26
รูป 2-5 แผนผังของรูปแบบทั่วไปของเบตา-กลูแคน ที่มา: Qiang Wang et al. (Wang et al., 2017)	27
รูป 2-6 การเปลี่ยนแปลงสายโครงสร้างของโปรตีน (ซ้าย) สายโครงสร้างโปรตีนสภาวะปกติ (ขวา) สายโครงสร้างโปรตีนสภาวะสูญเสียสภาพ	29
รูป 2-7 ตัวอย่างแผนผังก้างปลา.....	33
รูป 2-8 ตัวอย่างแผนผังพาราเรโต.....	37
รูป 2-9 แสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ	39
รูป 2-10 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล.....	42
รูป 2-11 การออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางสำหรับ 2 และ 3 ปัจจัย.....	45
รูป 2-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าสูงสุด	46
รูป 2-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าต่ำสุด.....	46
รูป 2-14 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางกรณี 3 ปัจจัย	47
รูป 2-15 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนกรณี 3 ปัจจัย.....	48
รูป 2-16 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัย กับจำนวนครั้งการทดลอง และค่า Resolution	52
รูป 2-17 แผนผังของอุปกรณ์วิธีการไหลแบบไดนามิก	57
รูป 2-18 แผนผังของเครื่องมือวิธีการเชิงปริมาตร	58

รูป 2-19 ผลการสแกนไมโครแคลอริเมทรีของ rhGH (2 mg/mL) ก่อน (J) และ หลัง (I) ด้วยการทำให้เข้าเนื้อเดียวกันที่ 15,000 รอบต่อนาที ใน 1 ชั่วโมง	61
รูป 2-20 ผลการสแกนไมโครแคลอริเมทรีของ rhDNase (5 mg/mL) ก่อน (J) และ หลัง (I) ด้วยการทำให้เข้าเนื้อเดียวกันที่ 15,000 รอบต่อนาที ใน 1 ชั่วโมง.....	61
รูป 3-1 ถังการเตรียมวัตถุดิบ	65
รูป 3-2 ถังผสมวัตถุดิบแบบแห้ง	66
รูป 3-3 ถังผสมไซรี่ปเครื่อง HSVM	67
รูป 3-4 วิธีการวัดค่าความสูงของตะกอน	68
รูป 3-5 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดจากวัตถุดิบ LME	69
รูป 3-6 รูปแบบการแปรสภาพโครงสร้างของ เบตา-กลูแคน.....	70
รูป 3-7 กราฟแสดงปริมาณเบตา-กลูแคนใน LME ที่ทำการทดลองปรับค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตต่อในกระบวนการผลิตไซรี่ปแบบขั้นหนึ่ง.....	72
รูป 3-8 แผนภูมิแก๊งปลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเรื่องของความสูงของตะกอนที่เกิดจากการเช็คสภาพของไซรี่ปในกระบวนการผสมไซรี่ปแบบขั้นหนึ่ง	75
รูป 3-9 แสดงอุปกรณ์เวอร์เนียวาลิปเปอร์ สำหรับการวัดค่าเก็บข้อมูลในงานวิจัย	79
รูป 3-10 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพการผลิตไซรี่ปด้วยเครื่อง	81
รูป 4-1 แสดงแผนภูมิแก๊งปลาที่ได้จากการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสูงของตะกอน	82
รูป 4-2 แผนภูมิพาเรโตจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสูงของตะกอน	85
รูป 4-3 แผนภูมิพาเรโตจัดลำดับปัจจัยตามค่า RPN จากการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ FMEA.....	97
รูป 4-4 การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของค่าความสูงตะกอน	107
รูป 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูลกับค่าส่วนตกค้างในการทดลองเบื้องต้น	108

รูป 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอยกับค่าส่วน ตกค้าง ในการทดลองเบื้องต้น	109
รูป 4-7 แผนภาพพาเรโตแสดงผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน จากการ ทดลองเบื้องต้น	111
รูป 4-8 กราฟ Normal Plot ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน จากการทดลอง เบื้องต้น.....	111
รูป 4-9 การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของค่า Residual จากการลดเทอม	113
รูป 4-10 รูปลูกบาศก์ของแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน	116
รูป 4-11 รายละเอียดการออกแบบการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคนโดยใช้โปรแกรม Minitab	19
.....	116
รูป 4-12 กราฟ Normal Probability Plot จากผลลัพธ์ของการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบ ปกติ.....	121
รูป 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูลกับค่าส่วนตกค้างของผลลัพธ์ที่ได้ .	122
รูป 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอยกับค่าส่วน ตกค้าง	123
รูป 4-15 กราฟ Contour plot แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสูงของตะกอนจาก	127
รูป 4-16 กราฟ Surface plot แสดงความสัมพันธ์แบบสามมิติของปัจจัย ที่มีผลต่อค่าความสูงของ ตะกอนจาก	128
รูป 4-17 ผลลัพธ์แสดงค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผสม ไซริป.....	130
รูป 4-18 ผลลัพธ์หลังปรับตั้งค่าคงที่ปัจจัย A ที่ 1 ซม. แสดงค่าของปัจจัย B และ Cที่เหมาะสมที่สุด ในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผสมไซริปเพื่อให้ได้ค่าตะกอนความสูง 10±1 มิลลิเมตร ..	130
รูป 4-19 ผลลัพธ์หลังปรับตั้งค่าคงที่ปัจจัย A ที่ 5 ซม. แสดงค่าของปัจจัย B และ Cที่เหมาะสมที่สุด ในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผสมไซริปเพื่อให้ได้ค่าตะกอนความสูง 10±1 มิลลิเมตร ..	131
รูป 4-20 ผลลัพธ์หลังปรับตั้งค่าคงที่ปัจจัย A ที่ 9 ซม. แสดงค่าของปัจจัย B และ Cที่เหมาะสมที่สุด ในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผสมไซริปเพื่อให้ได้ค่าตะกอนความสูง 10±1 มิลลิเมตร ..	131

รูป 5-1 ผลการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าความสูงตะกอนในกระบวนการผสมไซรัป..... 135

รูป 5-2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความสูงตะกอนของไซรัปที่หลังการปรับค่าพารามิเตอร์
โดยผลิตจากกระบวนการผสมเปียกด้วยเครื่อง HSVM..... 135

รูป 5-3 ความสามารถของกระบวนการผลิตของผลการทดลองเพื่อยืนยันหลังการปรับค่าพารามิเตอร์
..... 136

รูป 5-4 กราฟข้อมูลค่าของความสูงตะกอนเทียบระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงกระบวนการ
..... 137

รูป 5-5 รูปกราฟข้อมูลความสามารถของกระบวนการผลิตที่ได้จากค่าของความสูงตะกอนในการผสม
ไซรัปเทียบระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงกระบวนการ..... 138

รูป 5-6 กราฟแสดงข้อมูลเปรียบเทียบร้อยละของเสียไซรัปก่อนการปรับปรุงและหลังปรับปรุง 139



บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ปัจจุบันธุรกิจอุตสาหกรรมกลุ่มเครื่องตี๋ม เป็นที่รู้จักและมีผู้สนใจแพร่หลายมากขึ้น โดยในช่วง 5-10 ปีที่ผ่านมา กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องตี๋มพร้อมขง เป็นกลุ่มตลาดที่เปิดกว้างและเริ่มมีตัวเลือกในตลาดเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ผู้บริโภคมีทางเลือกในการบริโภคเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์เครื่องตี๋มพร้อมขง ในประเทศไทยมีกลุ่มบริษัทผู้ผลิตและจำหน่ายชั้นนำอยู่หลากหลายบริษัท บริษัทเหล่านี้ มีฐานการผลิตตั้งอยู่ที่ประเทศไทย เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นศูนย์กลางทางการค้า อีกทั้งยังเป็นศูนย์กลางของประเทศในกลุ่มอาเซียน (ASEAN) ที่มีประวัติการค้าติดต่อค้าขายกันมาอย่างยาวนาน และยังมีแผนขยายขนาดตลาดกลางทางธุรกิจในอนาคต จึงทำให้กลุ่มผู้ผลิตเครื่องตี๋มจากทั้งในและต่างประเทศให้ความสนใจที่จะสร้างฐานการผลิตร่วมมากขึ้น กลุ่มผู้ผลิตรายย่อยจึงเริ่มเข้ามามีบทบาทในส่วนแบ่งทางการตลาดมากขึ้น เป็นผลให้กลุ่มอุตสาหกรรมเครื่องตี๋มพร้อมขง เกิดการแข่งขัน ในการริเริ่ม คิดค้นสูตรและหาวิธีการกระบวนการผลิต ที่จะตอบสนองต่อความต้องการสินค้า และการเติบโตของกลุ่มตลาดที่เติบโตมากขึ้น

ตั้งแต่ช่วงต้นปี 2563 เกิดสถานการณ์การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 (Corona virus : COVID-19) ซึ่งการแพร่ระบาดส่งผลต่อการผลิตทั้งในแง่ของการบริหารจัดการกำลังคน และการบริหารคลังสินค้า บริษัทจึงเกิดการตระหนักถึงความเป็นไปได้ที่จะเกิดสถานการณ์ที่ไม่คาดคิด ซึ่งอาจส่งผลต่อการผลิตในภายภาคหน้าได้ จึงนำเครื่องจักรที่มีเทคโนโลยีร่วมกับนวัตกรรมแบบใหม่เข้ามาทดลองมีส่วนร่วมในสายการผลิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้กระบวนการผลิตสามารถเพิ่มกำลังการผลิตผลิตภัณฑ์ได้ทันต่อความต้องการของลูกค้า ลดระยะเวลา และค่าพลังงานที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยโรงงานกรณีศึกษานั้นมีการติดตั้งเครื่องจักรที่ผนวกเทคโนโลยีใหม่เข้ามาเพื่อเพิ่มศักยภาพในกระบวนการผลิต เพื่อให้สามารถผลิตสินค้าได้ทันท่วงทีและลดค่าใช้จ่ายในการจัดจ้างพนักงานปฏิบัติงาน แต่ทว่าโรงงานประสบปัญหาคุณภาพของไซรัปที่ผ่านกระบวนการปั่นผสมจากเครื่องจักรใหม่ที่ส่งต่อไปอบแห้งนั้นไม่ได้มาตรฐานตามที่กำหนด นั่นคือค่าความสูงของตะกอนในการเช็คชงไซรัปหลังผ่านการผสมมีค่าสูงเกินมาตรฐาน อีกทั้งในระหว่างการผลิตไซรัปจะมีการแยกชั้นและจับตัวของตัวตะกอนและสารผสมอื่นๆอย่างชัดเจน ซึ่งได้มีการศึกษาที่มาของการเกิดตะกอนดังกล่าวพบว่าไซรัปเกิดการแยกชั้นและตกเป็นริ้วตะกอนระหว่างกระบวนการปั่นผสม ซึ่งโรงงานไม่สามารถยอมรับได้ เนื่องจากเป็นกระบวนการผลิตสารตั้งต้นของทุกผลิตภัณฑ์เป็นหลักและยังส่งผล

กระทบต่อคุณภาพของผงผลิตภัณฑ์โดยรวม จึงทำให้เกิดของเสียจากกระบวนการผสมไซรัปจากเครื่องจักรใหม่นี้ อีกทั้งพบว่าสูญเสียโอกาสในการผลิตเป็นสินค้าที่มีคุณภาพ คิดเป็นมูลค่า 120,000 บาท ต่อการผลิตการผสมไซรัปด้วยเครื่องจักรใหม่ 1 ครั้ง/ชุดการผลิต

ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาด้านคุณภาพของไซรัปข้างต้น จึงมีการศึกษาวิธีการ ขั้นตอน ระบบของเครื่องจักรใหม่ และการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการจับตัวกันเป็นริ้วแล้วเกิดเป็นตะกอนในกลุ่มไซรัป เพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาจากสาเหตุที่แท้จริง และเป็นการปรับปรุงพร้อมหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่จะกำหนดเป็นมาตรฐานสำหรับกระบวนการผลิตผสมเปียกด้วยเครื่องจักรใหม่นี้ ซึ่งจะทำให้สามารถใช้เครื่องจักรให้เกิดศักยภาพและผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพ และลดการเกิดของเสียในกระบวนการผลิตตามนโยบายของโรงงานอย่างแท้จริง

1.2 ข้อมูลเบื้องต้นของโรงงานกรณีศึกษา

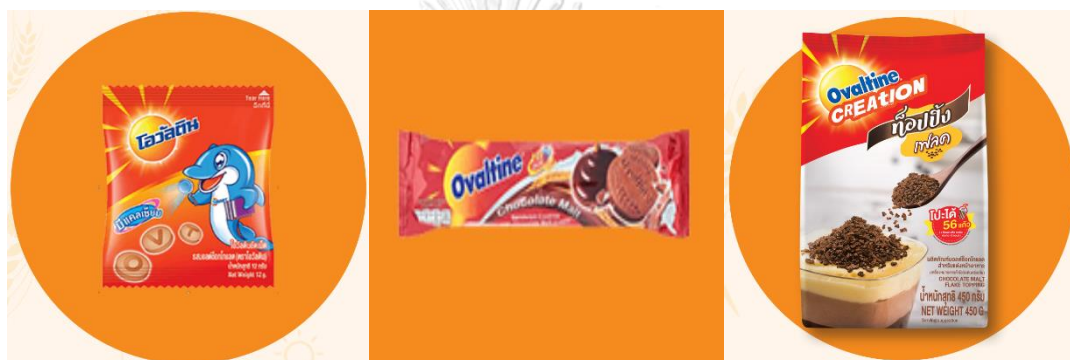
โรงงานกรณีศึกษา เป็นโรงงานที่ดำเนินการธุรกิจผลิตและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ผงเครื่องดื่มแบบพร้อมชง พร้อมทาน และแปรรูป มีฐานผลิตตั้งอยู่เลขที่ 89/5 หมู่ 10 ซอยวัดสวนส้ม ถนนปู่เจ้าสมิงพราย ตำบลสำโรงใต้ อำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ 10130 โดยมีกำลังการผลิตเฉลี่ยอยู่ที่ 40,000 ตันต่อปี เป็นฐานกำลังผลิตหลักของในเครือบริษัท โดยกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ผลิตและจัดจำหน่ายนั้นมีหลากหลายกลุ่มประเภท อาทิ เครื่องดื่มกลุ่มผงเฉพาะสูตร กลุ่มผง 3 in 1 กลุ่มผงอัดเม็ดแปรรูป และกลุ่มยูเอชทีพร้อมทาน ดังรูปที่ 1-1 ถึง รูปที่ 1-4



รูป 1-1 ผลิตภัณฑ์กลุ่มผงเฉพาะสูตร



รูป 1-2 ผลิตภัณฑ์กลุ่มผง 3 in 1



รูป 1-3 ผลิตภัณฑ์กลุ่มผงอัดเม็ดและแปรรูป

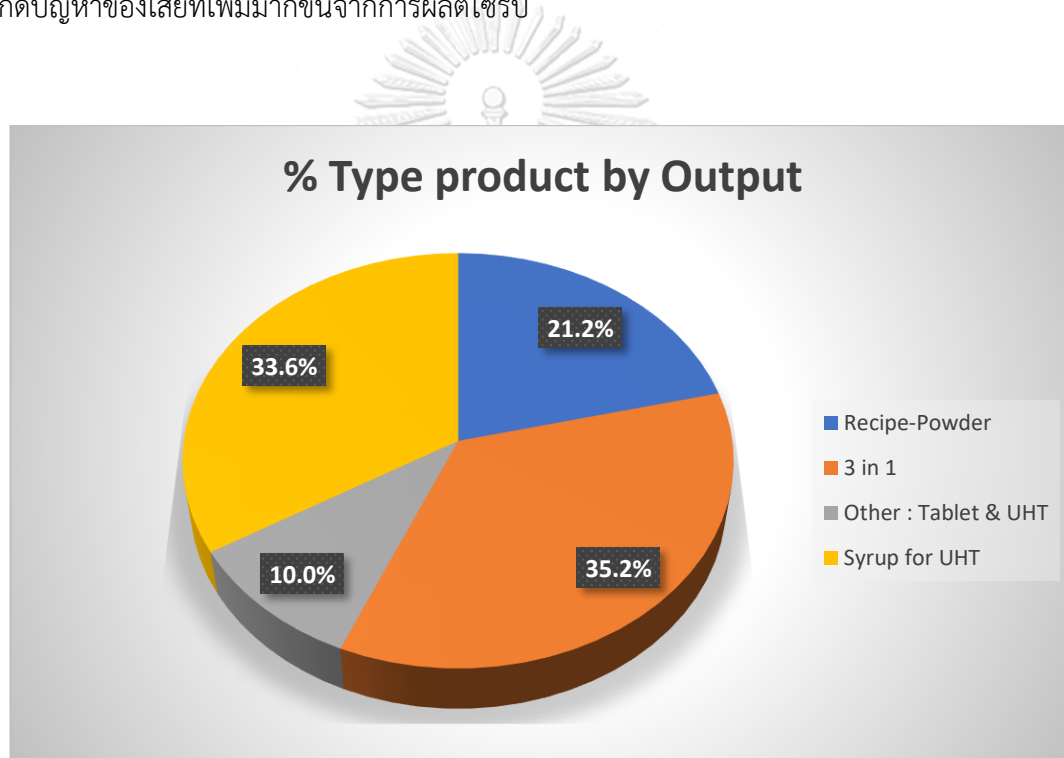


รูป 1-4 ผลิตภัณฑ์กลุ่มยูเอชทีพร้อมทาน

1.3 สภาพและความเป็นมาของปัญหา

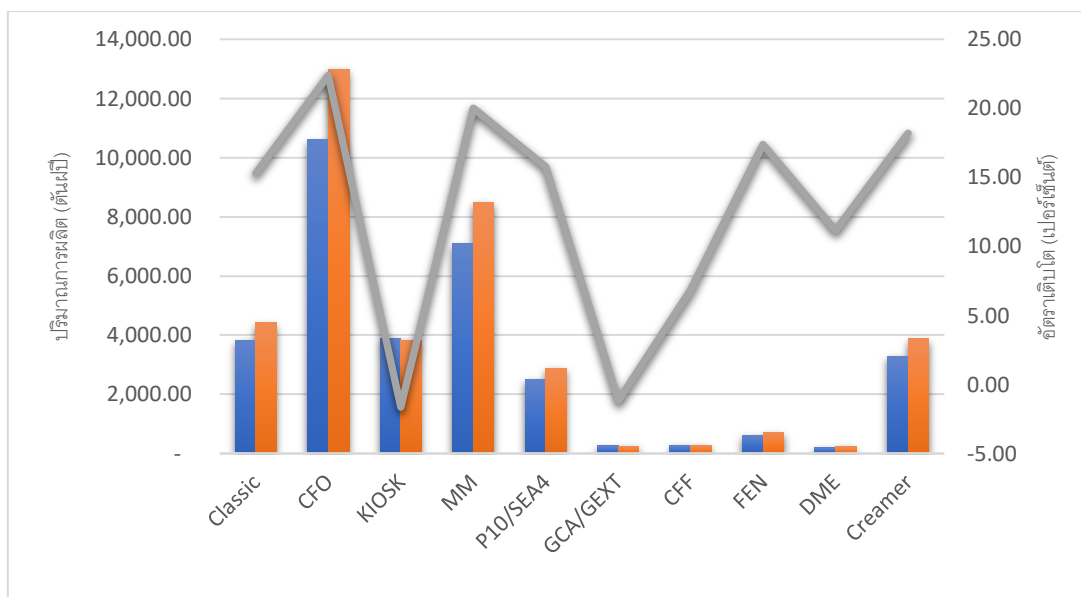
ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีกระบวนการผลิตสารตั้งต้นแบบเดียวกัน คือ กระบวนการผสมเปียก (Wet mix) กระบวนการอบแห้งด้วยเครื่องอบสุญญากาศแนวนอน (Vacuum Band Dryer) แต่

กระบวนการผลิตและบรรจุเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิด มีลำดับวิธีการที่แตกต่างกัน ในสายการผลิตจะแบ่งกลุ่มไซรัปด้วยสีมี 2 สีคือ สีน้ำตาลกับ สีขาว โดยสัดส่วนของไซรัปสีน้ำตาลจะอยู่ที่ 80.12 เปอร์เซ็นต์ของรายการทั้งหมด ส่วนไซรัปสีขาวจะอยู่ที่ 19.88 เปอร์เซ็นต์ของรายการทั้งหมดเช่นกัน ซึ่งจากรายการผลิตภัณฑ์ทั้งหมดยังแบ่งประเภทกลุ่มผลิตภัณฑ์ได้ 4 ประเภทตามสัดส่วนในการผลิต แสดงดังรูปที่ 1-5 จากข้อมูลจะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์กลุ่ม 3 in 1 และผลิตภัณฑ์กลุ่มผงเฉพาะสูตรนั้นมีสัดส่วนในการผลิตอยู่ถึง 35.2% และ 21.24% ตามลำดับ อันเนื่องจากอัตราการเติบโตของกลุ่ม 3 in 1 ที่เพิ่มมากขึ้น อีกทั้งสายการผลิตของผลิตภัณฑ์กลุ่ม 3 in 1 นั้นมีความซับซ้อน และใช้เวลาในการผลิตมากกว่าผลิตภัณฑ์กลุ่มอื่นๆ จึงมักประสบปัญหา ไม่สามารถผลิตได้ตามเป้าหมาย เนื่องจากเกิดปัญหาของเสียที่เพิ่มมากขึ้นจากการผลิตไซรัป



รูป 1-5 กราฟวงกลมแสดงสัดส่วนเปอร์เซ็นต์ประเภทกลุ่มสินค้าที่ผลิตทั้งหมด

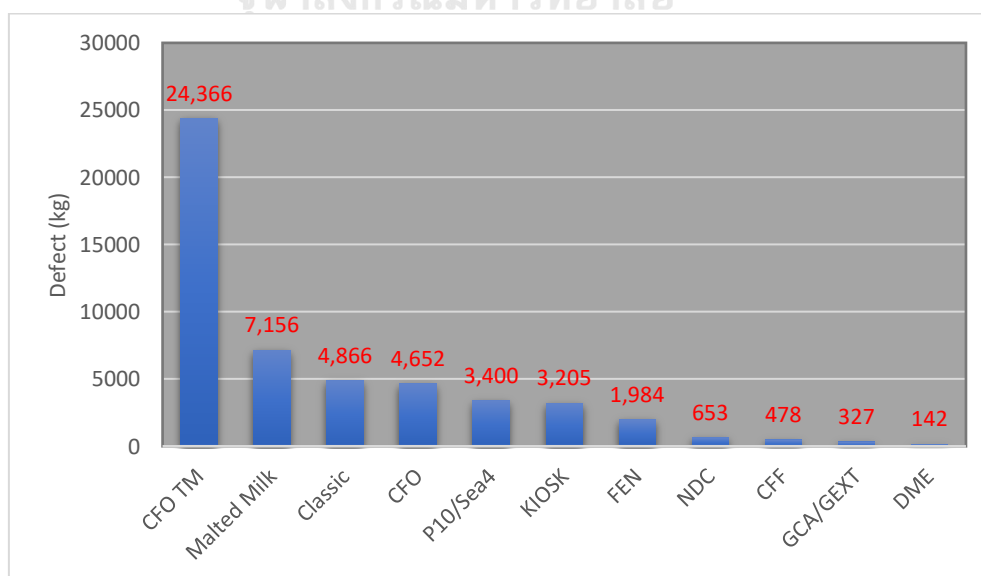
เมื่อตรวจสอบข้อมูลเปรียบเทียบยอดการผลิตของกลุ่มผงของโรงงานกรณีศึกษาระหว่างช่วงปี 2562 และช่วงปี 2563 โดยนับช่วงเดือนกันยายนของปี 2561 ถึง สิงหาคมของปี 2562 เทียบกับช่วงเดือนกันยายนของปี 2562 ถึง สิงหาคมของปี 2563 จะพบว่าปริมาณการผลิตกลุ่มผงเกือบทุกประเภทนั้นมีอัตราเพิ่มขึ้นจากรูปที่ 1-6



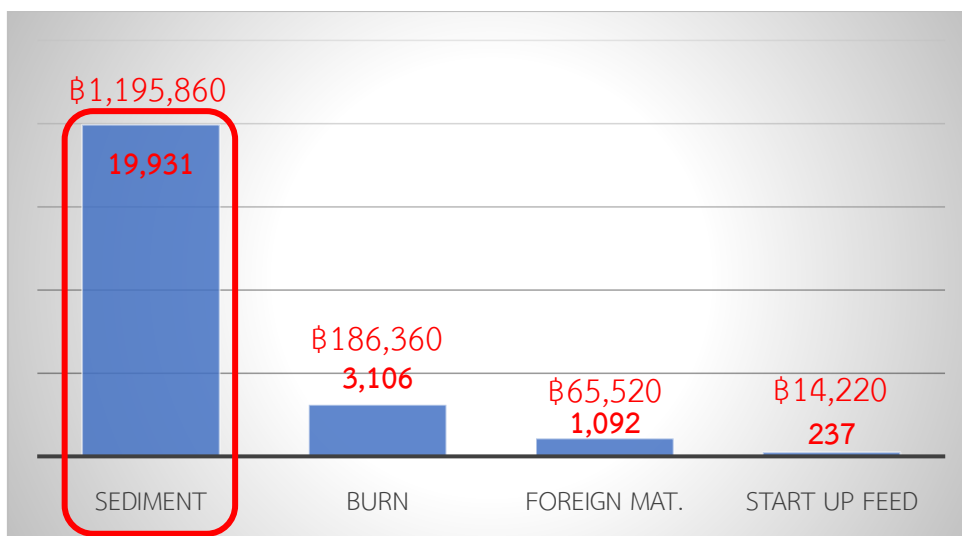
รูป 1-6 แสดงเปรียบเทียบปริมาณการผลิตแต่ละกลุ่มผงระหว่างช่วงปี ก.ย. 2561 - ส.ค. 2562 กับช่วงปี ก.ย. 2562 - ส.ค. 2563

จะเห็นได้ว่ากลุ่มผง CFO นั้นมีปริมาณการผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นจากทุกกลุ่มเนื่องจากเป็นกลุ่มผงที่เป็นผงตั้งต้นของผลิตภัณฑ์กลุ่ม 3 in 1 เป็นหลักและกลุ่มผงอื่นๆ และเมื่อศึกษาเพิ่มเติมในส่วนของของเสียที่เกิดขึ้นในกลุ่มผงย้อนหลัง 6 เดือน ตั้งแต่ช่วงเดือนเมษายน ถึง เดือนกันยายน ของปี 2563 แสดงดังรูปที่ 1-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



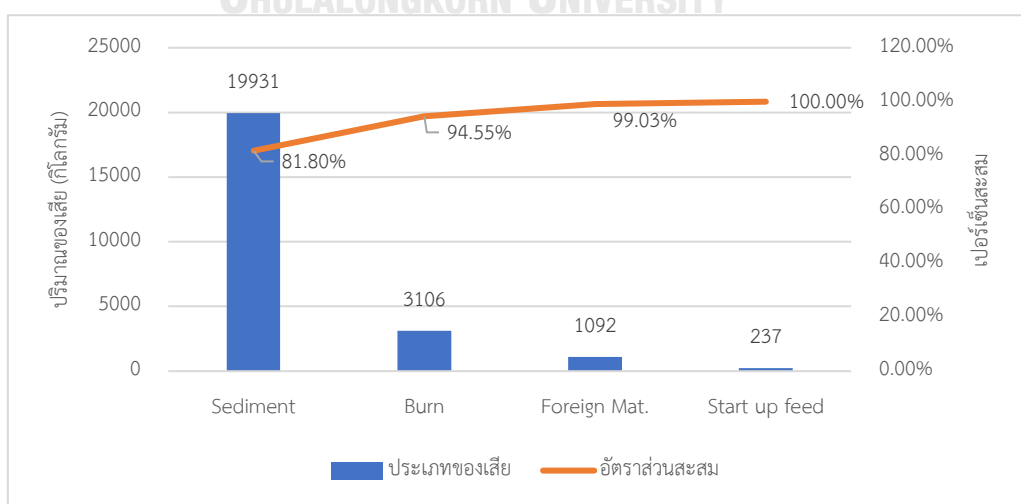
รูป 1-7 การแสดงสัดส่วนของเสียของกลุ่มผงแต่ละชนิด



รูป 1-8 การแสดงสัดส่วนของเสียแต่ละประเภทของกลุ่มผง CFO

พิจารณาจากโรงงานกรณีศึกษา จากสัดส่วนของเสียของกระบวนการผลิตผงทั้ง 11 ชนิดในรูปที่ 1-7 พบว่า ผง CFO มีสัดส่วนของเสียเกิดขึ้นในปริมาณมากที่สุด ประมาณ 24,366 กิโลกรัม ซึ่งเมื่อจำแนกตามประเภทของเสียแล้วพบว่าเกิดของเสียทั้งหมด 4 ประเภทดังรูปที่ 1-8 โดยมีประเภทของเสียที่เกิดจากตะกอนสูงด้วยการเสียดสีสภาพ (Sediment) ในสัดส่วนมากที่สุดประมาณ 19,931 กิโลกรัม จึงทำการวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิพาเรโตพบว่า สัดส่วนของเสียที่เกิดจากตะกอนสูงด้วยการเสียดสีสภาพนั้น มีสัดส่วนมากถึง 81.80% จากทั้งหมด จึงเป็นส่วนที่ผู้วิจัยสนใจนำมาศึกษาเพื่อแก้ไข ดังรูปที่ 1-9

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูป 1-9 กราฟพาเรโตของสัดส่วนของเสียของแต่ละประเภทในกลุ่มผง CFO

เนื่องด้วยผง CFO เป็นกลุ่มผงสารตั้งต้นหลักของผลิตภัณฑ์กลุ่ม 3 in 1 และมีความต้องการในปริมาณเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้ผงกลุ่มนี้เป็นกลุ่มผงที่ถูกเลือกมาศึกษาเป็นกลุ่มต้นๆ ทางโรงงานกรณีศึกษาได้มีการติดตั้งเครื่องผสมเปียกแบบใหม่เรียกว่า เครื่องผสมแบบแรงเฉือนสูงภายใต้แรงดันสุญญากาศ (Hi-shear Vacuum Mixer) ในกระบวนการผลิตกลุ่มไซรัปภายในโรงงานยังไม่เคยมีการผลิตมาก่อน เป็นการผสมโดยใช้หลักการแรงเฉือน เข้ามาช่วยให้ส่วนผสมแตกตัวเข้าเนื้อกันอย่างสมบูรณ์ (Homogeneous) ภายใต้แรงดันสุญญากาศ เพื่อเป็นการเพิ่มคุณภาพให้กับผลิตภัณฑ์และเป็นรูปแบบนวัตกรรมใหม่ที่ถูกนำมาใช้ภายในโรงงานเป็นครั้งแรก โรงงานกรณีศึกษาต้องการนำมาผลิตไซรัปของกลุ่มผง CFO ที่เลือกศึกษาเป็นกลุ่มผงชนิดแรก โดยยังมีการผลิตไซรัปจากเครื่องผสมเปียกแบบเก่า (Wet mixer) ควบคู่ไปด้วยเพื่อรองรับการผลิตไซรัป และเมื่อศึกษารายละเอียดข้อมูลของเสียจากรูปที่ 1-9 จะพบว่าเป็นกลุ่มผงที่ผลิตมาจากไซรัปที่ผลิตด้วยเครื่องผสม Hi-shear Vacuum Mixer ผลของไซรัปที่ได้พบว่ามีปัญหาด้านคุณภาพคือค่าความสูงของตะกอนนั้นสูงเกินมาตรฐาน และยังเกิดริ้วของตะกอนที่เกิดจากการจับตัวกันของกลุ่มผงที่ผสมกัน และส่งผลต่อเนื่องไปยังผลิตภัณฑ์กลุ่ม 3 in 1 ที่ผลิตไม่ได้ตามเป้าหมายเนื่องด้วยขาดวัตถุดิบตั้งต้นอย่างกลุ่มผง CFO ผู้วิจัยจึงเกิดความสนใจในระบบ และปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตไซรัปในสายการผลิต

ปัญหาการเกิดตะกอนที่สูงขึ้นเกินมาตรฐานนั้นเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการปั่นผสมด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer จะตรวจสอบได้โดยการเข้คชงด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสกับไซรัปที่ผสมเสร็จแล้ว ซึ่งมีลักษณะของการจับตัวกันของตะกอนหลังชงยกซ้อนขึ้น จากนั้นจะค่อยๆ ตกเป็นริ้วๆ ตะกอน ซึ่งทำให้เกิดค่าความสูงของตะกอนเกินมาตรฐาน ดังรูปที่ 1-10 ซึ่งเกณฑ์มาตรฐานค่าความสูงของตะกอนที่ตั้งไว้ที่ยอมรับได้ อยู่ที่น้อยกว่า 13 มิลลิเมตร ต่อการชง 1 ครั้ง ภายหลังจากตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 15 นาที โดยหลังชงด้วยน้ำร้อนยกซ้อนขึ้น จะต้องไม่มีการจับตัวของกลุ่มตะกอน ไม่เกิดริ้ว และมีระยะเวลาในการเริ่มตกตะกอนภายหลังจากผ่านไปแล้ว 5 นาทีหลังชง ซึ่งสัดส่วนในการตรวจสอบชงเข้คคือ ไซรัป 26 กรัม น้ำร้อน 260 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ซึ่งจากการเก็บข้อมูลและออกแบบการทดลองเกี่ยวกับปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน จะมีการประยุกต์ใช้วิธีการทางสถิติ เพื่อเข้าช่วยตรวจสอบในการหาปัจจัยที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตดังกล่าว พร้อมทั้งวิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมต่อการใช้เครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer ผลิตสินค้าให้ได้ไซรัปที่มีคุณภาพตามมาตรฐานของโรงงานควบคู่กับประสิทธิภาพที่ดีที่สุด



(ก.)

(ข.)

รูป 1-10 ลักษณะการจับตัวของตัวตะกอน (ก) และลักษณะความสูงของตะกอนและการแยกชั้น (ซ้าย) จากไซรัปสีน้ำตาลรหัส 4003 ของชุดผลิตที่มาจากเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer

1.3.1 กระบวนการผงโอวัลติน



รูป 1-11 กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์โอวัลติน

LME คือขั้นตอนกระบวนการสกัดน้ำตาลจากมอลต์และบาเรให้เป็นน้ำตาลมอลต์โตส โดยมีค่าความเข้มข้นอยู่ที่ 78-80 เปอร์เซ็นต์ของของแข็งรวม ซึ่งมอลต์สกัดเข้มข้นเป็นสารตั้งต้นสำหรับการผลิตโอวัลติน

Mixing คือขั้นตอนการผสมส่วนผสมต่างๆ ตามสูตรเฉพาะที่ได้ตั้งไว้โดยมีการผสมไซรัปพร้อมต้มให้ได้อุณหภูมิถึง 82 องศาเซลเซียส แล้วทำการพาสเจอร์ไรส์ ณ อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นจึงส่งไปยังกระบวนการการระเหยด้วยเครื่อง Evaporator เพื่อดึงเอาน้ำที่ผสมละลายอยู่ในไซรัปออกให้ได้ความเข้มข้นอยู่ที่ 78-80 ของของแข็งรวม แล้วนำไปเก็บพักในถังพักไซรัปเพื่อส่งให้กระบวนการต่อไป

Band Dryer คือขั้นตอนการอบแห้งไซรัปบนสายพาน ในภาวะที่มีแรงดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศปกติ เพื่อเป็นการรักษาคุณภาพของโอวัลตินตามแต่ละสูตรไว้ให้ได้มากที่สุด และเพื่อให้ได้ความชื้น สี รสชาติ ตามมาตรฐานที่ตั้งไว้ โดยการอบนั้นจะมีการปรับตั้งค่าปริมาณการอบความเร็วของสายพาน อุณหภูมิการอบ ที่เหมาะสมตามแต่ละสูตรเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด แล้วทำการบดเพื่อให้เป็นผงละเอียดตามสูตรที่ต้องการ ผงโอวัลตินที่ได้จะนำไปเก็บในถังเก็บพักเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการถัดไป

Dry Mix คือขั้นตอนการผสมวัตถุดิบชนิดต่างๆ เข้าด้วยกัน รวมถึง ผงโอวัลตินที่ได้จากกระบวนการอบแห้งด้วยเพื่อให้ได้โอวัลตินตามสูตรต่างๆ เช่น โอวัลติน 3 อิน 1 เป็นต้น

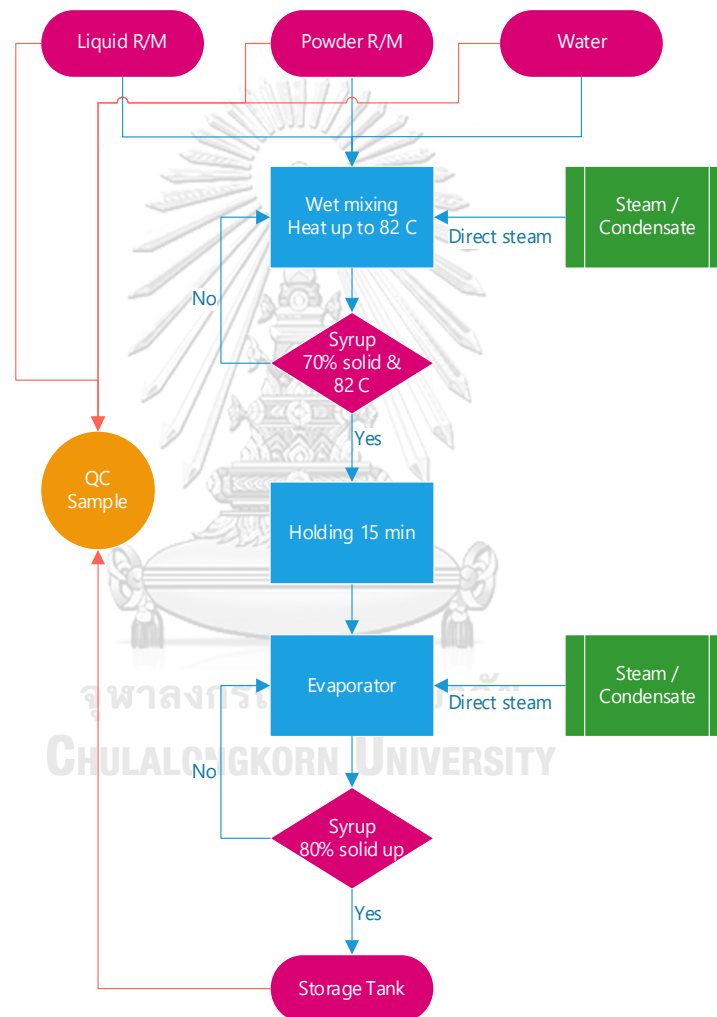
Packing คือกระบวนการบรรจุผงโอวัลตินของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ตามความต้องการของตลาด และชนิดของบรรจุภัณฑ์ เช่น บรรจุลงขวด บรรจุลงกระป๋อง บรรจุลงซองแบบ Soft pouch บรรจุลงซองแบบ Stick บรรจุลงซองแบบ Sachet หรือการอัดเป็นเม็ด Tablet O'nies แล้วบรรจุลงซองอีกที

โดยจากปัญหาข้างต้นที่พบนั้นผู้วิจัยจะทำการศึกษาเฉพาะส่วนของขั้นตอนกระบวนการ Mixing ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตไซรัปสำหรับส่งต่อไปยังกระบวนการอบแห้ง โดยนับว่าเป็นกระบวนการหัวใจหลักและตั้งต้นของทุกอย่างของการผลิตโอวัลติน ผู้วิจัยจึงทำการศึกษาเพิ่มเติมดังรายละเอียดในขั้นต่อไป

1.3.2 การศึกษากระบวนการผลิตไซรัป (Mixing)

ก. กระบวนการผลิตไซรัปปัจจุบัน

ในปัจจุบันเริ่มต้นจากการเติมกลุ่มวัตถุดิบของเหลว น้ำ และกลุ่มวัตถุดิบผง มาผสมกัน ภายในถังผสม และสิ้นสุดที่การถ่ายโอนไซรัปที่มีค่าของแข็งทั้งหมดมากกว่าหรือเท่ากับ 80 เปอร์เซ็นต์ ดังรูปที่ 1-12



รูป 1-12 แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตไซรัปในปัจจุบัน

1. Liquid Raw Material เป็นกลุ่มวัตถุดิบประเภทของเหลวคือลิกควิต มอลต์ เอ็กซ์แทรก (Liquid Malt Extract, LME), น้ำมันปาล์ม (Palm Oil) และกลูโคส (Glucose) ใช้สำหรับผสมในขั้นตอนการผสมเปียก ซึ่งได้จากการบวนการผลิต Brew House

2. Powder Raw Material เป็นกลุ่มวัตถุดิบประเภทผงคือผงโกโก้ (Cocoa Powder), น้ำตาล (Sugar), เวย์ โปรตีน (Whey Protein), ได-แคลเซียม (Di-Calcium), แมกนีเซียม (Magnesium) และผงพรีมิคซ์ (Premix Powder) ใช้สำหรับผสมในขั้นตอนการผสมเปียก

3. Water น้ำ เป็นตัวทำละลายและช่วยในการผสมของกลุ่มวัตถุดิบประเภทของเหลว และประเภทผงเข้าเนื้อกัน

4. Wet mixing เป็นกระบวนการผสมเปียกภายในถังผสมที่มีใบกวนเป็นประเภทแบบ ฟันเลื่อยที่มีการยกขึ้นและปล่อยลง พร้อมการใช้ความเร็วรอบสูง เพื่อช่วยให้การผสมของวัตถุดิบ ส่วนผสมต่างๆกระจายตัวในของเหลวได้เร็วขึ้นและเข้าเนื้อกัน โดยสตีมน้ำ (Steam) ที่ส่งมาจาก บอยเลอร์ (Boiler) เป็นแหล่งให้ความร้อนและปรับอุณหภูมิของส่วนผสมต่างๆให้เข้าด้วยกันแบบ สัมผัสทางตรง ซึ่งจะมีการพาสเจอร์ไรส์ (Pasteurization) ไปจนถึงอุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส เพื่อ ทำลายจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรค (Pathogen) ทุกชนิด และเอนไซม์ (Enzyme) ที่เป็นสาเหตุให้อาหาร เสื่อมเสีย ซึ่งจะมีการตรวจวัดค่าของแข็งทั้งหมดในไซรัปที่ผสมแล้วว่าอยู่ในช่วงค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ของแข็งหรือไม่ ถ้ามากกว่าจึงส่งไปยังกระบวนการถัดไป ถ้าไม่จะยังปั่นผสมในถังผสม ให้มีความเข้มข้นตามค่ามาตรฐานที่ตั้งไว้

5. Holding Syrup เป็นถังพักหลังจากผ่านกระบวนการพาสเจอร์ไรส์ไซรัป โดยไซรัป จะต้องคงอุณหภูมิไว้ที่ 82 องศาเซลเซียส เป็นระยะ 15 นาที เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดและยับยั้ง จุลินทรีย์กลุ่มที่ทนต่อความร้อนไม่ให้เจริญเติบโต

6. Evaporator เป็นกระบวนการระเหยเอาน้ำจากในไซรัปออก โดยค่าเริ่มต้นของไซรัป คือค่าของแข็งทั้งหมดอยู่ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ของแข็ง ซึ่งไซรัปจะทำการปั๊มหมุนวน ผ่านลููปปั๊ม (Loop Pump) และเข้าสู่ถังแลกเปลี่ยนความร้อนขนาดใหญ่แบบเชลล์และท่อ (Shell-and-tube) ซึ่งจะใช้การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสัมผัสโดยอ้อม โดยมีสตีมน้ำที่ส่งจ่ายภายนอก ท่อ ส่วนไซรัปจะเกิดการระเหยภายในท่อที่ไซรัปวิ่งผ่าน เพื่อดึงเอาไอน้ำที่ระเหย (Vapor) ได้ออกมา พร้อมกับควบแน่นเกิดเป็นน้ำคอนเดนเสจ (Condensate) ออกในส่วนของเซฟเพอเรเตอร์ (Separators) ส่วนไซรัปที่ได้นั้นจะหมุนเวียนจนกว่าเครื่องมือวัดค่าของแข็งทั้งหมดที่มีอยู่ที่มากกว่า หรือเท่ากับ 79.5 เปอร์เซ็นต์ของแข็งจึงจะส่งไปยังกระบวนการถัดไป

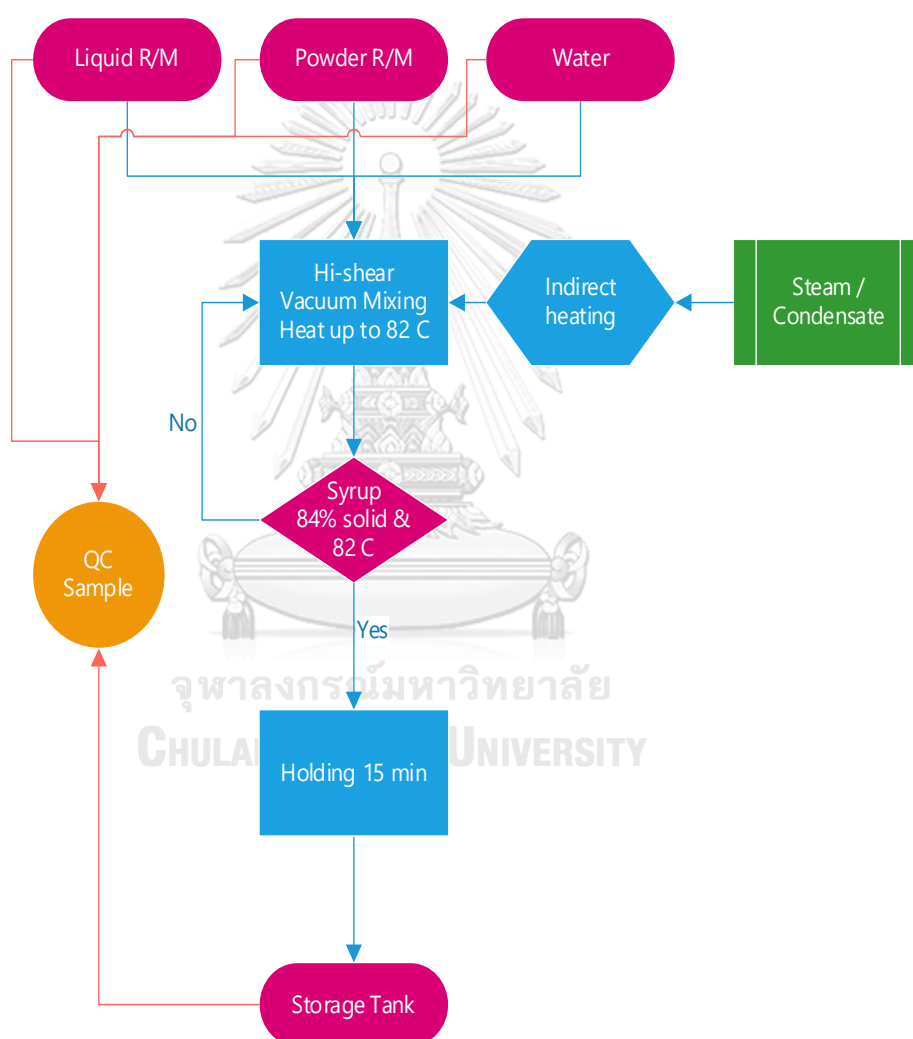
7. Storage Syrup Tank เป็นพื้นที่เก็บไซรัปโดยแยกตามสูตรการผลิตซึ่งเป็นเหมือนที่ พักไซรัปเบื้องต้นและเป็นทางผ่านของไซรัปในการส่งไซรัปไปยังกระบวนการถัดไป

8. QC Sample เป็นขั้นตอนในส่วนของการควบคุมคุณภาพจะเก็บตัวอย่างของ กลุ่มวัตถุดิบของเหลว กลุ่มวัตถุดิบผง น้ำ และไซรัปที่อยู่ถ้งพักไซรัปเพื่อตรวจสอบคุณภาพตาม

มาตรฐานและลำดับการทำงาน เพื่อควบคุมคุณภาพระหว่างกระบวนการและไซรัปที่จะนำส่งต่อไปยังกระบวนการอบแห้งด้วยเครื่อง Vacuum Band Dryer

ข. กระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer (HSVM)

ในส่วนกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM แบบใหม่แสดงดังรูปที่ 1-13



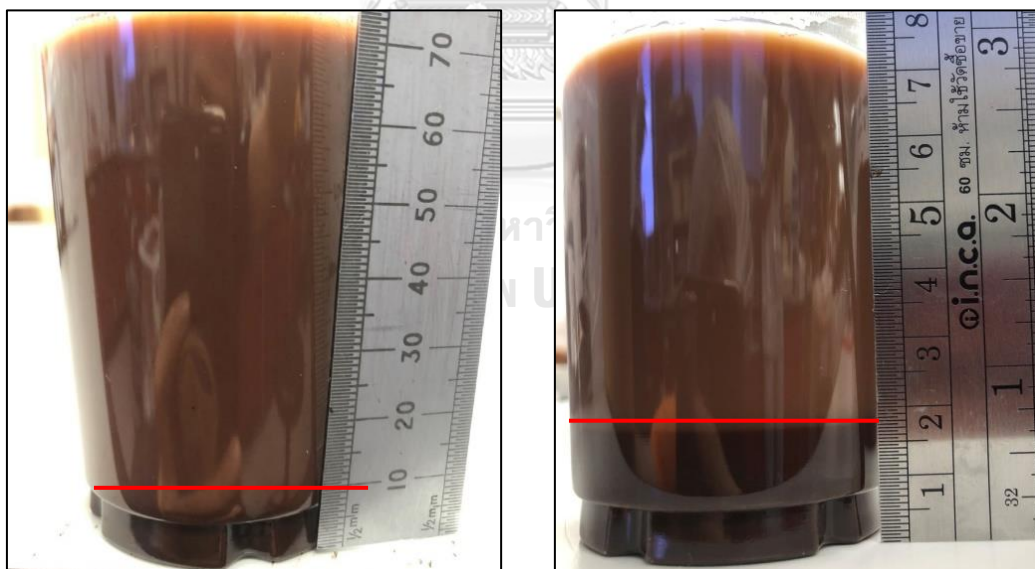
รูป 1-13 แผนภาพการไหลของกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer แบบใหม่

HSVM เป็นกระบวนการผสมเปียกภายในถังผสมที่มีใบกวน ใบปาดถัง และใบปั่นชุดหัวผสมแบบแรงเฉือนสูงที่สามารถเลือกการยกขึ้น - ลงพร้อมการใช้ความเร็วรอบสูง เพื่อช่วยให้การผสม

ของวัตถุดิบส่วนผสมต่างๆกระจายตัวในของเหลวได้เร็วขึ้นและเข้าเนื้อกัน ซึ่งการนำวัตถุดิบผงเข้าผสมนั้นจะใช้เป็นแบบลดความดันบรรยากาศให้เหลือต่ำกว่า 450 มิลลิบาร์ (mbar) แล้วจะค่อยๆถ่ายดูดผงจากถังพักให้เข้าไปผสมกับส่วนผสมของเหลว เมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 65 องศาเซลเซียสจะทำการให้ความร้อนโดยมีรูปแบบการให้ความร้อนแบบถังซ้อนถังคือแบบดับเบิลแจ็กเก็ต (Double Jacket) ซึ่งจะจ่ายไอน้ำ (Steam) ผ่านเข้าไปในตัวแจ็กเก็ต เมื่อทำการดูดผสมส่วนผสมชนิดผงหมดแล้วจะทำการผสมพร้อมดื่มให้ไซรัปได้อุณหภูมิ 82 องศาเซลเซียส แล้วทำการพาสเจอร์ไรส์ไว้ที่ 82 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 15 นาที ซึ่งจะมีการเก็บไซรัปตัวอย่างเพื่อชั่งการตกตะกอน และค่าความเข้มข้นของไซรัปว่าอยู่เกณฑ์มาตรฐานที่ตั้งไว้หรือไม่ แล้วจึงนำส่งไปยังถังพักไซรัปเพื่อรอการเข้าอบในกระบวนการถัดไป

1.3.3 ลักษณะเกณฑ์การวัดคุณภาพของไซรัป

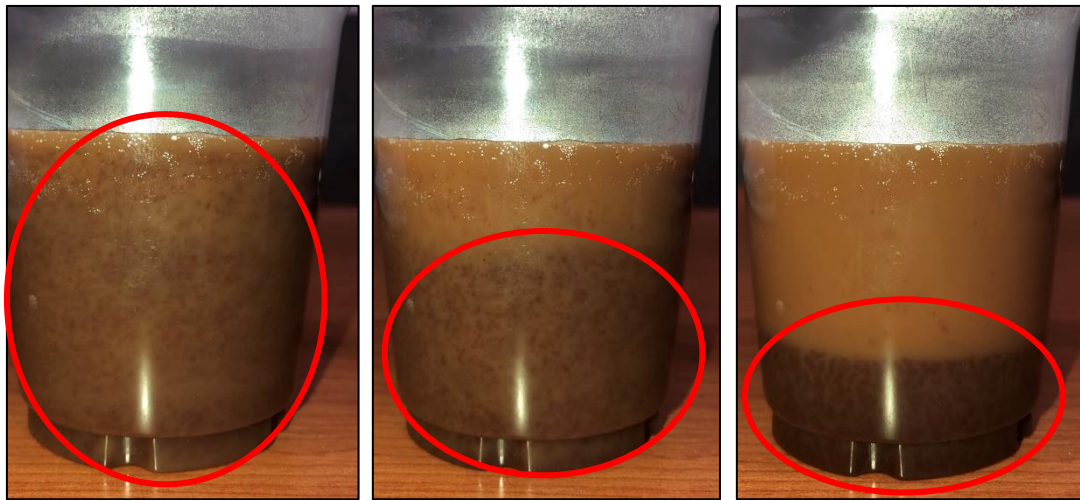
ลักษณะของความสูงตะกอนที่ผ่านเกณฑ์และไม่ผ่านเกณฑ์และลักษณะการตกตะกอนของไซรัป แสดงดังรูปที่ 1-14 และ รูปที่ 1-15



(ก.)

(ข.)

รูป 1-14 (ก) เกณฑ์ความสูงของตะกอนที่ผ่านมาตรฐาน (ข) เกณฑ์ความสูงของตะกอนที่ไม่ผ่านมาตรฐาน

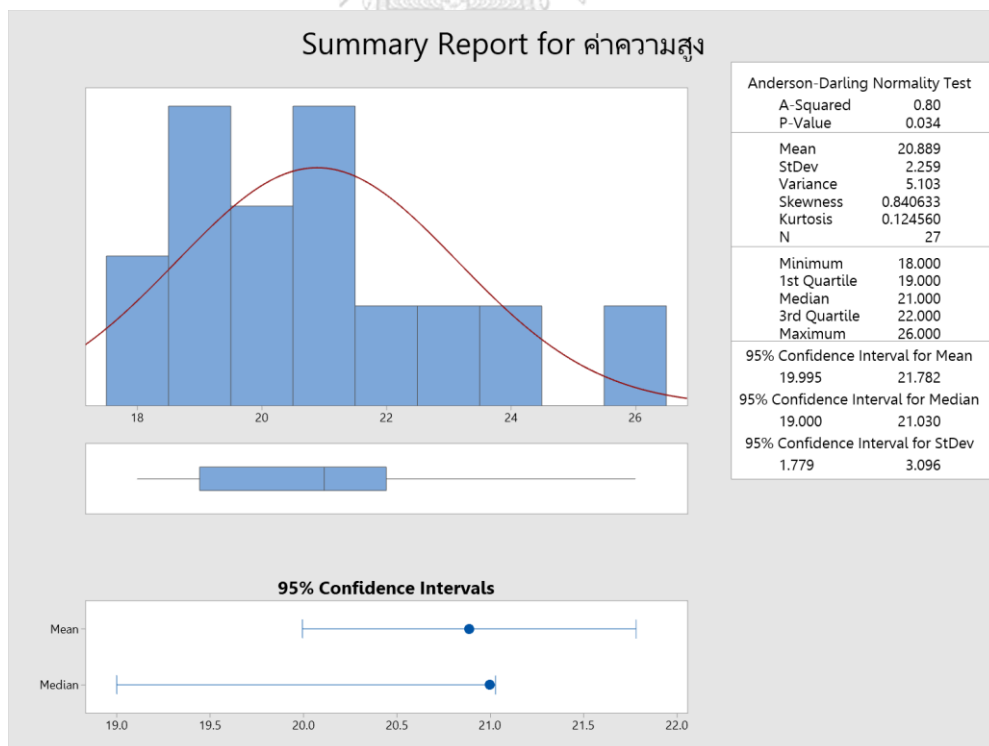


(1)

(2)

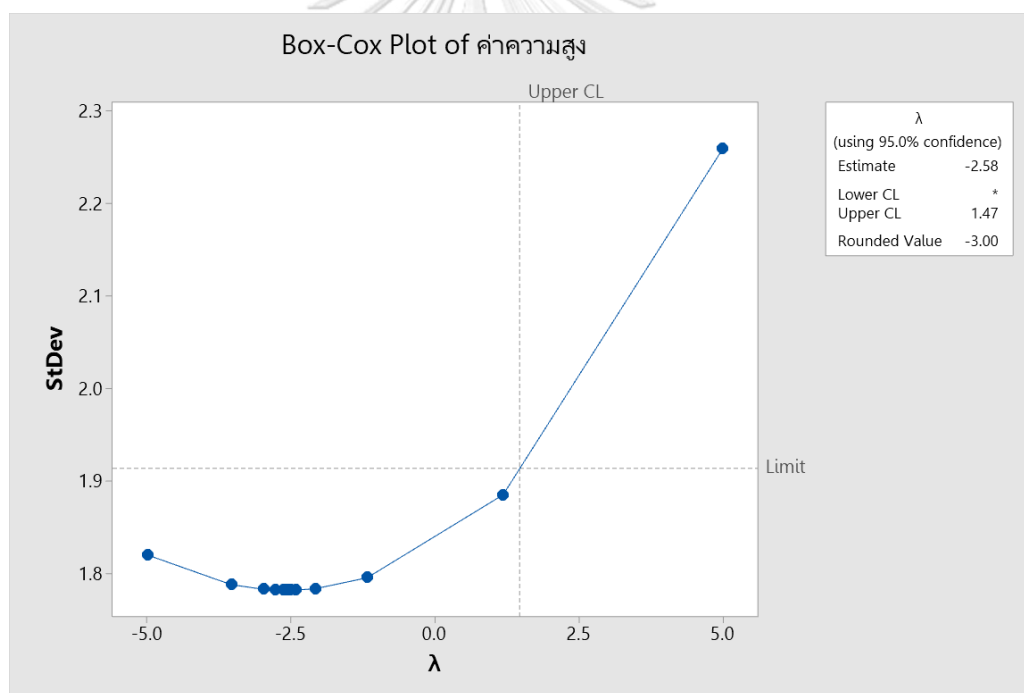
(3)

รูป 1-15 ลักษณะการเกิดตะกอนของไซรัป โดย (1) ลักษณะที่เกิดหลังจากยกช้อนกลุ่มสารแขวนลอยจะจับตัวเป็น
 ริว (2) ลักษณะริ้วตะกอนที่จับตัวกันจะเริ่มตกเป็นปุยๆลงด้านล่าง และ (3) ลักษณะตะกอนที่แพคตัวกันหลังจาก
 ตั้งวางทิ้งไว้ยังไม่ถึง 1 นาที

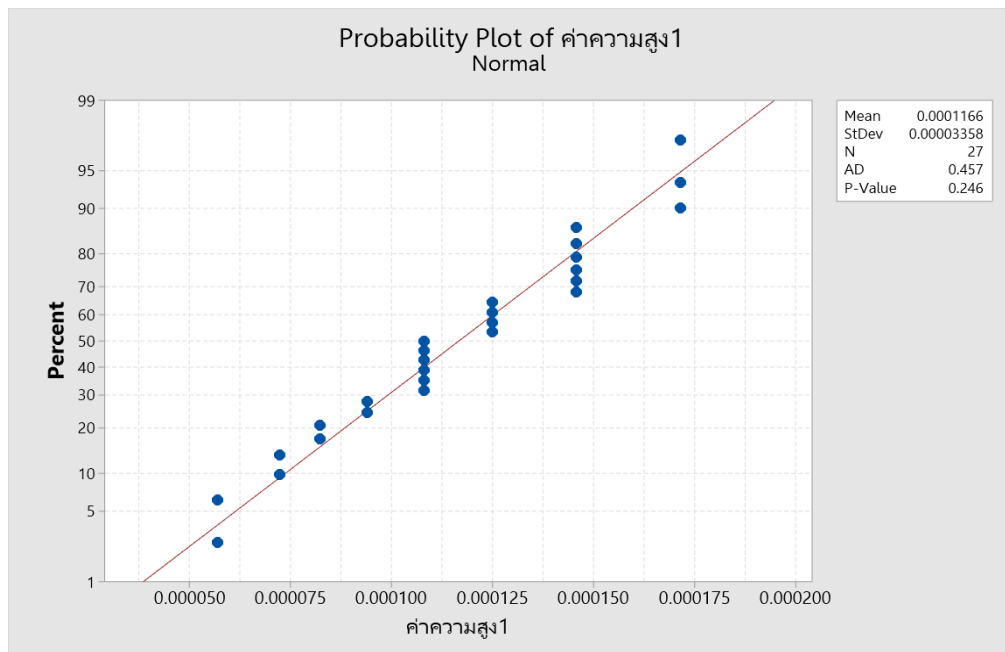


รูป 1-16 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความสูงตะกอนของไซรัปที่ผลิตจากกระบวนการผสมด้วยเครื่อง HSVM

เมื่อนำค่าความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้นมาวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งเป็นค่าความสูงตะกอนของไซรัปที่ผลิตจากเครื่องผสม HSVM เบื้องต้นดังรูปที่ 1-16 พบว่ามีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) เนื่องจากค่า P-value น้อยกว่า 0.05 โดยแสดงข้อมูลไว้ในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.1) จึงได้ทำการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธีบ็อก-ค็อก (The Box-Cox Transforms Method) แสดงข้อมูลไว้ในภาคผนวก ก (ตารางที่ ก.2) ภายหลังแปลงข้อมูลด้วย $\lambda = -2.58$ ดังรูปที่ 1-17 แล้วตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) อีกครั้ง ดังรูปที่ 1-18 พบว่าข้อมูลที่ผ่านการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธี Box-Cox แล้วนั้นมีการกระจายแบบปกติ เนื่องจากค่า P-value เท่ากับ 0.246 จึงสามารถทำการวิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการผลิตไซรัปจากเครื่องผสม Hi-Shear Vacuum Mixer ได้โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธี Box-Cox

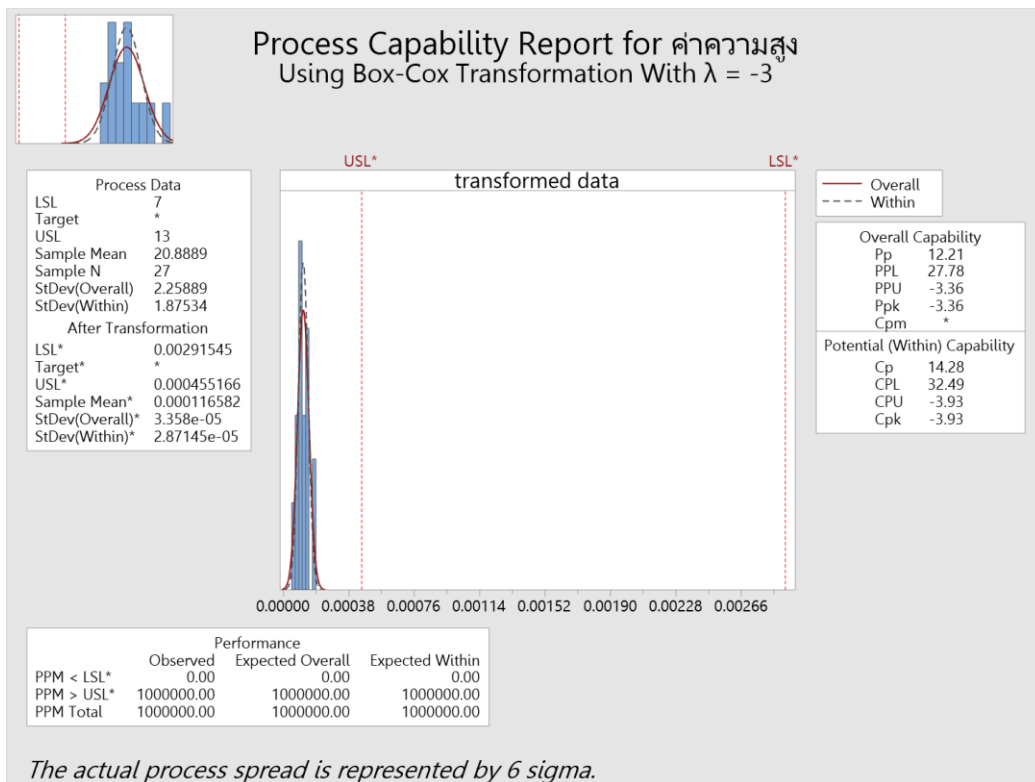


รูป 1-17 ผลการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธี Box-Cox



รูป 1-18 ผลการตรวจสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test)

จากข้อมูลที่ได้จากการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธี Box-Cox สามารถหาความสามารถของกระบวนการผลิต (Process Capability) ของกระบวนการผลิตไชร้ปจากเครื่องผสม HSVM ดังรูปที่ 1-19 ได้แสดงค่าดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการระยะสั้น (C_{pk}) ของค่าความสูง ตะกอน เท่ากับ -3.93 และค่าดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการระยะยาว (P_{pk}) ของค่าความสูงตะกอน เท่ากับ -3.36 แสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการทั้งระยะสั้นและระยะยาวอยู่ในเกณฑ์ที่ไม่ดี ดังตารางที่ 1-1



รูป 1-19 ความสามารถของกระบวนการผลิต (Process Capability) ของกระบวนการผสมไซร้ด้วยเครื่อง HSVM

ตาราง 1-1 แสดงลำดับความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการเบรชยะสั้น (C_{pk}) (กิตติศักดิ์, 2549)

(ที่มา : กิตติศักดิ์ พลอยพาณิชย์เจริญ, 2544. การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ)

ค่าดัชนี C_{pk}	ลำดับของความสามารถของกระบวนการ
$2.00 \leq C_{pk}$	ดีเหลือเชื่อ
$1.67 \leq C_{pk} < 2.00$	ดีเลิศ
$1.33 \leq C_{pk} < 1.67$	ดี
$1.00 \leq C_{pk} < 1.33$	พอใช้
$0.67 \leq C_{pk} < 1.00$	ไม่ดี
$C_{pk} < 0.67$	ไม่ดีมาก

ตาราง 1-2 แสดงค่าแนะนำสำหรับค่าที่ต่ำที่สุดของดัชนี (C_{pk}) (กิตติศักดิ์, 2549)

(ที่มา : กิตติศักดิ์ พลอยพาณิชย์เจริญ, 2544. การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ)

ประเภทของกระบวนการ	ค่าดัชนีที่ต่ำที่สุดสำหรับ C_{pk}		ระดับคุณภาพ (ระยะสั้น)
	แบบพิกัดด้านเดียว	แบบพิกัดสองด้าน	
กระบวนการทั่วไป (ใช้งานอยู่)	1.25	1.33	4s
กระบวนการทั่วไปใหม่ (ใหม่)	1.45	1.50	4.5s
กระบวนการที่เกี่ยวกับความปลอดภัยหรือพารามิเตอร์วิกฤติ (ใช้งานอยู่)	1.45	1.50	4.5s
กระบวนการที่เกี่ยวกับความปลอดภัยหรือพารามิเตอร์วิกฤติ (ใหม่)	1.60	1.67	5s

โดยค่าความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการแบบระยะสั้น (C_{pk}) ที่เป็นค่าแนะนำที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่องผสม HSVM ซึ่งอยู่ในประเภทของกระบวนการทั่วไป (ใช้งานอยู่) ที่มีข้อกำหนดเฉพาะแบบพิกัดสองด้าน คือ C_{pk} เท่ากับ 1.33 ดังตารางที่ 1-2 ซึ่งค่าความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการผลิตแบบระยะสั้น (C_{pk}) ที่ได้จากกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่องผสม HSVM ที่ให้ค่าความสูงตะกอนปัจจุบันนั้นมีค่าน้อยและแตกต่างจากเกณฑ์ที่เหมาะสมอยู่มาก

จากปัญหาข้างต้นที่พบจึงเป็นที่มาของการศึกษาปัจจัยที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตไซรัป CFO แล้วทำให้มีลักษณะเสียสภาพของไซรัป ก่อให้เกิดความสูงของตะกอนที่สูงเกินเกณฑ์มาตรฐานด้านคุณภาพ แล้วเกิดเป็นของเสียจากกระบวนการผลิตที่ไม่สามารถนำไปผลิตต่อได้

1.4 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผสมไซรัปแบบชั้นหนืดด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer (HSVM) ซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการผลิตผง 3 in 1

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

- 1.5.1) ทำการศึกษาเฉพาะกระบวนการผลิตผสมไซรัปที่ผลิตจากเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer เท่านั้น
- 1.5.2) ผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษา คือไซรัป CFO สีนํ้าตาล รหัส 4003 (เนื่องจากเป็นไซรัปตั้งต้นของสารตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์กลุ่มผง 3 in 1 และมีสัดส่วนมากที่สุด)
- 1.5.3) เน้นการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตผสมไซรัปแบบชั้นหนืด โดยค่าความสูงของตะกอนที่ขังเซ็คจากไซรัปที่ผ่านการผสมแล้วไม่เกิน 13 มิลลิเมตร เมื่อตั้งทิ้งไว้ 15 นาที
- 1.5.4) เน้นการศึกษาปัจจัยที่ลดของเสียจากกระบวนการผลิตผสมไซรัป เนื่องจากส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์
- 1.5.5) ศึกษาภายใต้การทดลองผ่านเพียงเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer เครื่องจักรเดียว และพนักงานที่ควบคุมการผสมเป็นเพียงคนเดียวในแต่ละกะเท่านั้น
- 1.5.6) งานวิจัยฉบับนี้ใช้โปรแกรมMinitab เป็นโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ

1.6 ขั้นตอนการวิจัยและดำเนินการ

- 1.6.1) ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตไซรัป
 - ศึกษาขั้นตอนการทำงานตั้งแต่การจัดเตรียมวัตถุดิบจนถึงวิธีการตรวจสอบผลของไซรัปหลังผสมเสร็จสิ้นสำหรับการผลิตแบบดั้งเดิม เพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในไซรัป
 - รวบรวมข้อมูลปริมาณการผลิตไซรัปกลุ่ม CFO สีนํ้าตาล รหัส 4003 สำหรับแบบดั้งเดิม และ รหัส 4003 สำหรับแบบใหม่
 - รวบรวมข้อมูลเกี่ยวสภาพกับปัญหา เช่น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผสม ความเร็วของใบกวน อุณหภูมิในการให้ความร้อน ต่างๆ

- 1.6.2) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี การนำมาใช้และสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.6.3) ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนและความสูงของตะกอนโดยใช้แผนภูมิแกงปลา, FMEA และการออกแบบการทดลองแบบเศษส่วนเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อคัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลมาออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง
- 1.6.4) ศึกษาหลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับและการทดลองแบบวิธีการพื้นผิวตอบสนอง
- 1.6.5) วางแผนการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมและดำเนินการทดลองตามแผน
- 1.6.6) วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติเชิงวิศวกรรม
- 1.6.7) ทดลองผลิตไซรัป โดยใช้ระดับของปัจจัยที่พิสูจน์และปรับปรุงแล้ว ติดตามประเมินผลแล้วกำหนดและจัดทำมาตรฐานพร้อมติดตามผลหลังการจัดทำมาตรฐาน
- 1.6.8) สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ
- 1.6.9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.7 ประโยชน์ที่จะได้รับการวิจัย

- 1.7.1) ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการใช้เครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer ในกระบวนการผสมไซรัป
- 1.7.2) ลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตผสมด้วยเครื่อง Hi-Shear Vacuum Mixer ในกระบวนการผสมไซรัป
- 1.7.3) เป็นแนวทางไปประยุกต์ใช้และศึกษาต่อในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไซรัปรสชนิดอื่นๆ ให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพตามเป้าหมาย

1.8 แผนการดำเนินงานวิจัย

หัวข้อเรื่อง	เดือน	มี.ค. 64	เม.ย. 64	พ.ค. 64	มิ.ย. 64	ก.ค. 64	ส.ค. 64	ก.ย. 64	ต.ค. 64	พ.ย. 64	ธ.ค. 64	ม.ค. 65	ก.พ. 65
	สัปดาห์ที่	W2	W4	W2	W4	W2	W4	W2	W4	W2	W4	W2	W4
ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิตโซลาร์													
ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี การนำมาใช้และสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง													
ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนและความสูงของตะกอนโดยใช้ทฤษฎีต่างๆ													
ศึกษาหลักการออกแบบการทดลอง													
วางแผนการออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลอง													
วิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติเชิงวิศวกรรม													
ทดลองพารามิเตอร์จากการปรับปรุง ติดตามผล ประเมินผล การกำหนดและจัดทำมาตรฐาน พร้อมติดตามผลหลังการจัดทำมาตรฐาน													
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ													
จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์													

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่นำมาใช้

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับเครื่องผสมแรงเฉือนสูง

เครื่องผสมแรงเฉือนสูง (Netinbag.com, 2020)

เครื่องผสมแรงเฉือนสูงเป็นอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเพื่อรวมส่วนประกอบของของเหลวก๊าซและของแข็งอย่างสมบูรณ์ซึ่งโดยปกติจะไม่ผสมอย่างสมบูรณ์โดยใช้วิธีการทั่วไป อุปกรณ์เหล่านี้ใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์พลศาสตร์ของไหลที่รู้จักกันในชื่อเฉือนความเครียดเพื่อรวมวัสดุที่ยากต่อการผสม แรงเฉือนเกิดขึ้นเมื่อวัตถุสองของเหลวเคลื่อนที่ผ่านกันด้วยความเร็วที่แตกต่างกันทำให้เกิดการเสียดสีตามพื้นที่สัมผัสระหว่างพวกเขา เครื่องผสมแบบแรงเฉือนสูงใช้ชุดใบพัดความเร็วสูงหมุนภายในตัวเรือนแบบติดตั้งกับที่เพื่อให้ผสมวัสดุส่วนประกอบหนึ่งเข้ากับการไหลคงที่ของวัสดุอื่นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยความเร็วที่แตกต่างกัน มีเครื่องผสมแบบเฉือนหลายประเภทที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ เครื่องผสมแบบกะแบบอินไลน์และเครื่องตัดแบบเฉือนสูงพิเศษ

การผสมวัสดุที่ภายใต้สภาวะปกติไม่ผสมให้เป็นที่รู้จักกันว่าเป็นส่วนผสมที่เข้ากันไม่ได้ น้ำมันและน้ำเป็นตัวอย่างที่ดีขององค์ประกอบทั่วไปที่เข้ากันไม่ได้ อย่างไรก็ตามการรวมกันของของเหลวของแข็งและก๊าซที่เข้ากันไม่ได้เป็นส่วนที่จำเป็นของกระบวนการทางเคมีและอุตสาหกรรม ในกรณีที่ใช้วิธีการผสมแบบปกติแล้วเครื่องผสมแรงเฉือนสูงจะถูกใช้เพื่อให้ได้ส่วนผสมที่สมบูรณ์แบบ เครื่องผสมเหล่านี้ควบคุมกลไกพลศาสตร์ของไหลที่เรียกว่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในบริเวณที่วัตถุสองชิ้นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่างกันสัมผัสกัน

แรงเฉือนทำให้เกิดการเสียดสีแบบเฉพาะของการไหลของวัสดุสองอย่างที่ทำหน้าที่รวมแรงเข้ากับระนาบแรงเฉือน ในเครื่องผสมที่มีแรงเฉือนสูงโดยทั่วไปเอฟเฟกต์นี้สามารถทำได้ด้วยใบพัดหรือโรเตอร์ความเร็วสูงที่หมุนภายในตัวเรือนแบบคงที่หรือสเตเตอร์ วัสดุชิ้นส่วนที่ถูกนำเข้าไปในห้องที่สร้างโดยสเตอร์จะได้สัมผัสกับความเร็วการหมุนที่สูงกว่าที่ขอบด้านนอกมากกว่าที่อยู่ตรงกลาง ความแตกต่างความเร็วนี้ทำให้เกิดแรงเฉือนที่จำเป็นในการรวมวัสดุอย่างมีประสิทธิภาพ การรวมกันเหล่านี้อาจประกอบด้วยของเหลวที่ต่างกันการจับคู่ของเหลวและก๊าซหรือการจับคู่ของเหลวและของแข็งซึ่งเป็นผลมาจากการผสมกันซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่ออิมัลชัน lysols และสารแขวนลอยตามลำดับ

มีเครื่องผสมเฉือนสูงหลายประเภทที่พบได้ทั่วไปในอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารยาเครื่องสำอางและอุตสาหกรรมการผลิตกระดาษ เหล่านี้รวมถึงเครื่องผสมแบบผสมแบบแบตช์แบบอินไลน์และแบบ

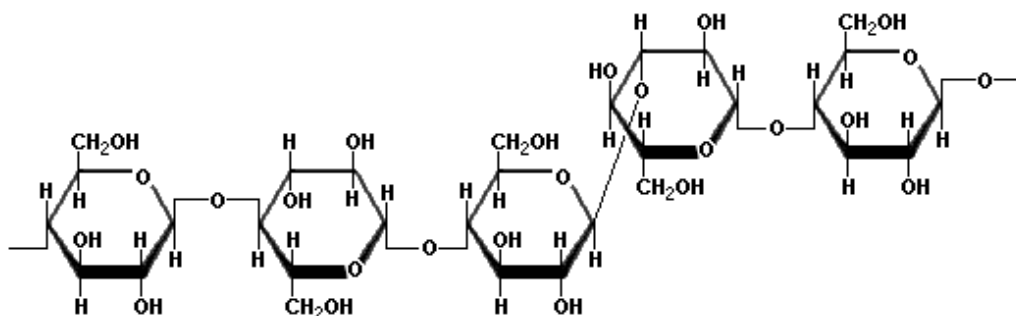
เดือนสูงพิเศษแต่ละแบบมีประโยชน์ในการดำเนินงานเฉพาะ เครื่องผสมแบบแบทช์ประกอบด้วยถังผสมที่มีใบพัดอยู่ด้านล่างพร้อมวัสดุส่วนประกอบที่ถูกบรรจุลงในถังจากด้านบนทำให้เครื่องผสมชนิดนี้สามารถประมวลผลปริมาณมากได้อย่างรวดเร็ว เครื่องผสมแบบอินไลน์เหมาะอย่างยิ่งสำหรับการผสมการผสมของเหลว / ผงและมีการจัดเรียงฟีด / จำหน่ายเชิงเส้นที่ดึงส่วนผสมผ่านมันรวมถึงการผสมวัสดุ เครื่องผสมแบบเดือนสูงพิเศษโดยทั่วไปอนุญาตให้ใช้งานการผสมแบบ Single pass และมีรูปทรงในสเตเตอร์ซึ่งวัสดุถูกบังคับด้วยความเร็วสูง

ซึ่ง Jinli Zhang และคณะ (Zhang et al., 2012) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานทั่วไปและการศึกษาเกี่ยวกับการดัดแปลงรูปแบบการไหลการกระจายพลังงานและคุณสมบัติการถ่ายโอนโดยระบบเครื่องผสมแบบเดือนสูง (HSM) โดดเด่นด้วยการกระจายพลังงาน มีการใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมกระบวนการในการลดขนาดขั้นตอนการกระจายตัวและปฏิกิริยาผสม ผลการวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ HSM โดยทั่วไปได้สรุปไว้ในเอกสารฉบับนี้ ได้แก่ ของเหลว - ของเหลว อิมัลชันสารแขวนลอยของแข็งและของเหลวและปฏิกิริยาทางเคมี โดยเน้นที่การทำให้เป็นอิมัลชัน เนื่องจากการวิจัยค่อนข้างเข้มข้นในพื้นที่นี้ การออกแบบและควบคุม HSM ในฐานะเครื่องปฏิกรณ์เคมีจำเป็นต้องมีความรู้ที่ครอบคลุมทั้งจลนศาสตร์ของปฏิกิริยาและไฮดรพลศาสตร์ของ HSM ดังนั้นอุทกพลศาสตร์ของ HSM ในแง่ของการดัดแปลงรูปแบบการไหลและการกระจายพลังงานจึงได้รับการตรวจสอบโดยเฉพาะจากการวัดพลศาสตร์ของไหลเชิงทดลอง (EFD) และการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) นอกจากนี้ยังมีการนำเสนอรายงานที่จำกัด เกี่ยวกับมวลและคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนใน HSM เพื่อแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำไปใช้ในการทำให้กระบวนการปฏิกิริยาเคมีเข้มข้น เนื่องจากความยากลำบากและความท้าทายที่เกิดขึ้นในการทดลองเครื่องมือ CFD จึงมีบทบาทสำคัญในการออกแบบการเพิ่มประสิทธิภาพและการขยาย HSM แต่ความแม่นยำในการทำนายยังคงต้องได้รับการปรับปรุง

2.2 เบตา-กลูแคน (Beta-glucan)

Biao Han และคณะ (Han & Baruah, 2020) ได้กล่าวว่าเบตา-กลูแคนเป็นกลุ่มของกลูโคสโพลีเมอร์ที่ต่างกันซึ่งมีโครงสร้างร่วมกันซึ่งประกอบด้วยสายโซ่หลักของหน่วย เบตา-(1,3) และ/หรือ เบตา-(1,4)-กลูโคพาราโนซิล พร้อมด้วยโซ่ด้านข้างที่มีกิ่งและความยาวต่างกัน โดยที่ Ramandeep Kaur และคณะ (Kaur et al., 2019) ยังกล่าวเพิ่มอีกว่า เบตา-กลูแคนมีความสามารถในการเปลี่ยนแปลงลักษณะการทำงาน เช่น ความหนืด การไหล เนื้อสัมผัส และคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์อาหาร คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของ Beta-glucans เชื่อมโยงโดยตรงกับแหล่งกำเนิด/

แหล่งที่มา น้ำหนักโมเลกุล และลักษณะทางโครงสร้าง น้ำหนักโมเลกุลและลักษณะโครงสร้าง/
โครงสร้าง ดังรูปที่ 2-1



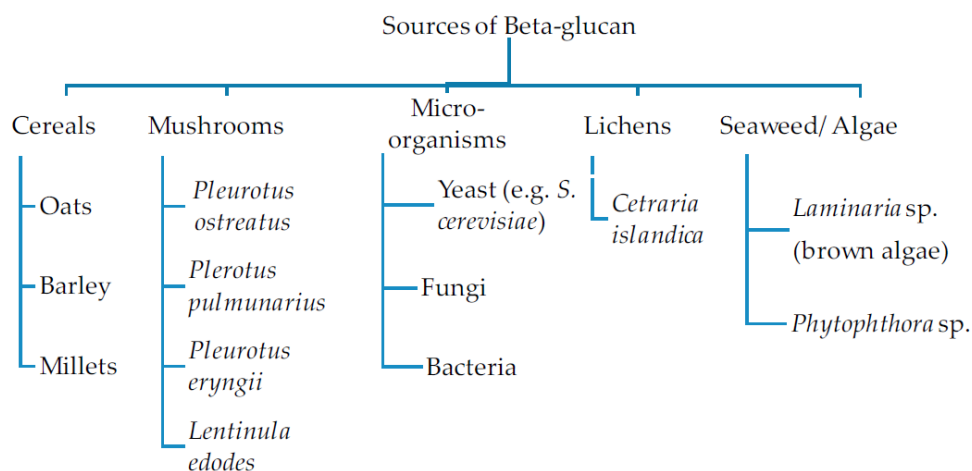
รูป 2-1 ลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของ เบตา-กลูแคน

โพลีเมอร์เบตา-กลูแคนที่เกิดจากผนังเซลล์เอนโดสเปิร์มของข้าวบาร์เลย์เป็นหนึ่งในข้อกังวลหลักในอุตสาหกรรมการผลิตเบียร์ ปริมาณและน้ำหนักโมเลกุลของ เบตา-กลูแคนในมอลต์ส่งผลต่อผลผลิตของสารสกัดจากโรงเบียร์และความหนืดของสาโทและเบียร์ เช่นเดียวกับการลอกออก ดินเบา และการกรองแบบเมมเบรน

ข้าวบาร์เลย์ Beta-glucans ยังเกี่ยวข้องกับหมอกควันเบียร์ การตกตะกอนและการเกิดเจลของโพลีเมอร์ เบตา-กลูแคนสามารถเพิ่มขึ้นได้ด้วยปัจจัยต่างๆ เช่น ความเข้มข้นของเอทานอล การแช่แข็งและการละลาย ตลอดจนแรงเฉือนแบบปั่นป่วน Yu-Lai Jin และคณะ(Jin et al., 2004) จึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับโครงสร้าง การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ และการเสื่อมสภาพของ เบตา-กลูแคนและพร้อมทั้งกลไกการรวมตัวของโพลีเมอร์เหล่านี้เพื่อช่วยให้ผู้ผลิตเบียร์นำการดำเนินการป้องกันและแก้ไขเพื่อลดปัญหาในการประมวลผลที่เกี่ยวข้องกับ เบตา-กลูแคน

แหล่งที่มา โครงสร้างทางเคมี และหน้าที่ของ เบตา-กลูแคน (Kaur et al., 2019)

ในอดีต ธัญพืชเป็นแหล่งของเบต้า-กลูแคนที่เป็นที่รู้จักมากที่สุด อย่างไรก็ตาม ด้วยความก้าวหน้าในการวิจัย เบต้า-กลูแคนได้รับการระบุและสกัดจากแหล่งจุลินทรีย์ รวมทั้งจากเห็ดไคเลน และสาหร่าย/สาหร่ายบางชนิด (รูปที่ 2-2)



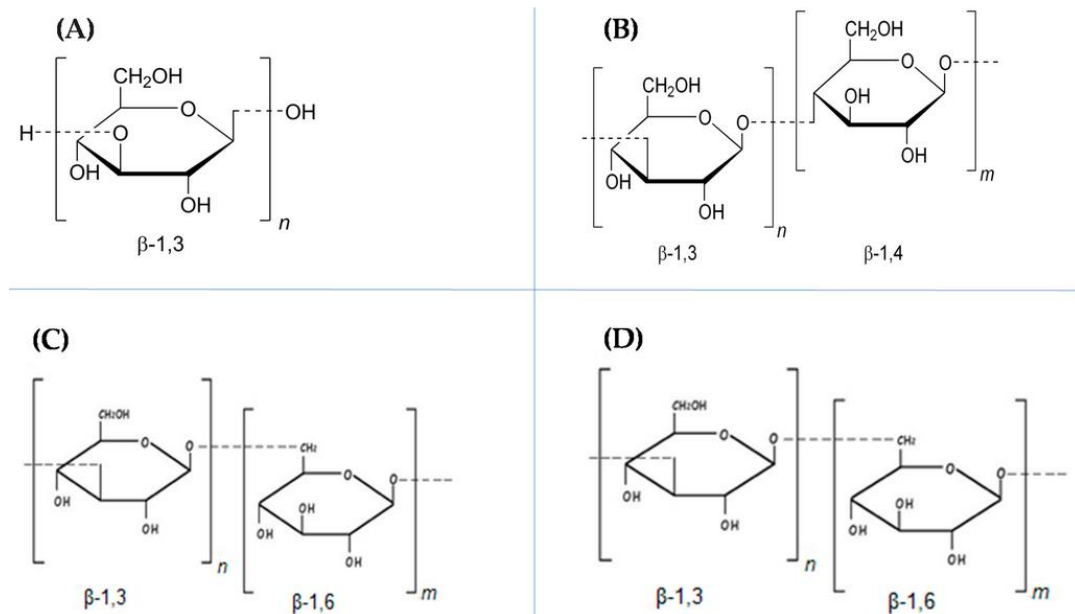
รูป 2-2 แหล่งที่มาของ เบตา-กลูแคน (Kaur et al., 2019)

รูปที่ 2-3 แสดงส่วนประกอบของเบตา-กลูแคน จากแหล่งต่างๆ โดยเบตา-กลูแคนมักเกิดขึ้นในซีเรียลที่มีความเข้มข้นต่ำ (ประมาณ 5% โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) ระดับของโพลีเมอร์เหล่านี้มีความแตกต่างกันอย่างมากในจุลินทรีย์ ผลผลิตที่เหมาะสมของเบตา-กลูแคนที่สกัดจากยีสต์ขนมปังให้เพียง 5%–7% แต่ยูกลีนา (Euglena) สามารถสะสมเบตา-กลูแคนภายในเซลล์ได้มากกว่า 90% ส่วนปริมาณเบตา-กลูแคนในเห็ดก็แตกต่างกันไปเช่นกัน จากประมาณ 3.1% ถึง 46.5%

Food Source	Content
Oats	4.5%–5.5%
Barley	4.5%
Whole rye flour	1.0%–2.5%
<i>Saccharomyces cerevisiae</i>	5%–7%
<i>Euglena</i>	90%
Stipes of <i>Durvillaea antarctica</i>	33%
Holdfast of <i>Durvillaea antarctica</i>	<5%
<i>Sparassis crispa</i>	43.6%
<i>Inonotus obliquus</i>	3.1%
<i>Gyrophora esculenta</i>	22.7%
<i>Coriolus versicolor</i>	46.5%

รูป 2-3 แสดงส่วนประกอบของ เบตา-กลูแคน จากแหล่งที่มาที่แตกต่างกัน

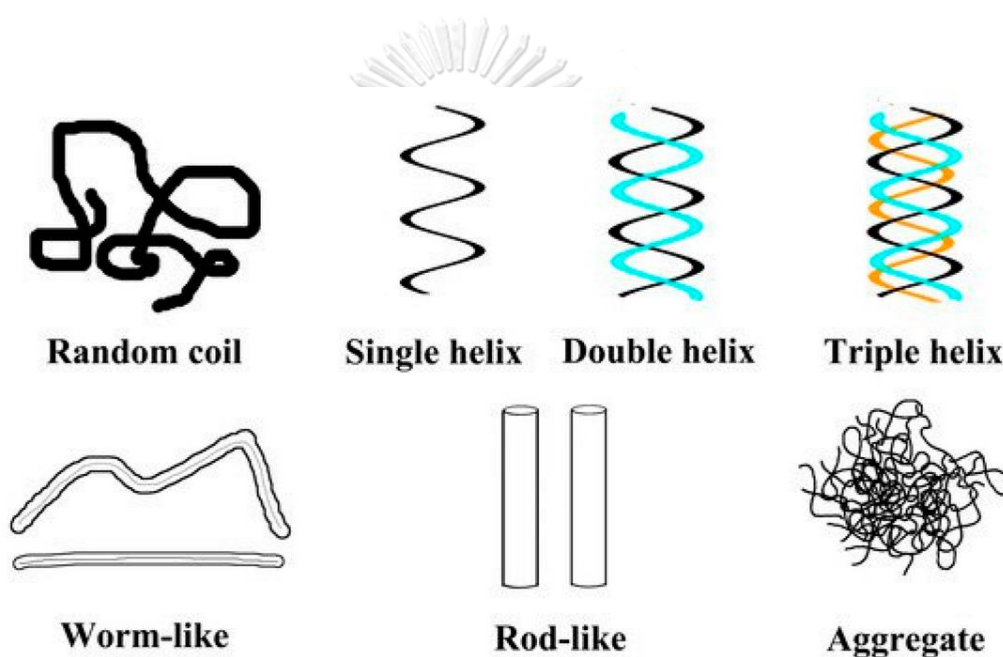
เบตา-กลูแคนที่แยกได้จากแหล่งต่างๆ จะมีลักษณะแตกต่างกันไป เช่น การเชื่อมโยงไกลโคซิดิก ระดับของการแตกแขนง น้ำหนักโมเลกุล และความสามารถในการละลายเบตา-กลูแคนที่ได้จาก ัญพืชเป็นส่วนผสมหลักของการเชื่อมโยงไกลโคซิดิกเบตา(1,3) และ เบตา(1,4) โดยไม่มีพันธะ เบตา (1,6) ใดๆ เบตา-กลูแคนจากยีสต์ (เช่น *Saccharomyces cerevisiae*) เป็นส่วนผสมของแบ็คโบน เส้นตรง ประเภท เบตา(1,3) ที่มีสายโซ่ตรง 30 ตัวและต่อเข้ากับกิ่งเหล่านี้จะมีกิ่งยาวติดผ่านข้อต่อ เบตา(1,6) เบตา-กลูแคนเชื้อราทำจากกลูแคน เบตา(1,3) แบบตรง โดยมีสายโซ่สั้นที่เชื่อมต่อกับ เบตา (1,6) แบคทีเรียเบตา-กลูแคน (เช่น แบคทีเรียจาก *Agribacterium biobaris*) มีกระดูกสันหลัง เบตา(1,3)-D-D-glucan ตรงและไม่มีกิ่ง ส่วนสาหร่ายเบตา-กลูแคน (เช่นที่พบในสาหร่ายสีน้ำตาล ลูมินา เรีย) ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และอาจ มีกาบโซ่ตรงเบตา(1,3) ตกค้างหรือกระดูกสันหลังของโซ่ตรงพร้อมกับกิ่งเบตา(1,6) ในระดับสูง โครงสร้างทางเคมีของเบตา-กลูแคนจากแหล่งต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 2-4



รูป 2-4 โครงสร้างทางเคมีของเบตา-กลูแคนจากแหล่งต่างๆ

จากรูปที่ 2-4 รูป (A) จะเป็นเบตา-กลูแคนจากแบคทีเรีย จะพบเบตา-1,3 เชิงเส้น ประเภทแบ็คโบนที่ไม่มีกิ่งก้าน ส่วนรูป (B) เบตา-กลูแคนจากัญพืชหรือไลเคน จะมีเบตา-1,3 หรือ เบตา-1,4 เชิงเส้น ประเภทแบ็คโบนที่ไม่มีกิ่งก้าน ในรูป (C) เบตา-กลูแคนจากสาหร่ายบางชนิด (เช่น *Laminaria spp*); จะพบ เบตา-1,3 ประเภทแบ็คโบนที่มีกิ่งสาขา เบตา-1,6 และรูป (D) เบตา-กลูแคนจากเชื้อราหรือยีสต์ จะพบ เบตา-1,3 แบ็คโบนที่มี เบตา-1,6 กิ่งที่สั้น (เชื้อรา) หรือยาว (ยีสต์)

ตามแหล่งกำเนิดและวิธีการแปรรูปที่ใช้ในการสกัดและตัดแปรง เบตา-กลูแคนสามารถมีอยู่ในรูปแบบต่างๆ (ดูรูปที่ 2-5) โครงสร้างที่สังเกตได้อย่างกว้างขวางที่สุดคือขดลวดสุ่ม(Random coil) เกลียว(Helix) (เดี่ยว Single คู่ Double หรือสาม Triple) รูปร่างคล้ายหนอน(Worm-like) รูปร่างเหมือนแท่ง(Rod-like) หรือมวลรวม(Aggregate) น้ำหนักโมเลกุล (MW) ของ เบตา-กลูแคนอยู่ในช่วง 102 ถึง 106 Da ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ตัวอย่างเช่น เบตา-กลูแคนที่ละลายได้จากเห็ดไมตาเกะ 2 สายพันธุ์ที่รับประทานได้ (*Grifolafrondosa*) และเห็ดชิตาเกะ (*Lentinula edodes*) ประมาณว่ามี MW ประมาณ 400 kDa และเบตา-กลูแคนของธัญพืชที่ละลายได้ซึ่งอาจมี MW ระหว่าง 1.1 ถึง 1.6 MDa สำหรับข้าวโอ๊ต และประมาณ 49 MDa สำหรับข้าวบาร์เลย์



รูป 2-5 แผนผังของรูปแบบทั่วไปของเบตา-กลูแคน ที่มา: Qiang Wang et al. (Wang et al., 2017)

นอกเหนือจากคุณค่าทางโภชนาการที่อ้างว่าเป็นแหล่งของเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำได้เบตา-กลูแคนยังได้รับความสนใจอย่างมากในอุตสาหกรรมอาหาร อันเนื่องมาจากลักษณะทางรีโอโลยี (Rheology) น้ำหนักโมเลกุล คุณสมบัติการกักเก็บน้ำ และความสามารถในการละลายของเบตา-กลูแคนมีผลกระทบอย่างมากต่อความหนืด และพฤติกรรมการไหล เบตา-กลูแคนมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำมาก เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมากที่มีส่วนร่วมในการจับไฮโดรเจนกับน้ำ และทำให้โมเลกุลมีความสามารถในการกักเก็บน้ำทั้งในรูปแบบที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ความสามารถในการละลายยังขึ้นอยู่กับน้ำหนักโมเลกุล ซึ่งดังที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ เบตา-กลูแคนได้รับอิทธิพลจากความยาวของสายโซ่และระดับของการแตกแขนงในโมเลกุล ปรากฏการณ์อื่นๆ อีกสองประการที่ส่งผลต่อ

น้ำหนักโมเลกุลของ เบตา-กลูแคน ได้แก่ การคืนสภาพและการรวมตัว ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมี ภายภาพบางอย่าง เช่น โครงสร้าง อัตราส่วนโมลาร์ของไตรเมอร์และเตตระเมอร์ในโมเลกุล และรัศมี อุทกพลศาสตร์

โครงสร้างในการละลายของ เบตา-กลูแคนมีความสำคัญต่อการประยุกต์ใช้โมเลกุลทางรีโอโลยี โภชนาการ และประสาทสัมผัส ตัวอย่างเช่น ความหนืดเป็นพารามิเตอร์ที่ขาดไม่ได้เมื่อใช้เบตา-กลูแคนเป็นสารเพิ่มความข้นในระบบอาหาร เช่น เครื่องดื่ม น้ำสลัด และผลิตภัณฑ์จากนม ในบริบทนี้ เบตา-กลูแคนแบบสายยาวที่มี MW สูงจะมีความสามารถในการสร้างเจลที่มีความหนืดและ สารละลายพลาสติกเทียม เนื่องจากการจัดเรียงโครงสร้างของโซ่ที่ซับซ้อน สารละลาย เบตา-กลูแคนที่มีความหนืดสามารถทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความคงตัวหรือสารเพิ่มความข้นในสูตรผสมอาหาร อย่างไรก็ตาม ความรู้ที่ว่าโครงสร้างจุลภาคของอาหารส่งผลต่อการดูดซึมสารอาหารและใยอาหารบาง ชนิดในระดับสูงจะลดการดูดซึมสารอาหารในระดับสูงได้อย่างไร หมายความว่า เบตา-กลูแคนที่มีความหนืดสูงอาจแสดงฤทธิ์ต้านทางโภชนาการในสูตรผสมอาหาร

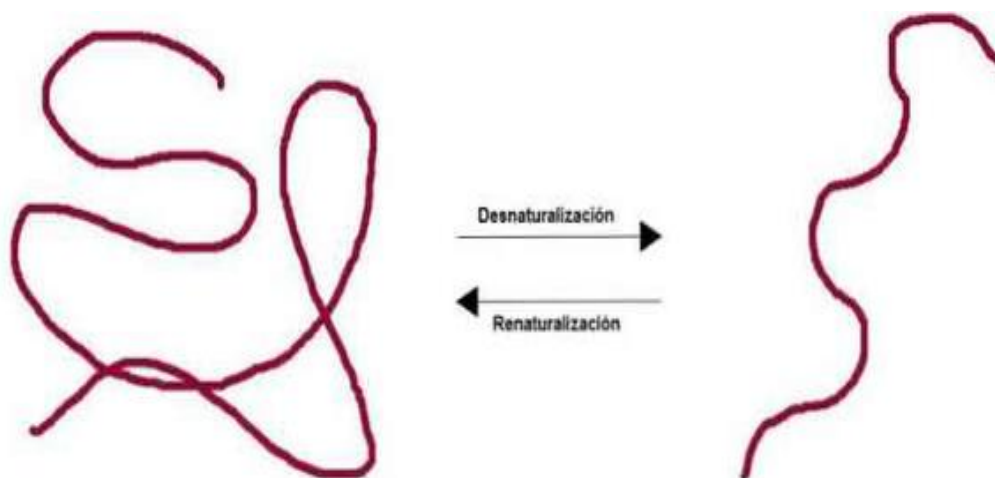
ในทางกลับกัน เบตา-กลูแคน ที่เสื่อมโทรม (หรือตัดแปลง) มี MW ที่ต่ำกว่า ซึ่งก่อให้เกิดเจลที่ อ่อนนุ่มกว่าที่ความเข้มข้นสูง ความหนืดที่ต่ำกว่าของ เบตา-กลูแคนเป็นที่ต้องการในผลิตภัณฑ์ เครื่องดื่มเพื่อให้เกิดความเสถียรต่อการแยกเฟสโดยไม่ลดทอนคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสอื่นๆ เทคนิคการแปรรูปที่เปลี่ยนระดับการแตกแขนงและน้ำหนักโมเลกุลของเบตา-กลูแคน จึงสามารถ นำมาใช้เพื่อควบคุมคุณสมบัติทางหน้าที่ของเบตา-กลูแคนเพื่อให้ได้สูตรที่มีคุณสมบัติความหนืด-รีโอโลยีตามที่ต้องการ นำไปใช้ในระบบอาหารต่างๆ ได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Chulalongkorn University

2.3 การสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน (Denaturation protein)

การสูญเสียสภาพของโปรตีน ประกอบด้วย การสูญเสียโครงสร้างสามมิติ โดยปัจจัยด้าน สิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันเช่น อุณหภูมิค่า pH หรือสารเคมีบางชนิด การสูญเสียโครงสร้างส่งผลให้ สูญเสียการทำงานทางชีวภาพที่เกี่ยวข้องกับโปรตีนไม่ว่าจะเป็นเอนไซม์ โครงสร้างการขนส่งและอื่น ๆ โครงสร้างของโปรตีนมีความไวสูงต่อการเปลี่ยนแปลง การทำให้ความเสถียรของสะพานไฮโดรเจนที่ จำเป็นเพียงตัวเดียวสามารถทำให้โปรตีนเสื่อมสภาพได้ ในทำนองเดียวกันมีการโต้ตอบที่ไม่จำเป็น อย่างเคร่งครัดเพื่อให้สอดคล้องกับฟังก์ชันโปรตีนและในกรณีที่ถูกทำให้เสถียรไม่ส่งผลกระทบต่อการ ทำงาน



รูป 2-6 การเปลี่ยนแปลงสายโครงสร้างของโปรตีน (ซ้าย) สายโครงสร้างโปรตีนสภาวะปกติ (ขวา) สายโครงสร้างโปรตีนสภาวะสูญเสียสภาพ

โครงสร้างของโปรตีน

เพื่อที่จะเข้าใจกระบวนการของการสูญเสียโปรตีนในธรรมชาติเราต้องรู้วิธีการจัดเรียงโปรตีน เหล่านี้นำเสนอโครงสร้างหลัก, รอง, อุদ্มศึกษาและ quaternary

โครงสร้างหลัก

มันเป็นลำดับของกรดอะมิโนที่ประกอบด้วยโปรตีนดังกล่าว กรดอะมิโนเป็นหน่วยการสร้างพื้นฐานของสารชีวโมเลกุลเหล่านี้และมีทั้งหมด 20 ชนิดซึ่งแต่ละชนิดมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีโดยเฉพาะ พวกมันรวมตัวกันด้วยพันธะเปปไทด์

โครงสร้างรอง

ในโครงสร้างนี้โซ่เชิงเส้นของกรดอะมิโนนี้เริ่มพับโดยพันธะไฮโดรเจน มีโครงสร้างรองขั้นพื้นฐานที่สอง: เกลียว α , รูปเกลียว; และแผ่นพับ β เมื่อโซ่เชิงเส้นสองเส้นอยู่ในแนวขนาน

โครงสร้างตติยภูมิ

เกี่ยวข้องกับกองกำลังประเภทอื่น ๆ ที่ส่งผลในการพับเฉพาะของรูปร่างสามมิติ สายโซ่ R ของกรดอะมิโนที่ตักค้างซึ่งประกอบกันเป็นโครงสร้างของโปรตีนสามารถสร้างสะพานไดซัลไฟด์และส่วนที่ไม่ชอบน้ำของโปรตีนจะถูกจัดกลุ่มอยู่ด้านในในขณะที่ส่วนที่

ชอบน้ำต้องเผชิญกับน้ำ กองกำลัง van der Waals ทำหน้าที่เป็นโคลงของการโต้ตอบที่อธิบายไว้

โครงสร้างสี่

ประกอบด้วยหน่วยโปรตีนรวม เมื่อโปรตีนถูกทำลายทำให้สูญเสียโครงสร้าง quaternary, tertiary และ secondary ในขณะที่โปรตีนหลักยังคงไม่เปลี่ยนแปลง โปรตีนที่อุดมไปด้วยพันธะซัลไฟด์ (โครงสร้างระดับอุดมศึกษา) ให้ความต้านทานต่อการสูญเสียสภาพธรรมชาติมากขึ้น

ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ

ปัจจัยใดก็ตามที่ทำให้พันธะโควาเลนต์ที่ไม่เสถียรเกิดความเสถียรในการรักษาโครงสร้างดั้งเดิมของโปรตีนสามารถทำให้เกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติได้ ที่สำคัญที่สุดเราสามารถพูดถึง:

พีเอช

ที่ค่า pH ที่สูงมากไม่ว่าจะเป็นสื่อที่เป็นกรดหรือพื้นฐานโปรตีนอาจสูญเสียการกำหนดค่าสามมิติ ส่วนเกินของไอออน H^+ และ O^- ตรงกลางมันทำให้เกิดปฏิกิริยาของโปรตีน การเปลี่ยนแปลงรูปแบบไอออนนี้ทำให้เกิดการสูญเสียสภาพธรรมชาติ การเสื่อมสภาพโดย pH สามารถย้อนกลับได้ในบางกรณีและในบางกรณีไม่สามารถกลับคืนสภาพเดิมได้

อุณหภูมิ

การสูญเสียความร้อนเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ในสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมโดยเฉลี่ยโปรตีนจะเริ่มเสถียรที่อุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส เห็นได้ชัดว่าโปรตีนของสิ่งมีชีวิตที่ทนความร้อนสามารถทนต่อช่วงอุณหภูมิเหล่านี้ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเพิ่มขึ้นซึ่งส่งผลต่อพันธะไฮโดรเจนและพันธะที่ไม่ใช่โควาเลนต์อื่น ๆ ส่งผลให้สูญเสียโครงสร้างตติยภูมิ การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเหล่านี้นำไปสู่การลดลงของอัตราการเกิดปฏิกิริยาถ้าเรากำลังพูดถึงเอนไซม์

สารเคมี

สารโพลาร์ - ยูเรียที่มีความเข้มข้นสูงจะมีผลต่อพันธะไฮโดรเจน นอกจากนี้สารที่ไม่ใช่ขั้วก็มีผลเช่นเดียวกัน อย่างเช่น ผงซักฟอกสามารถทำให้โครงสร้างโปรตีนไม่เสถียร อย่างไรก็ตามมันไม่ได้เป็นกระบวนการที่ก้าวร้าวและส่วนใหญ่จะย้อนกลับได้

ตัวแทนลด

merc-mercaptoethanol (HOCH₂CH₂SH) เป็นสารเคมีที่มักใช้ในห้องปฏิบัติการเพื่อทำลายโปรตีน มีหน้าที่ลดสะพานไดซัลไฟด์ระหว่างกรดอะมิโนที่ตกค้าง มันสามารถสร้างความเสถียรให้โครงสร้างตติยภูมิหรือควอเทอร์นารีของโปรตีน สารลดอื่นที่มีหน้าที่คล้ายกันคือ dithiothreitol (DTT) นอกจากนี้ปัจจัยอื่น ๆ ที่มีส่วนทำให้สูญเสียโครงสร้างดั้งเดิมในโปรตีนคือโลหะหนักในระดับความเข้มข้นสูงและรังสีอัลตราไวโอเล็ต

เมื่อพบปัจจัยที่ทำให้เกิดการเสียสภาพจะส่งผลกระทบ

เมื่อการสูญเสียสภาพธรรมชาติเกิดขึ้นโปรตีนสูญเสียการทำงาน โปรตีนทำงานได้ดีที่สุดเมื่ออยู่ในสถานะดั้งเดิม การสูญเสียฟังก์ชันไม่ได้เกี่ยวข้องกับกระบวนการสูญเสียความสามารถเสมอไป การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยในโครงสร้างโปรตีนอาจนำไปสู่การสูญเสียการทำงานโดยไม่ทำให้โครงสร้างทั้งสามมิติไม่เสถียร โดยกระบวนการนี้อาจจะใช่หรือไม่ก็ได้ ในห้องปฏิบัติการหากมีการย้อนกลับเงื่อนไขโปรตีนอาจกลับสู่การกำหนดค่าเริ่มต้น

กลับคืนสู่สภาพธรรมชาติ

หนึ่งในการทดลองที่มีชื่อเสียงและข้อสรุปเกี่ยวกับ renaturation เป็นหลักฐานใน Ribonuclease A. จากงานวิจัยโดยการเพิ่มสารทำลายสภาพเช่นยูเรียหรือ or-mercaptoethanol โปรตีนจะถูกทำลายสภาพ ถ้าสารเหล่านี้ถูกกำจัดออกโปรตีนกลับสู่โครงสร้างดั้งเดิมและสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ 100% หนึ่งในข้อสรุปที่สำคัญที่สุดของการวิจัยนี้คือการแสดงให้เห็นถึงการทดลองว่าโครงสร้างสามมิติของโปรตีนได้รับจากโครงสร้างหลักของมัน

ในบางกรณีกระบวนการ denaturing นั้นกลับไม่ได้ทั้งหมด ตัวอย่างเช่นเมื่อเราปรุงไข่เราจะใช้ความร้อนกับโปรตีน (หลักคืออัลบูมิน) ที่ทำขึ้นสีขาวจะมีลักษณะที่เป็นของแข็งและสีขาว โดยสังหรณ์ใจเราสามารถสรุปได้ว่าแม้ว่าเราจะทำให้มันเย็นมันจะไม่กลับไปรูปแบบเริ่มต้น

ในกรณีส่วนใหญ่กระบวนการ denaturation จะมาพร้อมกับการสูญเสียความสามารถในการละลาย นอกจากนี้ยังลดความหนืดความเร็วการแพร่กระจายและตกผลึกได้ง่ายขึ้น

โปรตีนของที่เลี้ยง

โปรตีน Chaperone หรือ chaperonin มีหน้าที่ป้องกันการทำลายของโปรตีนอื่น ๆ พวกเขายังระงับปฏิกิริยาบางอย่างที่ไม่เพียงพอรหว่างโปรตีนเพื่อให้แน่ใจว่าการพับแบบเดียวกันนั้นถูกต้อง เมื่ออุณหภูมิของสื่อเพิ่มขึ้นโปรตีนเหล่านี้จะเพิ่มความเข้มข้นและกระทำโดยป้องกันการสูญเสียสภาพ

ของโปรตีนอื่น ๆ นี่คือเหตุผลที่พวกเขาถูกเรียกว่า “heat shock proteins” หรือ HSP สำหรับตัวย่อในภาษาอังกฤษ โปรตีนช็อกความร้อน) chaperoninas นั้นคล้ายกับกรงหรือกระบอกรูปที่ช่วยปกป้องโปรตีนที่อยู่ภายใน โปรตีนเหล่านี้ที่ตอบสนองต่อสถานการณ์ความเครียดของเซลล์ได้รับการรายงานในสิ่งมีชีวิตกลุ่มต่าง ๆ และได้รับการอนุรักษ์อย่างสูง chaperonins มีหลายชนิดและพวกมันถูกจำแนกตามน้ำหนักโมเลกุล

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 การระดมสมอง (Brainstorming)

การระดมสมองเป็นวิธีการที่มีคุณค่าอย่างมากในการสร้างความคิดใหม่ๆ โดยอาศัยความสัมพันธ์ภายในกลุ่ม ซึ่งการระดมสมองมีหลายรูปแบบและวิธีการมากมายในการรวบรวมข้อมูลที่ได้ ซึ่งจะเป็นการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยระดมจากบุคคลที่มีความรู้ ความชำนาญแต่ละจุดจากการทำงานที่ต่างๆ ภายในกระบวนการผลิตที่จะทำการศึกษา ซึ่งจุดมุ่งหมายในขั้นตอนนี้อยู่ที่ปริมาณของความคิดเห็นที่ได้รับเพื่อนำมาวิเคราะห์ความสำคัญด้วยเครื่องมืออื่นๆในขั้นต่อไป

2.4.2 แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram)

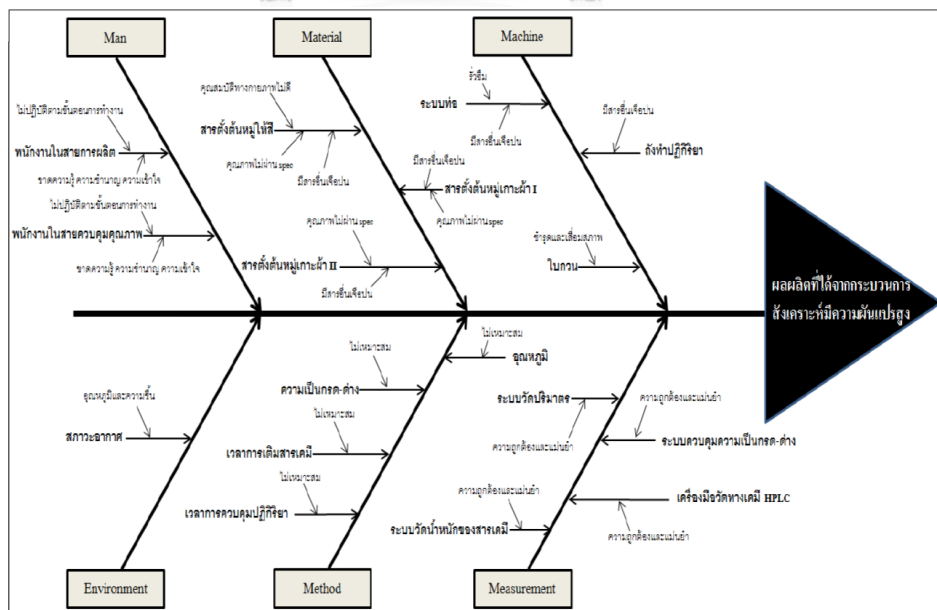
แผนภาพสาเหตุและผลกระทบเป็นแผนภาพที่แสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุ (Cause) ซึ่งทำให้คุณภาพเปลี่ยนแปลงกับผลที่เกิด (Effect) (Breyfogle, 1999) ได้รับการพัฒนาโดย Kaoru Ishikawa ในปีพ. ศ. 2486 และมักเรียกว่าแผนภาพอิชิกาวะ หรือเรียกอีกอย่างว่าแผนภาพก้างปลา เนื่องจากลักษณะที่ปรากฏโดยทั่วไปแล้วแผนภาพสาเหตุและผลจะใช้เพื่อระบุสาเหตุต่างๆอย่างเป็นระบบซึ่งอาจเป็นสาเหตุของปัญหา (หรือผลกระทบ) (Juran et al., 2005) ดังนั้นแผนภาพเหล่านี้จึงช่วยระบุว่าสาเหตุใดมีผลมากที่สุด แผนภาพสาเหตุและผลสามารถช่วยในการระบุสาเหตุที่ทำให้กระบวนการควบคุมไม่ได้ หรืออีกวิธีหนึ่งถ้ากระบวนการมีความเสถียรแผนภาพเหล่านี้จะต้องใช้ร่วมกันในการปรึกษาหารือในกลุ่มคนหลายๆความคิดมารวมกัน เพราะการละเว้นหรือมองข้ามปัจจัยบางอย่างไปจะก่อผลเสียในภายหลังได้ และอาจทำให้แก้ปัญหาที่ผิดจุด อีกทั้งยังเป็นแผนภาพที่สามารถช่วยตัดสินใจว่าสาเหตุใดที่จะตรวจสอบเพื่อปรับปรุงกระบวนการ การประยุกต์ใช้แผนภาพสาเหตุและผลกระทบหลัก ๆ มีอยู่สามประการ ได้แก่ การแจงนับรายการสาเหตุ (Cause Enumeration) การวิเคราะห์การกระจายตัวและความผันแปร (Dispersion Analysis) และการวิเคราะห์กระบวนการ (Process analysis) (Mitra, 2008)

การแจงนับรายการสาเหตุมักจะพัฒนาขึ้นโดยการประชุมระดมความคิดซึ่งมีการระบุสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด (ไม่ว่าจะอยู่ห่างไกลก็ตาม) เพื่อแสดงอิทธิพลของพวกเขาต่อปัญหา (หรือ

ผลกระทบ) ที่เป็นปัญหา ในการวิเคราะห์การกระจายตัวและความผันแปรแต่ละสาเหตุที่สำคัญจะได้รับการวิเคราะห์อย่างละเอียดโดยการตรวจสอบสาเหตุย่อยและผลกระทบที่มีต่อลักษณะคุณภาพ (หรือผลกระทบ) ที่เป็นปัญหา กระบวนการนี้จะทำซ้ำสำหรับแต่ละสาเหตุหลักตามลำดับความสำคัญ แผนภาพสาเหตุและผลช่วยให้เราวิเคราะห์สาเหตุของความแปรปรวนหรือการกระจาย เมื่อสร้างแผนภาพสาเหตุและผลสำหรับการวิเคราะห์กระบวนการเน้นที่การแสดงรายการสาเหตุตามลำดับที่ดำเนินการจริง กระบวนการนี้คล้ายกับการสร้างแผนภาพการไหลยกเว้นว่าแผนภาพสาเหตุและผลจะแสดงรายละเอียดสาเหตุที่มีอิทธิพลต่อลักษณะคุณภาพที่น่าสนใจในแต่ละขั้นตอนของกระบวนการ

โดยทั่วไปจะพิจารณาแยกสาเหตุของปัญหาออกเป็นหัวข้อหลัก 6 ปัจจัยหรือที่เรียกกันว่า 5M1E (ธนภัทร, 2559) โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ปัจจัยที่เกิดจากพนักงาน (Man)
- ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักรที่ใช้ในกระบวนการ (Machine)
- ปัจจัยที่เกิดจากระบบการวัด (Measurement)
- ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
- ปัจจัยที่เกิดจากขั้นตอนและวิธีการในการทำงาน (Method)
- ปัจจัยที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมในการทำงาน (Environment)



รูป 2-7 ตัวอย่างแผนผังก้างปลา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.4.3 ตารางแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

เป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองที่ทำการศึกษา (KPOV) กับ ปัจจัยนำเข้าที่สำคัญ (KPIV) ต่างๆ ที่ได้จากการระดมความคิดโดยใช้แผนภาพสาเหตุและผลหรือ แผนภูมิแก๊งปลา โดยจะวิเคราะห์ถึง ระดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญนี้ ที่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองต่างๆ ที่พิจารณาโดยใช้ ความรู้ความชำนาญและประสบการณ์ในการปฏิบัติงานของผู้ร่วมระดมความคิด ผลลัพธ์ที่สำคัญของการทำตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผลนี้ จะได้จาก แผนภูมิพาเรโต ซึ่งเรียงปัจจัยตามลำดับผล กระทบที่มีต่อปัญหาที่ทำการพิจารณา ทำให้สามารถที่จะพิจารณาเลือกปัจจัยนำเข้าที่สำคัญในระดับต้นๆ มาทำการแก้ไขก่อนหรือนำผลที่ได้มาใช้ในการประเมินแผนการควบคุมคุณภาพของกระบวนการผลิตได้ โดยวิธีการสร้างตารางความสัมพันธ์ระหว่างเหตุและผล มีดังนี้

1. ศึกษารายละเอียดของสาเหตุและปัจจัยทั้งหมดที่ได้จากการระดมสมองของทีมงาน
2. นำสาเหตุและปัจจัยที่ได้จากการระดมสมองของทีมงานทั้งหมดใส่ในตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล จากนั้นให้สมาชิกในคณะทำงานลงคะแนนให้กับทุกปัจจัย โดยการให้คะแนนขึ้นกับความรู้และความชำนาญของสมาชิกในแต่ละคนที่มีต่อสาเหตุและปัจจัยต่างๆ ที่สามารถส่งผลถึงปัญหาที่พบ ซึ่งการลงคะแนนของทีมงานแต่ละคนเป็นอิสระต่อกัน และเกณฑ์ในการลงคะแนนจะมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 9 คะแนน ดังนี้

1	คะแนน คือ	ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง
2-4	คะแนน คือ	มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองน้อย
5-7	คะแนน คือ	มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองปานกลาง
8-10	คะแนน คือ	มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนองมาก
3. รวบรวมคะแนนและจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยใช้แผนภูมิพาเรโตช่วยในการวิเคราะห์ผลให้อัตราเป็นตัวเลข (ความสัมพันธ์ร่วม) แสดงอิทธิพลของปัจจัยนำเข้าแต่ละตัวที่มีต่อตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวภายใต้กรอบในตารางที่พิจารณา โดยการกำหนดเกณฑ์จะขึ้นกับประสบการณ์และความรู้ของคณะทำงาน

2.4.4 ผังพาเรโต (Pareto Diagram)

คือแผนภูมิแท่งที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าของข้อมูลที่แสดงโดยใช้แกนตั้งกับประเภทของข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาซึ่งแสดงโดยใช้แกนนอนและเรียงลำดับตามข้อมูลที่รวมมามากไปน้อย ทำให้สามารถมองเห็นปัญหาได้อย่างชัดเจนกว่าการนำเสนอข้อมูลในรูปของตารางที่มีค่าเป็นตัวเลขเพียงอย่างเดียว แสดงถึงระดับความสำคัญของแหล่งที่มาของปัญหาในกระบวนการผลิต โดยหลักในการพิจารณาระดับผลกระทบของแหล่งที่มาของปัญหาคือ หลัก 20:80 หมายถึง ลักษณะปัญหาของกระบวนการผลิตจะมีประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ (Vital Few) ที่เป็นแหล่งที่มาของปัญหาที่มีผลกระทบเป็นส่วนมากต่อปัญหาทางคุณภาพที่ทำการศึกษา ในขณะที่จำนวนลักษณะปัญหาของกระบวนการผลิตส่วนใหญ่จำนวน 80 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ (Trivial Many) จะเป็นแหล่งที่มาของปัญหาที่มีผลกระทบเป็นส่วนที่น้อยกว่าต่อปัญหาที่ทำการศึกษา เมื่อนำแผนภูมิพาเรโตมาใช้จะทำให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่ และเป็นปัญหาสำคัญที่สุดโดยการเรียงลำดับ จากนั้นนำปัญหาหรือสาเหตุเหล่านั้นมาจัดหมวดหมู่หรือแบ่งแยกประเภทแล้วเรียงลำดับความสำคัญจากน้อยไปหามาก เพื่อแสดงให้เห็นว่าแต่ละปัญหามีอัตราส่วนเท่าใดเมื่อเทียบกับปัญหาทั้งหมด โดยแสดงด้วยกราฟแท่ง กราฟแท่งที่สูงที่สุด คือ ปัญหาที่เกิดขึ้นร่วมกันมากที่สุด (Most Common Problem) ซึ่งจะได้นำไปสู่การหาสาเหตุของปัญหา และกำหนดมาตรการในการแก้ไขสาเหตุของปัญหานั้น ๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว เมื่อกำจัดสาเหตุของปัญหาหนึ่งไปแล้ว จะทำให้ปัญหาอื่น ๆ มีแนวโน้มลดลงไปด้วย เมื่อไรจึงจะใช้แผนผังพาเรโต

1. เมื่อต้องการกำหนดสาเหตุที่สำคัญ ของปัญหาเพื่อแยกออกมาจากสาเหตุอื่น ๆ
2. เมื่อต้องการยืนยันผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการแก้ปัญหา โดยเปรียบเทียบก่อนปรับปรุง กับหลังปรับปรุง
3. เมื่อต้องการค้นหาปัญหาและหาคำตอบในการดำเนินกิจกรรม แก้ปัญหา

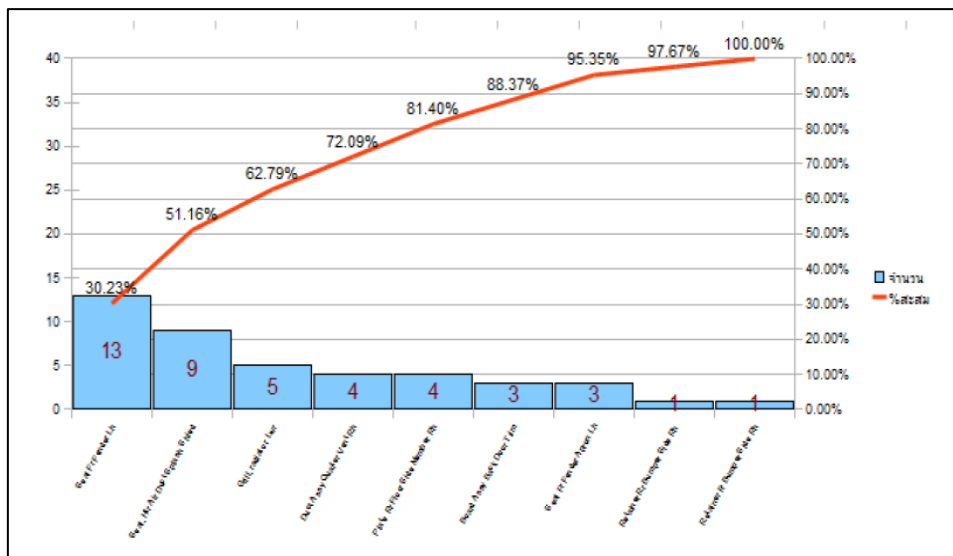
ขั้นตอนในการสร้างแผนภูมิพาเรโต

- กำหนดปัญหาและคุณลักษณะของกระบวนการที่จะทำการศึกษาให้ชัดเจน
- กำหนดช่วงระยะเวลาสำหรับการเก็บข้อมูลการศึกษา
- นับจำนวนความถี่ในการเกิดปัญหาคุณลักษณะ

ประโยชน์ของแผนผัง

- o สามารถบ่งชี้ให้เห็นว่าหัวข้อใดเป็นปัญหามากที่สุด

- สามารถเข้าใจว่าแต่ละหัวข้อมีอัตราส่วนเป็นเท่าใดในส่วนทั้งหมด
- ใช้กราฟแท่งบ่งชี้ขนาดของปัญหา ทำให้โน้มน้าวจิตใจได้ดี
- ไม่ต้องใช้การคำนวณที่ยุ่งยาก ก็สามารถจัดทำได้และใช้ในการเปรียบเทียบผลได้
- ใช้สำหรับการตั้งเป้าหมาย ทั้งตัวเลขและปัญหา



รูป 2-8 ตัวอย่างแผนผังพาเรโต

2.4.5 การวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของปัจจัย (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) (กิตติศักดิ์, 2008)

การวิเคราะห์ข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต (Failure Mode and Effect Analysis) เป็นการศึกษาถึงความล้มเหลวที่อาจเกิดขึ้น เพื่อระบุผลเสียหายที่เกิดความล้มเหลวนั้นโดยที่จุดประสงค์หลักของ FMEA คือเพื่อกำหนดแง่มุมของการออกแบบผลิตภัณฑ์ การผลิตหรือการปฏิบัติงาน ซึ่งมีความวิกฤตต่อการเกิดความล้มเหลวนั้น โดยการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ ซึ่งเป็นเทคนิคทางวิศวกรรมตัวหนึ่งที่ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการศึกษา และช่วยวิเคราะห์ถึงข้อบกพร่องที่อาจเกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นไปแล้ว โดยในกระบวนการดำเนินงานสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือความเสี่ยงของปัจจัยที่สามารถส่งผลกระทบทำให้เกิดปัญหาขึ้นมากที่สุด และดำเนินการติดตามผลหรือแผนการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการลดความเสี่ยงนั้นๆ ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบของปัจจัยนั้นๆ สามารถเริ่มทำได้ตั้งแต่ขั้นตอนของการออกแบบ รวมไปถึงสามารถทำ

ได้ในขั้นตอนของการคัดเลือกหาปัจจัยที่มีโอกาสส่งผลทำให้เกิดปัญหาได้ด้วยเช่นกัน (Automotive Industry Action Group: AIAG, 2001 อ้างถึงใน กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ)(กิตติศักดิ์, 2551)

แนวความคิดของ FMEA ในการดำเนินการ FMEA ให้มีประสิทธิภาพผลสูงที่สุดนั้น จะต้องมีการดำเนินการตามหลักความคิดพื้นฐาน 3 ประการคือ

- 1) การดำเนินการโดยคณะทำงาน
- 2) การดำเนินการผ่านการวิเคราะห์หน้าที่ของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ
- 3) การดำเนินการโดยเน้นการปรับปรุงไม่สิ้นสุด

2.4.6 การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Analysis)

(Montgomery, 1976) ได้นิยามไว้ว่า ความสามารถของกระบวนการ หมายถึง ความสม่ำเสมอ (Uniformity) ของกระบวนการซึ่งจะทำให้การวัดได้ค่าความผันแปรของผลที่ได้ (Output) จากกระบวนการโดยจำแนกออกเป็น 2 ประเภท คือ ความผันแปรโดยธรรมชาติในช่วงระยะเวลาสั้นๆ และความผันแปรตลอดช่วงเวลา

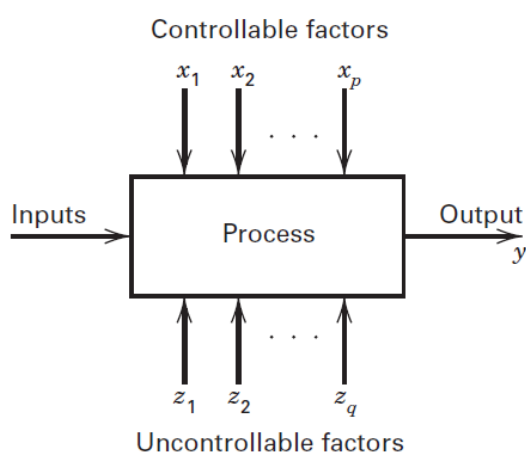
ความหมายของความสามารถของกระบวนการ (Process Capability)

ความสามารถของกระบวนการเป็นการแสดงถึงความสามารถของกระบวนการในการผลิตสินค้าได้ตรงตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งกำหนดในลักษณะของขีดจำกัดข้อกำหนด (Specification Limits) หากพารามิเตอร์ที่สนใจเป็นข้อมูลแบบต่อเนื่อง กระบวนการที่มีความสามารถที่ดีจะหมายถึงการที่กระบวนการนั้นสามารถผลิตชิ้นงานต่าง ๆ ให้มีค่าพารามิเตอร์ที่มีความผันแปรน้อยและมีค่าเฉลี่ยเข้าใกล้เป้าหมาย ซึ่งจะทำให้กระบวนการนั้นมีสัดส่วนของเสียที่น้อย แสดงว่ากระบวนการที่สองมีความสามารถที่ดีที่สุดจากทั้งสามกระบวนการ เนื่องจากมีระดับความผันแปรน้อยกว่าและมีค่าเฉลี่ยที่ตรงเป้าหมาย หากพารามิเตอร์ที่สนใจเป็นข้อมูลแบบหน่วยนับ เช่น เป็นข้อมูลที่เป็นผลของการตรวจสอบหาข้อบกพร่องบนชิ้นงานว่ามีข้อบกพร่องหรือไม่มีข้อบกพร่องเป็นจำนวนเท่าใด กระบวนการผลิตที่มีความสามารถดี จะเป็นกระบวนการที่ผลิตงานที่มีจำนวนของเสียน้อย จำนวนข้อบกพร่องน้อย และอัตราผลผลิตที่ดีที่มาก

2.4.7 การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ(Design of Experiment: DOE) (ปารเมศ, 2545)

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) เป็นกระบวนการวางแผนการทดลองและนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ด้วยหลักการทางสถิติและหาข้อสรุปว่าปัจจัยนำเข้า (Input Variable) ไตมีผลต่อสิ่งใดที่ให้ความสนใจในผลิตภัณฑ์หรือสิ่งทีออกมาจากระบบ

(Output Response) (ปารเมศ, 2545) โดยทั่วไปการทดลองจะถูกใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ โดยส่วนใหญ่ลักษณะของกระบวนการเริ่มจากการรวมกันของปัจจัยป้อนเข้า (Input) อันประกอบด้วย เครื่องจักร คน วิธีการ วัตถุดิบ และทรัพยากรอื่น ๆ ผ่านเข้าไปยังกระบวนการและปัจจัยป้อนเข้าเหล่านั้นจะเปลี่ยนรูปออกมาเป็นผลลัพธ์ (Output) ดังรูปที่ 2-9



รูป 2-9 แสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

การออกแบบการทดลอง (Anderson & McLean, 2018) เป็นการตรวจสอบดูว่า ปัจจัย (Factor) ใดหรือตัวแปรใดที่มีผลต่อสิ่งที่สนใจ (Response) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) คือ พิสูจน์ข้อเท็จจริงหรือความเชื่อหรือทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต และเพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration) คือ การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการ

ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

1. การนิยามปัญหา (Recognition and Statement of Problem) เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการเรียนรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปยัง วัตถุประสงค์ของการทดลอง

2. การเลือกปัจจัยและระดับของปัจจัย (Choice of Factors Levels and Ranges) เป็นการใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์จากงานวิจัยต่าง ๆ เพื่อระบุว่าปัจจัยบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลองและในแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในทดลองอย่างไร สุดท้ายคือระบุว่าจะใช้รูปแบบกำหนด แบบสุ่ม หรือแบบผสม

- แบบกำหนด (Fixed Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
- แบบสุ่ม (Random Effect) หมายถึงระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน
- แบบผสม (Mixed Effect) หมายถึงการผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดและแบบสุ่ม

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Selection of Response Variable) ในการเลือกตัวแปรต้องทำการเลือกตัวแปรที่ให้ข้อมูลที่มีประโยชน์ในการศึกษาและการวัดค่านั้นจะต้องมีความแม่นยำและถูกต้องด้วย

4. การเลือกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design) เมื่อกำหนด ทรีทเมนต์และตัวแปรตอบสนองแล้วต้องทำการตัดสินใจเกี่ยวกับขนาดของการทดลองซึ่งหมายถึงจำนวนซ้ำของการทดลอง ความเหมาะสม ข้อจำกัดในการสุ่มและการบล็อกปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลองสำหรับการเลือกปัจจัย

5. ดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment) ในระหว่างดำเนินการทดลอง ต้องศึกษาและดูแลอย่างใกล้ชิด ปฏิบัติตามหลักการที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of Data) จะใช้ความรู้ทางด้านสถิติเข้ามาวิเคราะห์และสรุปผล รวมทั้งตัดสินใจความถูกต้องของข้อมูลที่เกิดขึ้น

7. สรุปผลและข้อเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations) เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลแล้ว จะต้องสรุปผลการวิเคราะห์ อาจแสดงในรูปกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ และให้ข้อเสนอแนะเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตให้ดีขึ้น

หลักพื้นฐานที่สำคัญสำหรับการออกแบบการทดลอง (ปารเมศ, 2545) มี 3 ประการ ดังนี้

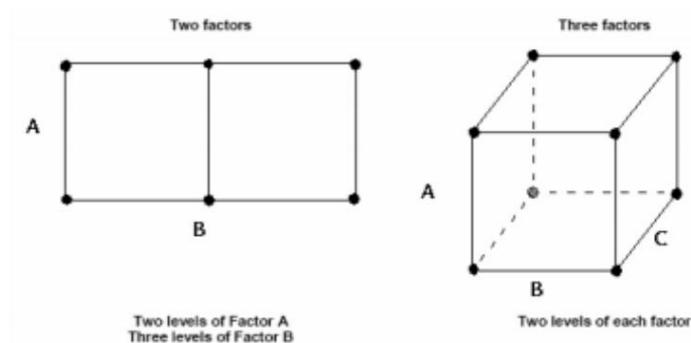
1. เปรียบเทียบ (replication) หมายถึง การทำการทดลองซ้ำ เป็นการทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของผิดพลาดจากการทดลองได้ และทำให้สามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการทดลอง

2. แรนดอมไมเซชัน (randomization) หมายถึง การทดลองที่ใช้วัสดุและลำดับของการทดลองเป็นแบบสุ่ม เพื่อลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจส่งผลต่อการทดลอง

3. บล็อกกิง (blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้เพิ่มความเที่ยงตรงหรือลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจภายในบล็อกเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

การออกแบบเพื่อการคัดเลือก (screening design)

แนวคิดของ โสภิตา ท่วมมี(โสภิตา, 2550) ซึ่งได้มีการศึกษาการลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง โดยการทดลองดังกล่าวนี้ ได้ออกแบบการทดลองออกเป็นสองส่วน ได้แก่ การทดลองเพื่อคัดเลือกปัจจัย (Screening Factor) และการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ในงานพัฒนากระบวนการและงานการผลิตส่วนมาก มีตัวแปรจำนวนมากที่มีแนวโน้มว่าจะมีส่วนในการปรับปรุงการคัดเลือกเป็นการลดจำนวนตัวแปรเหล่านี้ให้มีจำนวนน้อยลงโดยคัดเลือกตัวแปรที่มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดจำนวนตัวแปรนี้ทำให้สามารถจะพิจารณาเฉพาะที่ตัวแปรที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเท่านั้นได้ หรือ พิจารณาตามหลักการความสำคัญจำนวนน้อย “vital few” การคัดเลือกอาจจะสามารถทำได้ถึงการหาค่าที่เหมาะสม (optimal) ของตัวแปรนั้นๆรวมทั้งทำการทดลองเพื่อหาค่าที่ดีที่สุด (optimization) เพื่อบอกค่าตอบสนอง (response) มีสมการความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์เป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้ง การออกแบบการทดลองแบบ full factorial ในการทดลองแบบ full factorial ค่าตอบสนอง (response) จะถูกวัดค่าที่ทุกๆเงื่อนไขของทุกค่าระดับปัจจัยที่มีในการทดลองโดยเงื่อนไขการทดลอง (combination of factor levels) เป็นเงื่อนไขที่กำหนดให้ทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนองโดยที่เงื่อนไขการทดลองแต่ละอันจะเรียกว่ารัน (run) และมีการทำการทดลองเพื่อวัดค่าตอบสนองและชุดข้อมูลทั้งหมดในทุกรันจะเรียกว่า แบบการทดลอง (design) ในรูปภาพด้านล่างนี้เป็นรูปแสดงตัวแบบของการทดลองแบบ 2 และ 3 ปัจจัยโดยจุดจะเป็นแสดงถึงเงื่อนไขการทดลอง (combination) แต่ละอันของการทดลองตัวอย่างเช่น ในตัวแบบ 2 ปัจจัย (two-factor design) จุดที่มุมล่างด้านซ้ายและรันของการทดลองที่มีค่าระดับปัจจัย A เป็นค่าต่ำ (low) และ ค่าระดับปัจจัย B เป็นราคาต่ำเช่นกัน ดังรูปที่ 2-10



รูป 2-10 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial design)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลจะสามารถทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยที่มีต่อกระบวนการและเกิดขึ้นพร้อมๆกันได้ เมื่อมีการทำการทดลอง ควรทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยไปพร้อมๆกันมากกว่าทำการเปลี่ยนค่าระดับปัจจัยตัวใดตัวหนึ่งเพราะจะทำให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าทั้งในเรื่องการประหยัดเวลาและต้นทุน และยังสามารถวิเคราะห์เรื่องอิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างปัจจัยได้ด้วย โดยอิทธิพลร่วม (interaction) คือผลของการที่ปัจจัยร่วมกันที่มีอยู่ในหลายๆกระบวนการ ถ้าไม่ได้ทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลอาจจะไม่เห็นผลของอิทธิพลร่วม (interaction) ได้ชัดเจนนัก

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ (two-level factorial design)

ในตัวแบบของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับ two-level factorial design ในทุกๆการทดลองทุกๆปัจจัยจะมีค่าระดับเพียงแค่ 2 ระดับเท่านั้น การทดลองแต่ละรันจะมีทุกๆค่าระดับของทุกๆปัจจัยถึงแม้ว่าตัวแบบ two-level factorial design จะไม่สามารถทำการทดลองที่ค่าปัจจัยย่าน (range) กว้างๆ มากได้แต่ก็สามารถให้สาระข้อมูลที่มีประโยชน์ได้โดยที่จำนวนรันไม่มากนักต่อหนึ่งปัจจัยและเพราะว่า two-level factorial design สามารถที่จะแสดงค่าแนวโน้มได้จึงสามารถนำมาใช้เพื่อนำไปเป็นแนวทางในการสร้างการทดลองต่อไป ตัวอย่างเช่น เมื่อต้องการที่จะทำการทดลองในย่านที่กว้างขึ้นซึ่งคุณมีสมมติฐานเบื้องต้นว่าจะมีค่าที่ดีที่สุดอยู่อาจใช้ตัวแบบแฟคทอเรียล (factorial) เพิ่มเติมจากจุดนี้โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบ central composite design การออกแบบการทดลองแบบ general full factorial ในตัวแบบของ general full factorial การทดลองแต่ละครั้งในแต่ละปัจจัยจะมีค่าระดับหลายๆค่า ตัวอย่างเช่นปัจจัย A มี 2 ระดับ ปัจจัย B มี 3 ระดับ และปัจจัย C มี 5 ระดับ การทดลองในทุกรันจะทำครบทุกค่าระดับของทุกปัจจัย ตัวแบบ general

full factorial อาจจะนำไปใช้ในการทดลองขนาดเล็กเพื่อทำการคัดเลือกปัจจัย (screening) หรือเพื่อทำการหาค่าที่ดีที่สุด (optimization)

การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเชิงสัดส่วน (fractional factorial design)

ในการทดลองแบบ full factorial design ค่าตอบสนองจะถูกวัดค่าในทุกๆเงื่อนไขการทดลองซึ่งจะเป็นทุกๆค่าระดับของทุกปัจจัยซึ่งอาจจะต้องมีการทำการทดลองจำนวนมากครั้ง ตัวอย่างเช่น การทดลองของ two-level full factorial design ของ 6 ปัจจัยอย่างน้อยต้องมีการทดลองจำนวน 64 รัน หรือกรณีที่มี 9 ปัจจัยจะมีการทดลองอย่างน้อย 512 รัน เพื่อเป็นการประหยัดเวลาและต้นทุน อาจทำการออกแบบการทดลองให้มีการทำการทดลองเฉพาะบางเงื่อนไข ตัวแบบ factorial design ที่มีการทดลองไม่ครบทุกเงื่อนไขนี้เรียกว่า fractional factorial design โปรแกรม Minitab สามารถสร้างตัวแบบ fractional factorial design ได้จนถึงจำนวนปัจจัย 15 ตัว ต่อหนึ่งการทดลอง

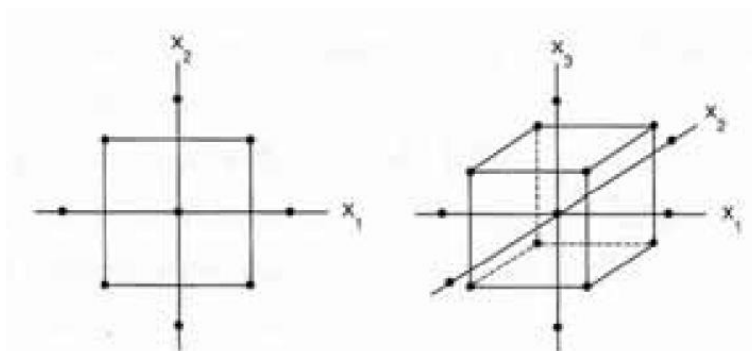
โดย วิธี Fraction factorial design มีความสำคัญอย่างมากในการทดลองเพื่อการคัดเลือกปัจจัย (screening) เพราะว่ามีผลลดจำนวนรันลงจนเหลือขนาดการทดลองที่สามารถทำได้จริง รันที่ถูกเลือกมาทำการทดลองเป็นรันที่อยู่ในชุดการทดลองของตัวแบบ full factorial design ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้ทำการทดลองครบทุกเงื่อนไขของทุกปัจจัยจะทำให้เกิดผลอย่างหนึ่งซึ่งเรียกว่า คอนฟาวด์ (confounded) ซึ่งคอนฟาวด์นี้หมายถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถทำการประเมินค่าแยกออกมา ได้เดี่ยว ๆ และอาจเรียกว่าเป็น aliased โดย Minitab จะแสดงตารางของ alias ที่อยู่ในรูปแบบของการคอนฟาวด์เพราะว่าเรื่องของคอนฟาวด์ทำให้อิทธิพล (effects) บางตัวไม่สามารถหาค่าได้ทำให้การเลือกการทำ fractional factorial ต้องเลือกส่วนที่จะมาทำให้ถูกต้องเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ใช้งานได้ การเลือกส่วนการทดลองที่ดีที่สุด (best fraction) บางครั้งอาจจะต้องใช้ความรู้เฉพาะเกี่ยวกับกระบวนการและผลิตภัณฑ์เพื่อมาตัดสินใจด้วย

การออกแบบการทดลองส่วนผสมกลาง (central composite design; CCD)

การออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางเป็นหนึ่งในวิธีการทดลองเพื่อสร้างสมการทางคณิตศาสตร์ในการหาพื้นผิวผลตอบที่นิยมใช้เพื่อหากระบวนการที่เหมาะสม โดยทั่วไป จะประกอบด้วย 3 ส่วนได้แก่ 1) ส่วนแฟคทอเรียลจำนวน 2^k รัน 2) ส่วนระยะห่างจากจุดศูนย์กลางการทดลองในแนวแกนด้วยระยะ α จำนวน 2^k รัน และ 3) ส่วนการทดลองที่จุดศูนย์กลางการทดลอง (center point of design; c) จำนวน n_c รัน ดังนั้นจำนวนครั้งในการทดลองของการ

ออกแบบการทดลองส่วนผสมกลางจึงเท่ากับ $2^k+2k+nc$ โดยที่ k คือจำนวนปัจจัยที่สนใจ
รูปแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลางแสดงดังรูปที่ 2-11





รูป 2-11 การออกแบบการทดลองส่วนผลสมกลางสำหรับ 2 และ 3 ปัจจัย

การออกแบบการทดลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Design)

ได้กล่าวถึงวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology; RSM) ว่าเป็น การรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \quad (1)$$

โดยกำหนดให้ปัจจัยนั้นแทนค่าด้วย x และ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง ถ้ากำหนดว่า $E(y) = f(x_1, x_2) = \mu$ ดังนั้น สามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\mu = f(x_1, x_2) \quad (2)$$

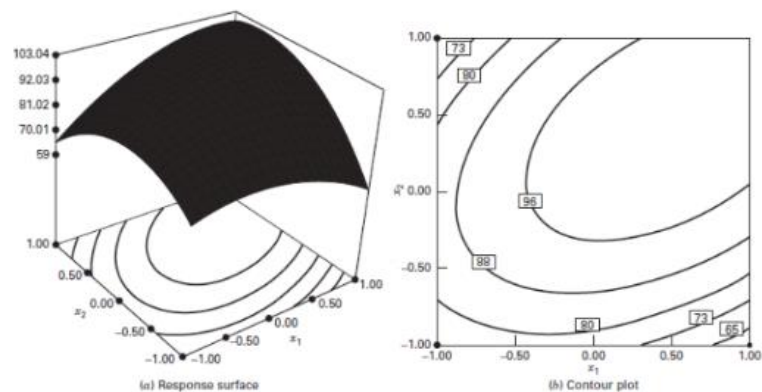
ซึ่งจะเรียกว่า “พื้นผิวตอบสนอง (response surface)” โดยส่วนใหญ่จะแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปของกราฟิกโดยที่ μ จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองเห็นรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งอาจจะพล็อตเส้นโครงร่าง (contour plot) ของพื้นผิวตอบสนอง โดยที่ปัญหาในส่วนใหญ่จะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ โดยในขั้นแรก จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่ใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระอาจจะเป็น แบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้เป็นแบบจำลองกำลังหนึ่งดังสมการ

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (3)$$

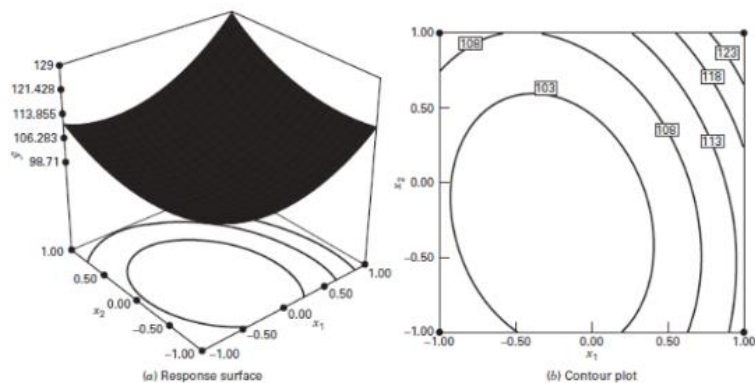
ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองกำลังหนึ่งหรือแบบจำลองกำลังสองในการหาผลตอบ แต่แบบจำลองทั้งสองชนิดไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอด

พื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจมีขนาดใหญ่ การออกแบบพื้นผิวผลตอบมีวิธีการที่นำมาใช้ในการหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ วิธีการกำลังสองน้อยสุด การป็นด้วยทางชั้น การออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่หนึ่ง และการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สอง ซึ่งการออกแบบสำหรับพิตแบบจำลองอันดับที่สองนี้เป็นการเน้นไปที่การสร้างแบบจำลองพหุนามของผลตอบ

การออกแบบนี้ใช้สำหรับการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองตามต้องการ ซึ่งระดับปัจจัยที่ใช้ทดสอบจะใช้มากกว่า 2 ระดับ การทดลองนี้ได้แก่ แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) และแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน การทดลองที่มากกว่าสองระดับจะสามารถเห็นจุดที่ตัวแปรตอบสนองมีค่าสูงที่สุดหรือต่ำที่สุดได้ดังรูป ที่ 2-12 และ 2-13 หรือที่ค่าตัวแปรตอบสนองที่ระดับที่ต้องการได้



รูป 2-12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าสูงสุด

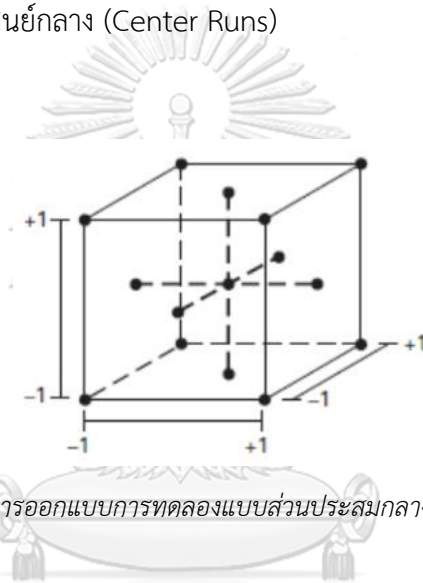


รูป 2-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองที่มีค่าต่ำสุด

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางนั้นเหมาะสำหรับการสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นโพลีโนเมียลกำลังสอง (Second-order Model) ซึ่งจะประกอบด้วยการทดลอง 3 ส่วนด้วยกันได้แก่

- 1) ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล 2^k (Factorial Runs) หรือแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{k-p}
- 2) ส่วนของจุดแกน (Axial Runs)
- 3) ส่วนของจุดศูนย์กลาง (Center Runs)



รูป 2-14 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางกรณี 3 ปัจจัย

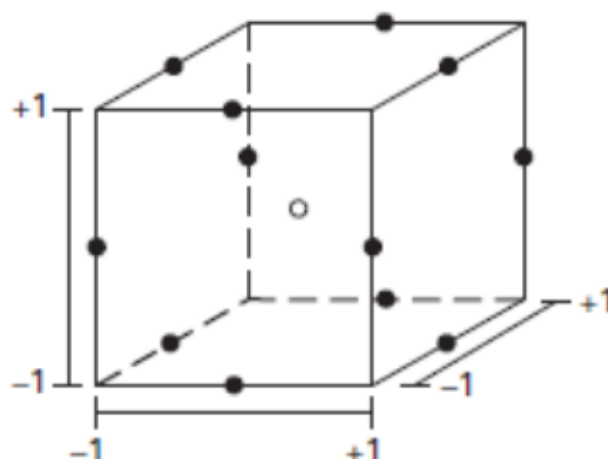
การทดลองแฟคทอเรียลจะทดลองอยู่ที่ระดับ +1 และ -1 ในส่วนของจุดศูนย์กลางใช้ระดับการทดลอง 0 ส่วนการทดลองที่ส่วนของจุดแกนจะอยู่ที่ระดับ $+\alpha$ และ $-\alpha$ โดยสามารถแสดงค่า α ได้ตามตารางที่ 2-1 ดังนี้

ตาราง 2-1 ค่า α ของการการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางตั้งแต่ 2-6 ปัจจัย

จำนวนปัจจัย	ส่วนการทดลองแฟคทอเรียล	ค่า α
2	2^2	1.414
3	2^3	1.682
4	2^4	2.000
5	2^5	2.378
5	2^{5-1}	2.000
6	2^6	2.828
6	2^{6-1}	2.378

การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design)

การออกแบบการทดลองแบบนี้จะใช้สำหรับการออกแบบการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยมากกว่า 3 ปัจจัยขึ้นไป และถูกทดลองที่ 3 ระดับ โดยจะสร้างตัวแบบที่มีลักษณะเป็นพอลิโนเมียลกำลังสอง ซึ่งคอมบินเนชันของการทดลองจะประกอบด้วย การทดลองที่จุดกึ่งกลาง (Midpoints) ของแต่ละด้านและที่จุดศูนย์กลางของตัวแบบดังแสดงในรูปที่ 2-15



รูป 2-15 การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนกรณี 3 ปัจจัย

ตาราง 2-2 เมทริกซ์การทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนกรณีมี 3 ปัจจัย

CCD				Box-Behnken			
Rep	x_1	x_2	x_3	Rep	x_1	x_2	x_3
1	-1	-1	-1	1	-1	-1	0
1	1	-1	-1	1	1	-1	0
1	-1	1	-1	1	-1	1	0
1	1	1	-1	1	1	1	0
1	-1	-1	1	1	-1	0	-1
1	1	-1	1	1	1	0	-1
1	-1	1	1	1	-1	0	1
1	1	1	1	1	1	0	1
1	-1.682	0	0	1	0	-1	-1
1	1.682	0	0	1	0	1	-1
1	0	-1.682	0	1	0	-1	1
1	0	1.682	0	1	0	1	1
1	0	0	-1.682	3	0	0	0
1	0	0	1.682				
6	0	0	0				
Total Runs = 20				Total Runs = 15			

จากตารางที่ 2-2 เป็นการแสดงระดับการทดลองและจำนวนการทดลองของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนกรณีมี 3 ปัจจัย ซึ่งจะเห็นได้ว่าบ็อกซ์-เบห์นเคนจะมีการทดลองที่น้อยกว่าแบบส่วนประสมกลาง และในแต่ละปัจจัยจำนวนการทดลองของวิธีทั้งสองไม่เท่ากันจะใช้วิธีการทดลองแบบใดต้องพิจารณาความเหมาะสมที่สุดในการใช้งาน ในการใช้งานของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนมีคุณสมบัติการทำนายสมการที่แตกต่างกันตามปัจจัยซึ่งสามารถสรุปความแตกต่างของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนได้ตามตารางที่ 2-3 ดังนี้

ตาราง 2-3 สรุปคุณสมบัติของการทดลองแบบส่วนประสมกลางและแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

ชนิด	สรุป
การทดลองแบบส่วนประสมกลาง	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นการออกแบบการทดลองที่มีคุณภาพการทำนายสูง แต่ต้องการปัจจัยที่มีช่วงการออกแบบการทดลองในส่วนของแฟคทอเรียล หมายเหตุ : เป็นไปได้ที่การออกแบบส่วนประสมกลางจะถูกล้อมรั้งก่อนจะเริ่มการทดลองในส่วนของแฟคทอเรียลว่า ช่องว่างของปัจจัยสามารถลดลงได้รวมไปถึงทำให้เชื่อว่า $\pm\alpha$ ของแต่ละรหัสปัจจัยสอดคล้องกับของระดับปัจจัยที่เหมาะสม - ต้องการ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย
การทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน	<ul style="list-style-type: none"> - เป็นการออกแบบที่มีทริทเมนต์คอมบินชันที่น้อยกว่าการทดลองแบบส่วนประสมกลางในกรณีที่มี 3 และ 4 ปัจจัย - การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบการทดลองที่หมุนได้แต่พื้นที่ของบ็อกซ์-เบห์นเคนจะมีคุณภาพการทำนายไม่ดี - มุมที่หายไปอาจมีประโยชน์เมื่อการทดลองต้องการหลีกเลี่ยงทริทเมนต์คอมบินชันที่สูงที่สุด - มีความสามารถในการทำนายสมการใกล้เคียงกับการทดลองแบบส่วนประสมกลางแบบเฟซเซ็นเตอร์ (Central Composite Face-Centered, CCF) - ต้องการ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย

การควบคุมปัจจัยรบกวน

การทดลองใดๆ ล้วนแต่มีปัจจัยที่มารบกวนหรือเป็นปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ โดยปัจจัยเหล่านั้นที่จะมีผลกระทบหรือส่งผลเล็กน้อยต่อคุณภาพ ซึ่งในลักษณะปกติจะไม่สามารถควบคุมได้เนื่องด้วยข้อจำกัดทางกายภาพและความล้ำสมัยทางเทคโนโลยี

ปัจจัยรบกวนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

1. สิ่งรบกวนภายใน เกิดจากความเสื่อมสภาพจากชิ้นงาน หรือเครื่องจาก หรือเครื่องมือที่ถูกใช้งานเป็นเวลานาน
2. สิ่งรบกวนภายนอก เกิดจากความผันแปรในสภาพแวดล้อมของกระบวนการผลิต เช่น อากาศ, ความชื้น, อุณหภูมิ, ความดัน
3. สิ่งรบกวนอยู่ภายในชิ้นงานแต่ละชิ้น เป็นความไม่สมบูรณ์ในระบบกระบวนการผลิต

โดยกระบวนการผลิตและชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์นั้นสามารถจะได้รับอิทธิพลมาจากทั้ง 3 ปัจจัยรบกวน ซึ่งในการออกแบบการทดลองเพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตที่ผลิตชิ้นงานได้นั้น โดยกำหนดค่าปัจจัยที่สามารถควบคุมได้และไม่ให้มีผลกระทบจากปัจจัยรบกวนใด

ทั้งสิ้น ซึ่งแนวคิดนี้จะไม่พยายามวิเคราะห์หรือหาสาเหตุของความผันแปรอันเนื่องจากปัจจัยรบกวนนั้นๆ แต่จะอาศัยวิธีการลดผลกระทบอันเนื่องมาจากสาเหตุเหล่านั้นๆ แทน เนื่องด้วยมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์มากกว่านั่นเอง

2.4.8 มิติการออกแบบการทดลอง (Resolution : R) (โรจนโรวรรณ, 2554)

มิติการออกแบบการทดลอง คือ ระดับความละเอียดในผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ หาได้จากความยาวของคู่แฝดแฝง (Alias) ที่สั้นที่สุด หมายความว่าผลการวิเคราะห์ที่ได้มีความน่าเชื่อถือมากแค่ไหน ซึ่งมีมิติการออกแบบการทดลองมากกว่า ย่อมให้ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์มากกว่า นั่นเพราะได้เฉพาะอิทธิพลร่วม (Interaction) ระดับสูงๆ แทนอิทธิพลหลัก (Main effect) ในการออกแบบ ทำให้โอกาสที่การปนที่ไม่สามารถแยกแยะได้ (Confound) ที่พบในการวิเคราะห์มีโอกาสเป็นของอิทธิพลหลัก มากกว่าอิทธิพลร่วม การเลือกระดับมิติการออกแบบการทดลองต่ำ หมายความว่าผู้ทดลองใช้ค่า p มากและเข้าใกล้ปัจจัย k มาก ทำให้ลดจำนวนการทดลองลงและต้องใช้อิทธิพลร่วมระดับต่ำในการแทนอิทธิพลหลักบางตัว

R_{III} เป็นระดับที่ต่ำที่สุดที่ผู้ออกแบบการทดลองจะเลือกใช้ ซึ่งการออกแบบเหล่านี้จะไม่มีอิทธิพลหลักใดๆ เป็นคู่แฝดแฝงกับอิทธิพลหลักอื่นๆ แต่อิทธิพลหลักอาจจะเป็นคู่แฝดแฝงกับอิทธิพลร่วมสองปัจจัย (2-Way Interaction) และอิทธิพลร่วมสองปัจจัยอาจจะเป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันได้ โดย R_{III} เหมาะสำหรับการเริ่มต้นคัดกรองปัจจัย (Screening) กรณีที่มีจำนวนปัจจัยมาก ไม่ควรนำตัวแบบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ทันทีจะต้องมีการคัดกรองเอาอิทธิพลหลักที่ไม่มีความสำคัญทางสถิติบางตัวออก และควรมีการออกแบบการทดลองอีกรอบ ที่มีมิติการออกแบบการทดลองมากกว่า R_{III}

R_{IV} เป็นระดับที่ดีปานกลางที่ผู้ออกแบบการทดลองควรจะใช้ ซึ่งการออกแบบเหล่านี้จะไม่มีอิทธิพลหลักใดๆ เป็นคู่แฝดแฝงกับอิทธิพลหลักอื่นๆ หรืออิทธิพลร่วมสอง (2-Way Interaction) ปัจจัยอื่นๆ แต่อิทธิพลร่วมสองปัจจัยอาจจะเป็นคู่แฝดแฝงซึ่งกันและกันได้ โดย R_{IV} สามารถนำตัวแบบที่ได้จากการวิเคราะห์ไปใช้ในการพยากรณ์ หรือเปลี่ยนแปลงกระบวนการตามผลการวิเคราะห์ได้

R_V เป็นระดับที่ดีที่สุดที่ผู้ออกแบบการทดลองควรจะใช้ ซึ่งการออกแบบเหล่านี้จะไม่มีอิทธิพลหลักใดๆ เป็นคู่แฝดแฝงกับอิทธิพลหลักอื่นๆ หรืออิทธิพลร่วมสองปัจจัยอื่นๆ แต่อิทธิพลร่วมสองปัจจัยอาจจะเป็นคู่แฝดแฝงกับอิทธิพลร่วมสามปัจจัย (3-Way Interaction) ได้ โดย R_V ต้องใช้ทรัพยากรจำนวนมากกว่าระดับอื่นๆ ทั้งนี้เพราะจะมีจำนวนการทดลองมากนั่นเอง ดังรูปที่ 2-16

Available Factorial Designs (with Resolution)														
	Factors													
Run	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

รูป 2-16 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนปัจจัย กับจำนวนครั้งการทดลอง และค่า Resolution

2.4.9 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

1. การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองนั้น มีความเหมาะสมเพียงไร ซึ่งในการทดลองทุกครั้ง จะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained variable) หรือความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอการออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้น้อยที่สุด

การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) = $\frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \times 100\%$

ความผันแปรทั้งหมด

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-square) ต่ำ สามารถแก้ไขโดย

1.1 เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง

1.2 ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง แล้วออกแบบการทดลองใหม่

1.3 ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-square) ยังต่ำอยู่ แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise factor) มีมาก จึงควรทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดผลปัจจัยรบกวนให้น้อยที่สุด

2. การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) จากสมการ

$$Y_{\mu} = \mu + \tau_{\mu} + \varepsilon_{\mu} \quad (4)$$

เมื่อ μ = ค่าเฉลี่ย

T = ผลจากทรีตเมนต์ i

ϵ = ค่าความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะต้องสมมุติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปรตอบสนอง) ให้มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ(Normal distribution) และในการที่ y จะมีการกระจายแบบนี้ ϵ (ค่าความคลาดเคลื่อน) มีการกระจายแบบปกติและต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระด้วย คือมี \sim NID

การตรวจสอบ มี 3 ขั้นตอนคือ

1. การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นการแจกแจงปกติ(Normal distribution) หรือไม่ โดย
 - ทดสอบแบบไครส์แควร์ (– Goodness of Fit test)
 - ทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ- สเมอร์นอฟ (Kolgomorov-Smirnov test)
 - ทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ(Normal Probability Plot: NOPP)
2. การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independence) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจาก แผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีรูปแบบแน่นอน
3. การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถตรวจสอบได้ โดยใช้การพิจารณาแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่รูปแบบกรวยปากเปิด

2.4.10 การทดสอบสมมติฐาน (Test of Hypothesis)

ในการตัดสินใจที่มีความตั้งใจก่อนการทดลองเพื่อใช้ในการยืนยันความเชื่อ อย่างไม่อย่างหนึ่งสามารถ ดำเนินการโดยใช้ตัวแบบการตัดสินใจที่เรียกว่า การทดสอบสมมติฐาน โดยผู้ทำการทดลองจะทำการตั้งสมมติฐาน โดยอาจจะใช้ประสบการณ์ในอดีต จากทฤษฎีตัวแบบของกระบวนการที่ทำการศึกษา หรือพิจารณาจากข้อมูลกำหนดเฉพาะทางวิศวกรรมโดยสมมติฐานที่จะทำการทดสอบอาจจะเป็น แบบสองด้าน หรือด้านเดียว โดยจะต้องกำหนด H_0 สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) และ H_1 สมมติฐานอื่น (Alternative Hypothesis) เช่น

$$H_0 : \text{ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิไม่มีผลต่อตัวแปร } (\mu_1 = \mu_2)$$

$$H_1 : \text{ปัจจัยทางด้านอุณหภูมิมีผลต่อตัวแปร } (\mu_1 \neq \mu_2)$$

จากนั้นผู้ทำการทดลองหรือผู้ทดสอบสมมติฐาน จะกำหนดวิธีการตัดสินใจ ด้วยการพิจารณาตัวสถิติสำหรับการทดสอบ และพิจารณาถึงการแจกแจงของสิ่งตัวอย่าง ซึ่งอธิบายถึงความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ระหว่างเงื่อนไขของการทดลอง หรือ รีโพรดูซิบิลิตี้ (Reproducibility) จากนั้นทดสอบด้วยการพิจารณาค่าความเสี่ยงของความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I Error) แทนด้วยสัญลักษณ์ α ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่ปฏิเสธสมมติฐานหลัก เมื่อสมมติฐานหลักถูกต้อง และความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II Error) แทนด้วยสัญลักษณ์ β ซึ่งเป็นความผิดพลาดที่ยอมรับสมมติฐานหลักเมื่อสมมติฐานหลักไม่ถูกต้อง แล้วออกแบบการทดลองโดยให้ค่าความเสี่ยง β มีค่าต่ำตามที่กำหนด จากนั้นดำเนินการทดลองและทำการตัดสินใจตามที่ได้กำหนดไว้ คือ หากค่าของตัวสถิติหรือข้อมูล อยู่ในช่วงการยอมรับสมมติฐาน อันเป็นผลเนื่องมาจากความผันแปรที่เกิดจากสาเหตุด้านรีโพรดูซิบิลิตี้ ของการทดลอง ให้ทำการยอมรับสมมติฐาน แต่ถ้าหากค่าของตัวสถิติอยู่บริเวณแห่งการปฏิเสธ ให้ทำการปฏิเสธสมมติฐาน และยืนยันว่า สมมติฐานที่กำหนดไว้ไม่ถูกต้อง

2.4.11 พื้นที่ผิวจำเพาะ (SPECIFIC SURFACE AREA)

พื้นที่ผิวจำเพาะของผงถูกกำหนดโดยการดูดซับก๊าซทางกายภาพบนพื้นผิวของของแข็ง และโดยการคำนวณปริมาณของก๊าซดูดซับที่สอดคล้องกับชั้นโมเลกุลเดี่ยวบนพื้นผิว การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงที่ค่อนข้างอ่อน (แรง Van der Waals) ระหว่างโมเลกุลของก๊าซดูดซับและพื้นผิวตัวดูดซับของผงทดสอบ การกำหนดมักจะดำเนินการที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ปริมาณของก๊าซที่ดูดซับสามารถวัดได้โดยขั้นตอนการไหลเชิงปริมาตรหรือต่อเนื่อง

ทฤษฎีและการกำหนดพื้นที่พื้นผิวเฉพาะ ของ BRUNAUER, EMMETT และ TELLER (BET)

การวัดหลายจุด (Multipoint Measurement)

ข้อมูลได้รับการปฏิบัติตามสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Brunauer, Emmett และ Teller (BET)

$$\frac{1}{V_a \left(\frac{P_0}{P} - 1 \right)} = \frac{C-1}{V_m C} \times \frac{P}{P_0} + \frac{1}{V_m C} \quad (5)$$

P = ความดันไอบางส่วนของก๊าซดูดซับในสภาวะสมดุลกับพื้นผิวที่ 77.4 K
(ที่จุดเดือดของไนโตรเจนเหลว), ในหน่วย Pa

P_0 = ความดันอิ่มตัวของก๊าซดูดซับ, ในหน่วย Pa

V_a = ปริมาตรของก๊าซที่ดูดซับที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (STP)
[อุณหภูมิ 273.15K และความดันบรรยากาศ (1.013×10^5 Pa)], ในหน่วย mL

V_m = ปริมาตรของก๊าซที่ดูดซับที่ STP เพื่อผลิตชั้นเดียวที่ปรากฏบนพื้นผิวตัวอย่าง,
ในหน่วย mL

C = ค่าคงที่ไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับเอนทัลปีของการดูดซับก๊าซดูดซับบนตัวอย่าง
ค่าของ V_a ถูกวัดที่ค่า P/P_0 อย่างน้อยสามค่า

จากนั้นค่า BET จะถูกพล็อตเทียบกับ P/P_0 ตามสมการ (1) พล็อตนี้ควรให้เส้นตรงโดยปกติดูในช่วงความดันสัมพัทธ์โดยประมาณ 0.05 ถึง 0.3 ข้อมูลจะถือว่ายอมรับได้หากสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ r ของการถดถอยเชิงเส้นไม่น้อยกว่า 0.9975 นั่นคือ r^2 ไม่น้อยกว่า 0.995 จากพล็อตเชิงเส้นที่ได้นั้น ความชันซึ่งเท่ากับ $(C-1)/V_m C$ และการสกัดกันซึ่งเท่ากับ $1/V_m C$ จะถูกประเมินโดยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น จากค่าเหล่านี้ V_m คำนวณเป็น $1/(\text{ความชัน} + \text{จุดตัด})$ ในขณะที่ C คำนวณเป็น $(\text{ความชัน}/\text{ค่าตัดขวาง}) + 1$ จากค่าของ V_m ที่กำหนด พื้นที่ผิวจำเพาะ (S) ในหน่วย $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, คำนวณโดยสมการ:

$$S = \frac{V_m N_a}{m \times 22400} \quad (6)$$

- N = ค่าคงที่ของ Avogadro ($6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)
- a = พื้นที่หน้าตัดที่มีประสิทธิภาพของโมเลกุลดูดซับหนึ่งโมเลกุลในหน่วยตารางเมตร (0.162 นาโนเมตรสำหรับไนโตรเจนและ 0.195 นาโนเมตรสำหรับคริปทอน)
- m = มวลของผงทดสอบ หน่วยเป็น g
- 22400 = ปริมาตร ในหน่วย mL. ถูกครอบครองโดยหนึ่งโมลของก๊าซดูดซับที่ STP เพื่อให้สามารถเคลื่อนออกจากอุณหภูมิต่ำได้เล็กน้อย

ต้องมีจุดข้อมูลอย่างน้อยสามจุด อาจทำการวัดเพิ่มเติมโดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้ความไม่เชิงเส้นที่ค่า P/P_0 ใกล้ 0.3 เนื่องจากมักจะได้รับความไม่เชิงเส้นที่ค่า P/P_0 ต่ำกว่า 0.05 จึงไม่แนะนำให้ใช้ค่าในภูมิภาคนี้ การทดสอบความเป็นเส้นตรง การประมวลผลข้อมูล และการคำนวณพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวอย่างได้อธิบายไว้ข้างต้น

การวัดจุดเดียว (Single-Point Measurement)

โดยปกติ จำเป็นต้องมีการวัด V_a อย่างน้อยสามครั้ง โดยแต่ละครั้งมีค่า P/P_0 ต่างกัน จำเป็นสำหรับการกำหนดพื้นที่ผิวจำเพาะโดยใช้เทคนิคการดูดซับก๊าซแบบไหลแบบไดนามิก (วิธีที่ I) หรือการดูดซับก๊าซเชิงปริมาตร (วิธีที่ II) อย่างไรก็ตาม ภายใต้สถานการณ์บางอย่างที่อธิบายไว้ด้านล่าง อาจเป็นที่ยอมรับในการกำหนดพื้นที่ผิวจำเพาะของผงจากค่า V_a เดียวที่วัดที่ค่า P/P_0 ค่าเดียว เช่น 0.300 (สอดคล้องกับ 0.300 โมลของไนโตรเจนหรือเศษส่วน 0.001038 โมลของคริปทอน) โดยใช้สมการต่อไปนี้ในการคำนวณ V_m :

$$V_m = V_a \left(1 - \frac{P}{P_0}\right) \quad (7)$$

พื้นที่ผิวจำเพาะจะคำนวณจากค่า V_m โดยสมการ (7) ที่ให้ไว้ข้างต้น

อาจใช้วิธีแบบจุดเดียวโดยตรงสำหรับชุดตัวอย่างผงของวัสดุที่กำหนด ซึ่งค่าคงที่ของวัสดุ C มีค่ามากกว่าเอกภาพมาก สถานการณ์เหล่านี้อาจตรวจสอบได้โดยการเปรียบเทียบค่าของพื้นที่ผิวจำเพาะที่กำหนดโดยวิธีจุดเดียวกับค่าที่กำหนดโดยวิธีหลายจุดสำหรับชุดตัวอย่างผง ความคล้ายคลึงกันอย่างใกล้ชิดระหว่างค่าจุดเดียวและค่าหลายจุดแสดงให้เห็นว่า $1/C$ เข้าใกล้ศูนย์

วิธีการแบบจุดเดียวอาจใช้ทางอ้อมสำหรับชุดของตัวอย่างผงที่คล้ายกันมากของวัสดุที่กำหนดซึ่งค่าคงที่ของวัสดุ C ไม่สิ้นสุด แต่อาจถือว่าไม่แปรผัน ภายใต้สถานการณ์เหล่านี้

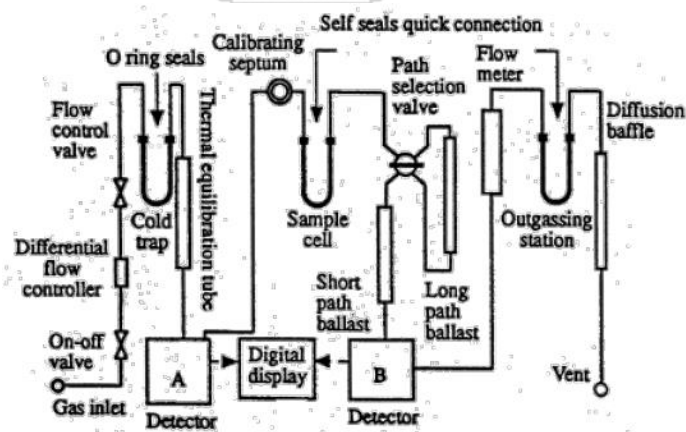
ข้อผิดพลาดที่เกี่ยวข้องกับวิธีจุดเดียวสามารถลดลงหรือถูกกำจัดได้โดยใช้วิธีหลายจุดเพื่อประเมินค่า C สำหรับหนึ่งในตัวอย่างของซีรีส์จากพล็อต BET ซึ่งค่า C ถูกคำนวณเป็น $(1 + \text{ค่าความชัน/ สก้ดกัน})$ จากนั้น V_m จะคำนวณจากค่าเดียวของ V_a ที่วัดที่ค่า P/P_0 เดียว โดยสมการ:

$$V_m = V_a \left(\frac{P_0}{P} - 1 \right) \left[\frac{1}{C} + \frac{C-1}{C} \times \left(\frac{P}{P_0} \right) \right] \quad (8)$$

วิธีที่ 1 : วิธีการไหลแบบไดนามิก (The Dynamic Flow Method)

หลักการในวิธีการไหลแบบไดนามิก (ดูรูปที่2-17) ก๊าซดูดซับที่แนะนำคือไนโตรเจนแห้งหรือคริปทอน ในขณะที่ฮีเลียมถูกใช้เป็นก๊าซเจือจาง ซึ่งไม่ถูกดูดซับภายใต้สภาวะที่แนะนำจะต้องมีส่วนผสมของก๊าซดูดซับที่เหมาะสมกับฮีเลียมอย่างน้อยสามชนิดภายในช่วง P/P_0 0.05 ถึง 0.30

เครื่องตรวจจับก๊าซควรจัดให้มีสัญญาณที่ประมาณสัดส่วนโดยประมาณกับปริมาตรของก๊าซที่ไหลผ่านภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันที่กำหนดไว้ เพื่อจุดประสงค์นี้ เครื่องตรวจจับค่าการนำความร้อนพร้อมอุปกรณ์รวมระบบอิเล็กทรอนิกส์เป็นหนึ่งในประเภทที่เหมาะสมกำหนดจุดข้อมูลอย่างน้อยสามจุดในช่วง 0.05 ถึง 0.30 ที่แนะนำสำหรับ P/P_0



รูป 2-17 แผนผังของอุปกรณ์วิธีการไหลแบบไดนามิก

ขั้นตอน

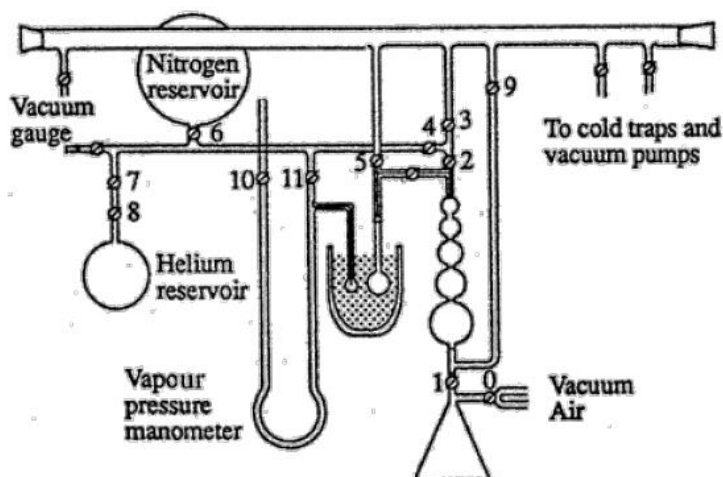
ส่วนผสมที่เป็นที่รู้จักของก๊าซ ซึ่งมักจะเป็นไนโตรเจนและฮีเลียม จะถูกส่งผ่านเซลล์การนำความร้อน ผ่านตัวอย่างอีกครั้ง ผ่านเซลล์การนำความร้อน และจากนั้นไปยังโพเทนชิออมิเตอร์สำหรับบันทึก ซึ่งเซลล์ตัวอย่างเช่นไนโตรเจนเหลว และตัวอย่างดูดซับไนโตรเจนจากชุด

เคลื่อนที่ ซึ่งจะทำให้เซลล์การนำความร้อนไม่สมดุล และสร้างสัญญาณแรงสั่นบนเครื่องบันทึกแบบแผนภูมิ จากนั้นตัวอย่างจะถูกแยกออกจากสารหล่อเย็น สิ่งนี้จะให้ค่าการดูดซึมที่สูงสุด เท่ากับพื้นที่และในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าการดูดซึมที่สูงสุด เนื่องจากวิธีนี้พบว่าค่าการดูดซึมได้ ตีกว่าค่าการดูดซึมที่สูงสุด จึงถูกใช้สำหรับการกำหนด เพื่อให้เกิดผลต่อการสอบเทียบ จะมีการ ฉีดปริมาณสารดูดซึมที่ทราบค่าซึ่งเพียงพอที่จะให้จุดสูงสุดที่มีขนาดใกล้เคียงกันกับค่าการ ดูดกลืนแสงสูงสุดเข้าไปในระบบ และได้รับสัดส่วนของปริมาตรก๊าซต่อพื้นที่สูงสุดของหน่วย ส่วนผสมของไนโตรเจนและฮีเลียมใช้สำหรับการหาค่าจุดเดียว และของผสมดังกล่าวหรือการ ผสมล่วงหน้าของก๊าซสองกระแสจะถูกใช้สำหรับการหาค่าแบบหลายจุด และการคำนวณ เหมือนกับวิธีการเชิงปริมาตร

วิธีที่ 2 : วิธีการเชิงปริมาตร (The Volumetric Method)

ในวิธีการเชิงปริมาตร (ดูรูปที่ 2-18) ก๊าซดูดซึบที่แนะนำคือไนโตรเจน ซึ่งถูกนำเข้าไปยัง พื้นที่แยกเหนือตัวอย่างผงที่ปล่อยออกมาก่อนหน้านี้ เพื่อให้แรงดันสมดุล ค่า P ที่กำหนดของ แก๊ส ดังนั้น การใช้ก๊าซเฉื่อยจาง เช่น ฮีเลียม จึงไม่จำเป็น แม้ว่าฮีเลียมอาจใช้เพื่อวัตถุประสงค์อื่น เช่น เพื่อวัดปริมาตรที่ตายแล้ว

เนื่องจากใช้เฉพาะก๊าซดูดซึบบริสุทธิ์ แทนที่จะใช้ส่วนผสมของแก๊ส จึงหลีกเลี่ยง ผลกระทบจากการแพร่ความร้อนในวิธีนี้



รูป 2-18 แผนผังของเครื่องมือวิธีการเชิงปริมาตร

ใส่ไนโตรเจนแห้งจำนวนเล็กน้อยลงในหลอดตัวอย่างเพื่อป้องกันการปนเปื้อนของพื้นผิวที่สะอาด เอาท่อตัวอย่างออก ใส่ตัวหยุด ซึ่งน้ำหนักท่อ และค่านวณน้ำหนักของตัวอย่าง จากนั้นติดหลอดตัวอย่างเข้ากับอุปกรณ์วัดปริมาตร ตัวอย่างจะถูกแยกอย่างระมัดระวังจนถึงความดันที่กำหนด (เช่น ระหว่าง 2 Pa ถึง 10 Pa)

อีกวิธีหนึ่งคือ เครื่องมือบางอย่างทำงานโดยการอพยพไปยังอัตราการเปลี่ยนแปลงความดันที่กำหนดไว้ (เช่น น้อยกว่า 13 Pa/30 วินาที) และโดยการถือไว้ตามระยะเวลาที่กำหนดก่อนที่จะเริ่มขั้นตอนต่อไป

หากหลักการการทำงานของเครื่องมือต้องมีการกำหนดปริมาตรพื้นที่อับอากาศในหลอดตัวอย่าง เช่น โดยการรับก๊าซที่ไม่ได้ดูดซับ เช่น ฮีเลียม ขั้นตอนนี้จะดำเนินการ ณ จุดนี้ ตามด้วยการแยกตัวอย่าง . การตรวจวัดปริมาตรพื้นที่อับอากาศอาจหลีกเลี่ยงได้โดยใช้การวัดผลต่าง กล่าวคือ โดยใช้หลอดอ้างอิงและหลอดตัวอย่างที่เชื่อมต่อกับเครื่องอ่านค่าความแตกต่าง จากนั้นวัดการดูดซับของก๊าซไนโตรเจนตามที่อธิบายไว้ด้านล่าง

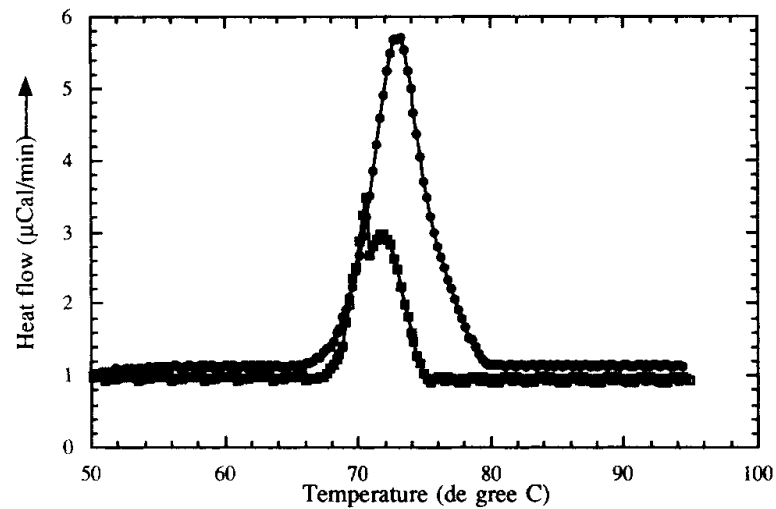
ยกภาชนะขวดดีวาร์ที่ไว้สำหรับรักษาอุณหภูมิที่มีไนโตรเจนเหลวที่ 77.4 K จนถึงจุดที่กำหนดไว้ในเซลล์ตัวอย่าง ซึ่งรับปริมาณก๊าซดูดซับที่เพียงพอเพื่อให้ความดันสัมพัทธ์ต่ำสุดที่ต้องการ มาวัดปริมาตรที่ดูดซับ ได้ค่า V_a สำหรับการวัดแบบหลายจุด ให้ทำซ้ำการวัดค่า V_a ที่ค่า P/P_0 ที่สูงขึ้นตามลำดับ เมื่อใช้ไนโตรเจนเป็นก๊าซดูดซับ ค่า P/P_0 ที่ 0.10, 0.20 และ 0.30 จะเป็นช่วงที่เหมาะสม

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

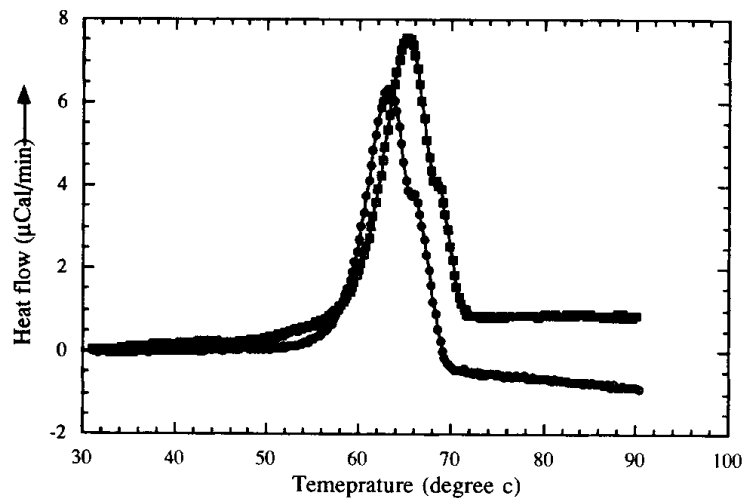
จากงานวิจัยเกี่ยวกับโมเลกุลของโปรตีนที่เคลื่อนที่ด้วยอัตราการไหลแบบเฉือนจริงหรือไม่นั้น (Jaspe & Hagen, 2006) พบว่าโมเลกุลของโปรตีนโดยทั่วไปจะเปลี่ยนสภาพเมื่ออยู่ภายใต้ความร้อนสูง ซึ่งในส่วนของงานวิจัยคาดว่าแรงเฉือนที่เกิดจากการไหลของของเหลวที่ไม่สม่ำเสมอจะทำให้โครงสร้างของโปรตีนไม่เสถียรเช่นกัน โดยมีการศึกษากลุ่มโปรตีน ไฮโดโคโรแมก ซี และกลุ่มกรดอะมิโน 104 ชนิด พบว่ามีการเรืองแสงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเปลี่ยนสภาพ ด้วยการบังคับให้ตัวอย่างผ่านซิลิกาแคปิลลารี (เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 150-180 μm) ที่ความเร็วใกล้เคียง 10 เมตร/วินาที โดยทำให้โปรตีนมีอัตราการเฉือนแบบ dv_z/dr ซึ่งมีขนาดใหญ่ใกล้เคียงถึง $2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ ในขณะที่ส่องผ่านด้วยเลเซอร์แสงอุลตราไวโอเล็ต ผลปรากฏว่าสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงการเรืองแสงได้น้อยกว่า 1% ตามการเปลี่ยนแปลงที่น้อยกว่า 0.01 kJ/mol ของความเสถียรของสถานการณ์พันธะไฮโดรเจนของโมเลกุล โดยผลสรุปรวมไม่พบหลักฐานว่าอัตราแรงเฉือนสูงจะทำให้โปรตีนประเภทโครงสร้างแบบพับ

งอไม่เสถียรอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งมีแบบจำลองที่เรียบง่ายนำเสนอว่าอัตราแรงเฉือนที่ไม่ธรรมดาที่ 10^7 s^{-1} นั้นจะทำให้โปรตีนเสียสภาพเป็นทรงกลมขนาดเล็กทั่วไปเมื่ออยู่ในน้ำ

แรงเฉือนนั้นมีอยู่ในกระบวนการทางชีวภาพเกือบทั้งหมด และมีการนำแรงเฉือนสูงเข้ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการกวน (Agitation) และกระบวนการทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Emulsification) โดยงานวิจัยของ Yuh-Fun Maa and Chung C. Hsu (Maa & Hsu, 1996) ที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของการใช้แรงเฉือนสูงและอัตราแรงเฉือนสูงที่มีต่อโปรตีน ซึ่งมีการเลือกใช้ระบบเฉือนที่ใช้กระบอกสูบศูนย์กลางสองระบบ หนึ่งคืออุปกรณ์แรงเฉือนทรงกระบอกศูนย์กลางแบบปิด (Closed concentric cylinder shear device : CCSD) และอีกหนึ่งอุปกรณ์เป็นเครื่องทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenizer) พร้อมชุดโรเตอร์ (Rotor) และส่วนประกอบสเตเตอร์ (Stator assembly) กอรปกับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเหล่านี้ทำให้สามารถคำนวณอัตราการเฉือนและแรงเฉือนได้ ซึ่งเครื่อง CCSD สร้างอัตราการเฉือนต่ำได้เร็ว (ไม่กี่ร้อยวินาที) ในขณะที่เครื่อง Homogenizer สามารถสร้างอัตราการเฉือนที่สูงมาก (ที่มากกว่า 10^5 วินาที) แรงเฉือนสูงสามารถทำได้ทั้งสองระบบโดยการเพิ่มเวลาในการประมวลผล รีคอมบิแนนท์ ฮิวแมน โกรท ฮอร์โมน (Recombinant human growth hormone : rhGH) และ รีคอมบิแนนท์ ฮิวแมน ดีออกซีไรโบนิวเคลียส (Recombinant human deoxyribonuclease : rhDNase) ถูกใช้เป็นโปรตีนต้นแบบในการศึกษานี้ พบว่าทั้งแรงเฉือนสูงและอัตราเฉือนสูงไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการรวมตัวของโปรตีน อย่างไรก็ตามมีการตรวจพบอุณหภูมิหลอมเหลวและเอนทัลปี (Enthalpy) ที่ต่ำกว่าสำหรับโปรตีน rhGH ที่มีแรงเฉือนสูงโดยใช้การสแกนแบบไมโครแคลอริเมทรี (Microcalorimetry) แสดงดังรูปที่ 2-19 สำหรับ rhGH และ รูปที่ 2-20 สำหรับ rhDNase ซึ่งน่าจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนนอกจากนี้ SDS-PAGE ยังระบุว่ามีส่วนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำซึ่งบ่งชี้ว่าการแตกพันธะเปปไทด์เกิดขึ้นเนื่องจากแรงเฉือนสูงในโปรตีน rhDNase ค่อนข้างเสถียรกว่าในโปรตีน rhGH ภายใต้แรงเฉือนสูงที่เท่ากัน จึงไม่พบการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและชิ้นส่วนโปรตีนอื่นๆ



รูป 2-19 ผลการสแกนไมโครแคลอริเมทรีของ rhGH (2 mg/mL) ก่อน (J) และ หลัง (I) ด้วยการทำให้เข้าเนื้อเดียวกันที่ 15,000 รอบต่อนาที ใน 1 ชั่วโมง



รูป 2-20 ผลการสแกนไมโครแคลอริเมทรีของ rhDNase (5 mg/mL) ก่อน (J) และ หลัง (I) ด้วยการทำให้เข้าเนื้อเดียวกันที่ 15,000 รอบต่อนาที ใน 1 ชั่วโมง

Fang Qian และคณะฯ (Qian et al., 2017) ได้ทำการศึกษาการทดลองและการสร้างแบบจำลองของการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีนนมด้วยความร้อน โดยในศึกษาการใช้ความร้อนกับนม มีวัตถุประสงค์เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ และปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การใช้ความร้อน ยังนำไปสู่การสูญเสียสภาพธรรมชาติของเวย์โปรตีน และการสร้างโพลีเมอร์ของเวย์โปรตีนเคซีน ซึ่งมีผลเสียต่อผลิตภัณฑ์นม ดังนั้นควรควบคุมเงื่อนไขการ

ให้ความร้อนของนมในการแปรรูปนม ในการศึกษานี้ได้กำหนดระดับการเปลี่ยนสภาพของเวย์โปรตีน และระดับการรวมกันของเวย์โปรตีนและเคซีนเมื่อได้รับการบำบัดด้วยความร้อนโดยใช้การวิเคราะห์ Native-PAGE และ SDS-PAGE ผลการศึกษาพบว่าระดับการสูญเสียของเวย์โปรตีน และระดับการผสมของเวย์โปรตีนกับเคซีน ที่เพิ่มขึ้นพร้อมกับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ และเวลาที่ให้ความร้อน ผลของอุณหภูมิที่ได้รับความร้อนและเวลาที่ให้ความร้อนต่อระดับการเปลี่ยนสภาพของเวย์โปรตีนและระดับการรวมกันของเวย์โปรตีนและเคซีนได้รับการอธิบายอย่างดีโดยใช้สมการถดถอยกำลังสอง กลยุทธ์การวิเคราะห์ที่ใช้ในการศึกษานี้ แสดงให้เห็นถึงการวัดระดับความอืดตัวของเวย์โปรตีนที่ใช้งานง่ายและมีประสิทธิภาพ และการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนนมภายใต้สภาวะการใช้ความร้อนที่แตกต่างกันอย่างมีประสิทธิภาพ และแม่นยำในอุตสาหกรรมนม อาจมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับโปรตีนในผลิตภัณฑ์นมหลังกระบวนการแปรรูปที่ใช้สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์นม

และ Qu Ruohong (Qu, 2020) นั้นได้ทำการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในเครื่องผสมแรงเฉือนสูงระหว่างการให้ความร้อน ในโครงการนี้เครื่องผสมแรงเฉือนสูงจะทำงานเป็นเครื่องพาสเจอร์ไรเซอร์แบบแบทช์ แม้ว่านักวิทยาศาสตร์หลายคนจะตรวจสอบเวลาในการพาสเจอร์ไรซ์สำหรับผลิตภัณฑ์อาหารประเภทต่างๆ แต่เวลาในการทำความร้อนที่ต้องการจากอุณหภูมิของอาหารเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิการพาสเจอร์ไรซ์ นอกจากนี้ยังศึกษาการกระจายอุณหภูมิและบริเวณที่เย็นที่สุดของเหลวระหว่างกระบวนการให้ความร้อนในเครื่องผสม เนื่องจากรูปทรงเรขาคณิตและการเคลื่อนที่ของโพล์ภายในเครื่องผสมแรงเฉือนสูงแบบกวนสองชั้นมีความซับซ้อนจึงใช้ Ansys® Fluent™ ในโครงการนี้เพื่อช่วยให้เข้าใจพฤติกรรมของสนามการไหลและการกระจายอุณหภูมิ

จำเป็นต้องมีทั้งการวัดเชิงทดลองและการคำนวณทางทฤษฎีเพื่อความเข้าใจในระบบทำความร้อนและการตรวจสอบเงื่อนไขขอบเขตความร้อนที่ดำเนินการใน CFD มีสามวิธีในการปรับใช้เงื่อนไขขอบเขตความร้อนใน Fluent: A) อุณหภูมิ B) ฟลักซ์ความร้อน C) การพาความร้อน - ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ผลการคำนวณทางทฤษฎีระบุว่าอุณหภูมิของไอน้ำ (วิธี A) และค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของไอน้ำ (วิธี C) เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีความหนืดเช่นซอสพริกหวาน เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนด้านผลิตภัณฑ์เป็นปัจจัย จำกัด หลัก ในขณะที่วิธี A และ C ไม่เหมาะสำหรับน้ำเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำและไอน้ำมีผลกระทบอย่างมากต่อการถ่ายเทความร้อน ฟลักซ์ความร้อน (วิธี B) อาศัยข้อมูลจากการทดลอง

จากผลการจำลอง CFD พื้นที่เย็นในผลิตภัณฑ์ (น้ำและซอสพริกหวาน) อยู่บริเวณมุมโรเตอร์ อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ทั้งสองกระจายอย่างเท่าเทียมกันในระหว่างกระบวนการทำความร้อนซึ่งพิสูจน์ได้ว่า 29 รอบต่อนาทีเป็นความเร็วในการหมุนที่เพียงพอสำหรับการทำความร้อน ดังนั้นพื้นที่เย็นไม่ควรเป็นปัญหาระหว่างการให้ความร้อนภายในเครื่องผสมแรงเฉือนสูง

(จิระวัฒน์, 2553) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป ที่พบปัญหาด้านคุณภาพเกี่ยวกับขนาดรวมของโพรงอากาศต้องไม่เกิน 500 ไมครอน โดยในงานวิจัยมีการนำเอาวิธีการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้ ในเบื้องต้นได้พบปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดโพรงอากาศทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ (1) แรงอัดของแม่พิมพ์ (2) แรงฉีดยา (3) ระยะเวลาในการอุ่นเรซิน และ (4) เวลาในการฉีดยา ต่อมาได้นำเอาหลักการการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 4 ที่ให้ขนาดรวมของโพรงอากาศน้อยที่สุด ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ คือ แรงอัดของแม่พิมพ์ที่ 280 Mpa, แรงฉีดยาที่ 10 kN, ระยะเวลาในการอุ่นเรซินอยู่ที่ 9 วินาที และเวลาในการฉีดยาที่ 8 วินาที ทำให้ได้ขนาดรวมของโพรงอากาศเฉลี่ยที่น้อยที่สุดที่ 218.25 ไมครอน โดยได้นำผลการหาสภาวะดังกล่าวทำการทดสอบเพื่อยืนยันผล ยังไม่พบข้อเสีย เนื่องจากขนาดรวมของโพรงอากาศไม่เกินกว่า 500 ไมครอน โดยผลการปรับปรุงข้างต้นนั้นไม่ทำให้เกิดปัญหาคุณภาพด้านอื่นเพิ่มเติม

(ภูธิป, 2557) ได้ทำการศึกษากระบวนการติดฉลากของโรงงานผลิตและบรรจุ ซึ่งตรวจพบปัญหาเวลาสูญเสียจากการหยุดการทำงานของเครื่องติดฉลาก พร้อมทั้งของเสียที่เกิดขึ้นจากการเครื่องติดฉลากเป็นหลัก ถึง 3 ประเภท เบื้องต้นจึงทำการวิเคราะห์สาเหตุการเกิดของเสียด้วยผังสาเหตุและผลมาทำร่วมกับการวิเคราะห์ข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต (FMEA) พบว่าปัญหาในการเกิดของเสียเกิดจากการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องจักรไม่เหมาะสม จึงได้ประยุกต์เอาการออกแบบการทดลองมาใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยพารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยในการหาค่าปรับตั้งที่เหมาะสมมีอยู่ 5 ปัจจัยคือ (1)ระยะห่างจากขวดในทิศทางเข้า-ออกจากขวดของ labeling station (mm.) (2)ระยะห่างจากขวดในทิศทางซ้าย-ขวาจากขวดของ labeling station (mm.) (3)ความหนาของกาวบน glue roller (μm .) (4)อัตราการป้อนกาวจากเครื่องปั๊ม (stroke/min.) และ(5)ความดันลมเป่าฉลาก (bar) ผลลัพธ์ที่ได้จากการประยุกต์ใช้มาตรฐานสำหรับการปรับตั้งพารามิเตอร์แบบใหม่สำหรับเครื่องติดฉลาก พบว่าสามารถลดค่าเฉลี่ยของลักษณะของเสียทั้ง 3 ประเภทคือฉลากพับ ฉลากเหลื่อม และโลโก้ไม่ตรงลงได้ 89.9, 75.6 และ 75.1 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับอีกทั้งลดเวลาสูญเสียและความถี่ในการหยุดเครื่องลงได้ 40.28 และ 72.72 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

(วัชรศักดิ์, 2546) ศึกษาปัจจัยในกระบวนการผลิตชุดประกอบสำเร็จหัวเขียนอ่านข้อมูลที่มีผลกระทบต่อค่าการโก่งตัวของตัวหัวเขียนอ่านข้อมูล รวมถึงพิจารณาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่เป็นไปได้จริงในทางปฏิบัติ เพื่อลดค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าการเปลี่ยนแปลงค่าการโก่งตัว โดยเริ่มจากการอาศัยความรู้และความชำนาญของผู้เชี่ยวชาญและเอกสารต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยใช้แผนภาพแสดงเหตุและผล จากนั้นทำการเลือกวิเคราะห์ปัจจัยเพื่อใช้ในการออกแบบการทดลองเป็นลำดับต่อไป

โดยมีแบบอย่างงานวิจัยเรื่องการลดปริมาณของเสียในกระบวนการพิมพ์โค้ดแบบหมึกลงบนผลิตภัณฑ์กระป๋อง (สิทธิกร, 2561) โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองด้วยวิธีบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อการให้ความร้อนผิวกระป๋องก่อนพิมพ์ พบว่าใช้อุณหภูมิ 512 องศาเซลเซียส แรงลมระดับ 3 และระยะเวลาในการให้ความร้อน 0.66 วินาที สำหรับกระป๋องประเภท Tin และสำหรับประเภท Aluminum ใช้อุณหภูมิ 309 องศาเซลเซียส แรงลมระดับ 3.5 และระยะเวลาในการให้ความร้อน 0.66 วินาที พร้อมทั้งควบคู่กับการปรับปรุงแผนบำรุงรักษาทำให้ลดของเสียโดยรวมเนื่องจากโค้ดลบจากสายการผลิตที่ 1 ลดลงจาก 0.2 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 0.02 เปอร์เซ็นต์

อีกทั้ง (อาภาพร, 2559) ที่ได้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มผลผลิตภาพในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตสีย้อมผ้า ซึ่งมีการนำแผนผังแสดงสาเหตุและผลมาจัดแจงลำดับความสำคัญพร้อมแสดงด้วยตารางแสดงความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล อีกทั้งนำเอาการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มาใช้ออกแบบเพื่อการทดลองปรับตั้งค่ากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับแต่ละปัจจัยที่ได้คือ ขนาดหัวฉีด 2.5 มิลลิเมตร 1 หัว ปริมาณน้ำล้างเมมเบรน 1712 กิโลกรัม ปริมาณน้ำล้างระบบ 324 กิโลกรัม และ อุณหภูมิอากาศร้อน 114 องศาเซลเซียส พบว่าผลหลังปรับปรุงหลังควบคุมและติดตามผลแล้ว ผลผลิตภาพของสีประเภทดีตายเพิ่มขึ้นจาก 19.97 เปอร์เซ็นต์ เป็น 31..69 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลิตภาพมีค่าเพิ่มขึ้น 58.66 เปอร์เซ็นต์

(วรพจน์, 2555) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการลดของเสียประเภทรูปลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตผ้าไม่ทอ โดยจากการศึกษาพบสาเหตุที่แท้จริงเป็นปัจจัย 4 ปัจจัยในกระบวนการปั่นเส้นใย คือ แรงดันในห้องปั่นเส้นใย อุณหภูมิตาย อุณหภูมิลมทำความเย็น และความเร็วลมดูดเส้นใย ซึ่งส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ จึงได้ประยุกต์ใช้การออกแบบเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลเพื่อคัดกรองปัจจัย พบว่ามีเพียง 3 ปัจจัย และได้้นำ 3 ปัจจัยนี้ไปใช้กับการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนอง เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม พบว่าค่าที่เหมาะสมในการกำหนดในการปฏิบัติงานสำหรับทั้ง 3 ปัจจัยคือ แรงดันในห้องปั่นเส้นใย ปรับที่ 2660.60 ปาสคาล อุณหภูมิตาย อยู่ที่ 219.85 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิลมทำความเย็นอยู่ที่ 29.73 องศาเซลเซียส ซึ่งภายหลังปรับปรุงโดยนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมไปใช้พบว่าของเสียประเภทรูปลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ จากเดิมอยู่ที่ร้อยละ 1.54 ลดเหลือเหลือเพียงร้อยละ 0.90 จากยอดการผลิตทั้งหมดหรือคิดได้ว่าสามารถลดของเสียลงได้เป็นร้อยละ 42

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

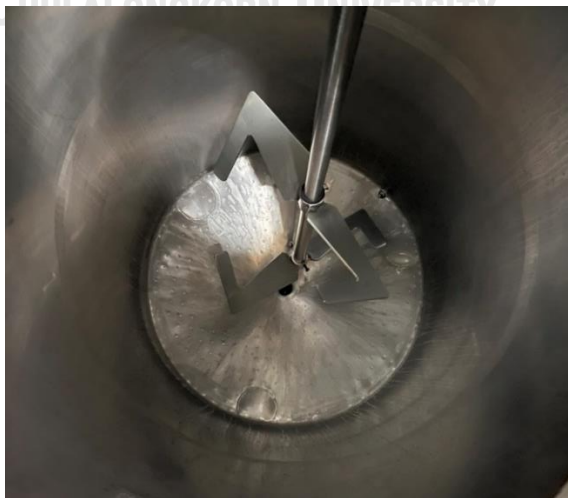
3.1 การศึกษากระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM

กระบวนการผลิตไซรัปจะแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน

3.1.1 การเตรียมวัตถุดิบกลุ่มของเหลว

คือขั้นตอนเริ่มต้นของการผลิตไซรัป โดยการป้อนเตรียมวัตถุดิบของเหลวแต่ละประเภทตามปริมาณที่กำหนดของสูตรมาเตรียมก่อนเข้าขั้นตอนผสม ลงถังเตรียมวัตถุดิบ ดังรูปที่ 3-1 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. Set ค่าปริมาณของวัตถุดิบเหลวแต่ละประเภทตามสูตรที่กำหนดที่หน้าต่างโปรแกรม
2. ทำการป้อนของเหลวด้วยลููปปั๊ม (Loop pump) มาพักไว้ในถังเตรียมของเหลวแล้วมีใบพัด (Agitator) กวนไม่ให้หยุดนิ่งหรือแยกชั้น โดยเช็คค่าน้ำหนักของแต่ละวัตถุดิบจากถังเตรียมวัตถุดิบกลุ่มของเหลวที่มีโหลดเซลล์ (Loadcell) เป็นจุดชั่งน้ำหนักของแต่ละรายการ
3. จากนั้นปั๊มผ่านชุดแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) เพื่อให้กลุ่มวัตถุดิบของเหลวมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 65-75 องศาเซลเซียส ซึ่งจะไปพักรอที่ถังบัฟเฟอร์ (Buffer tank) ก่อนการเข้าผสมในขั้นตอนถัดไป

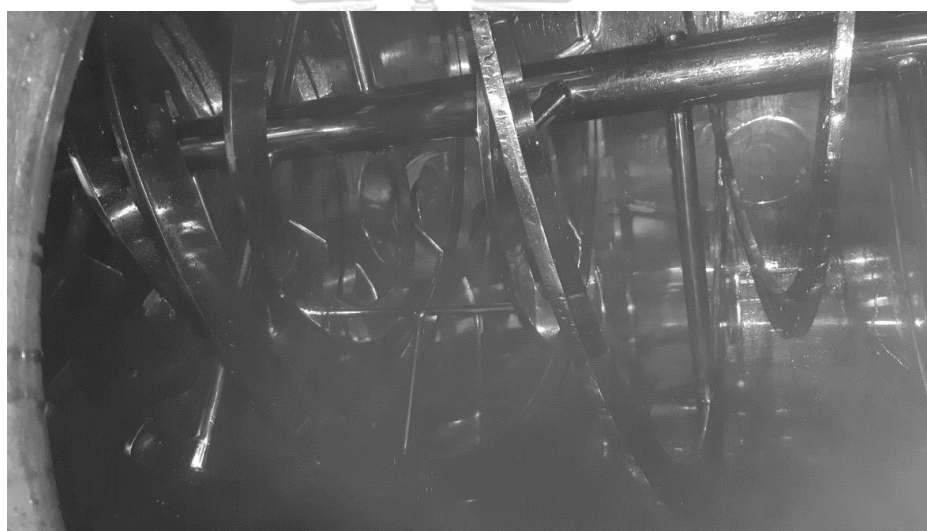


รูป 3-1 ถังการเตรียมวัตถุดิบ

3.1.2 การเตรียมวัตถุดิบกลุ่มผง

การเตรียมวัตถุดิบกลุ่มผงแต่ละรายการมาเตรียมก่อนการผสมเข้ากับวัตถุดิบกลุ่มของเหลว ไว้ที่ถังผสมแบบแห้ง (Ribbon tank) ดังรูปที่ 3-2 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. Set ค่าปริมาณของวัตถุดิบผงแต่ละประเภทตามสูตรที่กำหนดที่หน้าต่างโปรแกรม
2. ทำการดูดวัตถุดิบผงโดยใช้ระบบปั๊มแวกคัม (Vacuum pump) ผ่านไลน์ท่อมาพักเตรียมไว้ในชุดถังรับบ้วน (Ribbon tank) โดยเช็คค่าน้ำหนักของแต่ละวัตถุดิบจาก Ribbon tank ที่มี Loadcell เป็นจุดชั่งน้ำหนักของแต่ละรายการ และจะมีใบกวนแบบ Ribbon ที่จะกวนให้วัตถุดิบกลุ่มผงเข้ากันก่อน เพื่อรอการเข้าผสมในขั้นตอนถัดไป



รูป 3-2 ถังผสมวัตถุดิบแบบแห้ง

3.1.3 การผสมไซรัป

การผสมไซรัปจะเป็นการนำเอาวัตถุดิบกลุ่มผงมาปั่นผสมรวมเข้ากับวัตถุดิบกลุ่มของเหลว ซึ่งจะมีการให้ความร้อนและการฆ่าเชื้อไซรัปภายในถังผสม ดังรูปที่ 3-3 ก่อนนำส่งไปยังแผนกอบแห้งถัดไป ดังรูปที่ 3-4 โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. เริ่มถ่ายโอนวัตถุดิบกลุ่มของเหลวจาก Buffer Tank มายังถังมิกซ์ซิ่ง (Mixing tank)

2. เริ่มปรับลดระดับค่าแรงดันสุญญากาศภายในถังภายใต้ระบบแวกคัม (Vacuum system) พร้อมการปั่นด้วยชุดใบกวน (Agitator) ชุดใบปาด (Scraper) และชุดหัวปั่น (Shear mixer)

3. เมื่อค่าแรงดันสุญญากาศได้อยู่ที่ 450 mbar จะส่งสัญญาณให้ Ribbon tank ถ่ายวัตถุดิบกลุ่มผงมาเตรียมในถังทรงโคนสำหรับพักถ่าย (Hopper) ซึ่งจะมีตัววัดระดับของผงใน Hopper ที่ระดับต่ำ (Low level) และระดับสูง (High level) และเมื่อ High level เปลี่ยนสีแสดงว่าผงเต็ม Hopper

4. การผลิตไซรัปจะเข้าตามขั้นตอนกระบวนการที่ตั้งค่าไว้ โดยการตั้งค่าชุดใบกวน ชุดใบปาด ชุดหัวปั่นและประเภทหัวปั่น พร้อมทั้งการมอนิเตอร์หน้าจอการทำงาน

5. เมื่อทำการผสมวัตถุดิบกลุ่มผงเข้ากับวัตถุดิบกลุ่มของเหลวเรียบร้อยแล้วจะเข้าสู่ขั้นตอนการให้ความร้อน มีการตั้งค่าการให้ความร้อนสำหรับไซรัปอยู่ที่ 72 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 72.2 องศาเซลเซียส โดยการให้แรงดันของไอร้อนอยู่ที่ไม่เกิน 3 bar และอุณหภูมิไอร้อนไม่เกิน 130 องศาเซลเซียส ภายใต้ถังแบบดับเบิลแจ็กเก็ตของถังผสม

6. ทำการฆ่าเชื้อภายในถังผสม เมื่อจบขั้นตอนการผสมไซรัป สุ่มการตัดตัวอย่างไซรัปเพื่อเช็คการเกิดริ้วและค่าความสูงของตะกอน ก่อนนำส่งไปสู่ถังพักไซรัปเพื่อรอให้แผนกอบแห้งทำการอบแห้งถัดไป



รูป 3-3 ถังผสมไซรัปเครื่อง HSVM

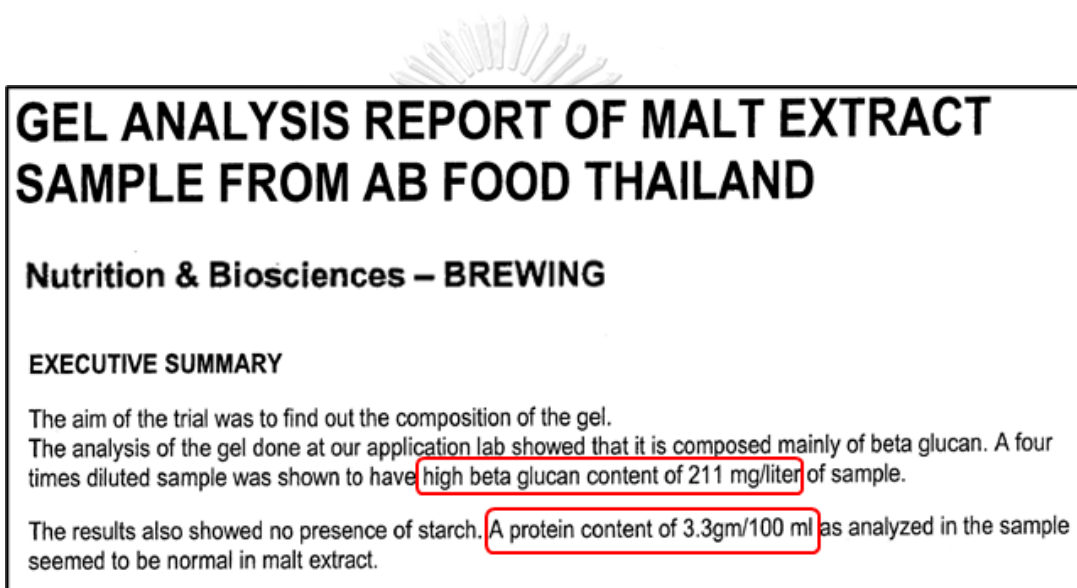
3.1.4 การตรวจสอบตะกอนในไซรัป

1. สุ่มตัวอย่างไซรัปจากถังผสมและถังพักไซรัป ช่วงด้านบนถึง ช่วงกลางถึง และช่วงด้านล่างถึง แต่ละจุดจำนวน 200 กรัม
2. ตักชั่งน้ำหนักแบ่งใส่ถ้วยชงเชค 35 กรัม แล้วชั่งตวงน้ำร้อนอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ปริมาณ 165 กรัม
3. คนจนจนละลายแล้วเริ่มจับเวลา พร้อมเช็คสภาพภาพรวมของไซรัป การเกิดริ้ว ในระหว่าง 1-2 นาทีช่วงต้น และทำการวัดค่าความสูงของตะกอนเมื่อครบเวลา 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที
4. บันทึกลักษณะริ้วของไซรัปแรกเริ่ม และบันทึกผลค่าความสูงของตะกอน (ดังรูปที่ 3-4)



รูป 3-4 วิธีการวัดค่าความสูงของตะกอน

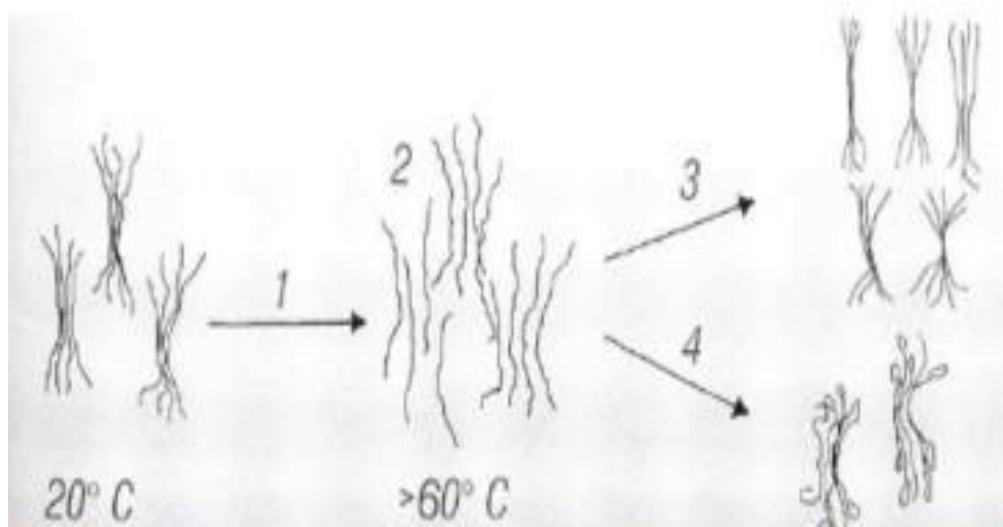
เนื่องจากศึกษาสภาพของตะกอน และวิธีการตรวจสอบตะกอนที่พบในการชงไซรัปนั้น ได้มีตรวจแยกจากแต่ละวัตถุดิบทั้งวัตถุดิบแบบผงและวัตถุดิบแบบเหลว ซึ่งการตรวจตะกอนนั้น ได้เป็นการส่งตรวจกับห้องปฏิบัติการภายนอกที่มีความเชี่ยวชาญเกี่ยวกับด้านตะกอนโดยเฉพาะของแต่ละกลุ่มวัตถุดิบ โดยในกลุ่มวัตถุดิบเหลวจะมีส่วนผสมอยู่ 1 รายการที่ได้มีการศึกษาและตรวจสอบความเป็นไปของสภาพตั้งต้นคือ LME หรือจะรู้จักกันในชื่อมอลต์สกัดเข้มข้น โดยในส่วนของ LME นั้นได้ทำการศึกษาเหนือจากกลุ่มงานวิจัย ซึ่งพบที่มาของตะกอนโดยรวมคือมาจาก LME ซึ่งมีเบตา-กลูแคนเป็นส่วนประกอบเป็นหลักในกลุ่มตะกอน แสดงผลดังรูปที่ 3-5



รูป 3-5 ผลการวิเคราะห์ตะกอนที่เกิดจากวัตถุดิบ LME

CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่ เบตา-กลูแคน จัดเป็นกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ ที่ไม่ใช่แป้งที่พบในกลุ่มธัญพืชเปลือกแข็งและมีพันธะสายยาว ซึ่งเมื่อพบเบตา-กลูแคนในปริมาณมาก แล้วพบแรงเฉือนจากเครื่องจักรเพิ่มเติมจึงกลายเป็นจุดที่จะทำให้เกิดโครงสร้างของการใยสายยาว ซึ่งเมื่ออุณหภูมิต่ำ จะมีการเกาะตัวจับกลุ่มกันเป็นกลุ่มก้อน และลอยอยู่ในมวลสาร แต่เมื่อมีการให้อุณหภูมิที่สูงขึ้นพร้อมกับการเติมเอนไซม์ช่วยสลายโครงสร้างดังกล่าว เบตา-กลูแคนจะค่อยๆสลายพันธะออกและถูกย่อยเป็นกลูโคสหรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หรือเบตา-กลูแคนที่เป็นสายพันธะสั้นๆที่จะย่อยได้ง่ายขึ้น แต่ถ้าหากอุณหภูมิที่ใช้หรือเอนไซม์ที่ใส่มีไม่มากพอ ก็จะเป็นเสมือนตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะทำให้กลุ่มเบตา-กลูแคน เริ่มกลับมาจับตัวกันเป็นโครงสร้างดั้งเดิมหรืออาจจัดเรียงไม่สวยแต่ไปยึดจับพอลิเมอร์อื่นๆรอบข้างให้ตกลงไปด้วยดังรูปที่ 3-6



รูป 3-6 รูปแบบการแปรสภาพโครงสร้างของ เบตา-กลูแคน

และเมื่อผู้วิจัยพบปัญหาดังกล่าวจึงได้ปรับปรุงในส่วนของกระบวนการผลิต LME ตั้งต้น คือ การปรับกระบวนการสกัดแป้งในส่วนของการต้มน้ำ Wort ที่เป็นสารตั้งต้นที่ผลิตเป็น LME โดยการปรับใช้เอนไซม์ที่มีประสิทธิภาพในการลดปริมาณเบตา-กลูแคนและผันให้เป็นกลุ่มน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว อีกทั้งเป็นการเพิ่มประสิทธิผลให้กับกลุ่มงานกระบวนการผลิต LME โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองและคัดเลือกปัจจัยที่จะศึกษาและปรับค่าได้ ซึ่งผู้วิจัยได้เลือกใช้เอนไซม์ Amylex 3G ที่พัฒนาต่อมาจาก Amylex 2G ซึ่งมีองค์ประกอบของเอนไซม์ เบต้ากลูโคซิเดส (Beta-glucosidase) และเอนโดกลูคาเนส (Endoglucanase) ที่จะช่วยย่อยควบคุมกับอุณหภูมิและเวลาในการต้มสกัดเบตา-กลูแคนสายยาวให้เป็นสายสั้นและค่อยๆย่อยจนเหลือแต่น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว แต่ในทางกลับกันถ้าเบตา-กลูแคน ย่อยแล้วยังไม่จบสภาพดี แล้วพบแรงเฉือนหรือแรงตัดเฉือนจากการเคลื่อนย้ายหรือจากอุปกรณ์ต่างๆเช่นปั๊ม ก็สามารถที่จะคืนรูปกลับมาเป็นโมเลกุลพันธะสายยาวได้เช่นกัน อีกทั้งจากผลการทดลองในกระบวนการสกัดน้ำ Wort ยังพบอีกหนึ่งปัจจัยคือ เมื่อการสกัดเบตา-กลูแคนได้มากขึ้นในระหว่างกระบวนการกรองสำหรับแยกกากไยจากน้ำ Wort ที่ต้มได้ พบว่าประสิทธิภาพเครื่องกรองกากไย (Mash Filter machine) นั้นลดระดับลง โดยเมื่อถ้าเพิ่มระยะเวลาในการช่วยสกัดเพิ่มขึ้น จะเกิดสภาพของเมือก (Gel) ที่ติดอยู่กับกากไย ทำให้ความสามารถของอัตราการไหล (Flow ability) ของน้ำ Wort ที่จะทำการกรองลดต่ำลงอย่างมากดังตารางที่ 3-1 โดยจากเดิมขั้นตอนกระบวนการกรองกากไยจะใช้ระยะเวลาอยู่ที่ 1 ชั่วโมง 30 นาที รวมการสกัดร้อนและชะล้างด้วยน้ำร้อน เมื่อมีการปรับเพิ่มระยะเวลาการสกัดในหม้อต้มน้ำ Wort จากส่งผลให้ระยะเวลาของกระบวนการผลิตจะยิ่งยืด

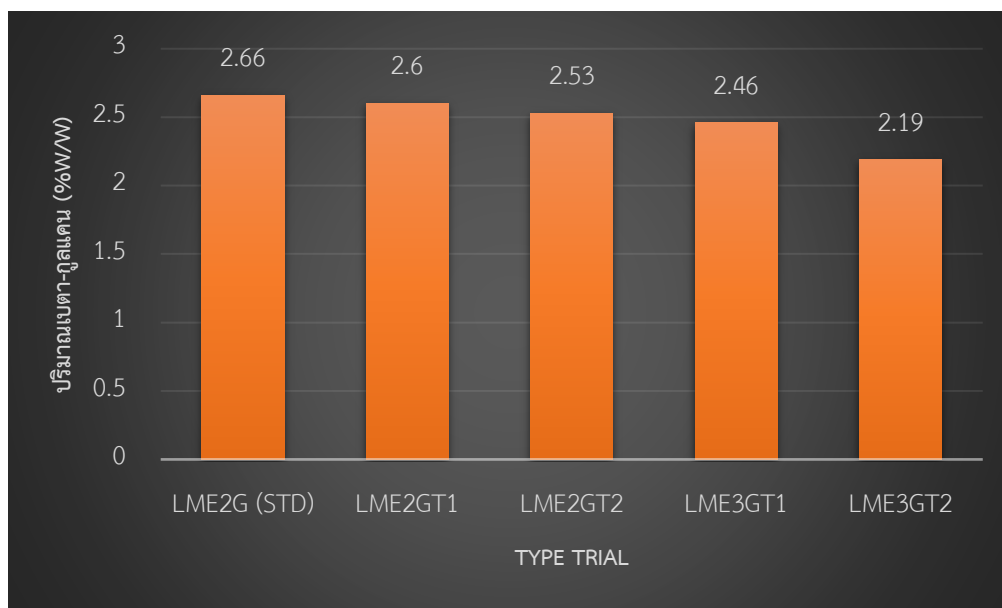
ออกไป และจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการขึ้นตอนถัดไปที่รอรับน้ำ Wort ในการเข้า Evaporator เช่นกัน

ตาราง 3-1 ตารางผลการทดลองการปรับระยะเวลาในการสกัด LME

ประเภท เอนไซม์	อุณหภูมิ (C)	ระยะเวลาใน การต้มสกัด (min)	ปริมาณ เบตา-กลูแคน (%w/w)	Pressure pump Mash Filter (mbar)	Flow ability Mash Filter (h/h)
2G (STD)	53	40	2.66	48.7	293
2G	50	40	2.60	50.1	291
2G	50	60	2.53	73.4	254
3G	50	40	2.46	58.2	276
3G	50	60	2.19	67.3	270

จากตารางที่ 3-1 จะแสดงให้เห็นว่า ถ้ายังปรับเห็นระยะเวลาในการสกัด จะยิ่งทำให้ปริมาณเบตา-กลูแคนลดน้อยลงแต่จะส่งผลเสียต่อไหลตของมอเตอร์ในส่วนของการขึ้นตอนถัดไปคือการกรอกกากไยออก เพราะจะเห็นได้ว่าเมื่อปริมาณเบตา-กลูแคนลดน้อยลง Flow ability จะลดลงต่ำลงและค่าแรงดันของปั๊มที่เครื่องกรองก็จะมีแรงดันสูงขึ้นซึ่งผลต่อไหลตของมอเตอร์ในการทำงาน ซึ่งเป็นแบบการทำงานที่ไม่เหมาะสม สุดท้าย ผู้วิจัยจึงเลือก LME ประเภท 3G ที่อุณหภูมิการสกัดที่ 50 องศาเซลเซียส และใช้เวลาสกัดใน 60 นาที เพื่อช่วยลดเบตา-กลูแคนและไหลตของมอเตอร์ปั๊มยังคงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ พร้อมทั้งค่าความสามารถของอัตราการไหลยังคงอยู่เกณฑ์ที่ดี เพื่อผลิต LME ที่เป็นวัตถุดิบเหลวตั้งต้นสำหรับการเดินงานการผลิตโอวัลตินทั้งกระบวนการต่อไป

จากการศึกษานอกงานวิจัยฉบับนี้จึงได้ปรับใช้ LME ที่ผลิตสำหรับเป็นสารตั้งต้นในการผลิตนั้นเป็น LME3G เพื่อส่งผลให้ปริมาณเบตา-กลูแคนที่จะพบใน LME แล้วนำไปผลิตต่อนั้นมีปริมาณลดลงโดยจากเดิม 2.66 %w/w ลดลงเหลือ 2.19 %w/w ดังรูปที่ 3-7



รูป 3-7 กราฟแสดงปริมาณเบตา-กลูแคนใน LME ที่ทำการทดลองปรับหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตต่อในกระบวนการผลิตไซรัปแบบชั้นหนืด

และเมื่อนำไปทดลองในกระบวนการผสมไซรัปทั้งแบบวิธีการเก่า (Thin mix) และแบบวิธีการใหม่ (Thick mix) ผลของไซรัปที่เซ็คซงมีผลของตะกอนที่ในลักษณะที่ตีขึ้นไม่จับตัวเป็นปุยร่วน แต่ยังคงมีปริมาณความสูงของตะกอนที่ยังสูงเกินมาตรฐานอยู่ จึงต้องทำการศึกษาปัจจัยจากเครื่องจักรเพิ่มเติม เพื่อปรับปรุงให้ค่าความสูงตะกอนมีค่าลดน้อยลงและไม่เกิดร่วนได้ดียิ่งขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 การศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกนำเอาไซรัปสีน้ำตาล รหัส 4003 ที่เป็นการผสมผ่านเครื่อง HSVM มาทำการทดลองเพราะมีปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นมากที่สุดและยังเป็นไซรัปที่มีปริมาณการผลิตมากที่สุด พร้อมทั้งเป็นรายการที่ผลิตอย่างสม่ำเสมอจึงสามารถติดตามผลการทดลองได้อย่างต่อเนื่อง โดยในกระบวนการผลิตผสมไซรัปสีน้ำตาลด้วยเครื่อง HSVM จะต้องมีการควบคุมตัวแปรตอบสนองที่สำคัญในกระบวนการ คือ

- ความสูงของตะกอนในการชงไซรัป ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร

ดังนั้นในการทำวิจัยในครั้งนี้จะกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจ คือ

- Yt คือ ความสูงของตะกอนในการชงไซรัป ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร

3.2.1 การคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

ซึ่งการจะศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความสูงของตะกอนที่ได้จากการชงไซรัป ที่ไม่เกิน 13 มิลลิเมตรนั้น จะมีการใช้วิธีการระดมสมอง (Brainstorming) จากทีมผู้เชี่ยวชาญ และผู้ที่มีประสบการณ์ในงานด้านการผสมและด้านที่เกี่ยวข้อง โดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม ข้อมูลจากกระบวนการผลิตแบบดั้งเดิม ข้อมูลจากกระบวนการผลิตที่ได้จากแบบใหม่ อีกทั้งข้อจำกัดและวิธีการแนวทางปฏิบัติที่ไม่ควรปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมเพื่อระบุปัจจัยที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในการทดลองและศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองดังกล่าวข้างต้น จึงพิจารณาปัจจัยโดยที่สามารถจะจำแนกประเภทของปัจจัยได้เป็น 5 ปัจจัย ตามหลักการ 4M และ 1E ดังต่อไปนี้

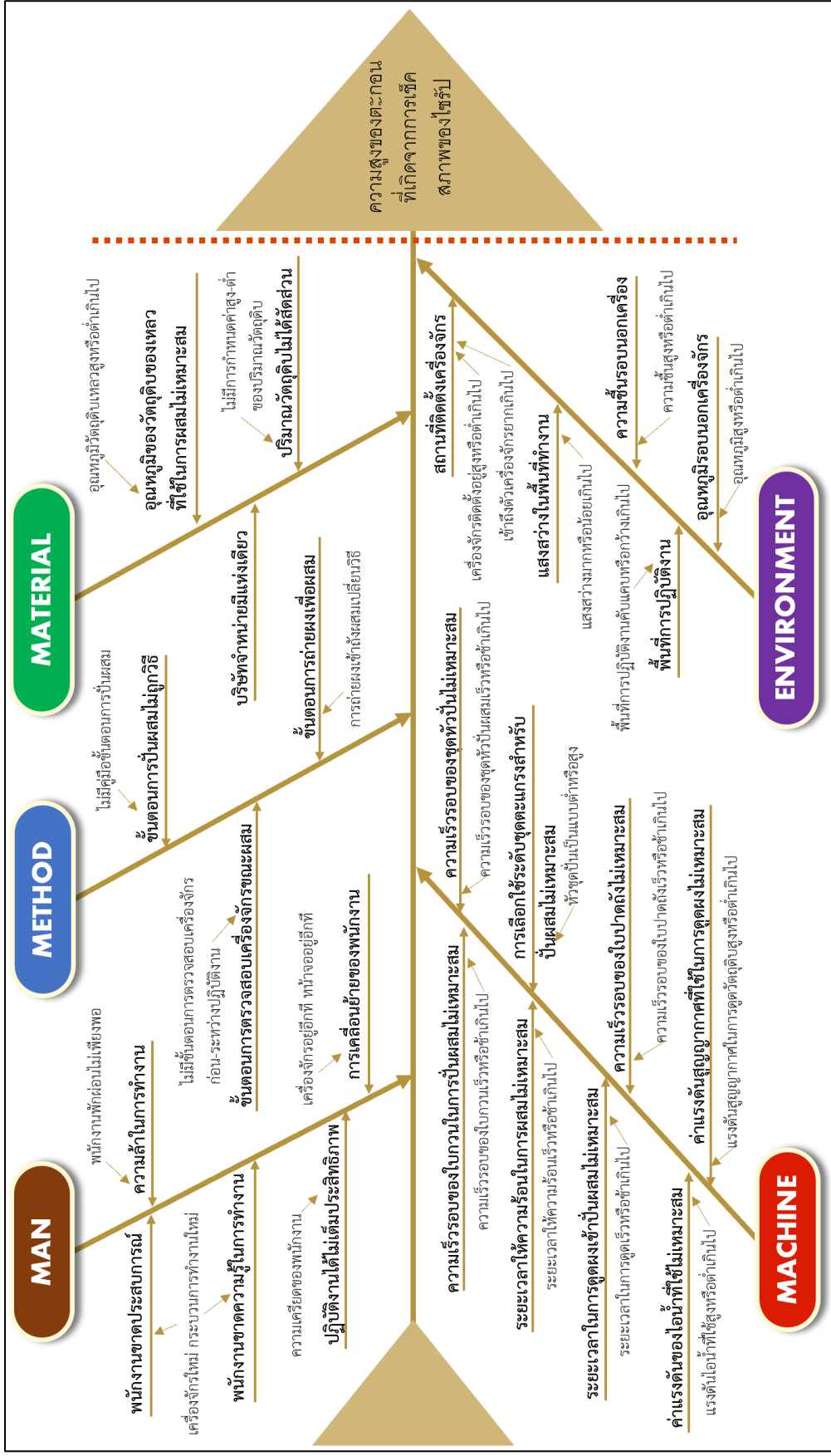
1. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
2. ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)
3. ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
4. ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
5. สิ่งแวดล้อมรอบข้าง (Environmental)

โดยการนำเอาแผนผังก้างปลา (Fishbone Diagram) มาประยุกต์ใช้นั้นจะเป็นการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการช่วยกันระดมสมองจากทีมงาน ผู้ที่มีความรู้ทางการผลิต ผู้มีประสบการณ์ในการเดินเครื่องจักร ผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมการผลิต และผู้มีความรู้ด้านการควบคุมคุณภาพกระบวนการผลิต ทั้งหมด 10 ท่าน โดยจัดทำเป็นแผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) จากปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย ดังรูปที่ 3-8 โดยมีขั้นตอนดำเนินการดังนี้

1. ชี้ลักษณะคุณภาพของปัญหาที่พบ ออกมาให้ชัดเจน
2. เขียนปัญหาทางด้านขวาสุด โดยลากเส้นจากซ้ายมาขวาสุดที่กรอบของหัวข้อปัญหา (Effect)
3. เขียนสาเหตุหลักของปัญหาที่เกิดขึ้น โดยใช้ปัจจัยตามหลักการ 4M และ 1E
4. เขียนสาเหตุรองและสาเหตุย่อยที่ได้จากการร่วมระดมสมอง ที่ส่งผลต่อปัญหา ให้ได้มากที่สุด ซึ่งเป็นโอกาสที่จะทำให้พบสาเหตุที่แท้จริงหรือสาเหตุรากเหง้า (Root Cause Effect)

5. ต่อมารจัดลำดับความสำคัญโดยทำการวิเคราะห์ผ่านตาราง Cause and Effect Matrix โดยการเติมหัวข้อ ขั้นตอนกระบวนการ หรือชื่อผลิตภัณฑ์ พร้อมวัน เดือน ปี ผู้เข้าร่วมที่ร่วมกันทำการระดมสมอง
6. นำข้อมูลที่ได้จากการระดมสมองมาจัดเรียงใส่ตาราง Cause and Effect Matrix แบ่งตามกลุ่มปัจจัย และกำหนดอัตราค่าความสำคัญอยู่ระหว่าง 1-10 (ความสำคัญจากน้อยไปมากที่สุด)
7. ให้กลุ่มทีมงานทำการลงคะแนนความสำคัญให้กับปัจจัยที่ได้มา โดยแต่ละคนจะต้องทำการให้คะแนนส่วนของตนเองจนครบทั้ง 25 ปัจจัย





รูป 3-8 แผนภูมิแก๊งปลาวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเรื่องของการเกิดจากการเกิดสภาพของโซลที่ใช้ในกระบวนการผสมโซลรับแบบเข้มข้น

3.2.2 การกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

เมื่อผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและคัดเลือกปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดความสูงของตะกอนในการผลิตไซร์ปสีน้ำตาลรหัส 4003 ดังหัวข้อ 3.2 ข้นถัดมาคือการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดความสูงของตะกอน ผู้วิจัยได้ทำการคัดเลือกปัจจัยที่จะใช้วิจัยและปัจจัยที่ไม่สามารถเลือกได้เนื่องจากเป็นปัจจัยควบคุมหรือเป็นปัจจัยที่ไม่ส่งผลต่อการเกิดความสูงของตะกอน แล้วนำปัจจัยเหล่านั้นที่คัดเลือกเบื้องต้นมาทำการออกแบบการทดลองเพื่อพิสูจน์สมมติฐานตามที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยเหล่านั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนหรือไม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะมีการประยุกต์ใช้หลักการทางสถิติและโปรแกรม Minitab มาช่วยวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติแล้วจะต้องวิเคราะห์ความหมายของผลการทดลองเพื่อนำไปศึกษาต่อว่าปัจจัยดังกล่าวนี้มีระดับในการปรับตั้งค่าที่เหมาะสมหรือไม่ เพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยที่ผลสรุปจากการทดลองนั้นจะแจ่มแจ้งได้ว่าปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจภายใต้ระดับของความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญตามสมมติฐานที่ตั้งไว้

จากหัวข้อ 3.2 ของการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อทำการพิสูจน์สมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยเหล่านั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดความสูงของตะกอนและเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองให้เหลือน้อยมากที่สุด ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาแผนแบบการทดลองแล้วพบว่า การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล (2^{k-p} Fractional Factorial Design) แบบสองระดับ ซึ่งมีเรโซลูชัน IV (Resolution) ที่ค่าความน่าเชื่อถือได้ในระดับ IV นั้นมีความเหมาะสมมากที่สุด กล่าวคือการออกแบบการทดลองข้างต้นเป็นแผนการทดลองที่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลัก และปัจจัยร่วมที่มี 2 ระดับได้ทุกรายการแบบโดยตรง ข้อดีของการออกแบบการทดลองชนิดนี้จะใช้จำนวนการทดลองที่น้อยและประหยัดต้นทุนเวลาในการทดลอง หากแต่ข้อเสียคือ อาจทำให้มีข้อมูลไม่เพียงพอต่อการวิเคราะห์ เพราะเป็นการกำหนดระดับปัจจัยเพียง 2 ระดับเท่านั้น เพื่อเกื้อยอิทธิพลแทรกซ้อนที่มีผลต่อข้อมูลต่างๆออก โดยจะกำหนดระดับของปัจจัย เป็นระดับต่ำ (-) และระดับสูง (+) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลออก

โดยการพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองนั้นจะได้รับการวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (Analysis of Variance) ซึ่งโปรแกรมช่วยวิเคราะห์จะคำนวณค่า P-value ออกมาให้ เมื่อพิจารณาค่า P-value ของแต่ละปัจจัย ทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมดังกล่าว จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α เพื่อเป็นการพิสูจน์สมมติฐาน ว่าปัจจัยดังกล่าวนี้มีอิทธิพลต่อตัว

แปรตอบสนองหรือไม่ โดยค่า P-value ที่ได้แต่ละค่า นั้นหากมีค่ามากกว่าค่า α จะแสดงว่า ปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05 โดยในการวิเคราะห์อิทธิพลของปัจจัยเหล่านั้น จะพิจารณาทั้ง อิทธิพลหลัก (Main effect) และ ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction effect) ที่ส่งผลต่อผลของตัวแปรตอบสนองนั้นๆ

3.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัยเบื้องต้น

ในการทดลองเบื้องต้นจะกำหนดระดับของปัจจัย (Levels) แบบการกำหนดตายตัว (Fixed level) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอน และควบคุมค่าได้ โดยอาศัยความรู้ความเข้าใจพื้นฐานในขั้นตอนและกระบวนการผลิต พร้อมทั้งประสบการณ์ของพนักงานควบคุมที่เชี่ยวชาญและชำนาญทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ควรใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 2 ระดับ โดยใช้สภาวะการผลิตปัจจุบันมากำหนดค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าของแต่ละปัจจัย เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าความสูงของตะกอนในการผลิตไซรัป

3.3 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง

3.3.1 แผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

สำหรับขั้นตอนการคัดกรองปัจจัยในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเลือกใช้การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2k-p (2k-p Fractional Factorial Design Single Replicate) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตการผสมไซรัปด้วยเครื่องผสม HSVM เพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายและต้นทุนการผลิตเนื่องจากการทดลอง ซึ่งมีปัจจัยนำเข้าอยู่ทั้งสิ้น 4 ปัจจัย จึงออกแบบจำนวนการทดลองได้ทั้งหมด 8 การทดลอง ซึ่งมีการใช้โปรแกรมวิเคราะห์ Minitab เข้าช่วยในการออกแบบ ลำดับ การสุ่มและตารางการทดลอง โดยจะกำหนดระดับของปัจจัย เป็นระดับต่ำ (-) และระดับสูง (+) เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลออก พร้อมทั้งแบ่งกลุ่มของอิทธิพลจากปัจจัยอันประกอบได้ด้วย

1. อิทธิพลหลัก (Main effect) คือ อิทธิพลจากปัจจัยที่ศึกษาส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองเป็นหลัก
2. ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction effect) คือ การแสดงออกของปัจจัยที่มีผลพวงจากปัจจัยต่างระดับ ในปัจจัยหนึ่งที่ไม่เท่ากัน เมื่อเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของแต่ละปัจจัย แล้วส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองร่วมกัน

3.3.2 หลักที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

1. การทำทดลองซ้ำ (Replication) เพื่อลดอิทธิพลแทรกซ้อน (Noise effect) ต่างๆที่ได้มาจากข้อมูล โดยการกำหนดจำนวนครั้งในการทำทดลองนั้นที่ระดับปัจจัยต่างๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ลดความคลาดเคลื่อนและน่าเชื่อถือ

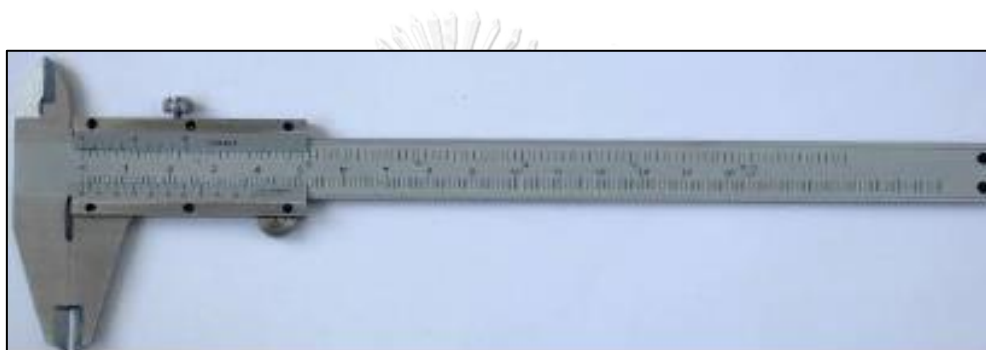
2. การทำแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อเป็นการกระจายและไม่มีการเจาะจงทำการทดลองใดทดลองหนึ่งและลดอิทธิพลแทรกซ้อนต่างๆที่อาจจะมีผลต่อข้อมูลและผลการทดลอง และเป็นการกระจายอิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ระหว่างกระบวนการ และเพื่อเป็นความเท่าเทียมต่อข้อมูลที่ได้ โดยสำหรับงานวิจัยนี้จะเลือกใช้การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete randomization)

ภายใต้การศึกษาปัจจัยที่จะส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองเหล่านั้น จะต้องนำหลักการที่ใช้ตั้งข้างต้นมาเป็นประเด็นหลักและพิจารณาอย่างเคร่งครัด เช่น ลำดับการสุ่มการทดลองตามแต่ละระดับปัจจัยตามที่ออกแบบการทดลองให้เหมาะสม และเป็นการกระจายความเป็นอิสระของข้อมูลและการทดลองซึ่งกันและกัน และเป็นการกระจายอย่างสม่ำเสมอไม่มีการเอนเอียงไปทางใดทางหนึ่ง และอยู่ภายใต้การควบคุมปัจจัยอื่นๆที่อยู่นอกเหนือปัจจัยหลักนั้นจะต้องมีการควบคุมตามข้อกำหนดไว้ในแผนการทดลอง

3.4 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์สำหรับการเก็บข้อมูลและการวิจัย

อุปกรณ์ที่ใช้ในการเก็บข้อมูลและวิจัยในการวัดค่าตะกอนความสูงของไซรัป

1. เวอร์เนียคาลิเปอร์ อุปกรณ์สำหรับวัดค่า
2. โต้ะขงเซ็คตัวอย่างสำหรับการเตรียมและวัดค่าความสูงของตะกอน
3. เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับชั่งตวงน้ำหนักไซรัปและน้ำ
4. ถ้วยชงและช้อนคน



รูป 3-9 แสดงอุปกรณ์เวอร์เนียคาลิเปอร์ สำหรับการวัดค่าเก็บข้อมูลในงานวิจัย

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลและผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลของข้อมูลจะนำหลักการทางสถิติมาประยุกต์ใช้และช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้ผลของการวิเคราะห์นั้นมีความน่าเชื่อถือ โดยดำเนินการตามหลักการดังต่อไปนี้

3.5.1 โปรแกรมช่วยสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้ จะมีการใช้โปรแกรมช่วยวิเคราะห์สำเร็จรูป คือ Minitab 19 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับช่วยในการออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยงานวิจัยฉบับนี้จะใช้โปรแกรมข้างต้นในการวิเคราะห์ผลทั้งในส่วนการทดลองคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น การทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม และการทดลองยืนยันผลภายหลังปรับปรุงพารามิเตอร์สำหรับกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM

3.5.2 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ออกแบบไว้ นั้น เป็นวิธีการตรวจสอบและให้ความมั่นใจว่าผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่างๆจากข้อมูล มีความน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ โดยมีการตรวจสอบ 3 คุณสมบัติ ซึ่งสามารถตรวจสอบตามสมมติฐาน 3 ข้อ ดังนี้

3.5.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (Normality Assumption)

การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ จะพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของข้อมูลและค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามาก ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และการทดสอบจะทวนสอบจากค่า P-value นั้นจะต้องมีค่ามากกว่า 0.05 จึงจะถือได้ว่าข้อมูลนั้นมีการแจกแจงแบบปกติ มีความน่าเชื่อถือและเหมาะสมต่อการนำไปใช้วิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

3.5.2.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ จะพิจารณาจากแผนภาพของข้อมูลในการกระจายตัวระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) กับค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยข้อมูลจะต้องไม่มีลักษณะกระจายตัวเป็นแนวโน้ม (Trend) หรือเกิดรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนหรือแน่นอน ภายใต้การทำทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม จึงจะถือได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกันและเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานต่อไป

3.5.2.3 การทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

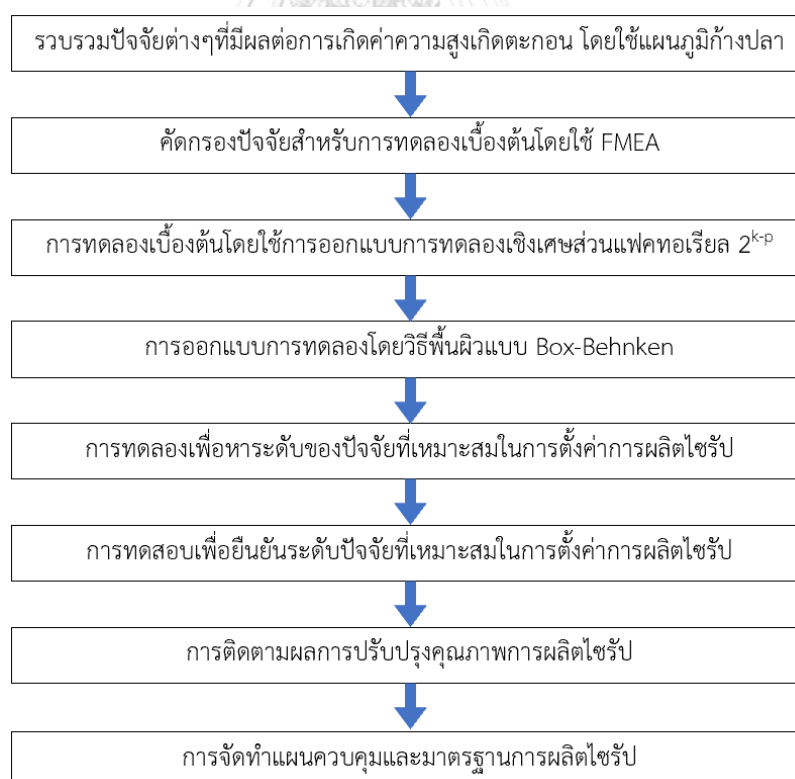
การทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน จะพิจารณาจากแผนภาพของข้อมูลในการกระจายตัวระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย (Fitted Value) กับค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยข้อมูลจะต้องไม่มีลักษณะกระจายตัวเป็นแนวโน้ม (Trend) หรือเกิดรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนหรือแน่นอน เป็นการกระจายแบบทั่วไป ซึ่งถ้าหากข้อมูลมีความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอในการกระจายตัวของข้อมูล แสดงว่าข้อมูลนั้นมีความน่าเชื่อถือและสามารถไปใช้วิเคราะห์ต่อไป

3.5.3 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของผลการทดลองแกรม

ในการวิเคราะห์ข้อมูลของผลการทดลองนั้น จะประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ในการช่วยพิจารณาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งจะเป็นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปทางสถิติช่วยในการคำนวณค่า P-value พร้อมทั้งทำให้สามารถเปรียบเทียบค่า P-value ของทั้งปัจจัยหลัก และปฏิกริยาสัมพันธ์ในแต่ละเทอมได้ โดยการพิจารณาค่า P-value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α โดยถ้ค่า P-value นั้นมีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่ถ้ค่า P-value นั้นมีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

3.6 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพสำหรับกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM

ขั้นตอนการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพสำหรับกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM แสดงดังรูปที่ 3-10



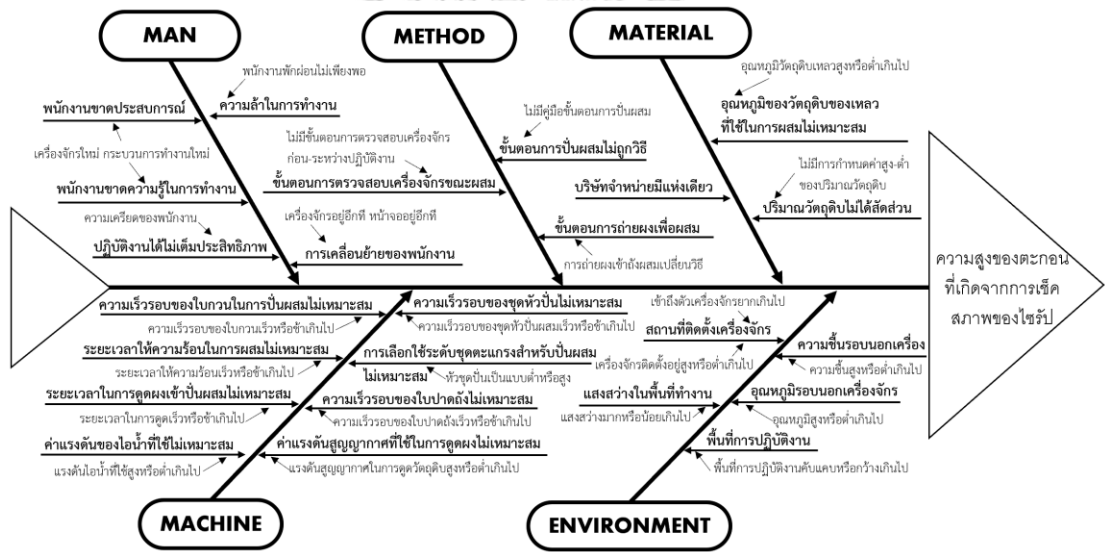
รูป 3-10 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง

บทที่ 4

ผลการศึกษาและวิเคราะห์ปัจจัย

4.1 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตโซลาร์

จากการระดมสมองจากสมาชิกทีม ผู้เชี่ยวชาญและผู้ชำนาญการจากประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต จากบทที่ 3 โดยอ้างอิงข้อมูลจากการทดลองและดำเนินงานในอดีตที่ผ่านมา มาพิจารณาร่วมกันเพื่อช่วยกันหาปัจจัยที่จะนำมาวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตโซลาร์ ผ่านการประยุกต์ใช้แผนภูมิแกงปลาเพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุและปัญหาที่ส่งต่อตัวแปรตอบสนอง ดังรูปที่ 4-1



รูป 4-1 แสดงแผนภูมิแกงปลาที่ได้จากการระดมสมองเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสูงของตะกอนที่เกิดจากการเช็คสภาพของโซลาร์

รูปที่ 4-1 จะแสดงถึงปัจจัยที่ทีมงานช่วยกันวิเคราะห์และพิจารณาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน โดยแสดงตารางความสัมพันธ์สาเหตุและผลของปัญหาที่เกิดขึ้นของเสียจากการผลิตโซลาร์ที่เกิดจากความสูงของตะกอนสูงเกินมาตรฐาน จากนั้นนำปัจจัยทั้งหมดทำการวิเคราะห์สาเหตุของลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ FMEA เพื่อเปรียบเทียบผลจากแต่ละปัจจัยโดยพิจารณาจาก

ผลรวมของค่าความเสี่ยงตามลำดับ RPN (Risk priority number) โดยจะเลือกปัจจัยจากลำดับความเสี่ยงสูงเพื่อทำการทดลองเบื้องต้นต่อไป

ตารางความสัมพันธ์ของสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix)

จากแผนภูมิแก๊งปลา หรือแผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) จากรูปที่ 4-1 พบว่าสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผสมไซรัป 4003 นั้น มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอยู่ถึง 25 ปัจจัย ซึ่งจะพบว่ามีปัจจัยจำนวนมากเกินไป ผู้วิจัยจึงได้พิจารณาหาวิธีการเพื่อตัดบางปัจจัยออกจากการทดลอง เพื่อให้เหมาะสมกับระยะเวลาที่มีอย่างจำกัดและทรัพยากรที่ใช้ไปวิธีการคัดกรอง โดยให้ผู้เชี่ยวชาญและชำนาญการทั้ง 10 ท่าน ร่วมกันลงคะแนนอัตราความสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรัป ตามหลักเกณฑ์ Cause and Effect Matrix

จากเกณฑ์ที่ได้กำหนดไว้ในการให้คะแนน โดยทีมงานทั้ง 10 ท่านให้คะแนนปัจจัยที่ส่งผลกับตัวแปรตอบสนอง ซึ่งทีมงานแต่ละท่านจะลงคะแนนในแบบสอบถาม ดังแบบฟอร์มในภาคผนวก ค. แล้วนำคะแนนแต่ละท่านมาวิเคราะห์ต่อ ซึ่งจะสามารถสรุปผลของความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลในตารางที่ 4-1 โดยมีการกำหนดคะแนนความสัมพันธ์มีค่า 1-10 โดยนิยามของคะแนนดังนี้

1 = มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนน้อยที่สุด

10 = มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนมากที่สุด

ซึ่งตารางแสดงผลการให้คะแนนของทีมงานแต่ละท่านจะแสดงภาพรวมในภาคผนวก ค.

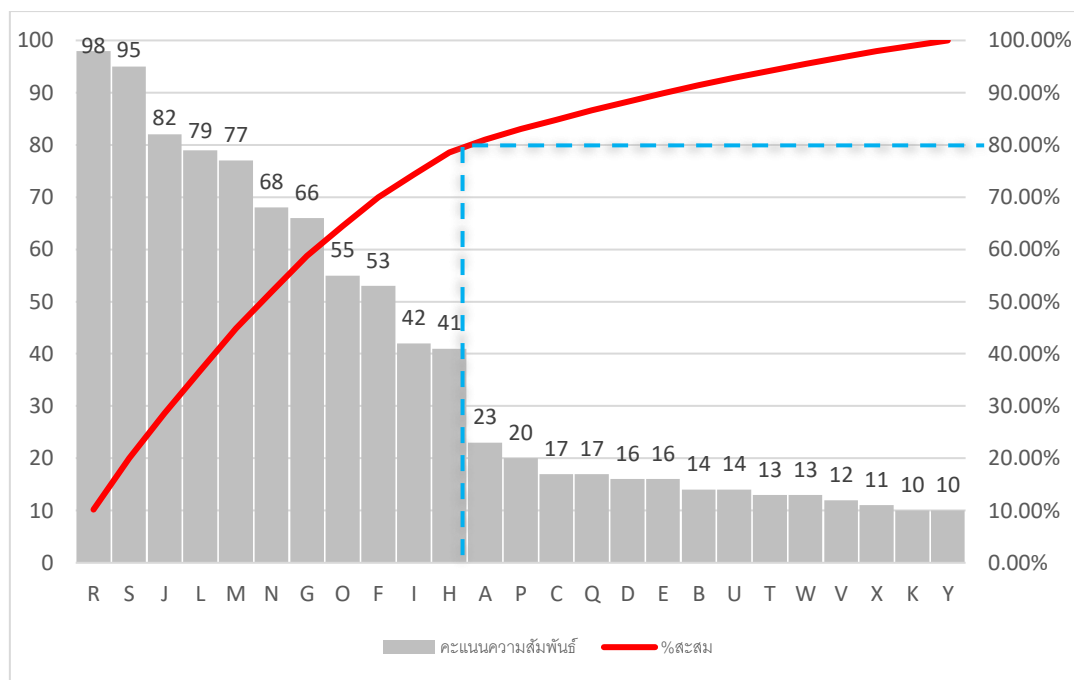
ตาราง 4-1 ตาราง Cause and Effect Matrixจากการให้คะแนนของคณะทีมผู้เชี่ยวชาญ

Cause and Effect Matrix				
ลำดับ	จำแนกตามสาเหตุ	สัญลักษณ์	ปัจจัย	คะแนน
1	Machine	R	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นไม่เหมาะสม	98
2	Machine	S	การเลือกใช้ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมไม่เหมาะสม	95
3	Material	J	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวที่ใช้ไม่เหมาะสม	82
4	Machine	L	ความเร็วรอบของใบกวนไม่เหมาะสม	79
5	Machine	M	ความเร็วรอบของใบปาดไม่เหมาะสม	77
6	Machine	N	ระยะเวลาให้ความร้อนในกปั่นผสมไม่เหมาะสม	68
7	Method	G	ไม่มีคู่มือขั้นตอนการปั่นผสม	66
8	Machine	O	การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสมเปลี่ยนวิธี	55
9	Method	F	ไม่มีคู่มือตรวจสอบเครื่องจักรขณะผสม	53

ตารางที่ 4-1 ตาราง Cause and Effect Matrix (ต่อ)

Cause and Effect Matrix				
ลำดับ	จำแนกตามสาเหตุ	สัญลักษณ์	ปัจจัย	คะแนน
10	Material	I	ปริมาณวัตถุดิบไม่ได้สัดส่วน	42
11	Method	H	ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	41
12	Man	A	ความเร็วรอบของใบกวนไม่เหมาะสม	23
13	Machine	P	ความเร็วรอบของใบปาดไม่เหมาะสม	20
14	Man	C	ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสมไม่เหมาะสม	17
15	Machine	Q	ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	17
16	Man	D	ค่าแรงดันของไอน้ำที่ใช้ในการผสมไม่เหมาะสม	16
17	Man	E	ค่าแรงดันสุญญากาศที่ใช้ในการดูดผงเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	16
18	Man	B	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นไม่เหมาะสม	14
19	Environment	U	การเลือกใช้ระดับชุดหัวปั่นผสมไม่เหมาะสม	14
20	Environment	T	สถานที่ติดตั้งเครื่องจักรอยู่สูงเกินไป	13
21	Environment	W	สถานที่ติดตั้งเครื่องจักรเข้าถึงยากเกินไป	13
22	Environment	V	แสงสว่างในพื้นที่ทำงานไม่เพียงพอ	12
23	Environment	X	พื้นที่ปฏิบัติงานคับแคบเกินไป	11
24	Material	K	ความชื้นรอบนอกเครื่องจักรไม่เหมาะสม	10
25	Environment	Y	อุณหภูมิรอบนอกเครื่องจักรไม่เหมาะสม	10
คะแนนรวม (Total)				962

จากการวิเคราะห์ด้วยแผนผังสาเหตุและผล พร้อมที่มลงคะแนนอัตราความสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน (Sediment Syrup) ในตารางที่ 4-1 Cause and Effect Matrix พร้อมทั้งใช้หลักการพาเรโตในการจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อ การเกิดค่าความสูงของตะกอนมากเกินไปเกินมาตรฐาน แสดงดังรูปที่ 4-2



รูป 4-2 แผนภูมิพาเรโตจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของตะกอน

มากเกินไปมาตรฐานของกระบวนการปั่นผสมไซรัป

จากรูปที่ 4-2 สามารถสรุปได้ว่า ผลการให้คะแนนอัตราความสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อการศึกษาของตะกอน (Sediment Syrup) โดยมุ่งประเด็นไปที่ปัญหาการศึกษาของตะกอนที่สูงเกินค่ามาตรฐานและมีค่าไม่สม่ำเสมอเป็นประเด็นหลักในการปรับปรุง จากผลการให้คะแนนจากทีมงานทั้ง 10 ท่านพบว่าคะแนนรวมทั้งหมดของปัจจัยมีค่าเท่ากับ 962 คะแนน และทำการเลือกพร้อมจัดเรียงลำดับปัจจัยตามแผนภูมิพาเรโต จะพบว่ามีจำนวนปัจจัยถึง 11 ปัจจัยที่ถูกนำไปศึกษาต่อด้วยการวิเคราะห์ FMEA ดังแสดงในตารางที่ 4-2 โดยผลรวมของคะแนนความสำคัญของ 11 ปัจจัยดังกล่าว นั้นอยู่ที่ 756 คะแนน ซึ่งคิดเป็นสัดส่วน 78.59 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 4-2 แสดงลำดับคะแนนของปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อด้วยการวิเคราะห์ FMEA ทั้ง 11 ปัจจัย

ลำดับที่	ตัวแปร	จำแนกตามสาเหตุ	ปัจจัย	คะแนน
1	R	Machine	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นไม่เหมาะสม	98
2	S	Machine	การเลือกใช้ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมไม่เหมาะสม	95
3	J	Material	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวที่ใช้ไม่เหมาะสม	82
4	L	Machine	ความเร็วรอบของใบกวนไม่เหมาะสม	79

5	M	Machine	ความเร็วรอบของใบปาดไม่เหมาะสม	77
---	---	---------	-------------------------------	----

ตารางที่ 4-2 แสดงลำดับคะแนนของปัจจัยที่นำไปศึกษาต่อด้วยการวิเคราะห์ FMEA ทั้ง 11 ปัจจัย (ต่อ)

ลำดับที่	ตัวแปร	จำแนกตามสาเหตุ	ปัจจัย	คะแนน
6	N	Machine	ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสมไม่เหมาะสม	68
7	G	Method	ไม่มีคู่มือขั้นตอนการปั่นผสม	66
8	O	Machine	การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสมเปลี่ยนวิธี	55
9	F	Method	ไม่มีคู่มือตรวจสอบเครื่องจักรขณะผสม	53
10	I	Material	ปริมาณวัตถุดิบไม่ได้สัดส่วน	42
11	H	Method	ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	41
คะแนนรวม (Total)				756

จากตารางที่ 4-2 ทั้ง 11 ปัจจัยข้างต้นที่เกิดจากการจัดเรียงลำดับตามอัตราคะแนนความสำคัญที่จะส่งผลต่อค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการปั่นผสมไซรป์ จะแจกแจงรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นผสม มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ และปรับเปลี่ยนค่าได้ง่ายในการทดลอง ซึ่งหากใช้ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นผสมที่ความเร็วรอบต่ำหรือสูงเกินไป จะส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรป์ ทำให้ไม่ได้คุณภาพตามมาตรฐานไซรป์ที่ส่งต่อไปอบแห้งในกระบวนการถัดไป

การเลือกใช้ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม ชุดหัวปั่นผสมสามารถเลือกใช้และปรับระดับได้ เป็นปัจจัยที่ควบคุมและปรับเปลี่ยนได้ง่ายในการทดลอง หากเลือกใช้ระดับของชุดหัวปั่นที่ไม่เหมาะสม อาจเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรป์

อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวเริ่มต้นที่ใช้ในการผสม ซึ่งอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิหลังแลกเปลี่ยนความร้อนจาก Heat exchanger plate ได้ หากอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวเหล่านี้มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป อาจทำให้การปั่นผสมไซรป์ไม่สมบูรณ์และอาจเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรป์

ความเร็วรอบของใบกวนในการปั่นผสม มีหน่วยเป็นรอบต่อนาที ซึ่งเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมค่าความเร็วได้ และปรับเปลี่ยนค่าได้ง่าย ซึ่งหากกำหนดความเร็วรอบของใบกวนไม่เหมาะสม อาจส่งผลต่อการปั่นผสมของเครื่องจักร และทำให้เกิดค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรป์มากเกินมาตรฐาน

ความเร็วรอบของใบปาดถังในการผสม หากเลือกใช้ความเร็วรอบของใบปาดถังที่ไม่เหมาะสม อาจส่งผลต่อค่าความสูงของตะกอนได้

ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสม ใช้ นาฬิกาจับเวลา ช่วงการให้ความร้อนในสำหรับการปั่นผสม ถ้าให้เวลาในการปั่นผสมที่ไม่เหมาะสมน้อยหรือมากเกินไป อาจทำให้เกิดค่าความสูงของตะกอนที่ในการชงไซรัปมากเกินไปมาตรฐาน

คู่มืออ้างอิงขั้นตอนในการปั่นผสม จำเป็นอย่างยิ่งและเป็นสิ่งที่จะต้องมีความรู้มาตรฐานในการปฏิบัติงาน และการปั่นผสมด้วยเครื่องจักร HSVM ซึ่งถ้าไม่ทำตามขั้นตอนอาจเป็นสาเหตุเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรัป มากเกินไปมาตรฐาน

การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสมเปลี่ยนวิธี เนื่องจากเป็นเครื่องจักรใหม่ และวิธีการถ่ายผงเพื่อเข้าผสมเปลี่ยนรูปแบบ ซึ่งอาจทำให้มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรัป

คู่มือการตรวจสอบเครื่องจักรก่อนและระหว่างการปั่นผสม เนื่องจากระหว่างการปั่นผสมอาจเกิดปัญหา และทำให้ไม่สามารถตรวจสอบได้ซึ่งมีการลองผิดลองถูกแก้ไขปัญหาเฉพาะหน้า ซึ่งอาจทำให้มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรัป

ปริมาณวัตถุดิบที่ผสมไม่ได้สัดส่วนตามมาตรฐาน จะมีค่าน้อยและมากที่ยอมรับได้ของสูตรในการปั่นผสม เนื่องจากเป็นเครื่องจักรใหม่ ซึ่งต้องมีการปรับจูนการเตรียมปริมาณผง ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการชงไซรัป

ระยะเวลาในการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสม หากกำหนดระยะเวลาในการดูดถ่ายผงเข้าปั่นผสมไม่เหมาะสม อาจส่งผลให้เกิดค่าความสูงของตะกอนที่เกินมาตรฐานได้

เมื่อสรุปปัจจัยที่ผ่านคัดกรองจากแผนผังสาเหตุและผล พร้อมทั้งมีลงคะแนนอัตราความสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนมาแล้ว 11 ปัจจัยข้างต้น ดังนั้นปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกสำหรับการศึกษาต่อในการปรับปรุงคุณภาพด้านค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัป ได้สรุปเหตุผลไว้ดังตารางที่ 4-3

ตาราง 4-3 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ เบื้องต้น

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
1. ปัจจัยด้านคน	
1.1 พนักงานขาดประสิทธิภาพเนื่องจากเป็นเครื่องจักรใหม่	- ปัจจัยนี้เกิดจากพนักงานใหม่หรือพนักงานที่ยังขาดประสบการณ์ในการทำงาน ซึ่งสามารถทำการแก้ไขโดยการกำหนดให้พนักงานที่มีประสบการณ์มากหรือมีความเชี่ยวชาญเป็นผู้ทดลองเพียงคนเดียวตลอดการทดลอง
1.2 พนักงานทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ	- ปัจจัยนี้เกิดจากพนักงานใหม่หรือพนักงานที่ยังขาดประสบการณ์ในการทำงาน ซึ่งสามารถทำการแก้ไขโดยการกำหนดให้พนักงานที่มีประสบการณ์มากหรือมีความเชี่ยวชาญเป็นผู้ทดลองเพียงคนเดียวตลอดการทดลอง
1.3 พนักงานมีการเคลื่อนย้ายบ่อย	- ปัจจัยนี้เกิดจากพนักงานใหม่หรือพนักงานที่ยังขาดประสบการณ์ในการทำงาน ซึ่งสามารถทำการแก้ไขโดยการกำหนดให้พนักงานที่มีประสบการณ์มากหรือมีความเชี่ยวชาญเป็นผู้ทดลองเพียงคนเดียวตลอดการทดลอง
1.4 พนักงานมีความล่าช้าในการทำงาน	- ปัจจัยนี้เกิดจากความเร่งรีบของพนักงาน หรือไม่เข้าใจหลักพื้นฐานของการแก้ไขปัญหา สามารถแก้ไขด้วยการสอนวิธีการและตั้งมาตรฐานการแก้ไขงาน เพื่อไม่ให้เกิดความล่าช้าในการทำงาน
1.5 พนักงานขาดความรู้ความเข้าใจเพราะเป็นกระบวนการใหม่	- ปัจจัยนี้เกิดจากพนักงานใหม่หรือพนักงานที่ยังขาดประสบการณ์ในการทำงาน ซึ่งสามารถทำการแก้ไขโดยการกำหนดให้พนักงานที่มีประสบการณ์มากหรือมีความเชี่ยวชาญเป็นผู้ทดลองเพียงคนเดียวตลอดการทดลอง
2. ปัจจัยด้านวัสดุ	
2.1 บริษัทจำหน่ายมีแห่งเดียว	- เป็นปัจจัยที่อยู่นอกเหนือความรับผิดชอบ และไม่สามารถปรับเปลี่ยนหรือหาใหม่ได้ในระหว่างการทดลอง
3. ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม	
3.1 สถานที่ติดตั้งเครื่องจักรอยู่สูงเกินไป	- เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักรเป็นพื้นที่เฉพาะเจาะจงและไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ระหว่างการทดลอง
3.2 สถานที่ติดตั้งเครื่องจักรเข้าถึงยากเกินไป	- เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักรเป็นพื้นที่เฉพาะเจาะจงและไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ระหว่างการทดลอง

ตารางที่ 4-3 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ เบื้องต้น (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
3.3 พื้นที่ปฏิบัติงานคับแคบเกินไป	- เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้เนื่องจากพื้นที่ในการติดตั้งเครื่องจักรเป็นพื้นที่เฉพาะเจาะจงและไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้ระหว่างการทดลอง
3.4 แสงสว่างในพื้นที่ทำงานไม่เพียงพอ	- ปัจจัยนี้สามารถแก้ไขได้เลยโดยทำการติดตั้งระบบแสงสว่างเพิ่มเติมให้เพียงพอต่อและเหมาะสมต่อการทำงานให้กับพนักงาน
3.5 อุณหภูมิรอบนอกเครื่องจักรไม่เหมาะสม	- เนื่องจากพื้นที่เป็นลักษณะเปิดโล่ง ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมค่าความชื้นในอากาศรอบๆ เครื่องจักรได้
3.6 ความชื้นรอบนอกเครื่องจักรไม่เหมาะสม	- เนื่องจากพื้นที่เป็นลักษณะเปิดโล่ง และเครื่องจักรอยู่ด้านบนสุดใกล้เคียงกับพื้นที่ความร้อน ดังนั้นจึงไม่สามารถควบคุมค่าความร้อนหรืออุณหภูมิรอบๆ เครื่องจักรได้
4. ปัจจัยด้านเครื่องจักร	
4.1 ค่าแรงดันของไอน้ำที่ใช้ในการผสมไม่เหมาะสม	- เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้เนื่องจากต้นทางมีการควบคุมค่าแรงดันการนำส่งไอน้ำสำหรับการใช้งานและมีควบคุมค่าได้ระหว่างการทดลอง
4.2 ค่าแรงดันสุญญากาศที่ใช้ในการดูดผงเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	- เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนได้เนื่องจากต้นทางมีการควบคุมค่าแรงดันการนำส่งไอน้ำสำหรับการใช้งานและมีควบคุมค่าได้ระหว่างการทดลอง

4.2 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัป

จากการวิเคราะห์และให้คะแนนความสำคัญของปัจจัยโดยการพิจารณาจาก Cause and Effect Matrix จึงได้ปัจจัยมาทั้ง 11 ปัจจัย ผู้วิจัยได้นำมาศึกษาลักษณะข้อบกพร่องของปัจจัยต่างๆต่อรวมถึงผลกระทบที่จะเกิดขึ้น เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ส่งผลการเกิดของเสียจากกระบวนการปั่นผสมไซรัปที่แท้จริง เพื่อนำไปศึกษาและปรับปรุงแก้ไขในขั้นตอนต่อไป ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบสามารถทำได้ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. จัดตั้งทีมงาน FMEA ในที่นี้สมาชิกควรจะมาจกหน่วยงานต่าง ๆ ที่หลากหลาย (อ้างอิงจากสมาชิกทีมในการให้อัตราความสำคัญของปัจจัยก่อนหน้า)
2. วิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบตามขั้นตอนต่อไปนี้

- 2.1) ระดมสมองระบุผลิตภัณฑ์หรือองค์ประกอบของระบบหรือส่วนของกระบวนการที่ต้องการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบที่มีโอกาสเกิดขึ้น
 - 2.2) ทำการศึกษาและระบุรายการ Failure Mode ของแต่ละสาเหตุนั้นๆ
 - 2.3) กำหนดผลและสาเหตุของแต่ละ Failure Mode
 - 2.4) ประเมิน Failure Mode อาจใช้จากประสบการณ์หรือจากตารางเกณฑ์การประเมินค่าระดับความรุนแรงของผลกระทบ (Severity) แสดงในตารางที่ 4-4 ค่าของโอกาสหรือความถี่ของสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง (Occurrence) แสดงในตารางที่ 4-5 และค่าระดับความสามารถในการตรวจจับ (Detection) แสดงในตารางที่ 4-6
 - 2.5) ประเมินค่าตัวเลขความเสี่ยงชี้้นำ (Risk Priority Number) โดย $RPN = \text{ผลคูณของค่าระดับความรุนแรงของผลกระทบ (S: Severity) และโอกาสหรือความถี่ของสาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง (O: Occurrence) และระดับความสามารถในการตรวจจับ (D: Detection)}$ ให้ทำการคำนวณทุก Failure Mode ของความล้มเหลวค่าความเร่งด่วนเมื่อเทียบกับแต่ละ Mode นั้นๆ โดย $RPN = S \times O \times D$
 เช่น ค่ามากที่สุดคือ 1,000 ($10 \times 10 \times 10$) หมายถึง ความรุนแรงของปัญหารุนแรงที่สุด มีโอกาสเกิดบ่อยครั้งและความสามารถในการตรวจจับได้ต่ำมาก
 ค่าน้อยที่สุดคือ 1 ($1 \times 1 \times 1$) หมายถึง ความรุนแรงของปัญหาน้อยมาก โอกาสเกิดปัญหาแทบไม่มีเลยและความสามารถในการตรวจจับได้อยู่ในระดับสูง
 - 2.6) วางมาตรการปรับปรุงโดยจัดลำดับความสำคัญตามค่า RPN จากค่ามากไปค่าน้อย (ตัวเลขยิ่งน้อยยิ่งดี ถ้ายิ่งมากต้องรับหามาตรการดำเนินการแก้ไข / ป้องกันโดยด่วน)
3. ระบุวิธีการดำเนินการแก้ไขเมื่อเกิด Failure และทำการประเมินค่า RPN ใหม่เมื่อทำการปรับปรุงเสร็จแล้วทุกครั้ง

ตาราง 4-4 กฎเกณฑ์การประเมินค่าผลความรุนแรงของผลกระทบ (Severity) (กิตติศักดิ์, 2008)

ผลกระทบของสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อลูกค้า	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อกระบวนการภายใน	คะแนน
เกิดอันตรายโดยไม่มี การเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อความปลอดภัยของลูกค้่า หรือ ชัดต่อ กฎหมาย โดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อ การเกิดอันตรายต่อพนักงาน (หรือเครื่องจักร) โดยไม่มีการเตือนล่วงหน้า	10

ตารางที่ 4-4 กฎเกณฑ์การประเมินค่าผลความรุนแรงของผลกระทบ (Severity) (กิตติศักดิ์, 2008)
(ต่อ)

ผลกระทบของสินค้าที่ไม่ได้มาตรฐาน	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อลูกค้า	ความรุนแรงของผลกระทบที่มีต่อกระบวนการภายใน	คะแนน
เกิดอันตรายโดยมีการเตือนล่วงหน้า	กระทบต่อความปลอดภัยของลูกค้า หรือขัดต่อ กม. มีการเตือนล่วงหน้า	มีผลกระทบต่อ การเกิดอันตรายต่อพนักงาน (หรือเครื่องจักร) โดยมีการเตือนล่วงหน้า	9
ผลกระทบสูงมาก	ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากสูญเสียความสามารถในการทำหน้าที่หลักของสินค้า	สินค้าทั้งหมด (100%) อาจต้องถูกทำลาย หรือส่งเข้าซ่อมแซมแก้ไขโดยใช้เวลามากกว่า 1 ชั่วโมง	8
ผลกระทบสูง	สินค้านำไปใช้งานได้ แต่ระดับสมรรถนะลดลงจนทำให้ลูกค้าไม่พอใจมาก	อาจจะมีการตรวจสอบสินค้าแบบคัดเลือก และบางส่วน (น้อยกว่า 100%) ที่อาจถูกทำลายหรือส่งซ่อมแซมแก้ไข ระหว่าง 1/2-1 ชม.	7
ผลกระทบปานกลาง	สินค้าดังกล่าวสามารถนำไปใช้งานได้ แต่ขาดความสะดวกสบายทำให้ลูกค้าไม่พอใจ	สินค้าบางส่วน (น้อยกว่า 100%) อาจถูกทำลาย และไม่ต้องตรวจสอบแบบคัดเลือก (Sorting) หรือส่งเข้าซ่อมแซม แก้ไขใช้เวลาต่ำกว่าครึ่งชม.	6
ผลกระทบต่ำ	สินค้าที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้ด้วยความสะดวกสบาย แต่ระดับสมรรถนะลดลง	สินค้าทั้งหมด (100%) อาจต้องได้รับการรีเวิร์ค (Rework) หรือได้รับการซ่อมแซมนอกสายการผลิตที่ฝ่ายผลิต	5
ผลกระทบต่ำมาก	ความเรียบร้อยของสินค้าไม่ดีนัก อาจมีตำหนิบ้าง ลูกค้าส่วนใหญ่ (>75%) สามารถสังเกตเห็นจุดข้อบกพร่องได้	สินค้าอาจได้รับการตรวจสอบแบบคัดเลือก (Sorting) โดยไม่มีส่วนที่ต้องถูกทำลาย แต่บางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจได้รับการรีเวิร์ค (Rework)	4
ผลกระทบเล็กน้อย	ความเรียบร้อยของสินค้าไม่ดีนัก อาจมีเสียงดังบ้าง ลูกค้าประมาณครึ่ง สามารถสังเกตเห็นข้อบกพร่องได้	สินค้าบางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจต้องได้รับการรีเวิร์ค (Rework) ในสายการผลิตแต่นอกจุดปฏิบัติงานที่ต้องถูกทำลาย	3
เกือบไม่มีผลกระทบ	ความเรียบร้อยของสินค้าไม่ดีนัก อาจมีตำหนิบ้าง โดยลูกค้าส่วนใหญ่ (<25%) สามารถสังเกตเห็นข้อบกพร่องได้	สินค้าบางส่วน (ต่ำกว่า 100%) อาจต้องได้รับการรีเวิร์ค (Rework) ในสายการผลิตแต่นอกจุดปฏิบัติงานไม่มีสินค้าที่ถูกทำลาย	2
ไม่มีผลกระทบ	ไม่มีผลกระทบที่สังเกตเห็นได้	อาจมีความสะดวกสบายเล็กน้อยต่อการทำงาน หรือตัวพนักงานหรือไม่มีผลกระทบใด ๆ	1

ตาราง 4-5 กฎเกณฑ์การประเมินค่าโอกาสของผลกระทบที่เกิดขึ้น (Occurrence) (กิตติศักดิ์, 2008)

โอกาสในการเกิดของสาเหตุนั้นๆ	อัตราข้อบกพร่องที่เกิด ความเสียหาย	Ppk	คะแนน
สูงมาก : เกิดข้อบกพร่องเป็นประจำ	≥ 1 ใน 2	<0.33	10
	1 ใน 3	≥ 0.33	9
สูง : เกิดข้อบกพร่องบ่อย	1 ใน 8	≥ 0.51	8
	1 ใน 20	≥ 0.67	7
ปานกลาง : เกิดข้อบกพร่องเป็นครั้งคราว	1 ใน 80	≥ 0.83	6
	1 ใน 400	≥ 1.00	5
ต่ำ : เกิดข้อบกพร่องค่อนข้างน้อย	1 ใน 2,000	≥ 1.17	4
	1 ใน 15,000	≥ 1.33	3
ห่างไกล : เกือบไม่มีโอกาสเกิดข้อบกพร่อง	1 ใน 150,000	≥ 1.50	2
	≤1 ใน 1,500,000	≥ 1.67	1

ตาราง 4-6 กฎเกณฑ์การประเมินค่าการตรวจจับของระบบควบคุม (Detection) (กิตติศักดิ์, 2008)

การ ตรวจจับ	กฎเกณฑ์	ประเภทการ ตรวจสอบ			ขอบเขตวิธีการตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
เกือบเป็นไป ไม่ได้	ไม่มีระบบการตรวจจับใดๆ			X	ไม่สามารถตรวจจับหรือตรวจสอบได้	10
ห่างไกลมาก	มีระบบควบคุม, ไม่สามารถ ตรวจจับข้อบกพร่องได้			X	การควบคุมกระทำได้โดยทางอ้อมหรือเป็น การสุ่มตรวจ	9
ห่างไกล	มีระบบควบคุมแต่มีโอกาสน้อย มากที่จะตรวจจับ ข้อบกพร่องได้			X	การควบคุมกระทำได้ด้วยการตรวจสอบ ด้วยตาเปล่า Visual inspection เท่านั้น	8
ต่ำมาก	มีระบบควบคุมแต่มีโอกาสน้อย มากที่จะตรวจจับได้			X	การควบคุมกระทำได้ด้วยการตรวจสอบ ด้วยตาเปล่า 2 ครั้ง เท่านั้น	7
ต่ำ	มีระบบควบคุมและอาจจะ ตรวจจับข้อบกพร่องได้		X	X	การควบคุมกระทำได้ด้วยแผนภูมิ SPC	6
ปานกลาง	มีระบบควบคุมและอาจจะ ตรวจจับข้อบกพร่องได้		X		มีการควบคุมโดยใช้เครื่องมือวัด วัดชิ้นงาน ก่อนออกจากจุดปฏิบัติงาน หรือใช้เกจ แบบ Go/NoGo ก่อนออกจากจุดปฏิบัติ	5

ตารางที่ 4-6 กฎเกณฑ์การประเมินค่าการตรวจจับของระบบควบคุม (Detection) (ต่อ)

การตรวจจับ	กฎเกณฑ์	ประเภทการตรวจสอบ			ขอบเขตวิธีการตรวจจับ	คะแนน
		A	B	C		
ค่อนข้างสูง	มีระบบควบคุมแต่มีโอกาสสูงที่จะตรวจจับข้อผิดพลาดได้	X	X		มีการตรวจจับข้อบกพร่องในกระบวนการถัดไปหรือมีการใช้เครื่องมือวัดวัดชิ้นงานชิ้นแรกในขั้นตอนการปรับตั้ง (Set-up)	4
สูง	มีระบบควบคุมแต่มีโอกาสสูงที่จะตรวจจับข้อบกพร่องได้	X	X		มีการตรวจจับสี่เหลี่ยมที่จุดปฏิบัติงาน หรือมีการตรวจจับในกระบวนการถัดไปโดยตรวจสอบเพื่อนการยอมรับ	3
สูงมาก	มีระบบควบคุมเกือบจะมั่นใจได้ว่าสามารถตรวจจับข้อบกพร่องได้	X	X		มีการตรวจจับความผิดพลาดที่จุดปฏิบัติงานด้วยเครื่องมือตรวจจับอัตโนมัติ ชิ้นงานบกพร่องไม่สามารถผ่านไป	2
สูงสุด	มีระบบควบคุมและมั่นใจได้ว่าสามารถตรวจจับข้อบกพร่องได้	X			ไม่มีโอกาสเกิดผลิตภัณฑ์บกพร่องเพราะใช้ Poka-Yoke ในขั้นตอนการออกแบบ Product	1

หมายเหตุ :
 A = การป้องกันความผิดพลาด
 B = การใช้อุปกรณ์การวัด (Gaging)
 C = ตรวจสอบโดยอาศัยบุคคล (Manual Inspection)

เพื่อเป็นแนวทางให้กับคณะทีมงาน สำหรับการร่วมกันวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบต่อ การเกิดปัญหาต่อความสูงมาเกินในไซรป์ โดยในการให้คะแนนจึงกำหนดระดับคะแนนเพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ร่วมกัน 4 ระดับ เนื่องด้วยถ้าใช้เกณฑ์ถึง 10 ระดับ คณะทีมงานอาจบอกความแตกต่างของแต่ละระดับไม่เข้าใจ เพราะระดับแต่ละค่ามีความใกล้เคียงกันมากเกินไป จึงได้ตั้งเกณฑ์ทั้ง 4 ระดับดังนี้

ความรุนแรงของผลกระทบเมื่อเกิดหรือพบปัญหา (Severity)

- 1 คือ ทำให้ไซรป์เกิดค่าตะกอนเล็กน้อยและไม่เกิดริ้วเสียหายสามารถนำไปผลิตเป็นผงดี้ต่อได้เลย
- 4 คือ ทำให้ไซรป์เกิดค่าตะกอนปานกลางและไม่เกิดริ้วเสียหายสามารถนำไปผลิตเป็นผงดี้ได้เป็นส่วนใหญ่

- 7 คือ ทำให้ไซร้เกิดค่าตะกอนสูงและเกิดริ้วเสียหายเล็กน้อยสามารถนำไปผลิตเป็นผงดีได้ เป็นส่วนน้อย
- 10 คือ ทำให้ไซร้เกิดค่าตะกอนสูงมากและเกิดริ้วเสียหายไม่สามารถนำไปผลิตเป็นผงดีต่อ ได้เลย

โอกาสที่จะเกิดหรือพบปัญหานี้ แล้วส่งผลกระทบ (Occurrence)

- 1 คือ เกิดน้อยมาก : เกิดตะกอนจากการชงไซร้มีค่าความสูงน้อยกว่าเกณฑ์หรือตามเกณฑ์
- 4 คือ เกิดปานกลาง : เกิดตะกอนจากการชงไซร้มีค่าความสูงปานกลางเป็นบางครั้ง
- 7 คือ เกิดสูง : เกิดตะกอนจากการชงไซร้มีค่าความสูงเป็นส่วนใหญ่
- 10 คือ เกิดสูงมาก : เกิดตะกอนจากการชงไซร้มีค่าความสูงของตะกอนมากเป็นประจำ

ความสามารถในการตรวจจับปัญหานี้ก่อนจะส่งผลกระทบ (Detection)

- 1 คือ มีระบบการควบคุมได้ทั้งหมด มีการป้องกันได้เกือบทั้งหมด
- 4 คือ มีระบบการควบคุมได้เป็นส่วนใหญ่ มีการป้องกันด้วยเครื่องมือวัด
- 7 คือ มีระบบการควบคุมได้เป็นส่วนน้อย มีการป้องกันโดยอาศัยพนักงานตรวจสอบ
- 10 คือ ไม่มีระบบการควบคุมเกือบทั้งหมด และต้องอาศัยพนักงานเพียงอย่างเดียว

เมื่อทำการวิเคราะห์ประเมินความรุนแรง ความถี่ในการเกิดปัญหา และการประเมินความเป็นไปได้ของการตรวจจับของระบบควบคุมในแต่ละปัจจัยเหล่านั้น แล้วนำค่าระดับคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ประเมินมาคำนวณค่าความเสี่ยง (RPN) โดยค่า $RPN = S \times O \times D$ แสดงไว้ดังตารางที่ 4-7

ตาราง 4-7 ผลการวิเคราะห์ที่ช่วยด้วยการวิเคราะห์ที่การชั่งตวงและผลกระทบบ FMEA

Failure Mode and Effect Analysis

Process Name :		กระบวนการผสมไซรัปข้นหนืด (Thick mixing process)			FMEA No. : PD-0001-2020			Page 1		
Product Name :		CFO Thick mix Syrup (4003-1000)			FMEA Date : 01-Nov-2020			Revision : 00/2020		
Responsible :		Project Engineer, Process Engineer, QA, QC, Supervisor			Prepare : Engineer, Production, QA, QC					
ลำดับที่	Process Step / Part Number	Potential Failure Mode	Potential Failure Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Control	DET	RPN	
1	ผสมไซรัป	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น	- ของเสีย - ไซรัปเสียสภาพ - ค่าตะกอนสูงเกินมาตรฐาน	10	ความเร็วรอบชุดหัวปั่นเร็วหรือช้าเกินไป	7	ใช้ค่าตั้งต้นค่าเดียวในการปั่นผสม	7	490	
2	ผสมไซรัป	การเลือกใช้ระดับชุดหัวปั่นผสม	- ของเสีย - ไซรัปเสียสภาพ - ค่าตะกอนสูงเกินมาตรฐาน	10	เลือกประเภทชุดหัวปั่นไม่ถูก	7	ใช้ค่าตั้งต้นค่าเดียวในการปั่นผสม	7	490	
3	ผสมไซรัป	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวที่ใช้	- ของเสีย - ไซรัปเสียสภาพ - ค่าตะกอนสูงเกินมาตรฐาน	10	อุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป	7	ใช้ค่าตั้งต้นค่าเดียวในการปั่นผสม	7	490	
4	ผสมไซรัป	ความเร็วรอบของใบกวน	- ค่าตะกอนสูงเกินมาตรฐาน - ไซรัปไม่เข้าเนื้อ เป็นก้อน - ค่าตะกอนสูงเกินมาตรฐาน	7	ความเร็วรอบใบกวนเร็วหรือช้าเกินไป	7	ใช้ค่าตั้งต้นค่าเดียวในการปั่นผสม	7	343	
5	ผสมไซรัป	ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสม	- ไซรัปปกติ - ค่าตะกอนสูงเป็นบางส่วน	4	ระยะเวลาการให้ความร้อนเร็วหรือช้าเกินไป	1	มีการตรวจสอบก่อนการเริ่มงาน	4	16	
6	ผสมไซรัป	ความเร็วรอบของใบปาดล้าง	- ไซรัปไม่เข้าเนื้อ เป็นก้อน - ค่าตะกอนสูงเกินมาตรฐาน	7	ความเร็วรอบใบปาดเร็วหรือช้าเกินไป	7	ใช้ค่าตั้งต้นค่าเดียวในการปั่นผสม	4	196	
7	ผสมไซรัป	คู่มือขั้นตอนการปั่นผสม	- ไซรัปปกติ - ค่าตะกอนสูงเล็กน้อย	1	เป็นเครื่องจักรใหม่ ขั้นตอนวิธีการปฏิบัติงานยังไม่เป็นมาตรฐาน	1	มีการตรวจสอบก่อนการเริ่มงาน	4	4	

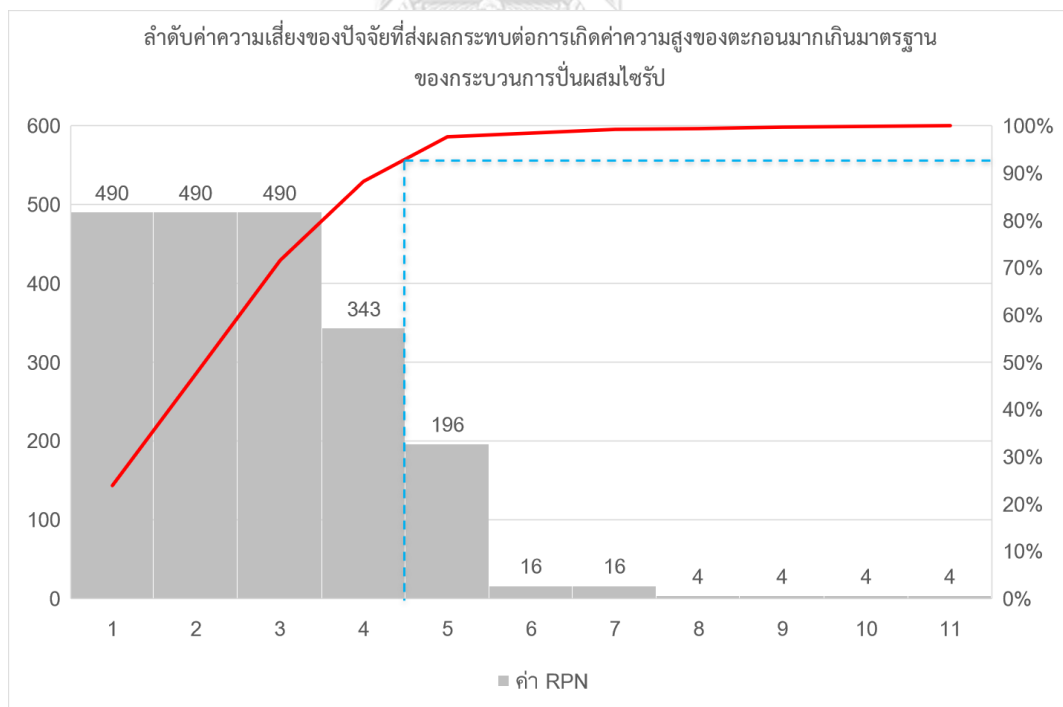
ตารางที่ 4-7 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยการวิเคราะห์อาการ FMEA (ต่อ)

Failure Mode and Effect Analysis

Process Name :		FMEA No. : PD-0001-2020		Page 2					
Product Name :		FMEA Date : 01-Nov-2020		Revision : 00/2020					
Responsible :		Prepare : Engineer, Production, QA, QC							
ลำดับที่	Process Step / Part Number	Potential Failure Mode	Potential Failure Effect	SEV	Potential Cause	OCC	Current Control	DET	RPN
8	ผสมไซรัป	การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสม	- ไซรัปปกติ - ค่าตะกอนสูงเล็กน้อย	1	เป็นเครื่องจักรใหม่ ขั้นตอนวิธีการปฏิบัติงานยังไม่เป็นมาตรฐาน	1	มีการตรวจสอบก่อนการเริ่มงาน	4	4
9	ผสมไซรัป	คู่มือตรวจสอบเครื่องจักรขณะผสม	- ไซรัปปกติ - ค่าตะกอนสูงเล็กน้อย	1	เป็นเครื่องจักรใหม่ ขั้นตอนวิธีการปฏิบัติงานยังไม่เป็นมาตรฐาน	1	มีการตรวจสอบก่อนการเริ่มงาน	4	4
10	ผสมไซรัป	ปริมาณวัตถุดิบ	- ไซรัปปกติ - ค่าตะกอนสูงเล็กน้อย	1	สัดส่วนวัตถุดิบ มากหรือน้อยเกินไป ไม่ได้มาตรฐาน	1	มีการตรวจสอบก่อนการเริ่มงาน	4	4
1.1	ผสมไซรัป	ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสม	- ไซรัปปกติ - ค่าตะกอนสูงเป็นบางส่วน	4	ระยะเวลาการดูดผงเข้าเร็วหรือช้าเกินไป	1	มีการตรวจสอบก่อนการเริ่มงาน	4	16

ตาราง 4-8 แสดงลำดับค่า RPN ของแต่ละปัจจัยที่วิเคราะห์ได้จากตาราง FMEA

ลำดับที่	ปัจจัยที่มีผล	RPN
1	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นไม่เหมาะสม	490
2	การเลือกใช้ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมไม่เหมาะสม	490
3	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวที่ใช้ไม่เหมาะสม	490
4	ความเร็วรอบของใบกวนไม่เหมาะสม	343
5	ความเร็วรอบของใบปาดถังไม่เหมาะสม	196
6	ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสมไม่เหมาะสม	16
7	ระยะเวลาการคูดผงเข้าเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	16
8	ปริมาณวัตถุดิบไม่ได้สัดส่วน	4
9	ไม่มีคู่มือขั้นตอนการปั่นผสม	4
10	การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสมเปลี่ยนวิธี	4
11	ไม่มีคู่มือตรวจสอบเครื่องจักรขณะผสม	4
ผลรวม (Total)		2,057



รูป 4-3 แผนภูมิพาเรโตจัดลำดับปัจจัยตามค่า RPN จากการวิเคราะห์หาการขัดข้องและผลกระทบ FMEA

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) ดังตารางที่ 4-7 เมื่อเรียงลำดับคะแนนของแต่ละปัจจัยจะได้ค่า RPN ผลรวมจากทั้ง 11 ปัจจัยเท่ากับ 2,057 คะแนนดังตารางที่ 4-8 และเมื่อใช้แผนภูมิพาเรโตตามหลักการ 80% ของปัญหา จะมาจาก 20% ของสาเหตุ ซึ่งจะพบว่าปัจจัยลำดับที่ 1-4 จาก 11 ปัจจัย ซึ่งมีผลรวมอยู่ที่ 1,81 คะแนน ซึ่งคิดเป็น 88.13% นั้นเป็นสาเหตุหลักของปัญหา ดังรูปที่ 4-3 ทำให้พบว่า มีถึง 4 ปัจจัยที่ถูกเลือกนำไปศึกษาต่อในการใช้การออกแบบการทดลองเบื้องต้น โดยทั้ง 4 ปัจจัยข้างต้นนี้อาจส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการปั่นผสมไซร้ดังตารางที่ 4-9

ตาราง 4-9 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัย	ค่าปัจจุบัน	หน่วย
ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม	5 (กลาง)	เซนติเมตร
ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น	2000	รอบต่อนาที
อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว	75	องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบของใบกวน	60	รอบต่อนาที

ตาราง 4-10 ปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัยที่ถูกควบคุม	เงื่อนไขที่ควบคุม
ความเร็วรอบของใบปาด	ตรวจสอบความเร็วรอบของใบปาดจากโปรแกรมในห้องควบคุม และใช้ค่าเดียวกันทุกครั้ง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการตกค้างอยู่บนพื้นผิวของถังผสม
ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสม	ตรวจสอบระยะเวลาในการปั่นผสมในห้องควบคุมและกำหนดใช้ค่าเดียวกันทุกครั้ง
คู่มือขั้นตอนการปั่นผสม	กำหนดขั้นตอนและวิธีการปั่นผสมให้เป็นแบบมาตรฐานเดียวกัน
การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสม	กำหนดขั้นตอนและวิธีการปั่นผสมให้เป็นแบบมาตรฐานเดียวกัน
คู่มือตรวจสอบเครื่องจักร	กำหนดขั้นตอนและวิธีการปั่นผสมให้เป็นแบบมาตรฐานเดียวกัน
ปริมาณวัตถุดิบ	ตรวจสอบน้ำหนักของวัตถุดิบที่ติดตามเอกสารการควบคุม น้ำหนักตามสูตรที่กำหนด
ระยะเวลาการดูผงเข้าเพื่อปั่นผสม	ตรวจสอบระยะเวลาในการดูผงเข้าเพื่อปั่นผสมในห้องควบคุม และกำหนดใช้ค่าเดียวกันทุกครั้ง

4.3 การรวบรวมปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัป

เมื่อผ่านการวิเคราะห์ปัจจัยต่างและการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ FMEA เพื่อคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลองเบื้องต้น ได้แสดงวิธีการและเหตุผลต่างๆ ที่ในการคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผสมไซรัปด้วยเครื่อง HSVM ตลอดจนการพิจารณาถึงวิธีการและเงื่อนไขควบคุมปัจจัยอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 4-9 และ 4-10 ตามลำดับ

เมื่อทำการกรองเฉพาะปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อตัวแปรตอบสนองแล้วนั้น ต่อมาคือการเลือกแผนการออกแบบการทดลองเพื่อพิสูจน์สมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยที่คัดเลือกเบื้องต้นดังกล่าวนี้มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง (Yt) ที่สนใจและเพื่อคัดเลือกปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองให้เหลือน้อยมากที่สุด ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาแผนแบบการทดลองแล้วพบว่า การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล (2^{k-p} Fractional Factorial Design) แบบสองระดับ ซึ่งมีเรโซลูชัน IV (Resolution) ที่ค่าความน่าเชื่อถือได้ในระดับ IV นั้นมีความเหมาะสมมากที่สุด กล่าวคือเป็นการออกแบบการทดลองข้างต้นเป็นแผนการทดลองที่สามารถวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมที่มี 2 ระดับได้ทุกรายการแบบโดยตรง ซึ่งจากทั้ง 4 ปัจจัยข้างต้น โดยแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ และจะไม่มีการทำทดลองซ้ำ (Replication) เนื่องด้วยในแง่ของทรัพยากรและต้นทุนในการทดลองและการผลิตมีจำนวนจำกัด จากที่กล่าวมาข้างต้นแล้วนั้นการออกแบบการทดลองจะเป็นการทำแบบสุ่มสมบูรณ์เพื่อเกลี่ยอิทธิพลแทรกซ้อนที่มีผลต่อข้อมูลต่างๆออก โดยจะกำหนดระดับของปัจจัย เป็นระดับต่ำกว่า และระดับสูงกว่า เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีผลออก

เนื่องด้วยกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษานั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง มีกำลังการผลิตที่สูง ซึ่งอาจมีผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายที่เกิดสูงขึ้นตามมา ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเพิ่มเติมจากหนังสือของปารเมศ ชูติมา (ปารเมศ, 2545) ซึ่งมีการกล่าวถึงการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลแบบสองระดับนั้นมีการปรับและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย โดยการออกแบบการทดลองดังกล่าวจะช่วยให้สามารถศึกษาว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้ในการคัดกรองปัจจัย (Screen factor) ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของโครงการพัฒนาหรือปรับปรุงกระบวนการ และเมื่อได้ปัจจัยที่ผ่านการกรองแล้วจะสามารถนำไปสู่การทดลองแบบลงรายละเอียดได้ต่อไป

4.3.1 การกำหนดระดับของปัจจัยเบื้องต้น

ในการทดลองเบื้องต้นนี้จะกำหนดระดับของปัจจัย (Levels) แบบการกำหนดตายตัว (Fixed level) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าได้แน่นอน และควบคุมค่าได้ โดยอาศัยความรู้ความเข้าใจพื้นฐานในขั้นตอนและกระบวนการผลิต พร้อมทั้งประสบการณ์ของพนักงาน

ควบคุมที่เชี่ยวชาญและชำนาญทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ควรใช้สำหรับการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 2 ระดับ โดยใช้สภาวะการผลิตปัจจุบันมากำหนดค่าที่สูงกว่าและต่ำกว่าของแต่ละปัจจัย เพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับค่าความสูงของตะกอนและการตกเป็นริ้วในการงซีคไซร้ โดยมีการแบ่งระดับปัจจัยดังนี้

1. ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม

ระดับของชุดหัวปั่น คือ การเลือกระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมว่าจะทำงานที่ระดับใด ซึ่งจะมี 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ คือระดับที่ชุดตะแกรงอยู่ต่ำกว่าใบพัดโรเตอร์ซึ่งตะแกรงจะยกตัวขึ้นมา 1 เซนติเมตร ระดับกลาง คือระดับที่ชุดตะแกรงจะยกตัวขึ้นมา 5 เซนติเมตรอยู่กึ่งกลางโดยใบพัดโรเตอร์จะหมุนปั่น และระดับสูง คือระดับที่ชุดตะแกรงจะยกตัวขึ้นมา 9 เซนติเมตรอยู่สูงกว่าใบพัดโรเตอร์ โดยตามหลักการของชุดตะแกรงหัวปั่นที่สร้างระบบการหมุนวน จะทำการหมุนปั่นด้วยใบพัดโรเตอร์ดึงเอาของเหลวหรือวัตถุดิบต่างๆที่อยู่ด้านบนลงสู่ด้านล่างและปั่นกระจายออกด้านข้างผ่านรูตะแกรง จากทั้ง 3 ระดับสามารถทำงานในลักษณะเดียวกัน แตกต่างแค่ระดับและระยะการผ่านรูตะแกรง ซึ่งสภาวะการผลิตในปัจจุบันถูกเลือกใช้ที่ระดับกลาง จึงกำหนดระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมเพิ่มขึ้นและลดลงตามระดับค่าที่ตั้งได้คือ ดังนั้นจึงแบ่งระดับของปัจจัยระดับของชุดหัวปั่นผสมเป็น 2 ระดับคือ

ระดับที่ 1 ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมแบบระดับต่ำ ตะแกรงยกตัว 1 ซม.

ระดับที่ 2 ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมแบบระดับสูง ตะแกรงยกตัว 9 ซม.

2. ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น

ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น คือ ความเร็วในการปั่นผสมด้วยชุดใบพัดโรเตอร์ที่หมุนด้วยความเร็วตามรอบที่กำหนดปั่นผ่านรูตะแกรงหรือที่เรียกว่าสเตเตอร์ เป็นจุดศูนย์กลางในการดึงกลุ่มวัตถุดิบของเหลวและวัตถุดิบกลุ่มผงปั่นผ่านรูตะแกรง เพื่อให้ส่วนผสมเข้าเนื้อกัน และสร้างระบบการหมุนวนภายในโดยการดึงของเหลวจากข้างบนลงข้างล่าง ซึ่งจะทำงานภายใต้สภาวะค่าแรงดันสุญญากาศ 300-450 mbar ซึ่งสภาวะการผลิตในปัจจุบันกำหนดไว้ที่ 2000 รอบต่อนาที จึงกำหนดระดับความเร็วรอบในการปั่นผสม เพิ่มขึ้นและลดลง 400 รอบต่อนาที เนื่องจากหากใช้ความเร็วรอบที่ต่ำหรือช้าเกินไป จะส่งผลให้มอเตอร์เกียร์ทำงานหนักและอาจเกิดการไหลของมอเตอร์ได้ และทำให้การทำงานของชุดหัวปั่นผสมทำงานได้ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจถึงส่งผลต่อคุณภาพของไซร้ที่ปั่นผสมออกมาได้ การปรับค่าความเร็วรอบของชุดหัวปั่นดังกล่าวจึงปรับจากค่า

ควบคุมที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้และควบคุมได้ง่าย จึงแบ่งระดับความเร็วรอบของชุดหัวปั่นได้ 2 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 ความเร็วรอบชุดหัวปั่น 1600 รอบต่อนาที

ระดับที่ 2 ความเร็วรอบชุดหัวปั่น 2400 รอบต่อนาที

3. อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว

อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว คือ อุณหภูมิตั้งต้นของวัตถุดิบเหลวก่อนการเข้าปั่นผสม ซึ่งจะมีการควบคุมอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากน้ำร้อนผ่านทาง Heat Exchanger plate ซึ่งจะสามารถควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบการหมุนวนจากถังน้ำร้อน และเป็นจุดเริ่มต้นของการเตรียมวัตถุดิบของเหลวสำหรับกระบวนการปั่นผสมด้วยเครื่อง HSVM ซึ่งสภาวะการผลิตในปัจจุบันกำหนดไว้ที่ 75 องศาเซลเซียส จึงกำหนดระดับอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวในการเริ่มต้น เพิ่มขึ้นและลดลง 10 องศาเซลเซียส เนื่องจากหากใช้ระดับของอุณหภูมิที่สูงเกินไป จะทำให้เกิดความเสียหายต่อสภาพเริ่มต้นของวัตถุดิบของเหลว มีกลิ่นไหม้ สีเข้ม ตะกอนดำหรือถ้าหากหรือใช้ระดับของอุณหภูมิที่ต่ำเกินไประยะเวลาในการเคลื่อนย้ายผ่านจะนานเกินไปซึ่งจะมีผลต่อคุณภาพของไซรัปในการปั่นผสมโดยตรง การปรับค่าระดับของอุณหภูมิจะสามารถปรับจากการตั้งค่าหน้าจอบควบคุมและตรวจสอบอุณหภูมิได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิได้ง่าย ดังนั้นจึงแบ่งระดับของอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวเป็น 2 ระดับคือ

ระดับที่ 1 อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส

ระดับที่ 2 อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส

4. ความเร็วรอบของใบกวน

ความเร็วรอบของใบกวน คือ ความเร็วในการหมุนของใบกวนที่หมุนด้วยความเร็วตามรอบที่กำหนด โดยใบกวนนี้จะเป็นใบกวนที่ช่วยกวนให้วัตถุดิบต่างๆเข้าเนื้อกัน ไม่ตกตะกอนหรือทำให้วัตถุดิบเกาะติด ณ จุดใดจุดหนึ่ง มีส่วนช่วยในการดึงกลุ่มวัตถุดิบของเหลวและวัตถุดิบกลุ่มผงให้ผสมเข้าเนื้อกัน ใบกวนนี้จะทำงานได้ทั้งภายใต้สภาวะค่าแรงดันสุญญากาศ และสภาวะปกติ ซึ่งสภาวะการผลิตในปัจจุบันกำหนดไว้ที่ 60 รอบต่อนาที จึงกำหนดระดับความเร็วรอบในใบกวน เพิ่มขึ้นและลดลง 40 รอบต่อนาที การปรับค่าความเร็วรอบของใบกวนจะสามารถปรับจากแผงหน้าจอบควบคุมเครื่องจักรให้ทำงานได้และควบคุมได้ง่าย แต่ถ้าใช้ความเร็วรอบที่ช้าเกินไป จะทำให้เกิดโพลด์ที่

มอเตอร์และเสียงทำให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย จึงแบ่งระดับความเร็วรอบของใบกวน ได้ 2 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 ความเร็วรอบใบกวน 20 รอบต่อนาที

ระดับที่ 2 ความเร็วรอบใบกวน 100 รอบต่อนาที

ตาราง 4-11 สรุปการกำหนดระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย		หน่วย
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)	
ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม	A	1 (Low)	9 (High)	เซนติเมตร
ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น	B	1600	2400	รอบต่อนาที
อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว	C	65	85	องศาเซลเซียส
ความเร็วรอบของใบกวน	D	20	100	รอบต่อนาที

ตารางสรุประดับปัจจัยที่ใช้สำหรับการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลแสดงดังตารางที่ 4-11

4.3.2 ตัวแปรตอบสนอง

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ผู้วิจัยมีความสนใจว่าปัจจัยใดที่ส่งผลให้เกิดค่าความสูงของตะกอนที่สูงเกินมาตรฐานจากกระบวนการผลิตการผสมไซรัป ดังนั้นการกำหนดตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนการคัดกรองปัจจัยนั้น คือ ค่าของความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้นในการชงไซรัปมีความสูงไม่เกิน 13 มิลลิเมตร โดยทำการทดลองผสมไซรัปสีน้ำตาลรหัส 4003 ด้วยเครื่องผสม HSVM และวัดค่าความสูงของไซรัปในขั้นตอนสุดท้ายหลังทำการผสมเสร็จก่อนส่งผ่านไปสู่อุปกรณ์ถัดไป ซึ่งจะต้องมีการควบคุมตัวแปรตอบสนองที่สำคัญในกระบวนการ ดังนั้นในการทำวิจัยในครั้งนี้จะกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจ คือ

- Sediment คือ ความสูงของตะกอนในการชงไซรัป ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร

4.3.3 สรุปแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

สำหรับขั้นตอนการคัดกรองปัจจัยเบื้องต้นได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2^{k-p} (2^{k-p} Fractional Factorial Design) แบบ 1 เฟลิกิต เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนจากกระบวนการผลิตไซรัป และเพื่อช่วยใน

การลดต้นทุนการผลิตเนื่องจากการทดลอง ค่าใช้จ่ายและเวลาในการทดลอง ซึ่งการทดลองจะมีทั้งหมด 4 ปัจจัยนำเข้า และมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 8 การทดลอง โดยมีการสรุปแบบแผนการออกแบบการทดลองดังตารางที่ 4-12

ตาราง 4-12 สรุปแบบแผนการออกแบบการทดลอง

แผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น			
1. วัตถุประสงค์			
เพื่อคัดกรองปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM ออก เนื่องด้วยทรัพยากรและต้นทุนสำหรับการทดลองนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและมีระยะเวลาอย่างจำกัด			
2. ข้อมูลพื้นฐาน			
ในกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM พบว่าเกิดตะกอนในกระบวนการดังกล่าวที่สูงเกินมาตรฐานกำหนด จึงทำให้เกิดปริมาณของเสียที่ไม่สามารถนำไปผลิตเป็นสินค้าปกติต่อไปได้เป็นปริมาณมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพและกำลังการผลิตลดต่ำ ของเสียที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการผลิต อีกทั้งสูญเสียเวลาและค่าใช้จ่ายแรงงานที่เกิดขึ้นโดยไม่เกิดเป็นสินค้าดี ซึ่งในปัจจุบันมีการปรับตั้งค่าตัวแปรต่างๆแบบลองผิดลองถูก ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของพนักงานผู้ดูแลเครื่องจักร ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์และนำเอาเทคนิคการวิเคราะห์ปัญหาที่เกิด การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ FMEA การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์เชิงสถิติ มาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาที่แท้จริง			
3. ตัวแปรในการทดลอง			
3.1 ตัวแปรตอบสนอง			
ความสูงของตะกอนในการชงไซรัป ไม่เกิน 12 มิลลิเมตร			
3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย	
		ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
3.2.1. ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม (ระดับ = เซนติเมตร)	A	1 (Low)	9 (High)
3.2.2. ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น (รอบต่อนาที)	B	1600	2400
3.2.3. อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว (องศาเซลเซียส)	C	65	85
3.2.4. ความเร็วรอบของใบกวน (รอบต่อนาที)	D	20	100

ตารางที่ 4-12 สรุปแผนการออกแบบการทดลอง (ต่อ)

<p>3.3 ปัจจัยที่ควบคุม</p> <p>3.3.1. ความเร็วรอบของใบปาด (รอบต่อนาที)</p> <p>3.3.2. ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสม (นาที)</p> <p>3.3.3. คู่มือขั้นตอนการปั่นผสม</p> <p>3.3.4. การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสม</p> <p>3.3.5. คู่มือตรวจสอบเครื่องจักร</p> <p>3.3.6. ปริมาณวัตถุดิบ (กิโลกรัม)</p> <p>3.3.7. ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสม (นาที)</p>	<p>การควบคุม</p> <p>80</p> <p>30</p> <p>จัดทำและควบคุมการทดลอง</p> <p>จัดทำและควบคุมการทดลอง</p> <p>จัดทำและควบคุมการทดลอง</p> <p>ใช้น้ำหนักตามสูตร</p> <p>8</p>
<p>4. การออกแบบการทดลอง</p> <p>การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2^{k-p} แบบ 1 เรพลิเคต (2^{k-p} Fractional Factorial Design) ที่ เรสโซลูชันระดับ IV การทดลองทั้งหมดมี $2^{4-1} = 8$ การทดลอง โดยมีทั้งหมด 4 ปัจจัย แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 2 ระดับ ตามสภาวะเงื่อนไข ไม่มีการทำซ้ำ</p>	
<p>5. เมตริกการออกแบบการทดลอง</p> <p>เมตริกการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 3-13</p>	
<p>6. วิธีการสุ่ม</p> <p>ทำการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในการทดลอง ตามตารางที่ 3-13</p>	
<p>7. ตารางบันทึกผล</p> <p>ใช้ตารางบันทึกผลที่ทำการแปลงและสร้างตารางการทดลองออกมาเป็นตารางที่ 3-14 สำหรับบันทึกผล</p>	
<p>8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 2. การใช้โปรแกรม Minitab ช่วยวิเคราะห์และแปลผลร่วม 	
<p>9. อื่นๆ</p> <p>-</p>	

เมื่อใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 ช่วยออกแบบลำดับ การสุ่มและตารางการทดลองตามปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย จะแสดงดังตารางที่ 4-13 ผู้วิจัยได้แปลงและสร้างตารางการทดลองออกมาเป็นตารางที่ 4-14 เพื่อนำเอาระดับของปัจจัยที่ได้กำหนดไว้จากการศึกษาข้อมูล และในกระบวนการพร้อมทั้งสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญให้เหมาะสมในการทำการทดลองขั้นต่อไป

ตาราง 4-13 การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล 2^{k-p} Fractional Factorial Design แบบ 1 เรพลิเคต จากโปรแกรม Minitab 19

StdOrder	RunOrder	A	B	C	D
5	1	-1	-1	1	1
6	2	1	-1	1	-1
4	3	1	1	-1	-1
7	4	-1	1	1	-1
2	5	1	-1	-1	1
3	6	-1	1	-1	-1
1	7	-1	-1	-1	1
8	8	1	1	1	-1

ตาราง 4-14 การกำหนดระดับปัจจัยสำหรับการออกแบบการทดลอง 2^{k-p} Fractional Factorial Design

ลำดับ การทดลอง	ระดับชุด ตะแกรง (A)	ความเร็วรอบ ของชุดหัวปั่น (B)	อุณหภูมิของวัตุดิบ ของเหลว (C)	ความเร็วรอบ ของใบกวน (D)	Sediment (มิลลิเมตร)
1	1	1600	85	100	
2	9	1600	85	20	
3	9	2400	65	20	
4	1	2400	85	20	
5	9	1600	65	100	
6	1	2400	65	100	
7	1	1600	65	20	
8	9	2400	85	100	

4.3.4 ขั้นตอนการทดลองเบื้องต้น

จากการใช้โปรแกรม Minitab ช่วยออกแบบลำดับ การสุ่มและตารางการทดลองตาม ปัจจัยนำเข้า 4 ปัจจัย จะแสดงดังตารางที่ 4-13 ผู้วิจัยได้แปลงและสร้างตารางการทดลอง ออกมาเป็นตารางที่ 4-14 เพื่อนำเอาระดับของปัจจัยที่ได้กำหนดไว้จากการศึกษาข้อมูลและใน กระบวนการพร้อมทั้งสอบถามจากผู้ชำนาญในกระบวนการผลิตให้เหมาะสมในการทำการ ทดลองขั้นต่อไป

โดยกระบวนการผลิตสำหรับการผสมไซรัปนั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องและมี กำลังการผลิตที่ค่อนข้างสูงต่อรอบอีกทั้งใช้ระยะเวลาในการทดลองมาก จึงต้องออกแบบการ ทดลองและวางแผนการดำเนินงานให้ครอบคลุมและชัดเจน เพื่อให้พนักงานฝ่ายผลิตสามารถ ดำเนินงานและขั้นตอนปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และลดผลกระทบต่อสายการผลิต

จากการศึกษาขั้นตอนกระบวนการทั้งหมด ผู้วิจัยได้มีการเตรียมความพร้อมก่อนการ ทดลอง พร้อมแผนการทดลองและทำการอธิบายให้พนักงานฝ่ายผลิตและฝ่ายควบคุมคุณภาพ เข้าใจภาพรวมทั้งหมด รวมทั้งปัจจัยควบคุมและข้อกำหนดที่ต้องควบคุมทั้งหมด เพื่อให้ได้การ ทำงานและผลการทดลองที่มีความน่าเชื่อถือ และไม่มีผลกระทบระหว่างการทดลอง โดย ผลิตภัณฑ์ของกลุ่มไซรัปที่ได้หลังจากการทดลองจะต้องได้รับการตรวจสอบคุณภาพจากแผนก ส่วนควบคุมคุณภาพ ร่วมกับฝ่ายผลิต ก่อนส่งมอบไปยังแผนกการอบแห้งถัดไป ซึ่งจะมีการเพิ่ม ความถี่ในการตรวจสอบจากเดิม 1 ครั้งต่อกะของการผลิต ปรับเปลี่ยนเป็น 1 ครั้งต่อชุดของการ ผลิต

1. เริ่มปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ตามระดับการผลิตปกติ จัดให้มีการผลิตอย่างน้อย 1 ชุด เพื่อปรับสถานะเครื่องผสมให้ทำงานได้อย่างคงที่ และเป็นการทวนเช็คเครื่องจักรตามคู่มือการ ทำงาน
2. ทำการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ตามค่าตารางแผนการทดลอง โดยปรับตามลำดับการ ทดลองที่ออกแบบ โดยทำการผลิตจำนวน 3 ชุด ต่อหนึ่งการทดลอง พนักงานฝ่ายทำการเก็บ ตัวอย่างเพื่อส่งให้พนักงานตรวจสอบคุณภาพวัดค่าความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้น
3. ทำการทดลองและปรับตามค่าพารามิเตอร์ที่ออกแบบไว้จนครบจำนวนของแผนการ ทดลอง และผลค่าความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้น มาทำการวิเคราะห์ค่าวิสัยและค่าความมี นัยสำคัญของปัจจัยนำเข้าที่ทดลองเบื้องต้นแต่ละปัจจัย
4. การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามรูปแบบการวิเคราะห์ผลการทดลอง

5. สรุปผลปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตโซ่รับด้วยเครื่อง HSVM เพื่อไปศึกษาการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการตั้งค่าเครื่องจักรในการผลิตอย่างต่อเนื่อง โดยการออกแบบทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response surface Methodology) ต่อไป

4.3.5 การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

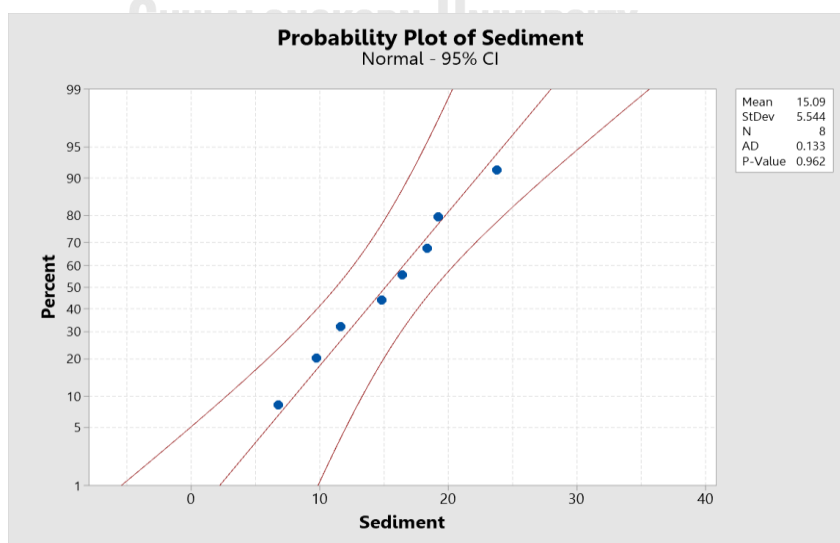
ในการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ออกแบบไว้นั้น เป็นวิธีการตรวจสอบและให้ความมั่นใจว่าผลการทดลองและการวิเคราะห์ความแปรปรวนต่างๆจากข้อมูล มีความน่าเชื่อถือตามหลักการทางสถิติ โดยมีการตรวจสอบ 3 คุณสมบัติ ซึ่งสามารถตรวจสอบตามสมมติฐาน 3 ข้อ ที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ความแปรปรวนในขั้นถัดไปคือ การแจกแจงแบบปกติ การทดลองมีความเป็นอิสระอยู่ภายใต้แบบสุ่ม และมีค่าความแปรปรวนของผลข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความเสถียรภาพหรือน่าเชื่อถือ ดังนี้

4.3.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (Normality Assumption)

การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ สามารถพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของข้อมูลและค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามาก ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และการทดสอบจะทวนสอบจากค่า P-value นั้นมีค่ามากกว่า 0.05 โดยตั้งสมมติฐานการทดสอบดังต่อไปนี้

H_0 : ข้อมูลจากการทดลองมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลจากการทดลองไม่ได้มีการแจกแจงแบบปกติ



รูป 4-4 การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของค่าความสูงตะกอน

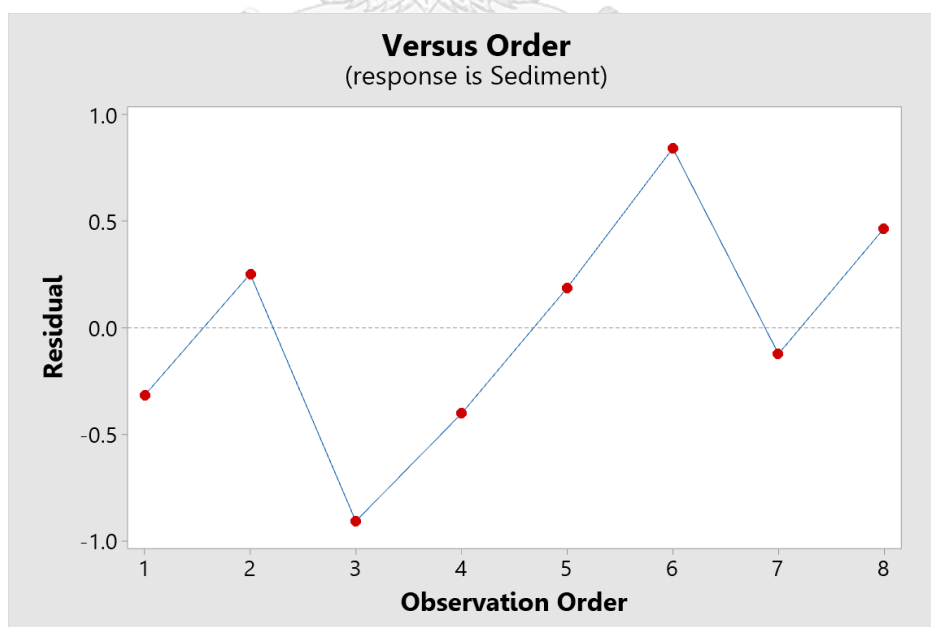
จากการทดสอบผลของข้อมูลค่าความสูงของตะกอนในการชั่งเชื้อไซริบจากค่า ส่วนตกค้างที่ถูกเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามาก และค่าความน่าจะเป็นสะสม ดังรูปที่ 4-4 พบว่ากราฟข้อมูลทั้ง 8 ค่าดังกล่าว มีลักษณะการจัดเรียงใกล้เคียงแนวเส้นตรง อีกทั้ง พิจารณาผลการทดสอบค่าความเป็นปกติจากค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.962 ซึ่งมีค่า มากกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าได้ผลลัพธ์ของข้อมูลตามสมมติฐานที่ตั้งคือยอมรับ สมมติฐาน H_0 และปฏิเสธสมมติฐาน H_1 นั่นคือข้อมูลค่าความสูงของตะกอนการชั่งเชื้อไซริบมีการแจกแจงแบบปกติ

4.3.1.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ จะพิจารณาจากแผนภาพของข้อมูล ในการกระจายตัวระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) กับค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยข้อมูลจะต้องไม่มีลักษณะกระจายตัวเป็นแนวโน้มหรือเกิดรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนหรือแน่นอน โดยตั้งสมมติฐานการทดสอบดังต่อไปนี้

H_0 : ลำดับของข้อมูลจากการทดลองมีความเป็นอิสระภายใต้การสุ่ม

H_1 : ลำดับของข้อมูลจากการทดลองไม่มีความเป็นอิสระภายใต้การสุ่ม



รูป 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูลกับค่าส่วนตกค้างในการทดลองเบื้องต้น

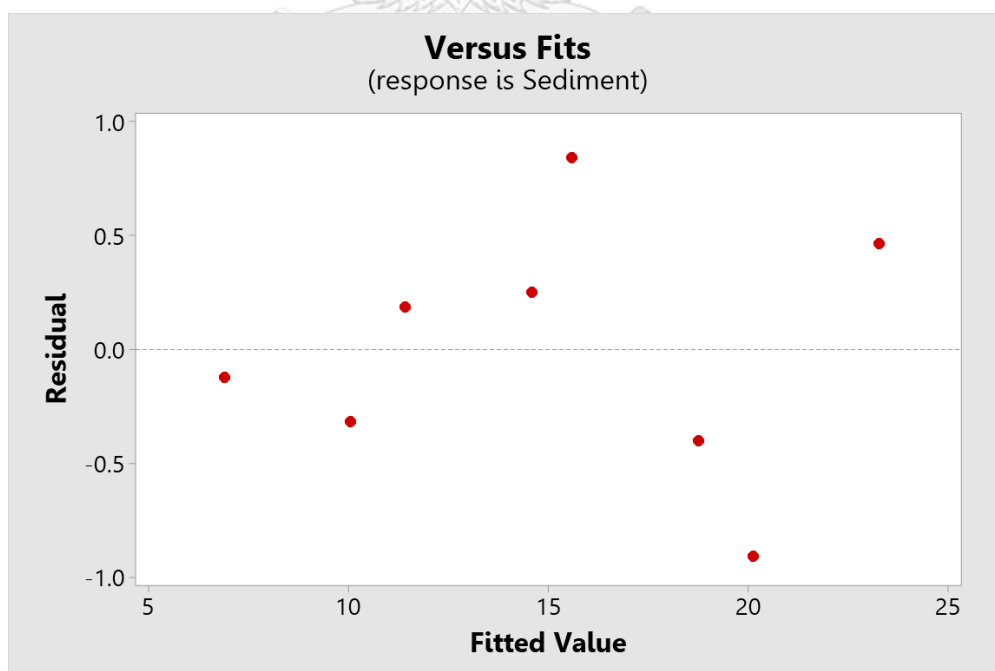
เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูลกับค่าส่วนตกค้างในการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า ข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นอิสระ ไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน และไม่พบค่าความผิดปกติในข้อมูล ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลตามสมมติฐานที่ตั้งคือยอมรับสมมติฐาน H_0 และปฏิเสธสมมติฐาน H_1 นั่นคือลำดับของข้อมูลจากการทดลองมีความเป็นอิสระภายใต้การสุ่ม

4.3.1.3 การทดสอบสมมติฐานของควมมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

การทดสอบสมมติฐานของควมมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน จะพิจารณาจากแผนภาพของข้อมูลในการกระจายตัวระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย (Fitted Value) กับค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยข้อมูลจะต้องไม่มีลักษณะกระจายตัวเป็นแนวโน้มหรือเกิดรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนหรือแน่นอน โดยตั้งสมมติฐานการทดสอบดังต่อไปนี้

H_0 : ค่าความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองมีความเสถียรภาพ

H_1 : ค่าความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองไม่มีความเสถียรภาพ



รูป 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอยกับค่าส่วนตกค้างในการทดลองเบื้องต้น

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4-6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอยกับค่าส่วนตกค้างในการทดลองเบื้องต้นแล้วพบว่า ข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแบบสุ่ม ไม่มีลักษณะการกระจายตัวแบบเป็นแนวโน้ม ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าข้อมูลตามสมมติฐานที่ตั้งคือยอมรับสมมติฐาน H_0 และปฏิเสธสมมติฐาน H_1 นั่นคือค่าความแปรปรวนของข้อมูลจากการทดลองมีเสถียรภาพและเชื่อถือได้

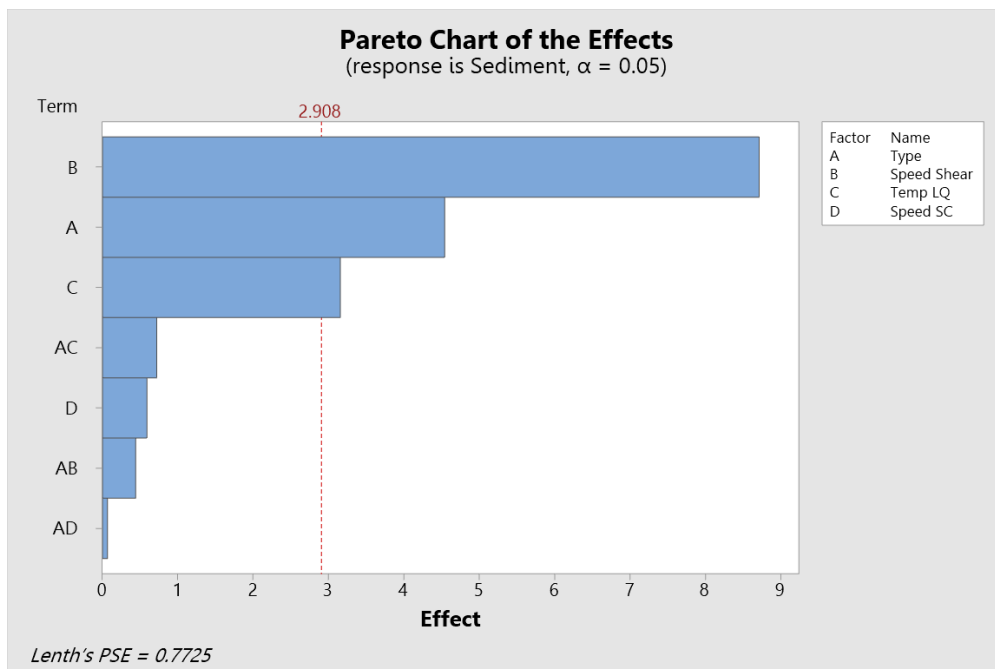
4.3.6 ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้น

ในการทดลองเบื้องต้นแบบ 2^{4-1} Fractional Factorial Design แสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4-15

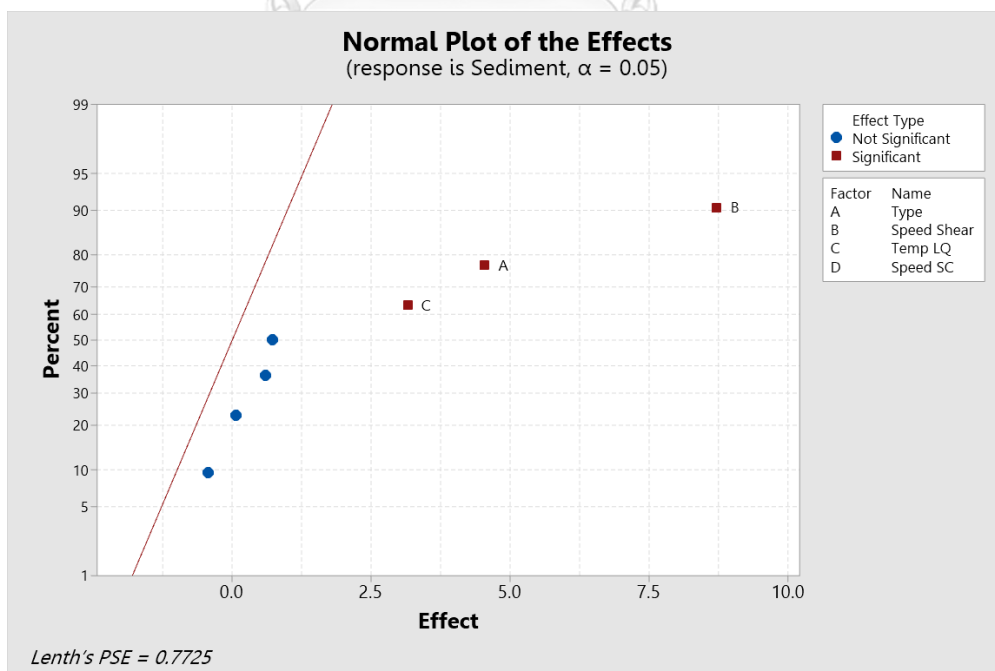
ตาราง 4-15 ผลการทดลองคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น

ลำดับ การทดลอง	ระดับชุด ตะแกรง (A)	ความเร็วรอบ ของชุดหัวปั่น (B)	อุณหภูมิของวัตถุดิบ ของเหลว (C)	ความเร็วรอบ ของใบกวน (D)	Sediment (มิลลิเมตร)
1	1	1600	85	100	9.72
2	9	1600	85	20	14.83
3	9	2400	65	20	19.23
4	1	2400	85	20	18.35
5	9	1600	65	100	11.61
6	1	2400	65	100	16.44
7	1	1600	65	20	6.76
8	9	2400	85	100	23.76

4.3.7 การวิเคราะห์ผลการทดลองจากการทดลองเบื้องต้น



รูป 4-7 แผนภาพพาราเรโตแสดงผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน จากการทดลองเบื้องต้น



รูป 4-8 กราฟ Normal Plot ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน จากการทดลองเบื้องต้น

ตาราง 4-16 ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลของการปั่นผสมไซรัป

Analysis of Variance			
Term	Effect Estimate	Seq SS	Contribution
A	4.540	41.223	19.16%
B	8.715	151.902	70.60%
C	3.155	19.908	9.25%
D	0.5900	0.696	0.32%
A*B	-0.4400	0.387	0.18%
A*C	0.7200	1.037	0.48%
A*D	0.06500	0.008	0.00%
Total		215.162	100.00%

จากตารางที่ 4-16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในการผสมไซรัป โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่าไม่สามารถประมาณค่าความผิดพลาดได้ เนื่องจากค่า Degree of freedom of error มีค่าเป็น 0 ซึ่งส่งผลให้ไม่สามารถคำนวณค่า P-value ได้ ซึ่งพบว่าจากผลของการออกแบบ ที่มีการกระจายตัวแบบปกติและการออกแบบไม่มีการทดลองซ้ำ จึงทำให้การวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองนั้นจะพิจารณาผลการคัดกรองปัจจัยจากแผนภาพพาร์โตแสดงผลของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน (Pareto Chart of the Effect) หรือ กราฟ Normal Plot ของปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน (Normal Plot of the Effect) จากรูปที่ 4-7 และ 4-8 ดังนั้นสามารถสรุปได้ดังนี้

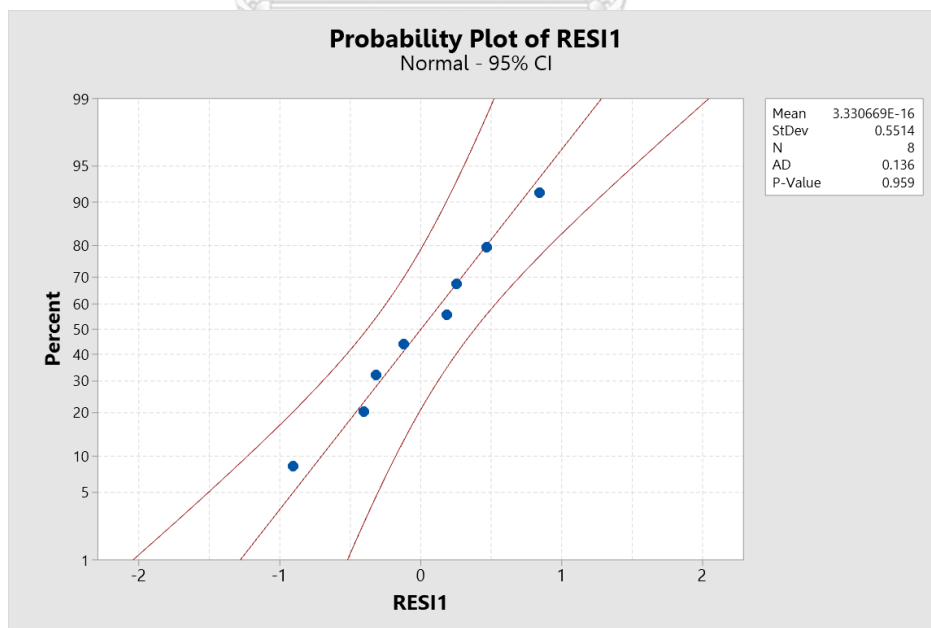
1. Main Effect B หรือ ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนเป็นลำดับที่หนึ่ง
2. Main Effect A หรือ ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสมมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนเป็นลำดับที่สอง
3. Main Effect C หรือ อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวมีอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนเป็นลำดับที่สาม

ในขณะที่ Main Effect D หรือ ความเร็วรอบของใบกวน และอันตรกิริยาระหว่างคู่ปัจจัย ไม่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อทำการพิจารณาจากแผนภาพพารेटและกราฟ Normal Plot จากรูปที่ 4-7 และ 4-8 จะพบว่าปัจจัยที่อยู่เหนือเส้นประคือปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง จึงทดสอบโดยการยุบเทอมของปัจจัยที่ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญ (ใต้เส้นประ) ไปรวมกับเทอม Error เพื่อเพิ่มค่าความผิดพลาดองศาอิสระ (Degree of freedom of error) แล้วจึงวิเคราะห์ผลอีกครั้งด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งให้ผลดังตารางที่ 4-17

ตาราง 4-17 ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลของการปั่นผลมไซร์หลังปรับลดเทอมที่ไม่มีผลออก

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Linear	3	213.034	99.01%	213.034	71.011	133.44	0.000
A	1	41.223	19.16%	41.223	41.223	77.46	0.001
B	1	151.902	70.60%	151.902	151.902	285.44	0.000
C	1	19.908	9.25%	19.908	19.908	37.41	0.004
Error	4	2.129	0.99%	2.129	0.532		
Total	7	215.162	100.00%				
S = 0.729495							
R-sq = 99.01%			R-sq(adj) = 98.27%		R-sq(pred) = 96.04%		



รูป 4-9 การทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติของค่า Residual จากการลดเทอม

ซึ่งจากตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 4-17 นั้นจะเห็นได้ว่า เมื่อลดเทอมในส่วนที่ไม่ส่งผลต่อการเกิดความสูงของตะกอนในไซรัปออก จะพบว่าปัจจัยจาก ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น และอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว นั้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการเกิดความสูงของตะกอนในไซรัป โดยพิจารณาค่า P-value ควบคุมจากทั้ง 3 ปัจจัยนั้นมีค่า 0.001, 0.000 และ 0.004 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ได้อย่างมีนัยสำคัญ ผู้วิจัยจึงนำทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวไปศึกษาต่อในการการออกแบบการทดลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เพื่อศึกษาหาระดับของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในไซรัปต่อไป

4.4 การออกแบบการทดลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง เพื่อศึกษาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในไซรัป

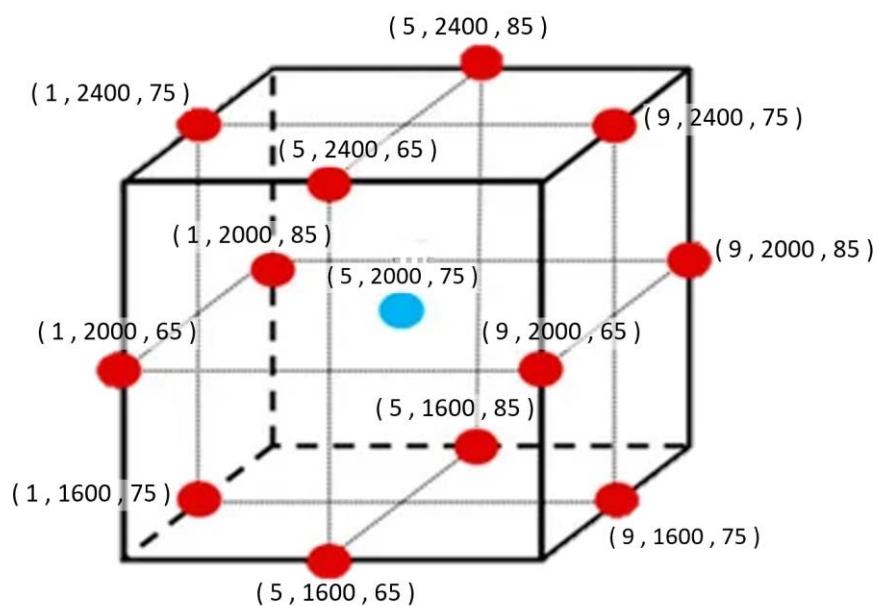
ในขั้นตอนของการออกแบบการทดลองวิธีพื้นผิวตอบสนอง ทางผู้วิจัยเลือกการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Designs) เนื่องจากด้วยปริมาณของจำนวนรอบในการทดลองน้อยกว่าวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนผสมกลาง (Central Composite Designs) โดยการเทียบที่จำนวนปัจจัยที่เท่ากัน เพราะเนื่องด้วยต้นทุนของการทำการทดลองกับผลิตภัณฑ์นั้นมีต้นทุนที่ค่อนข้างสูง และเหมาะกับการทดลองที่มีจำนวนปัจจัยตั้งแต่ 3 ปัจจัยเป็นต้นไปด้วย

ตาราง 4-18 สรุปแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม

แผนการออกแบบการทดลอง	
1. วัตถุประสงค์	เพื่อระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตไซรัปด้วยเครื่อง HSVM ออก เนื่องด้วยทรัพยากรและต้นทุนสำหรับการทดลองนั้นมีค่าใช้จ่ายสูงและมีระยะเวลาอย่างจำกัด
2. ข้อมูลพื้นฐาน	ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนอย่างมีนัยสำคัญจากการทดลองเบื้องต้น
3. ตัวแปรในการทดลอง	<p>3.1 ตัวแปรตอบสนอง</p> <p>ความสูงของตะกอนในการชงไซรัป ไม่เกิน 12 มิลลิเมตร</p>

ตารางที่ 4-18 สรุปแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม (ต่อ)

3.2 ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	สัญลักษณ์	ระดับปัจจัย		
		ระดับต่ำ (-)	ระดับกลาง (0)	ระดับสูง (+)
3.2.1. ระดับชุดตะแกรงสำหรับปั่นผสม (ระดับ)	A	1 (Low)	5 (Middle)	9 (High)
3.2.2. ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น (รอบต่อนาที)	B	1600	2000	2400
3.2.3. อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว (องศาเซลเซียส)	C	65	75	85
3.3 ปัจจัยที่ควบคุม		การควบคุม		
3.3.1. ความเร็วรอบของใบกวน (รอบต่อนาที)		60		
3.3.2. ความเร็วรอบของใบปาด (รอบต่อนาที)		80		
3.3.3. ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสม (นาที)		30		
3.3.4. คู่มือขั้นตอนการปั่นผสม		จัดทำและควบคุมการทดลอง		
3.3.5. การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสม		จัดทำและควบคุมการทดลอง		
3.3.6. คู่มือตรวจสอบเครื่องจักร		จัดทำและควบคุมการทดลอง		
3.3.7. ปริมาณวัตถุดิบ (กิโลกรัม)		เขี่ยน้ำหนักตามสูตร		
3.3.8. ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสม (นาที)		8		
4. การออกแบบการทดลอง				
การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน แบบ 1 เฟกติกเกต (Box-Behnken Designs) การทดลองทั้งหมดมี 15 การทดลอง โดยมีทั้งหมด 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ตามสภาวะเงื่อนไข ไม่มีการทำซ้ำ				
5. เมตริกการออกแบบการทดลอง				
เมตริกการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4-19				
6. วิธีการสุ่ม				
ทำการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในการทดลอง ตามตารางที่ 4-19				
7. ตารางบันทึกผล				
ใช้ตารางบันทึกผลที่ทำการแปลงและสร้างตารางการทดลองออกมาเป็นตารางที่ 4-20 สำหรับบันทึกผล				
8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง				
1. การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง				
2. การใช้โปรแกรม Minitab ช่วยวิเคราะห์และแปลผลร่วม				
9. อื่นๆ				
-				



รูป 4-10 รูปลูกบาศก์ของแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Box-Behnken Design

Design Summary

Factors:	3	Replicates:	1
Base runs:	15	Total runs:	15
Base blocks:	1	Total blocks:	1

Center points: 3

รูป 4-11 รายละเอียดการออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนโดยใช้โปรแกรม Minitab 19

ตาราง 4-19 การออกแบบการทดลองโดยวิธีการพินผิวตบสองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน แบบ 1 เพลลิก
 เคต จากโปรแกรมMinitab 19

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C
2	1	2	1	1	-1	0
3	2	2	1	-1	1	0
14	3	0	1	0	0	0
5	4	2	1	-1	0	-1
15	5	0	1	0	0	0
6	6	2	1	1	0	-1
12	7	2	1	0	1	1
1	8	2	1	-1	-1	0
11	9	2	1	0	-1	1
13	10	0	1	0	0	0
10	11	2	1	0	1	-1
9	12	2	1	0	-1	-1
7	13	2	1	-1	0	1
8	14	2	1	1	0	1
4	15	2	1	1	1	0

เมื่อโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab ช่วยออกแบบลำดับ การสุ่มและตารางการทดลองด้วยการทดลองวิธีการพินผิวตบสองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน โดยมีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย จากการศึกษาในหัวข้อ 4.3 ที่ผ่านมา จะได้จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 15 การทดลอง เพื่อหาระดับสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผสมไซรป์ให้มีค่าความสูงของตะกอนที่ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร แสดงดังตารางที่ 4-19 ผู้วิจัยได้ทำการแปลงและสร้างตารางการทดลองออกมาเป็นตารางที่ 4-20 เพื่อนำเอาค่าระดับของปัจจัยที่จะใช้ในการปรับตั้ง และสามารถอธิบายกระบวนการและการทดลองให้แก่ผู้ปฏิบัติงานในการทดลองได้ทราบและเข้าใจ

ตาราง 4-20 ลำดับและค่าของพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตผลมไซร์ปให้มีค่าความสูงของตะกอนที่ไม่เกิน 13 มิลลิเมตร

ลำดับการทดลอง	ระดับชุดตะแกรง (A)	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น (B)	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว (C)
1	9	1600	75
2	1	2400	75
3	5	2000	75
4	1	2000	65
5	5	2000	75
6	9	2000	65
7	5	2400	85
8	1	1600	75
9	5	1600	85
10	5	2000	75
11	5	2400	65
12	5	1600	65
13	1	2000	85
14	9	2000	85
15	9	2400	75

4.4.1 การกำหนดตัวแปรควบคุมที่สำคัญในการทดลอง

เนื่องด้วยในการผลิตผลมไซร์ปนั้นยังมีตัวแปรอื่นๆ ที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับปัญหาข้างต้น แต่ต้องมีการดำเนินการควบคุมเพื่อให้ผลการทดลองที่ได้นั้นมีความเชื่อถือและไม่ส่งผลกระทบต่อขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตและการทดลองได้แก่

1. งดการใช้ไซร์ปชนิดรีโพรเซส (Reprocess)
2. งดการใช้ผงเติมจากงานแก้ไข (Powder Rework)
3. LME ตั้งต้นจะต้องเป็น LME 3G โดยใช้ชุดเอนไซม์เดียวกับที่ทำการทดลองเบื้องต้น
4. กำหนดค่าควบคุมของเครื่องจักรในตัวแปรควบคุมให้คงที่ เช่น ความเร็วรอบใบกวน ความเร็วรอบใบปาด ระยะเวลาการดูดผงเข้า เป็นต้น

4.4.2 การกำหนดแผนและช่วงการทดลอง เพื่อไม่ให้กระทบกับแผนการผลิต

เนื่องจากกระบวนการผลิตโวลติน เป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง และมีกำลังการผลิตที่สูงมาก การทดลองจึงจำเป็นต้องมีการปรึกษากับทีมวางแผนเพื่อขอแผนและช่วงของการทดลอง เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเปล่าหรือกระทบต่อต้นทุนในระหว่างการผลิต และได้ขอความช่วยเหลือร่วมจากฝ่ายคลังสินค้าและฝ่ายการควบคุมคุณภาพพร้อมด้วย ดังนั้นการกำหนดแผนการผลิตจะดำเนินกำหนดแผนในทุกสัปดาห์สุดท้ายของสิ้นเดือน เพื่อเป็นแผนสำหรับการผลิตในเดือนถัดไป โดยทำการประชุมร่วมกันระหว่างทุกแผนกที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ดังนี้

1. ผู้วิจัยดำเนินการจัดลำดับแผนการทดลองเพื่อเสนอต่อฝ่ายวางแผนการผลิต พร้อมจัดทำแผนการเก็บตัวอย่าง
2. ฝ่ายวางแผนการผลิตจัด จัดแผนและ วางแผนการผลิตประจำเดือนในรอบถัดไป พร้อมประสานงานต่อฝ่ายคลังสินค้าเพื่อจัดเตรียมพื้นที่ต่อการจัดเก็บไซรป์ และจัดทำเอกสารเตรียมเสนอต่อในที่ประชุม
3. เมื่อที่ประชุมลงมติเห็นชอบ และอนุมัติแผนการทดลอง ฝ่ายผลิตจัดเตรียมเครื่องจักร วัตถุดิบและ กำลังพลเพื่อรองรับต่อการทดลอง
4. ผู้วิจัยจัดเตรียมเอกสารพร้อมทั้งรายละเอียดวิธีการโดยละเอียด ให้แก่ ฝ่ายผลิต ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายคลังสินค้า และฝ่ายพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์ และจัดประชุมเพื่ออธิบายข้อมูลดังกล่าวข้างต้นและเตรียมตัวสำหรับการทดลอง
5. ผู้วิจัย ฝ่ายผลิต ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์ ร่วมกันดำเนินการทดลอง และทวนสอบตรวจเช็คผลในระหว่างการทดลอง
6. ฝ่ายคลังสินค้าทำการจัดพื้นที่แยกสำหรับไซรป์สินค้าที่เกิดขึ้นจากการทดลอง เพื่อรอผลก่อนการส่งมอบนั้นต่อไป
7. ฝ่ายควบคุมคุณภาพตรวจเช็คผลการละลาย สภาพองค์รวมของไซรป์ ผลด้านกายภาพ ด้านชีวภาพและเคมี เพื่อเป็นการการันตีว่าไซรป์ที่จะปล่อยนั้นมีคุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กำหนด โดยในส่วนของไซรป์ที่ไม่ผ่านจะต้องพิจารณาเพิ่มเติมว่าสามารถนำไปผสมในกระบวนการรีโพรเซสได้หรือไม่ หรือตัดเป็นเป็นสินค้าเสียหาย
8. ฝ่ายวางแผนสรุปปริมาณไซรป์ที่สามารถส่งมอบต่อไปยังขั้นตอนกระบวนการถัดไปได้ และจัดทำแผนผลิตชุดเซกร์มิไซรป์สินค้าเสียหายหรือไม่เพียงพอต่อการส่งมอบ

4.4.3 ผลการทดลองการหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตผสมไซรัป

จากการทดลองตามลำดับการทดลองดังตารางที่ 4-20 เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตผสมไซรัปให้มีค่าความสูงของตะกอนที่ไม่เกิน 12 มิลลิเมตร โดยแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4-21

ตาราง 4-21 ผลค่าความสูงของตะกอนจากการทดลองเพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตผสมไซรัป

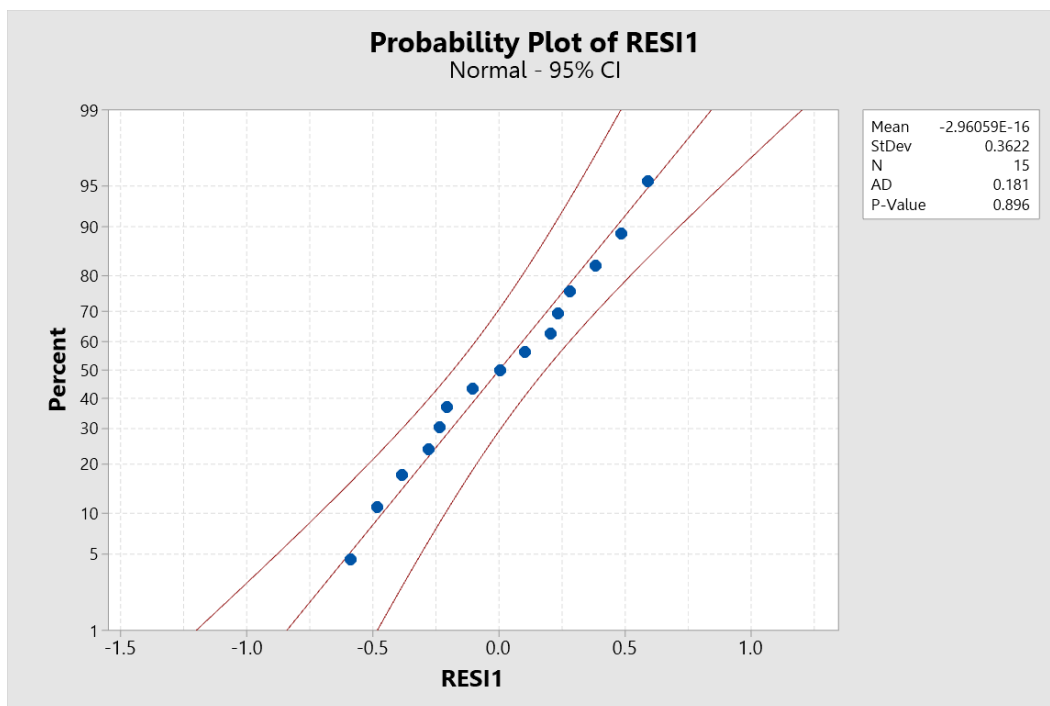
ลำดับการทดลอง	ระดับชุดตะแกรง (A)	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น (B)	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว (C)	ความสูงตะกอน (มิลลิเมตร)
1	9	1600	75	16.79
2	1	2400	75	18.14
3	5	2000	75	12.21
4	1	2000	65	8.13
5	5	2000	75	12.68
6	9	2000	65	17.2
7	5	2400	85	19.73
8	1	1600	75	7.89
9	5	1600	85	13.84
10	5	2000	75	12.45
11	5	2400	65	16.76
12	5	1600	65	9.02
13	1	2000	85	13.07
14	9	2000	85	18.81
15	9	2400	75	23.65

4.4.4 การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบจำลองความสูงของตะกอน

4.4.4.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ (Normality Assumption)

จะพิจารณาจาก Normal Probability Plot ของข้อมูลและค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการเรียงลำดับจากค่าน้อยไปหาค่ามาก ว่ามีการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) และการทดสอบจะทวนสอบจากค่า P-value นั้นมีค่ามากกว่า 0.05

จากการทดสอบข้อมูลผ่านโปรแกรม Minitab จะแสดงกราฟดังรูปที่ 4-12 ซึ่งจะเห็นได้ว่า การกระจายตัวของข้อมูลนั้นมีลักษณะเข้าใกล้เส้นตรง และยังพบว่าค่า P-value เท่ากับ 0.896 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลจากผลการทดลองสำหรับการหาสถานะที่เหมาะสมนั้นเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงแบบปกติ



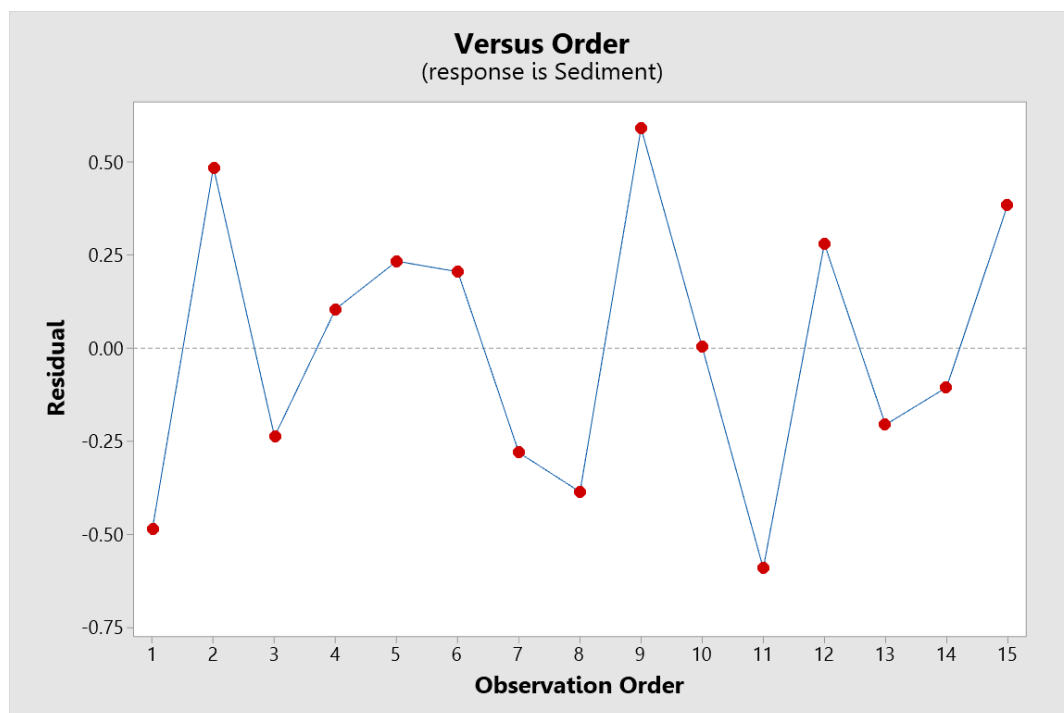
รูป 4-12 กราฟ Normal Probability Plot จากผลลัพธ์ของการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงแบบปกติ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.4.2 การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

จะพิจารณาจากแผนภาพของข้อมูลในการกระจายตัวระหว่างลำดับการเก็บข้อมูล (Observation order) กับค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยข้อมูลจะต้องไม่มีลักษณะกระจายตัวเป็นแนวโน้มหรือเกิดรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนหรือแน่นอน ซึ่งจะแสดงว่าข้อมูลที่ได้มาเป็นอิสระต่อกัน

จากรูปที่ 4-13 จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าลำดับการเก็บข้อมูลกับค่าส่วนตกค้างนั้น มีลักษณะการกระจายตัวอย่างเป็นอิสระ ไม่เกาะกลุ่มอยู่ฝั่งใดฝั่งหนึ่ง และไม่เป็นแนวโน้มและรูปแบบที่แน่นอน จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลจากผลการทดลองสำหรับการหาสถานะที่เหมาะสมนั้นมีความเป็นอิสระต่อกัน

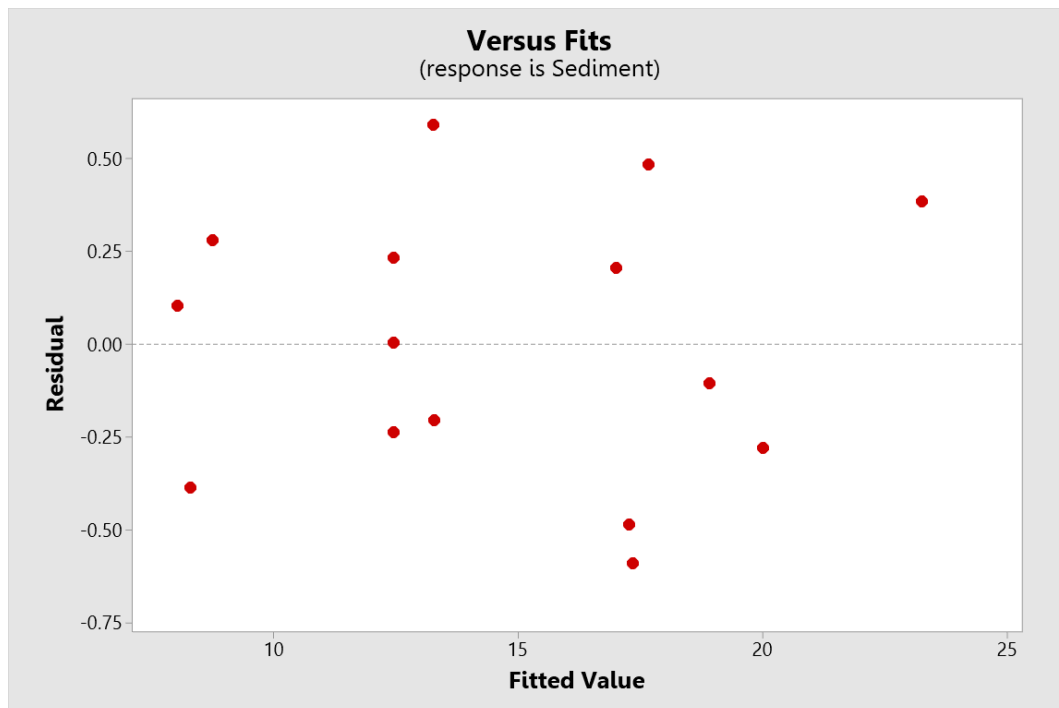


รูป 4-13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลำดับการเก็บข้อมูลกับค่าส่วนตกค้างของผลลัพธ์ที่ได้

4.4.4.3 การทดสอบสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability)

จะพิจารณาจากแผนภาพของข้อมูลในการกระจายตัวระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอย (Fitted Value) กับค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยข้อมูลจะมีลักษณะกระจายตัวเป็นอิสระ ไม่เกิดแนวโน้มหรือเกิดรูปแบบ (Pattern) ที่ชัดเจนหรือแน่นอน จึงหมายความว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวนที่ดี

โดยพิจารณาจากรูปที่ 4-14 จะพบว่ากราฟของข้อมูลในส่วนตกค้างนั้นมีการกระจายตัวอย่างเป็นอิสระ ไม่เป็นรูปแบบใด รูปแบบหนึ่ง จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลจากผลการทดลองสำหรับการหาสภาวะที่เหมาะสมนั้นมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน



รูป 4-14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองที่ได้จากตัวแบบถดถอยกับค่าส่วนตกค้าง

จากรูปที่ 4-12 ถึงรูปที่ 4-14 ทั้ง 3 รูปจะพบว่าลักษณะการกระจายตัวและรูปแบบของค่าส่วนตกค้าง ที่ได้จากผลของข้อมูลการทดลองเป็นไปตามหลักการ $\epsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ทุกประการ นั่นจึงแสดงว่าข้อมูลจากการทดลองชุดนี้นั้นมีความน่าเชื่อถือ และสามารถนำไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

4.4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตผสมไซรีป

โดยการวิเคราะห์ผลการทดลองนี้จะนำผลการทดลองจากตารางที่ 4-21 มาวิเคราะห์ผ่านโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab 19 ซึ่งแสดงผลดังตารางที่ 4-22

ตาราง 4-22 ตารางผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองวิธีการฟื้นฟิวดอกบสนองแบบ
บอกรี-เบิร์ตเคน ของการผลิตผสมไชรูป

Response Surface Regression: Sediment versus A, B, C

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	95% CI	T-Value	P-Value	VIF
Constant	12.447	0.350	(11.5, 13.3)	35.57	0.000	
A	3.652	0.214	(3.1, 4.2)	17.05	0.000	1.00
B	3.843	0.214	(3.3, 4.4)	17.93	0.000	1.00
C	1.793	0.214	(1.2, 2.3)	8.37	0.000	1.00
A*A	1.818	0.315	(1.0, 2.6)	5.76	0.002	1.01
B*B	2.353	0.315	(1.5, 3.2)	7.46	0.001	1.01
C*C	0.038	0.315	(-0.8, 0.8)	0.12	0.909	1.01
A*B	-0.848	0.303	(-1.6, -0.1)	-2.80	0.038	1.00
A*C	-0.833	0.303	(-1.6, -0.1)	-2.75	0.040	1.00
B*C	-0.463	0.303	(-1.2, 0.3)	-1.53	0.187	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	PRESS	R-sq(pred)	AICc	BIC
0.606047	99.37%	98.22%	27.8646	90.38%	121.07	40.85

Analysis of Variance

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	287.696	99.37%	287.696	31.966	87.03	0.000
Linear	3	250.549	86.54%	250.549	83.516	227.38	0.000
A	1	106.726	36.86%	106.726	106.726	290.57	0.000
B	1	118.118	40.80%	118.118	118.118	321.59	0.000
C	1	25.704	8.88%	25.704	25.704	69.98	0.000
Square	3	30.646	10.58%	30.646	10.215	27.81	0.002
A*A	1	10.129	3.50%	12.202	12.202	33.22	0.002
B*B	1	20.512	7.08%	20.441	20.441	55.65	0.001
C*C	1	0.005	0.00%	0.005	0.005	0.01	0.909
2-Way Interaction	3	6.501	2.25%	6.501	2.167	5.90	0.043
A*B	1	2.873	0.99%	2.873	2.873	7.82	0.038
A*C	1	2.772	0.96%	2.772	2.772	7.55	0.040
B*C	1	0.856	0.30%	0.856	0.856	2.33	0.187
Error	5	1.836	0.63%	1.836	0.367		
Lack-of-Fit	3	1.726	0.60%	1.726	0.575	10.42	0.089
Pure Error	2	0.110	0.04%	0.110	0.055		
Total	14	289.533	100.00%				

การวิเคราะห์ผลการทดลองเบื้องต้น

ในการวิเคราะห์ผลการทดลองของวิธีพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน รูปแบบของสมการเชิงถดถอยที่ใช้ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยกับตัวแปรตอบสนอง ดังสมการที่ 4.1

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 \quad (4.1)$$

เมื่อ y	คือ	Predicted response
β_0	คือ	Model constant
x_1, x_2, x_3	คือ	Independent variables
$\beta_1, \beta_2, \beta_3$	คือ	Linear coefficients
$\beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$	คือ	Quadratic coefficients
$\beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}$	คือ	Cross product coefficients

โดยที่ β_i คือ อิทธิพลหลัก และ β_{ij} คืออันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัย เมื่อ $i = 1,2,3$ และ $j = 1,2,3$

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab สมการถดถอยให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ หรือ ค่า R2 มีค่าเท่ากับ 99.37% และค่า R2(adj) มีค่าเท่ากับ 98.22% ซึ่งมีความน่าเชื่อถือ พิจารณาว่าความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์นั้นมีความน่าเชื่อถือ สามารถยอมรับได้ และเป็นที่น่าพอใจ อีกเมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Regression model นั้นมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α จึงสามารถสรุปได้ว่า สมการฟังก์ชันเชิงถดถอยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น และตัวแปรปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถพิจารณาในการทดสอบสมมติฐานหลักถัดไป พร้อมทั้งเมื่อพิจารณาค่า P-value ของ Lack of Fit จะพบว่ามีค่าเท่ากับ 0.089 ซึ่งมีความมากกว่า α นั้นจึงสรุปได้ว่า ส่วนของเทอมในสมการเชิงถดถอยนั้นมีความเพียงพอต่อการนำไปใช้ได้

การวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อทดสอบปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน ในกระบวนการผลิตผสมไซรัปที่ระดับนัยสำคัญที่ α มีค่าเท่ากับ 0.05 ได้ดังต่อไปนี้

การทดสอบสมมติฐานของปัจจัยหลัก

H_0 : Main effect ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอน

H_1 : Main effect มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอน

พิจารณาจากค่า P-value ของ Main effect ในตารางที่ 4-22 โดยอิงตารางค่าวิกฤติการแจกแจงแบบ F (Critical Values for F Distribution Table) โดยเปิดที่ $F_{(0.05,1,5)} = 6.61$ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พบว่า Main effect A มีค่า F-value เท่ากับ 290.57 ซึ่งมีความมากกว่า F วิกฤติที่ 6.61 จึงสรุปได้ว่า ระดับของชุดตะแกรง มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการผลิตผสมไซรับที่ระดับนัยสำคัญ α มีค่าเท่ากับ 0.05
2. พบว่า Main effect B มีค่า F-value เท่ากับ 321.59 ซึ่งมีความมากกว่า F วิกฤติที่ 6.61 จึงสรุปได้ว่า ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการผลิตผสมไซรับที่ระดับนัยสำคัญ α มีค่าเท่ากับ 0.05
3. พบว่า Main effect C มีค่า F-value เท่ากับ 69.98 ซึ่งมีความมากกว่า F วิกฤติที่ 6.61 จึงสรุปได้ว่า อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการผลิตผสมไซรับที่ระดับนัยสำคัญ α มีค่าเท่ากับ 0.05

การทดสอบสมมติฐานของอันตรกิริยาของแต่ละปัจจัย

H_0 : Interaction effect ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอน

H_1 : Interaction effect มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอน

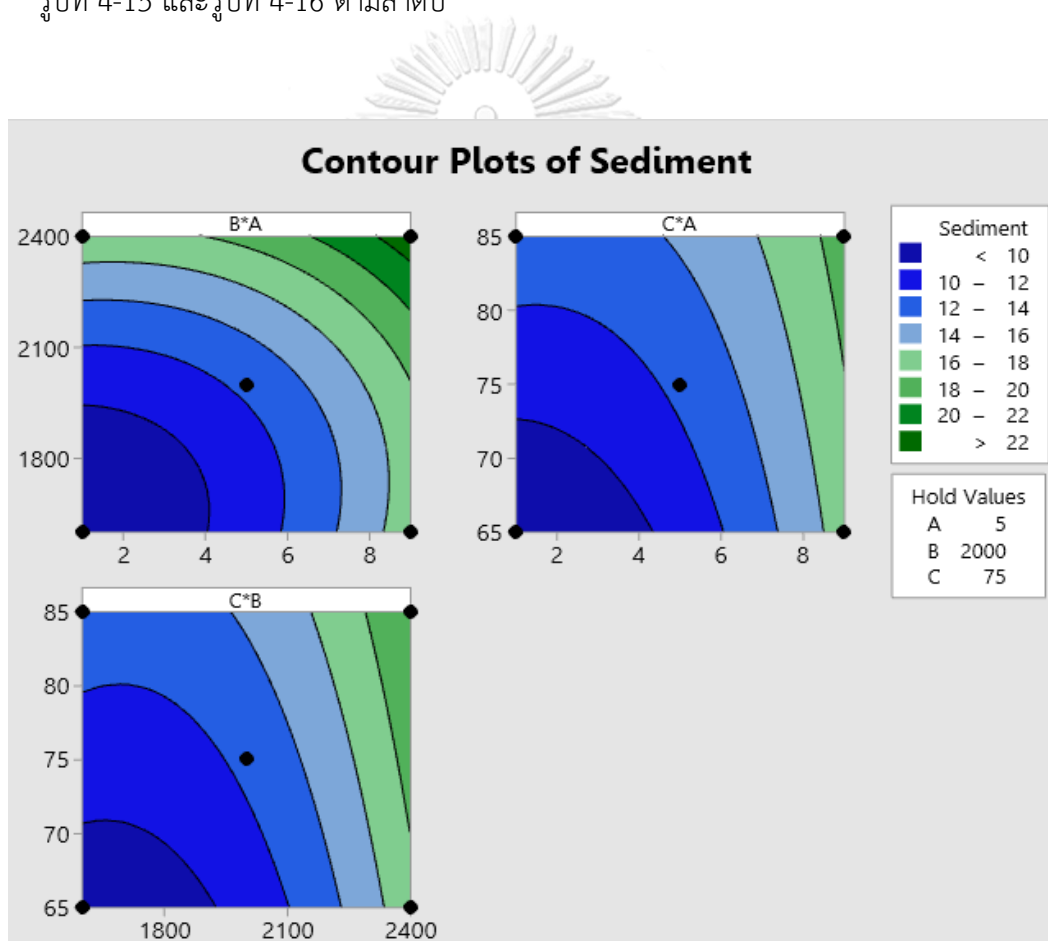
พิจารณาจากค่า P-value ของ Main effect ในตารางที่ 4-22 โดยอิงตารางค่าวิกฤติการแจกแจงแบบ F (Critical Values for F Distribution Table) โดยเปิดที่ $F_{(0.05,1,5)} = 6.61$ สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พบว่า Interaction effect A*B มีค่า F-value เท่ากับ 7.82 ซึ่งมีความมากกว่า F วิกฤติที่ 6.61 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมระหว่างระดับของชุดตะแกรงกับความเร็วรอบของชุดหัวปั่น มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการผลิตผสมไซรับที่ระดับนัยสำคัญ α มีค่าเท่ากับ 0.05
2. พบว่า Interaction effect A*C มีค่า F-value เท่ากับ 7.55 ซึ่งมีความมากกว่า F วิกฤติที่ 6.61 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมระหว่างระดับของชุดตะแกรง

กับอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการผลิตผสมไซรัปที่ระดับนัยสำคัญ α มีค่าเท่ากับ 0.05

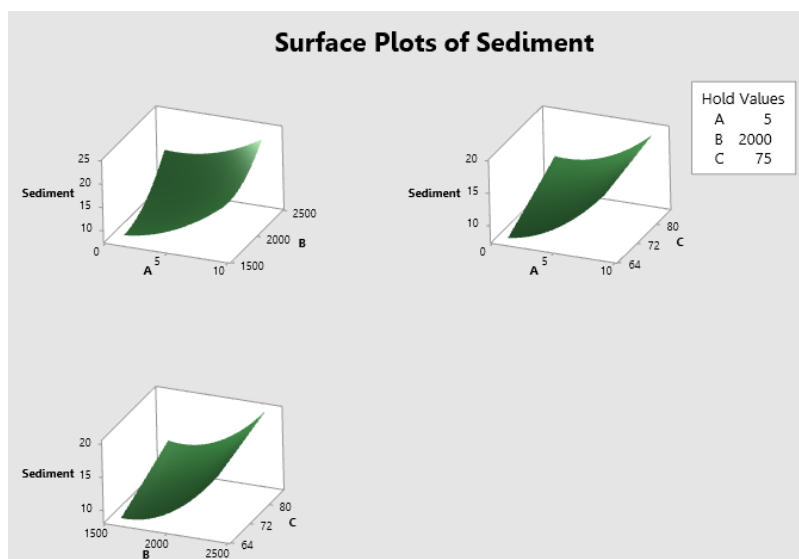
3. พบว่า Interaction effect B*C มีค่า F-value เท่ากับ 2.33 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า Fวิกฤตที่ 6.61 จึงสรุปได้ว่าปัจจัยร่วมระหว่างความเร็วรอบของชุดหัวปั่นกับอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว ไม่มีอิทธิพลต่อค่าความสูงของตะกอนในการผลิตผสมไซรัปที่ระดับนัยสำคัญ α มีค่าเท่ากับ 0.05

การวิเคราะห์ Contour plot และ Surface plot ของค่าความสูงของตะกอนแสดงดังรูปที่ 4-15 และรูปที่ 4-16 ตามลำดับ



รูป 4-15 กราฟ Contour plot แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความสูงของตะกอนจาก

การผลิตผสมไซรัป



รูป 4-16 กราฟ Surface plot แสดงความสัมพันธ์แบบสามมิติของปัจจัย ที่มีผลต่อค่าความสูงของตะกอนจากการผลิตผสมไชร็ป

จากรูปที่ 4-16 จะแสดงพื้นผิวตอบสนองแบบสามมิติ โดยแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 2 ปัจจัย เช่น (ภาพมุมซ้ายด้านบน) จะแสดงพื้นผิวตอบสนองระหว่างระดับของชุดตะแกรงกับความเร็วยรอบของชุดหัวปั่น แล้วคงปัจจัยอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวไว้ที่ระดับกลาง 75 องศาเซลเซียส พบว่าค่าความสูงของตะกอนจะอยู่ต่ำสุดเมื่อใช้ระดับของชุดตะแกรงเป็นแบบต่ำ ระดับ 1 ซม. และความเร็วยรอบของชุดหัวปั่นอยู่ในระดับต่ำ 1600 rpm ด้วย และความสูงของตะกอนจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นถ้าความเร็วยรอบของชุดหัวปั่นเพิ่มขึ้นเป็น 2000 rpm หรือ 2400 rpm ควบคู่กันมีการปรับระดับชุดตะแกรงเพิ่มขึ้นด้วย ในขณะที่ถ้าใช้ระดับของชุดตะแกรงเป็นแบบต่ำ ระดับ 1 ซม. และอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวอยู่ที่ระดับต่ำคือ 65 องศาเซลเซียส (ภาพมุมขวาบน) แล้วคงปัจจัยความเร็วยรอบของชุดหัวปั่นไว้ที่ระดับกลาง 2000 rpm จะพบว่าพื้นที่ผิวตอบสนองของค่าความสูงตะกอนก็จะอยู่ในโซนค่าต่ำและเริ่มมีค่าสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นหรือมีการปรับระดับชุดตะแกรงเพิ่มขึ้นเป็นระดับกลางหรือระดับสูง ซึ่งเมื่อสังเกตภาพมุมซ้ายล่างก็จะมีลักษณะที่คล้ายกันกับภาพมุมขวาบนคือ เมื่อความเร็วยรอบของชุดหัวปั่นอยู่ที่ระดับต่ำ 1600 rpm และอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวอยู่ระดับต่ำ 65 องศาเซลเซียส แล้วคงปัจจัยระดับของชุดตะแกรงอยู่ที่ระดับกลาง จะพบว่าตะกอนมีค่าความสูงอยู่ในโซนต่ำ และจะค่อยๆ เพิ่มความสูงของตะกอนขึ้นเมื่อความเร็วยรอบของชุดหัวปั่นและอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวเพิ่มขึ้น จากที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการตั้งค่าเลือกระดับชุดตะแกรงปั่นผสม (A) ความเร็วยรอบของชุดหัวปั่น (B) และอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว (C) ที่สูงหรือมากเกินไปจะทำให้เกิดค่าตะกอนที่สูงเกิน

จากการวิเคราะห์และการทดสอบสมมติฐานข้างต้นที่กล่าวข้างต้น ผู้วิจัยได้หาสมการเชิงถดถอย (Linear Regression) โดยมาจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยข้างต้นและผลของค่าตัวแปรตอบสนอง และตัดเทอมที่ไม่มีผลออก สามารถสรุปเป็นสมการถดถอยที่ใช้ในการทำนายได้ดังสมการที่ 4.2

$$\begin{aligned} \text{Sediment} = & 8.6 + 2.397A - 0.03790B + 0.458C + 0.1136A^2 + 0.000015B^2 \\ & - 0.000530AB - 0.02081AC \end{aligned} \quad (4.2)$$

เมื่อ Sediment คือ ค่าความสูงของตะกอนที่จะเกิดจากการผสมไซรัป
 A คือ ระดับของชุดตะแกรงปั่นผสม
 B คือ ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น
 C คือ อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว

การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

จากผลการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab เพื่อหาระดับหรือสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ที่จะส่งผลต่อการเกิดความสูงของตะกอนที่ในไซรัปให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ตามค่ากลางของช่วงในการวัดคือ 10 ± 1 มิลลิเมตร โดยอ้างอิงจากสมการถดถอย (4.2) และใช้โปรแกรม Minitab19 ช่วยวิเคราะห์ จะได้ดังตารางที่ 4-23 และรูปที่ 4-18

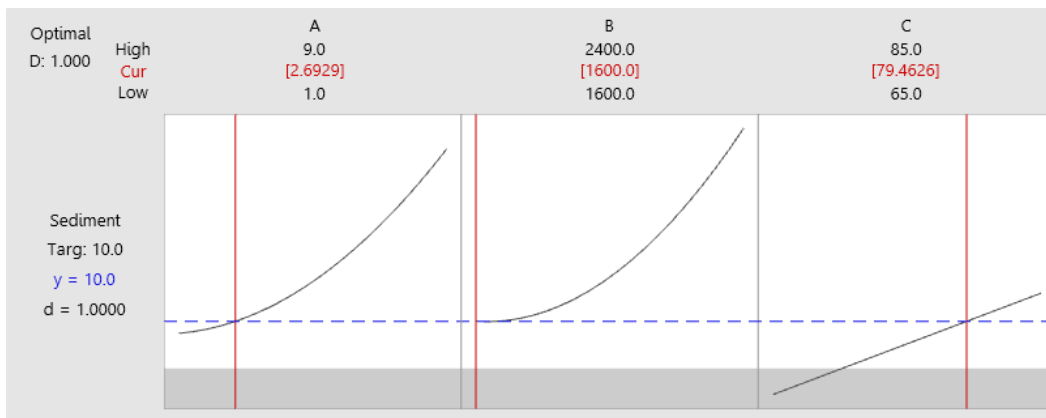
ตาราง 4-23 ตารางการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมให้ได้ค่าความสูงของตะกอนในค่ากลางของการควบคุม

Solution

Solution	A	B	C	Sediment Fit	Composite Desirability
1	2.69289	1600	79.4626	10	1

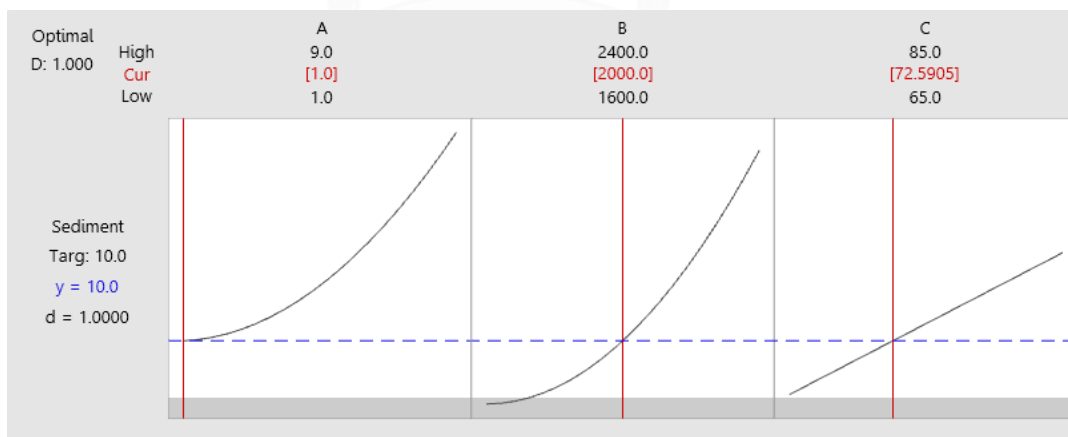
Multiple Response Prediction

Variable	Setting			
A	2.69289			
B	1600			
C	79.4626			
Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Sediment	10.000	0.404	(9.044, 10.956)	(8.249, 11.751)

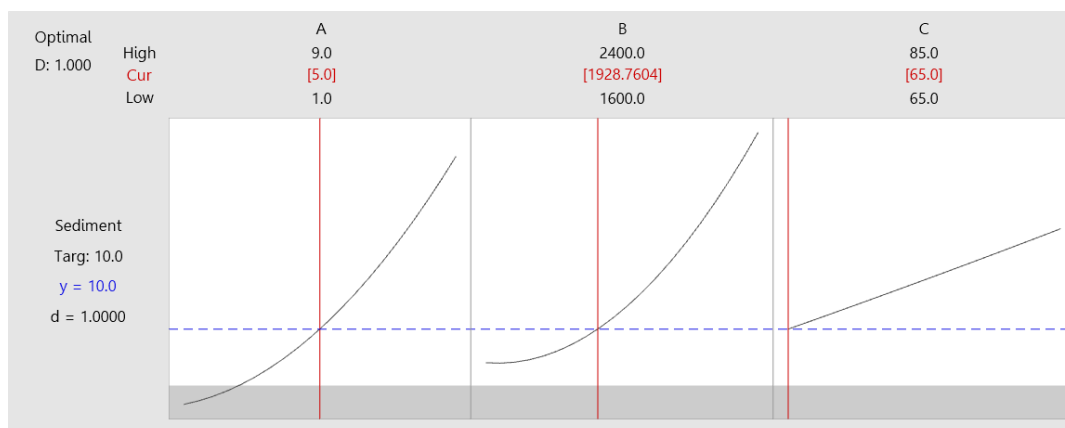


รูป 4-17 ผลลัพธ์แสดงค่าของปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผลมไซร์ป เพื่อให้ได้ค่าตะกอนไม่เกิน 10 มิลลิเมตร

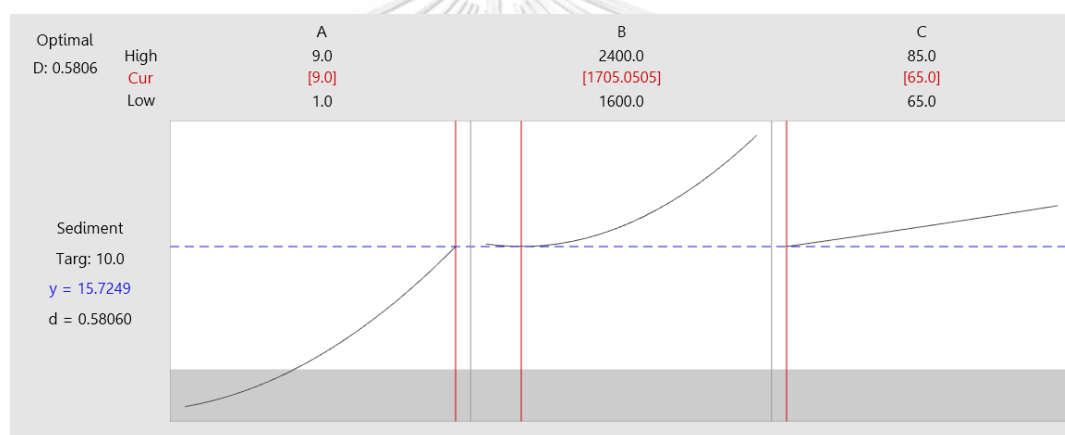
จากรูปที่ 4-17 จะพบว่าปัจจัยระดับของชุดตะแกรง (A) นั้นอยู่ในรูปค่าทศนิยม ซึ่งจะไม่สามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรได้ เนื่องด้วยค่าเครื่องจักรจะมีแค่ 3 ระดับคือ ระดับต่ำ อยู่ที่ 1 ซม. ระดับกลาง 5 ซม. และระดับสูง 9 ซม. โดยจากค่าการทำนายจะมีค่าใกล้เคียงไปทางค่า 1 ซม. จึงทำการปรับค่าปัจจัยระดับของชุดตะแกรง ให้เป็นค่าคงที่ 1 ซม., 5 ซม. และ 9 ซม. เพื่อดูการทำนายว่าช่วงค่า B และ C จะปรับอยู่ในช่วงเท่าใด จะแสดงรูปที่ 4-18 ถึง รูปที่ 4-20



รูป 4-18 ผลลัพธ์หลังปรับตั้งค่าคงที่ปัจจัย A ที่ 1 ซม. แสดงค่าของปัจจัย B และ C ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผลมไซร์ปเพื่อให้ได้ค่าตะกอนความสูง 10±1 มิลลิเมตร



รูป 4-19 ผลลัพธ์หลังปรับตั้งค่าคงที่ปัจจัย A ที่ 5 ซม. แสดงค่าของปัจจัย B และ C ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผลผสมไซร้เพื่อให้ได้ค่าตะกอนความสูง 10 ± 1 มิลลิเมตร



รูป 4-20 ผลลัพธ์หลังปรับตั้งค่าคงที่ปัจจัย A ที่ 9 ซม. แสดงค่าของปัจจัย B และ C ที่เหมาะสมที่สุดในการปรับตั้งเครื่องจักรสำหรับการผลิตผลผสมไซร้เพื่อให้ได้ค่าตะกอนความสูง 10 ± 1 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 4-18 ถึง รูปที่ 4-20 จะแสดงให้เห็นว่า เมื่อยังปรับค่าของระดับชุดตะแกรงสูงมากขึ้น ค่าความเร็วรอบของชุดหัวปั่นผสมจะต้องลดลงและควบคุมกับอุณหภูมิตั้งต้นของวัตถุดิบเหลว เพื่อให้ค่าความสูงของตะกอนนั้นไม่เกิน 10 มิลลิเมตร แต่เนื่องจากรีเอเจนต์เครื่องจักรมีข้อจำกัดในการผสม คือ การใช้อุณหภูมิตั้งต้นของวัตถุดิบเหลวที่ต่ำมากๆ จะทำให้เกิดระยะเวลาในการบ่มเคลื่อนย้ายวัตถุดิบของเหลวเป็นเวลานาน เนื่องด้วยต้นทางจะอยู่ด้านล่าง และปลายทางของถังพักวัตถุดิบเหลวจะอยู่ด้านบน ซึ่งทำให้ระยะเวลาในกระบวนการทดลองของกลุ่มที่ใช้อุณหภูมิวัตถุดิบของเหลวที่ 65 องศาเซลเซียสนั้นมีระยะเวลาในกระบวนการรอคอยวัตถุดิบเหลว ซึ่งส่งผลให้กระบวนการอบแห้งมีการขาดช่วงรอไซร้

จึงทำให้เกิดการสรุปจากรูปทั้ง 3 โดยนำไปปรับใช้ตั้งค่าเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด จึงเป็นตัวเลือกการปรับตั้งค่าตามแบบรูปที่ 4-18 เนื่องจากอุณหภูมิตั้งต้นของวัตถุดิบเหลวนั้นไม่ได้ยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด แสดงดังตารางที่ 4-24 และตารางที่ 4-25

ตาราง 4-24 ตารางการหาระดับของปัจจัยที่เหมาะสมให้ได้ค่าความสูงของตะกอนในค่ากลางของการควบคุม หลังปรับตั้งค่าปัจจัย A

Solution

Solution	A	B	C	Sediment	Composite
				Fit	Desirability
1	1	2000	72.5905	10	1

Multiple Response Prediction

Variable	Setting
A	1
B	2000
C	72.5905

Response	Fit	SE Fit	95% CI	95% PI
Sediment	10.000	0.361	(9.145, 10.855)	(8.301, 11.699)

ตาราง 4-25 ระดับที่เหมาะสมในการนำไปตั้งค่าพารามิเตอร์ของแต่ละปัจจัยที่ได้จากการทดลอง

ปัจจัยนำเข้า	สัญลักษณ์	หน่วย	ค่าที่เหมาะสม	ค่าที่ปรับตั้งจริง
ระดับของชุดตะแกรง	A	เซนติเมตร	1.0	1 (LOW)
ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น	B	รอบต่อนาที	2000	2000
อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว	C	องศาเซลเซียส	72.5905	72.5

สรุปผลจากการทำนายผลการหาระดับที่เหมาะสมจากการดำเนินแก้ไขปรับปรุง กระบวนการผลิตผสมไซรับซึ่งมีปัจจัยนำเข้าที่ทำการศึกษ ได้แก่ ระดับของชุดตะแกรง ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น และอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว โดยการใช้การออกแบบการทดลองวิธี พื้นผิวตอบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน จากผลการทดลองพบว่า ระดับที่เหมาะสมและสามารถนำไปปรับตั้งค่าและใช้งานได้จริงในแต่ละปัจจัย คือ

- ระดับชุดตะแกรง เท่ากับ ระดับต่ำ หรือ 1 ซม.
- ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น เท่ากับ 2000 RPM
- อุณหภูมิตั้งต้นของวัตถุดิบของเหลว เท่ากับ 72.5 องศาเซลเซียส

ภายใต้การควบคุมตัวแปรต่างๆตามปัจจัยควบคุมจากที่ทำการศึกษาและทดลองมาทั้งหมดควบคุมด้วย

บทที่ 5

การปรับปรุงแก้ไขแก้ไขกระบวนการ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการนำเอาข้อมูลของระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองในบทที่ 4 มาปรับตั้งและปรับปรุงกระบวนการผลิตการผสมไซรีปด้วยเครื่อง HSVM ร่วมกับแนวทางอื่นๆเพิ่มเติม โดยมีเริ่มจากนำค่าระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่ได้ศึกษามาแล้วดำเนินการปรับใช้ตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องจักรเพื่อใช้ในกระบวนการผลิต แล้วทำการสรุปผลการปรับปรุงเมื่อได้ผลที่น่าเชื่อถือและเป็นที่น่าพอใจ โดยการปรับตั้งค่ามาตรฐานการทำงานและการปรับเปลี่ยนวิธีการหรือการสื่อสารขั้นตอนการทำงานกับพนักงานเพื่อให้เป็นแนวทางให้พนักงานปฏิบัติตามได้อย่างไม่ผิดข้อกำหนด

5.1 การทดลองเพื่อยืนยันผลการทดลอง

เนื่องด้วยกระบวนการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง และมีการกำหนดแผนการผลิตแบบรายเดือน โดยสินค้าที่ผู้วิจัยทำการศึกษามีการผลิตตลอดทั้งเดือน จึงต้องมีการประสานงานร่วมกับฝ่ายวางแผนการผลิต และกำหนดช่วงระยะเวลาของการดำเนินการทดลอง เป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการผลิตที่ขาดตอนและเพื่อลดโอกาสสูญเสียไปในการดำเนินการ โดยมีแผนการทดลองดังนี้

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิต โดยใช้ปัจจัยนำเข้าทั้งหมดที่ทำการศึกษา เพื่อให้ได้ค่าความสูงของตะกอนที่เป็นก้างและอยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ และไม่กระทบต่อประสิทธิภาพของเครื่องจักร เนื่องจากความแม่นยำของเครื่อง กรกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ มีค่าความละเอียดของตำแหน่งในการปรับตั้งจำกัดและแตกต่างกันออกไป ดังนั้น ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าการปรับตั้งโดยอ้างอิงจากตารางที่ 4-25 และค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 5-1 และตารางที่ 5-2

ตาราง 5-1 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการศึกษาปัจจัย

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	หน่วย
ระดับของชุดตะแกรง (Level Shear)	ระดับต่ำ 1	เซนติเมตร
ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น (Speed Shear)	2000	รอบต่อนาที
อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว (Temp. Liquid)	72	องศาเซลเซียส

ค่าพารามิเตอร์อื่น ๆ สำหรับการควบคุมได้กำหนดเหมือนกับปัจจัยควบคุมที่ใช้ในการผลิตปกติ

ตาราง 5-2 ค่าพารามิเตอร์ตัวแปรควบคุม

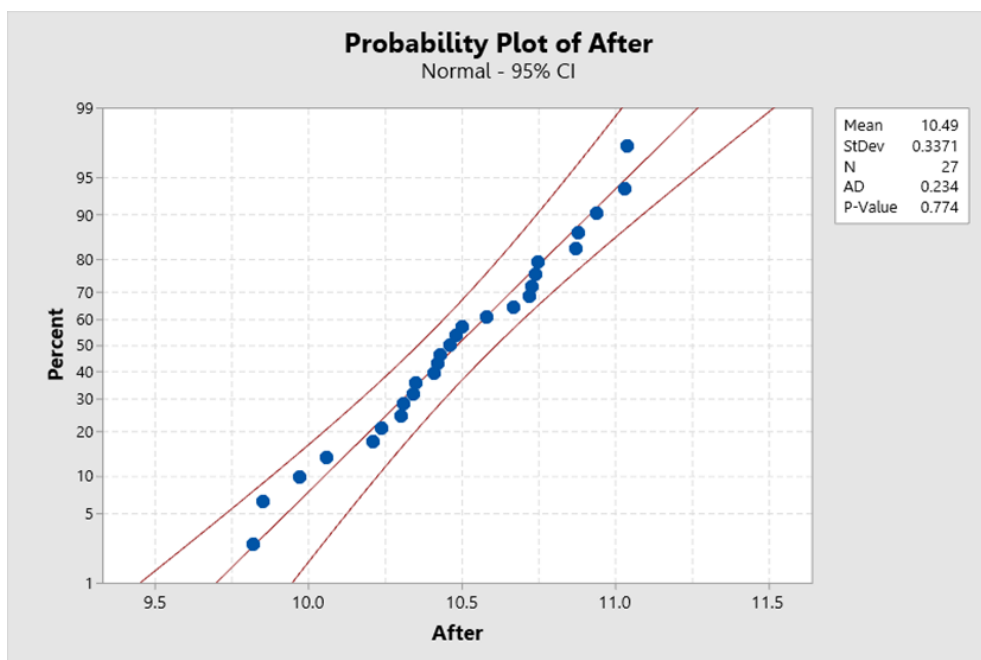
พารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย
ความเร็วรอบของใบกวน	60	รอบต่อนาที
ความเร็วรอบของใบปาด	80	รอบต่อนาที
ระยะเวลาให้ความร้อนในการปั่นผสม	30	นาที
แรงดันแวกคัมสำหรับการดูดผง	400	mbar
ความเร็วรอบป้อนในการป้อนน้ำ	100	rpm
แรงดันสตีมในการให้ความร้อน	3	bar
ปริมาณวัตถุดิบ	กิโลกรัม	ตามสูตร
ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสม	8	นาที
ระยะเวลาการฆ่าเชื้อ	15	นาที
อุณหภูมิในการฆ่าเชื้อ	72	องศาเซลเซียส

หมายเหตุ การเลือกใช้ความเร็วรอบของใบกวนที่ 60 รอบนาที เนื่องจากการทดลองในชั้นเบื้องต้น และการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน ที่มีการใช้ความเร็วที่ 20 รอบนาทีนั้นพบว่ามอเตอร์ขับเคลื่อน สำหรับใบกวนนั้นค่าโหลดขึ้นสูงและเสี่ยงต่อการเกิดมอเตอร์ไหม้และอาจทำให้เกิดการหยุดชะงักใน ระหว่างกระบวนการผลิต ทางผู้วิจัยและทีมงานจึงได้ตัดสินใจใช้ที่ค่ากลางตามแบบเดิม เพื่อไม่ให้เกิด โหลดเครื่องจักรและไม่กระทบต่อกระบวนการผลิต

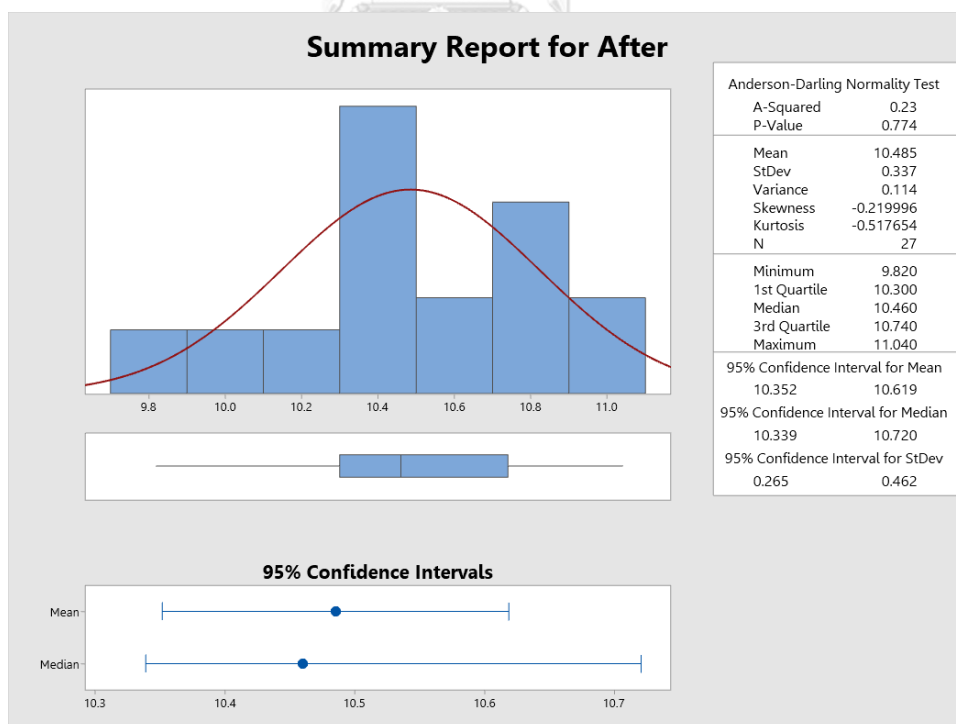
- กำหนดให้มีการใช้ชั้นตอนเดียวกับขั้นตอนการผลิตปกติ
- กำหนดให้มีการสุ่มตรวจตัวอย่างเช่นเดียวกับการผลิตในรอบปกติ เพื่อให้มั่นใจว่า ค่าพารามิเตอร์มีการปรับตั้งค่าได้ถูกต้องตรงตามกระบวนการและครบถ้วน

5.2 ผลการทดลองหลังการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์

เมื่อทำการทดลองตามแผนการผลิตที่ได้วางไว้ โดยใช้ค่าพารามิเตอร์ตามระดับของปัจจัยที่ได้ ศึกษาในช่วงเดือนมิถุนายน 2564 โดยทำการสุ่มเช็คค่าความสูงของตะกอนในทุก Batch โดยใช้ จำนวนตัวอย่างที่น้อยที่สุด คือ 27 ตัวอย่าง ซึ่งผลแสดงดังรูปที่ 5-1 (ข้อมูลผลการทดลองเพื่อยืนยัน แสดงรูปเต็มในภาคผนวก ก.)



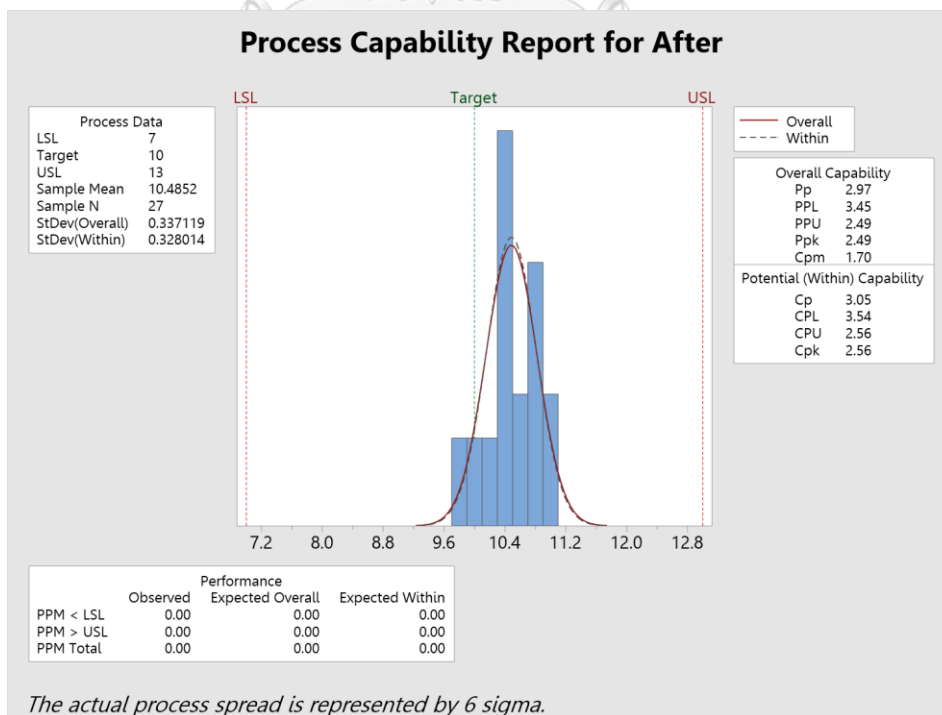
รูป 5-1 ผลการทดสอบการแจกแจงปกติของค่าความสูงตะกอนในกระบวนการผสมไซรัปจากการทดลองเพื่อยืนยันผล



รูป 5-2 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติของค่าความสูงตะกอนของไซรัปที่หลังการปรับค่าพารามิเตอร์โดยผลิตจากกระบวนการผสมเปียกด้วยเครื่อง HSVM

จากรูปที่ 5-1 และ รูปที่ 5-2 จะเป็นข้อมูลของผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลข้อมูลทางสถิติของค่าความสูงของตะกอนที่วัดได้จากการผลิตด้วยเครื่อง HSVM ภายหลังจากปรับค่าพารามิเตอร์ในการควบคุมเครื่อง ซึ่งพบว่า ค่า P-value นั้นมีค่าเท่ากับ 0.774 ซึ่งมากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลของผลการทดลองนั้นเป็นการแจกแจงแบบปกติ สามารถเชื่อถือได้และนำไปใช้วิเคราะห์ผลต่อได้

โดยจากผลข้อมูลของการทดลองเพื่อยืนยันผล ได้นำไปวิเคราะห์หาความสามารถของกระบวนการผลิต (Process Capability) ของกระบวนการผลิตไซร้จากเครื่องผสม HSVM ดังรูปที่ 5-3 ได้แสดงค่าดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการระยะสั้น (C_{pk}) ของค่าความสูงตะกอน เท่ากับ 2.56 และค่าดัชนีความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการระยะยาว (P_{pk}) ของค่าความสูงตะกอน เท่ากับ 2.49 แสดงให้เห็นว่าค่าความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการทั้งระยะสั้นและระยะยาวอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก ซึ่งอ้างอิงตารางที่ 1-2 จะพบว่าค่า C_{pk} ของกระบวนการผลิตไซร้จากเครื่องผสม HSVM อยู่ในประเภทของกระบวนการทั่วไป (ใช้งานอยู่) ที่มีข้อกำหนดเฉพาะแบบพิกัดสองด้าน คือต้องมีค่ามากกว่า 1.33 โดยค่า C_{pk} ของหลังการปรับปรุงมีค่ามากกว่า 1.33 ดังนั้นสรุปได้ว่าผลของการทดลองเพื่อการยืนยันหลังการปรับค่าพารามิเตอร์นั้นดีขึ้นกว่าเดิมมาก โดยค่าความสามารถของกระบวนการผลิตของค่าความสูงตะกอนหลังปรับปรุงแสดงดังรูปที่ 5-3



รูป 5-3 ความสามารถของกระบวนการผลิตของผลการทดลองเพื่อยืนยันหลังการปรับค่าพารามิเตอร์

5.3 การสรุปผลการทดลอง

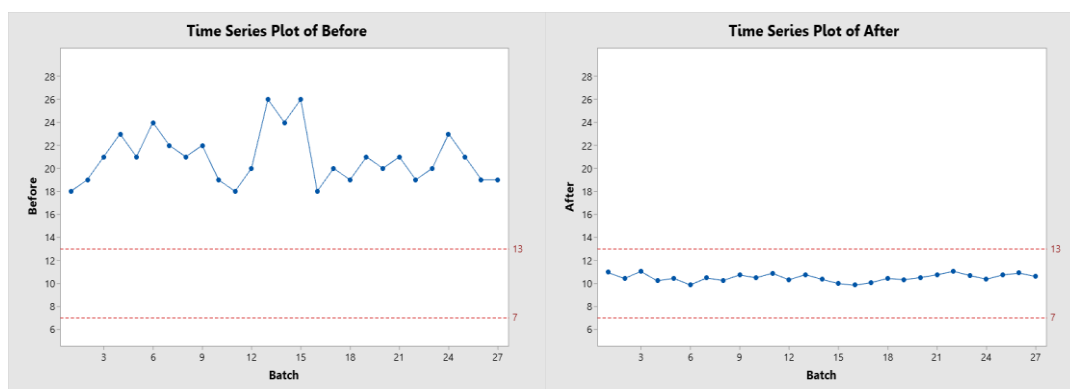
จากผลการทดลองหลังการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องจักรการผลิตชิ้นรับด้วยเครื่อง HSVM สามารถสรุปผลการดำเนินการก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุง แสดงดังรูปที่ 5-4 และรูปที่ 5-5 พร้อมทั้งตารางเปรียบเทียบผลการทดลองดังตารางที่ 5-3

ตาราง 5-3 ตารางเปรียบเทียบผลของค่าความสูงของตะกอนในกระบวนการผลิตชิ้นรับก่อนและหลังการปรับปรุง

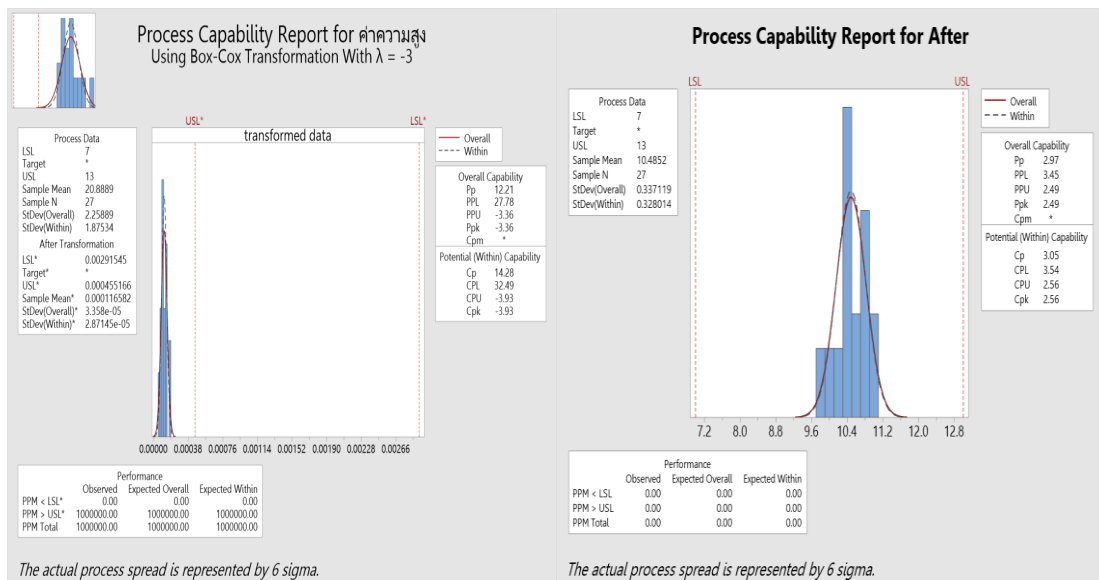
ประเภท	ค่าเฉลี่ยความสูงของตะกอน (มิลลิเมตร)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน	C_{pk}
ก่อนการปรับปรุง	20.89	2.25	-3.93
หลังการปรับปรุง	10.49	0.34	2.56

จากตารางที่ 5-3 สรุปผลการดำเนินการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่า ค่า C_{pk} หลังการปรับปรุงมีค่าเท่ากับ 2.56 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงกระบวนการได้ดีขึ้น ภายใต้สภาวะการใช้ LME วัดถุดิบของเหลวตั้งต้นเหมือนกัน และยังพบค่าเฉลี่ยของค่าความสูงของตะกอนมีค่าลดลง โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 10.48 มิลลิเมตร และค่าความแปรปรวนมีค่าเท่ากับ 0.34 ยิ่งแสดงให้เห็นว่าผลหลังจากการปรับปรุงนั้นทำให้ค่าความสูงของตะกอนมีค่าลดลงมากและอยู่ในเกณฑ์ตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนด และไม่พบข้อบกพร่องอื่นๆ เกิดขึ้นในระหว่างการผลิตและกระบวนการผลิต และสามารถนำสภาวะดังกล่าวไปใช้ในกระบวนการผลิตการผลิตชิ้นรับอย่างต่อเนื่องพบว่าไม่เกิดข้อบกพร่องเกิดขึ้นอีกเช่นกัน

มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูป 5-4 กราฟข้อมูลค่าของความสูงตะกอนเทียบระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงกระบวนการ



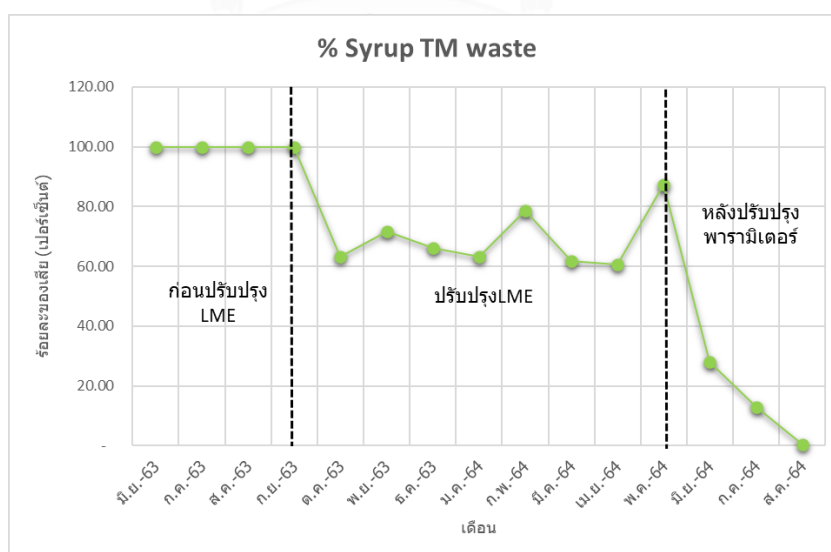
รูป 5-5 รูปกราฟข้อมูลความสามารถของกระบวนการผลิตที่ได้จากค่าของความสูงตะกอนในการผสมไครป์เทียบระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงกระบวนการ

5.4 การตรวจติดตามผลหลังการปรับพารามิเตอร์การใช้งาน

เมื่อภายหลังดำเนินการปรับปรุงการตรวจสอบผลการปรับใช้ค่าพารามิเตอร์ที่นำไปผลิตจริงในช่วงก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยการคำนวณจากการหาร้อยละของเสียของไครป์และค่าเฉลี่ยความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่ผลไม่ผ่านก่อนหน้าี่ที่พบในกระบวนการผลิต ซึ่งช่วงระหว่างเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2563 ถึงเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2564 เป็นช่วงก่อนการปรับปรุง และ ช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือน สิงหาคม 2564 เป็นช่วงหลังการปรับปรุง แสดงดังตารางที่ 5-4

ตาราง 5-4 ตารางยอดการผลิต และร้อยละของเสียของไซรัปที่ผลิตด้วยเครื่อง HSMV ก่อนปรับปรุง และหลังปรับปรุง

ระยะ	เดือน-ปี	ยอดการผลิตไซรัป (กิโลกรัม)	ยอดของเสียไซรัป (กิโลกรัม)	ร้อยละของเสียไซรัป
ก่อนการ ปรับปรุง	มิ.ย.-63	8,922.90	8,922.90	100.00
	ก.ค.-63	15,442.60	15,442.60	100.00
	ส.ค.-63	19,931.00	19,931.00	100.00
	ก.ย.-63	22,460.00	22,460.00	100.00
	ต.ค.-63	10,284.25	6,500.00	63.20
	พ.ย.-63	9,465.24	6,778.12	71.61
	ธ.ค.-63	7,107.79	4,695.28	66.06
	ม.ค.-64	18,325.01	11,612.44	63.37
	ก.พ.-64	10,849.94	8,529.60	78.61
	มี.ค.-64	15,257.59	9,446.76	61.92
	เม.ย.-64	13,800.97	8,363.92	60.60
	พ.ค.-64	32,909.64	28,781.08	87.45
หลังการ ปรับปรุง	มิ.ย.-64	12,226.37	3,428.13	28.04
	ก.ค.-64	21,617.85	2,802.45	12.96
	ส.ค.-64	20,601.00	102.00	0.50



รูป 5-6 กราฟแสดงข้อมูลเปรียบเทียบร้อยละของเสียไซรัปก่อนการปรับปรุงและหลังปรับปรุง

ที่ผลิตด้วยเครื่อง HSVM

จากตารางที่ 5-4 ปริมาณการผลิต ปริมาณของเสีย และร้อยละของเสียของไซรัปที่ผลิตด้วยเครื่อง HSMV เมื่อเทียบผลระหว่างก่อนปรับปรุงและหลังปรับปรุงแล้วจะเห็นได้ว่ามีอัตราการลดลง ดังรูปที่ 5-6 โดยทำการเทียบค่าเฉลี่ยของร้อยละของเสียของไซรัปที่เกิดจากค่าตะกอนสูงก่อนปรับปรุงหลังปรับปรุงดังตารางที่ 5-5

ตาราง 5-5 ผลการปรับปรุงค่าของปัจจัย ในการผลิตขั้นตอนการผลิตไซรัป CFO ด้วยเครื่อง HSMV

ช่วงระยะเวลาทำงาน	ปริมาตรของเสียที่เกิดจาก ค่าตะกอนสูง
ก่อนการปรับปรุง : มิ.ย. 63 - พ.ค.-64	79.40%
หลังการปรับปรุง : มิ.ย. 64 - ส.ค.-64	13.83%
ร้อยละการปรับปรุง	82.58%

จากตารางที่ 5-5 จะพบว่าปริมาณของเสียหลังการปรับปรุงมีปริมาณลดลงถึง 82.58% เมื่อเทียบจากค่าเฉลี่ยของร้อยละของเสียของไซรัป CFO ผลิตด้วยเครื่องผสม HSMV อีกทั้งแนวโน้มของหลังการปรับปรุงพารามิเตอร์ในกระบวนการผลิตยังทำให้ไซรัปที่ผลิตได้ไม่เกิดของเสียขึ้นอีก และยังทำให้ความสามารถของกระบวนการผลิตในขั้นตอนการผลิตไซรัปนั้นเพิ่มขึ้น พร้อมทั้งค่าความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้นในไซรัปยังอยู่ในค่าเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานกำหนดคือไม่สูงเกิน 13 มิลลิเมตรนั่นเอง

ภายหลังได้มีการปรับแบบฟอร์มสำหรับควบคุมพารามิเตอร์กระบวนการผลิตการผสมไซรัปด้วยเครื่อง HSMV ตามแบบตารางที่ 5-6 เพื่อให้การผลิตไซรัปแบบขั้นหนึ่นั้น ไม่เกิดความผิดพลาด และเป็นการควบคุมคุณภาพในระหว่างกระบวนการผลิตเพื่อให้เครื่องจักรผลิตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

บทที่ 6

สรุปผลการดำเนินการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปการดำเนินงานวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยเพื่อศึกษาหาปัจจัยส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพไซร่ปในการผสมแบบชั้นหนืดด้วยเครื่อง HSVM ประกอบไปด้วย ขั้นตอนการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การเก็บข้อมูลและการศึกษาสาเหตุของปัญหาพร้อมทั้งกระบวนการผลิต การวิเคราะห์และคัดเลือกสาเหตุของปัญหา การปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ และการสรุปผลการวิจัยพร้อมข้อเสนอแนะ

6.1.1 สรุปปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไซร่ป

ปัญหาที่เกิดขึ้นและตรวจสอบพบส่วนใหญ่จะเป็นด้านทางจุลชีวภาพที่จะไม่ได้เห็นด้วยตาเปล่า แต่ในภายหลังที่มีการผลิตไซร่ปด้วยเครื่อง HSVM นั้นจะพบปัญหาการเกิดตะกอนสูง และมีลักษณะเสียสภาพแยกชั้น โดยพบว่ามีความเสียหายเกิดขึ้นมากถึง 100% ของของเสียที่เกิดขึ้นทั้งหมดที่ผลิตจากเครื่องผสม HSVM จึงทำให้เป็นที่มาของปัญหาของหัวข้อวิจัยในฉบับนี้

6.1.2 สรุปสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตไซร่ป

จากการศึกษาและเก็บข้อมูล ของสาเหตุปัญหานั้น สามารถแบ่งได้เป็นสองส่วน ส่วนแรกคือข้อมูลที่เกิดจากการเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตการผสมไซร่ปด้วยเครื่อง HSVM เปรียบเทียบในแต่ละเดือนและแต่ละชนิดของปัญหาที่เกิดของเสีย ส่วนที่สองคือ การหาสาเหตุจากประสบการณ์การทำงานของผู้ปฏิบัติงาน ผู้มีความชำนาญและรู้ถึงปัญหาที่เกิด โดยการจัดทีมประชุมเพื่อหารือและวิเคราะห์สาเหตุที่มาและความเป็นไปได้ในแต่ละด้าน โดยประยุกต์ใช้แผนผังก้างปลา (Fishbone diagram) เพื่อช่วยในการจำแนกและรวบรวมความคิดเห็น พร้อมทั้งใช้การวิเคราะห์ปัจจัยด้วยการวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ (FMEA) มาช่วยในการเก็บข้อมูลของโรงงานกรณีศึกษาในระหว่างเดือน กรกฎาคม 2563 ถึงเดือน ธันวาคม 2563

จึงสามารถสรุปเอาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมดดังนี้

1. ระดับของชุดตะแกรง
2. ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น
3. อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว

4. ความเร็วรอบของใบกวน

จากนั้นจึงเข้าไปสู่การวิเคราะห์สาเหตุเพื่อแก้ไขปัญห

6.1.3 สรุปขั้นตอนการวิเคราะห์ปัจจัยและแก้ไขปัญห

เมื่อได้ข้อมูลของสาเหตุมาแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลแบบสองระดับ 2k-p แบบ 1 เรพลิเคต (2k-p Fractional Factorial Design) ที่เรสโซลูชันระดับ IV เพื่อคัดกรองปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในไซรัป โดยอาศัยโปรแกรม Minitab 19 ช่วยในการออกแบบการทดลอง การสุ่มลำดับ ซึ่งกระบวนการผลิตการผสมไซรัปนั้นเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องและมีกำลังผลิตที่สูง การกรองปัจจัยข้างต้นโดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียลแบบสองระดับ จะช่วยให้ลดต้นทุนของการทดลองลงได้ เพราะจำนวนแบบการทดลองที่ได้จากโมเดลการทดลองจะแบ่งได้เป็น 8 แบบ

ทำการทดลองตามแบบที่ได้ออกแบบการทดลองไว้ และทำการเก็บข้อมูลค่าความสูงของตะกอนไซรัปแลติดตามผลของข้อมูลของเสียที่เกิดขึ้นตามแต่ละแบบการทดลอง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลและตรวจสอบแบบจำลอง ซึ่งพบว่า ปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 ต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอนในการผสมไซรัปเกิดขึ้นได้จาก 3 ปัจจัย ได้แก่ ระดับของชุดตะแกรง ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น และอุณหภูมิของวัตถุดิบเหลว

ส่วนของการปรับปรุงแก้ไขปัญหานั้น ผู้วิจัยได้นำเอาปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยดังกล่าวมาทำการออกแบบการทดลองด้วยวิธีพื้นผิวตอบ (Response Surface Methodology) แบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box Behnken Design) เมื่อได้ผลการทดลองมาแล้ว จึงนำมาทดสอบแบบจำลองตามเงื่อนไข ซึ่งพบว่าเป็นไปตามเงื่อนไขทำการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์โดยใช้โปรแกรม Minitab ผ่านวิธี Response Optimizer โดยตั้งค่าความสูงของตะกอนอยู่ที่ช่วงค่ากลางของมาตรฐานโรงงานกรณีศึกษาคือ 10 มิลลิเมตร จะพบว่าค่าที่เหมาะสมในการผสมไซรัปด้วยเครื่อง HSVM คือ ปัจจัย A (ระดับของชุดตะแกรง) อยู่ที่ระดับ 2.6929 ปัจจัย B (ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น) อยู่ที่ระดับ 1600 rpm ปัจจัย C (อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว) อยู่ที่ระดับ 79.4626 องศาเซลเซียส แต่เนื่องจากระดับของชุดตะแกรงเป็นค่าคงที่และปรับได้แค่ 3 ระดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงทดลองปรับหาค่า Optimize อีกครั้งโดยกำหนดค่าของระดับชุดตะแกรงเป็นค่าคงที่ จะพบว่าค่าที่เหมาะสมปรับตั้งได้เป็น ปัจจัย A (ระดับของชุดตะแกรง) กำหนดที่ ระดับ 1 คือระดับต่ำ Low ปัจจัย B (ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น) อยู่ที่ระดับ 2000 rpm และปัจจัย C (อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว) จะอยู่ที่ระดับ 72.5905 องศาเซลเซียส และความสามารถของเครื่องจักรมีความละเอียดในการปรับตั้งตำแหน่ง

ค่าได้จำกัด ผู้วิจัยจึงกำหนดค่าปรับตั้งเป็น ระดับชุดตะแกรงอยู่ที่ระดับต่ำ ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นเป็น 2000 rpm และอุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลว เป็น 72.5 องศาเซลเซียส

6.1.4 สรุปขั้นตอนการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการ

จากผลการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยมาแล้ว ผู้วิจัยจึงนำค่าระดับของพารามิเตอร์มาทดสอบตั้งค่าที่เครื่องจักร เพื่อทดลองกระบวนการผสมด้วยเครื่อง HSVM แล้วยืนยันผล พบว่าผลการทดลองที่ได้ออกมานั้น อยู่ในเกณฑ์ช่วงค่ากลางที่ควบคุมและผลของไซรัปทุก Batch นั้นผ่านโดยไม่เกิดของเสียในระหว่างกระบวนการ โดยทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจำนวน 27 Batch โดยการคำนวณจากการหาร้อยละของเสียของไซรัปและค่าเฉลี่ยความสูงของตะกอนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่ผลไม่ผ่านก่อนหน้านี้ที่พบในกระบวนการผลิต ซึ่งช่วงระหว่างเดือน มิถุนายน พ.ศ. 2563 ถึงเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2564 เป็นช่วงก่อนการปรับปรุง และ ช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2564 ถึงเดือน สิงหาคม 2564 เป็นช่วงหลังการปรับปรุง พบว่าก่อนปรับปรุงค่าความสูงของตะกอนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 20.89 ± 2.26 มิลลิเมตร ค่าความสามารถของกระบวนการผลิตอยู่ที่ -3.93 และร้อยละของเสียโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 79.40% เมื่อหลังปรับปรุงพบค่าความสูงของตะกอนโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 10.48 ± 0.32 มิลลิเมตร ค่าความสามารถของกระบวนการผลิตอยู่ที่ 2.56 และร้อยละของเสียโดยเฉลี่ยลดลงมาอยู่ที่ 13.83% ดังนั้นสรุปได้ว่าปัจจัย ทั้ง 3 ปัจจัยข้างต้น คือ 1.) ระดับของชุดตะแกรง 2.) ความเร็วรอบของชุดหัวปั่น และ 3.) อุณหภูมิเริ่มต้นของวัตถุดิบของเหลว นั้นมีอิทธิพลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน และเมื่อใช้ค่าปรับตั้งตามที่ได้กล่าวไว้ ผลการทดลองเพื่อยืนยันสามารถยืนยันได้ว่าควบคุมจริง ผู้วิจัยจึงได้กำหนดรูปแบบการควบคุมการผลิตและคุณภาพไซรัปที่ผลิตด้วยเครื่อง HSVM เพื่อไม่ให้เกิดข้อผิดพลาดหรือของเสียระหว่างกระบวนการขึ้นอีก

6.2 ข้อจำกัด

1. การผสมไซรัปด้วยเครื่อง HSVM จะต้องจัดแผนการทดลองให้ลงลึกกับแผนการอบแห้งในส่วนของ Vacuum Band Dry ซึ่งแผนการผลิตจะถูกจัดมาแบบต่อเนื่องทั้งเดือน ดังนั้นผู้วิจัยต้องประสานงานร่วมกับทั้งฝ่ายวางแผนการผลิต ฝ่ายควบคุมคุณภาพ ฝ่ายผลิต และฝ่ายพัฒนาและวิจัยผลิตภัณฑ์ เพื่อเข้าดำเนินการทดลอง และเป็นการป้องกันการผิดพลาดและเกิดข้อบ่งชี้ที่ผิดวิสัยหรือไม่ถูกต้องของสินค้าในขั้นตอนถัดไป

2. กระบวนการผลิตที่กำลังสูงและต่อเนื่อง หากการปรับตั้งค่ามีความผิดพลาดอาจทำให้เกิดของเสียระหว่างกระบวนการที่ผิดพลาดไปจากการทดลอง หรือเกิดจากข้อผิดพลาดอื่นๆ ซึ่งจะส่งผลให้

เกิดต้นทุนในการทดลองที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากผงโอวัลท์ที่เสียสภาพแล้วนั้นจะไม่สามารถนำกลับมารีไซเคิลหรือรีกระบวนการผลิตใหม่ได้ เนื่องจากจะยิ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาต่อไซรัปที่ผลิตออกมาได้

3. การประชุมทีมงาน และพนักงานที่มีการทำงาน 3 กะ และเดินงานต่อเนื่องตลอด 24 ชั่วโมง ทำให้ไม่สามารถนัดการประชุมร่วมกันแบบครบทีมได้ทั้ง 3 กะ เนื่องจากต้องมีทีมปฏิบัติงาน 1 กะ คอยดำเนินการผลิต

6.3 ข้อเสนอแนะ

1. จากการศึกษาปัจจัยที่ได้จากการปรับตั้งค่าเครื่องผสม HSVM โรงงานกรณีศึกษาสามารถนำเอาข้อมูลด้านการปรับตั้งปัจจัยมาศึกษาต่อการพัฒนาการผลิตภัณฑ์อื่นๆ หรือผลิตภัณฑ์อื่นๆได้ด้วย

2. กระบวนการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับเครื่องผสม HSVM นี้ จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการอบแห้งด้วย Vacuum Band Dry ดังนั้นควรจะต้องมีกาตรวจสอบสมรรถภาพเครื่องอบ Band dry ในระหว่างการอบ เพื่อดูสภาพไซรัประหว่างการอบ และการทำงานอย่างรอบคอบ เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อไซรัปในภายหลังแล้วเกิดเป็นข้อผิดพลาดบ่งชี้ต่อสินค้าที่ผลิตออกมาได้

3. การเก็บข้อมูลจะต้องมีการสื่อสารให้กับพนักงานที่รับผิดชอบหน้างานอย่างรอบคอบและทั่วถึง และต้องได้รับความร่วมมือจากพนักงาน ที่ต้องปฏิบัติตามอย่างเคร่งครัด เพื่อป้องกันการผิดพลาดระหว่างกระบวนการผลิตที่อาจเกิดขึ้นได้



ภาคผนวก ก

ตาราง ก-1 ข้อมูลค่าความสูงของตะกอนที่วัดได้จากการชั่งเชื้อไร้บของการผลิตไ้รับด้วยเครื่อง HSVM (ก่อนปรับปรุง)

No.	ความสูงของตะกอน (mm.)
1.	18
2.	19
3.	21
4.	23
5.	21
6.	24
7.	22
8.	21
9.	22
10.	19
11.	18
12.	20
13.	26
14.	24
15.	26
16.	18
17.	20
18.	19
19.	21
20.	20
21.	21
22.	19
23.	20
24.	23
25.	21
26.	19
27.	19

ตาราง ก-2 ข้อมูลค่าความสูงของตะกอนที่วัดจากการขงเซ็คไชร็ปของการผลิตไชร็ปด้วยเครื่อง HSVM ผ่านการแปลงรูปข้อมูลด้วยวิธีบ็อก-ค็อก (ก่อนปรับปรุง)

No.	ความสูงของตะกอน (mm.)
1.	0.0001715
2.	0.0001458
3.	0.0001080
4.	0.0000822
5.	0.0001080
6.	0.0000723
7.	0.0000939
8.	0.0001080
9.	0.0000939
10.	0.0001458
11.	0.0001715
12.	0.0001250
13.	0.0000569
14.	0.0000723
15.	0.0000569
16.	0.0001715
17.	0.0001250
18.	0.0001458
19.	0.0001080
20.	0.0001250
21.	0.0001080
22.	0.0001458
23.	0.0001250
24.	0.0000822
25.	0.0001080
26.	0.0001458
27.	0.0001458

ตาราง ก-3 ผลการทดลองหลังปรับปรุงเพื่อยืนยัน

No.	ความสูงของตะกอน (mm.)
1.	10.94
2.	10.41
3.	11.03
4.	10.21
5.	10.43
6.	9.85
7.	10.46
8.	10.24
9.	10.72
10.	10.48
11.	10.87
12.	10.30
13.	10.75
14.	10.34
15.	9.97
16.	9.82
17.	10.06
18.	10.42
19.	10.31
20.	10.50
21.	10.74
22.	11.04
23.	10.67
24.	10.35
25.	10.73
26.	10.88
27.	10.58

ภาคผนวก ข

ตาราง ข-1 ตารางการออกแบบการทดลองเชิงเศษส่วนแฟคทอเรียล (2k Fractional Factorial Design)

Fractional Factorial Design

Design Summary

Factors : 4 Base Design : 4,8 Resolution : IV
Runs : 8 Replicates : 1 Fraction : 1/2
Blocks : 1 Center pts (total) : 0

Design Generators: D = ABC

Defining Relation: I = ABCD

Alias Structure

I + ABCD

A + BCD

B + ACD

C + ABD

D + ABC

AB + CD

AC + BD

AD + BC



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Design Table (randomized)

Run	Blk	A	B	C	D
1	1	+	-	+	-
2	1	-	-	+	+
3	1	-	-	-	-
4	1	-	+	+	-
5	1	+	-	-	+
6	1	-	+	-	+
7	1	+	+	-	-
8	1	+	+	+	+

ตาราง ข-2 ตารางการออกแบบการทดลองวิธีการพื้นผิวตอบสนองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน

Box-Behnken Design

Design Summary

Factors:	3	Replicates:	1
Base runs:	15	Total runs:	15
Base blocks:	1	Total blocks:	1

Center points: 3

Design Table (randomized)

Run	Blk	A	B	C
1	1	1	-1	0
2	1	-1	1	0
3	1	0	0	0
4	1	-1	0	-1
5	1	0	0	0
6	1	1	0	-1
7	1	0	1	1
8	1	-1	-1	0
9	1	0	-1	1
10	1	0	0	0
11	1	0	1	-1
12	1	0	-1	-1
13	1	-1	0	1
14	1	1	0	1
15	1	1	1	0

ภาคผนวก ค

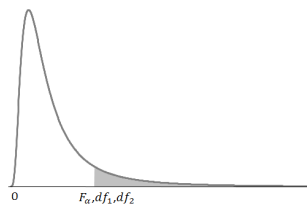
ตาราง ค-1 แบบฟอร์มการให้คะแนนสาเหตุและผลกระทบ

แบบฟอร์มการให้คะแนนปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดค่าความสูงของตะกอน
ในกระบวนการผสมไซรป์ด้วยเครื่อง HSVM

ตำแหน่งงาน _____	เพศ ชาย / หญิง _____	อายุการทำงาน _____ ปี										
ลำดับที่	ประเภทสาเหตุ	รายการสาเหตุและ เป็นปัจจัยป้อนเข้า	คะแนนความสัมพันธ์ต่อการเกิดค่าความสูง ของตะกอนในกระบวนการผสมไซรป์									
1	Man	พนักงานขาดประสบการณ์เนื่องจากเป็นเครื่องจักรใหม่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
2	Man	พนักงานขาดความรู้ความเข้าใจเพราะเป็นกระบวนการใหม่	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Man	พนักงานทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	Man	ความล่าช้าในการทำงาน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	Man	การเคลื่อนย้ายย่อย	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	Method	ไม่มีคู่มือขั้นตอนการปั่นผสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	Method	ไม่มีคู่มือตรวจสอบเครื่องจักรขณะผสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	Method	การถ่ายผงเพื่อเข้าปั่นผสมเปลี่ยนวิธี	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9	Material	ปริมาณวัตถุดิบไม่ได้สัดส่วน	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	Material	อุณหภูมิของวัตถุดิบของเหลวที่ใช้ไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	Material	บริษัทจำหน่ายมีแห่งเดียว	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	Machine	ความเร็วรอบของใบกวนไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
13	Machine	ความเร็วรอบของใบปาดไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
14	Machine	ระยะเวลาให้ความร้อนในกปั่นผสมไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15	Machine	ระยะเวลาการดูดผงเข้าเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	Machine	ค่าแรงดันของไอน้ำที่ใช้ในการผสมไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
17	Machine	ค่าแรงดันสุญญากาศที่ใช้ในการดูดผงเพื่อปั่นผสมไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
18	Machine	ความเร็วรอบของชุดหัวปั่นไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
19	Machine	การเลือกใช้ระดับชุดหัวปั่นผสมไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
20	Environment	สถานที่ติดตั้งเครื่องจักรอยู่สูงเกินไป	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21	Environment	สถานที่ติดตั้งเครื่องจักรเข้าสิ่งยากเกินไป	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22	Environment	แสงสว่างในพื้นที่ทำงานไม่เพียงพอ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
23	Environment	พื้นที่ปฏิบัติงานคับแคบเกินไป	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
24	Environment	ความชื้นรอบนอกเครื่องจักรไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	Environment	อุณหภูมิรอบนอกเครื่องจักรไม่เหมาะสม	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

ตาราง ค-3 ตารางค่าวิกฤตการแจกแจงแบบ F (ต่อ)

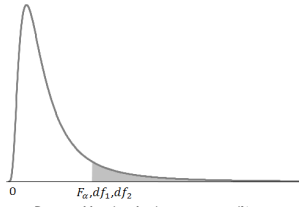
Critical Values for F Distributions



df2	Degree of freedom for the numerator, df1																df2				
	α	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30		40	60	120	∞
13	0.100	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.01	1.98	1.96	1.93	1.90	1.88	1.85	13
	0.050	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	
	0.025	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.89	2.84	2.78	2.72	2.66	2.60	
	0.010	9.07	6.70	5.74	5.21	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	3.96	3.82	3.66	3.59	3.51	3.43	3.34	3.25	3.18	
	0.005	11.37	8.19	6.93	6.23	5.79	5.48	5.25	5.08	4.94	4.82	4.64	4.46	4.27	4.17	4.07	3.97	3.87	3.76	3.66	

ตาราง ค-3 ตารางค่าวิกฤตการแจกแจงแบบ F (ต่อ)

Critical Values for F Distributions



df2	α	Degree of freedom for the numerator, df1																		df2	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120		∞
25	0.100	2.92	2.53	2.32	2.18	2.09	2.02	1.97	1.93	1.89	1.87	1.82	1.77	1.72	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	25
	0.050	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	
	0.025	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.30	2.24	2.18	2.12	2.05	1.98	1.91	
	0.010	7.77	5.57	4.68	4.18	3.85	3.63	3.46	3.32	3.22	3.13	2.99	2.85	2.70	2.62	2.54	2.45	2.36	2.27	2.17	
	0.005	9.48	6.60	5.46	4.84	4.43	4.15	3.94	3.78	3.64	3.54	3.37	3.20	3.01	2.92	2.82	2.72	2.61	2.50	2.38	
26	0.100	2.91	2.52	2.31	2.17	2.08	2.01	1.96	1.92	1.88	1.86	1.81	1.76	1.71	1.68	1.65	1.61	1.58	1.54	1.50	26
	0.050	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	
	0.025	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.22	2.16	2.09	2.03	1.95	1.88	
	0.010	7.72	5.53	4.64	4.14	3.82	3.59	3.42	3.29	3.18	3.09	2.96	2.81	2.66	2.58	2.50	2.42	2.33	2.23	2.13	
	0.005	9.55	6.66	5.52	4.89	4.49	4.20	3.99	3.83	3.69	3.59	3.42	3.25	3.06	2.97	2.87	2.77	2.66	2.55	2.33	
27	0.100	2.90	2.51	2.30	2.17	2.07	2.00	1.95	1.91	1.87	1.85	1.80	1.75	1.70	1.67	1.64	1.60	1.57	1.53	1.49	27
	0.050	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	
	0.025	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.19	2.13	2.07	2.00	1.93	1.85	
	0.010	7.68	5.49	4.60	4.11	3.78	3.56	3.39	3.26	3.15	3.06	2.93	2.78	2.63	2.55	2.47	2.38	2.29	2.20	2.10	
	0.005	9.34	6.49	5.36	4.74	4.34	4.06	3.85	3.69	3.56	3.45	3.28	3.11	2.93	2.83	2.73	2.63	2.52	2.41	2.29	
28	0.100	2.89	2.50	2.29	2.16	2.06	2.00	1.94	1.90	1.87	1.84	1.79	1.74	1.69	1.66	1.63	1.59	1.56	1.52	1.48	28
	0.050	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	
	0.025	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.17	2.11	2.05	1.98	1.91	1.83	
	0.010	7.64	5.45	4.57	4.07	3.75	3.53	3.36	3.23	3.12	3.03	2.90	2.75	2.60	2.52	2.44	2.35	2.26	2.17	2.07	
	0.005	9.28	6.44	5.32	4.70	4.30	4.02	3.81	3.65	3.52	3.41	3.25	3.07	2.89	2.79	2.69	2.59	2.48	2.37	2.25	
29	0.100	2.89	2.50	2.28	2.15	2.06	1.99	1.93	1.89	1.86	1.83	1.78	1.73	1.68	1.65	1.62	1.58	1.55	1.51	1.47	29
	0.050	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
	0.025	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.89	1.81	
	0.010	7.60	5.42	4.54	4.04	3.73	3.50	3.33	3.20	3.09	3.00	2.87	2.73	2.57	2.49	2.41	2.33	2.23	2.14	2.04	
	0.005	9.23	6.40	5.28	4.66	4.26	3.98	3.77	3.61	3.48	3.38	3.21	3.04	2.86	2.76	2.66	2.56	2.45	2.33	2.21	
30	0.100	2.88	2.49	2.28	2.14	2.05	1.98	1.93	1.88	1.85	1.82	1.77	1.72	1.67	1.64	1.61	1.57	1.54	1.50	1.46	30
	0.050	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
	0.025	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.20	2.14	2.07	2.01	1.94	1.87	1.79	
	0.010	7.56	5.39	4.51	4.02	3.70	3.47	3.30	3.17	3.07	2.98	2.84	2.70	2.55	2.47	2.39	2.30	2.21	2.11	2.01	
	0.005	9.18	6.35	5.24	4.62	4.23	3.95	3.74	3.58	3.45	3.34	3.18	3.01	2.82	2.73	2.63	2.52	2.42	2.30	2.18	
40	0.100	2.84	2.44	2.23	2.09	2.00	1.93	1.87	1.83	1.79	1.76	1.71	1.66	1.61	1.57	1.54	1.51	1.47	1.42	1.38	40
	0.050	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
	0.025	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	2.01	1.94	1.88	1.80	1.72	1.64	
	0.010	7.31	5.18	4.31	3.83	3.51	3.29	3.12	2.99	2.89	2.80	2.66	2.52	2.37	2.29	2.20	2.11	2.02	1.92	1.81	
	0.005	8.83	6.07	4.98	4.37	3.99	3.71	3.51	3.35	3.22	3.12	2.95	2.78	2.60	2.50	2.40	2.30	2.18	2.06	1.93	
60	0.100	2.79	2.39	2.18	2.04	1.95	1.87	1.82	1.77	1.74	1.71	1.66	1.60	1.54	1.51	1.48	1.44	1.40	1.35	1.29	60
	0.050	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
	0.025	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.88	1.82	1.74	1.67	1.58	1.48	
	0.010	7.08	4.98	4.13	3.65	3.34	3.12	2.95	2.82	2.72	2.63	2.50	2.35	2.20	2.12	2.03	1.94	1.84	1.73	1.60	
	0.005	8.49	5.79	4.73	4.14	3.76	3.49	3.29	3.13	3.01	2.90	2.74	2.57	2.39	2.29	2.19	2.08	1.96	1.83	1.69	
120	0.100	2.75	2.35	2.13	1.99	1.90	1.82	1.77	1.72	1.68	1.65	1.60	1.55	1.48	1.45	1.41	1.37	1.32	1.26	1.19	120
	0.050	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.26	
	0.025	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.76	1.69	1.61	1.53	1.43	1.31	
	0.010	6.85	4.79	3.95	3.48	3.17	2.96	2.79	2.66	2.56	2.47	2.34	2.19	2.03	1.95	1.86	1.76	1.66	1.53	1.38	
	0.005	8.18	5.54	4.50	3.92	3.55	3.28	3.09	2.93	2.81	2.71	2.54	2.37	2.19	2.09	1.98	1.87	1.75	1.61	1.43	
∞	0.100	2.71	2.30	2.08	1.95	1.85	1.77	1.72	1.67	1.63	1.60	1.55	1.49	1.42	1.38	1.34	1.30	1.24	1.17	1.03	∞
	0.050	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.40	1.32	1.22	1.03	
	0.025	5.03	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.95	1.83	1.71	1.64	1.57	1.49	1.39	1.27	1.04	
	0.010	6.64	4.61	3.78	3.32	3.02	2.80	2.64	2.51	2.41	2.32	2.19	2.04	1.88	1.79	1.70	1.59	1.48	1.33	1.05	
	0.005	7.88	5.30	4.28	3.72	3.35	3.09	2.90	2.75	2.62	2.52	2.36	2.19	2.00	1.90	1.79	1.67	1.54	1.37	1.05	

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

- กิตติศักดิ์, พ. (2008). *FMEA การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ = Failure mode and effect analysis* (พิมพ์ครั้งที่ 1. ed.) [Non-fiction]. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat05085a&AN=chu.b1779685&site=eds-live>
- กิตติศักดิ์, พ. (2549). การวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ (พิมพ์ครั้งที่ 4. ed.) [Non-fiction]. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat05085a&AN=chu.b1730841&site=eds-live>
- กิตติศักดิ์, พ. (2551). *FMEA การวิเคราะห์อาการขัดข้องและผลกระทบ* [Non-fiction]. ส.ส.ท.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat05085a&AN=chu.b1781496&site=eds-live>
- จิระวัฒน์, แ. (2553). การลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากโพรงอากาศในกระบวนการขึ้นรูปไมโครชิป [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. CUIR.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.61042&site=eds-live>
<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/61042>
- ชนภัทร, ส. (2559). การปรับปรุงกระบวนการสังเคราะห์สีย้อมผ้ารีแอกทีฟโดยใช้หลักการซิกซ์ ซิกมา [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. CUIR.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.55211&site=eds-live>
<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/55211>
- ปารเมศ, ช. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (พิมพ์ครั้งที่ 1. ed.) [Non-fiction]. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat05085a&AN=chu.b1609868&site=eds-live>

ภูธิป, อ. (2557). การลดเวลาสูญเสียในกระบวนการติดฉลาก [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย].

CUIR.

<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.46179&site=eds-live>

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/46179>

โรจน์โรวรรณ, น. (2554). การควบคุมคุณภาพ (Quality Control) [การควบคุมคุณภาพ (Quality Control)].

วรพจน์, ร. (2555). การลดของเสียประเภทรูปลักษณะภายนอกของผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตผ้าไม่ทอ [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. CUIR.

<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.42403&site=eds-live>

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/42403>

วัชรศักดิ์, ท. (2546). การศึกษาปัจจัยในกระบวนการการประกอบชุดประกอบสำเร็จหัวเขียนอ่านข้อมูลฮาร์ดิสก์ที่มีผลกระทบต่อการทำงานของตัวหัวเขียนอ่านข้อมูลโดยใช้การออกแบบการทดลอง [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. CUIR.

<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.10124&site=eds-live>

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/10124>

สิทธิกร, เ. (2561). การลดปริมาณของเสียในกระบวนการพิมพ์ได้แบบหมึกลงบนผลิตภัณฑ์กระป๋อง [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. CUIR.

<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.63634&site=eds-live>

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/63634>

[Record #22 is using a reference type undefined in this output style.]

อาภาพร, จ. (2559). การเพิ่มผลิตภาพในกระบวนการทำให้แห้งแบบพ่นฝอยในการผลิตสีย้อมผ้า [Thesis, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย]. CUIR.

<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=ir01978a&AN=cuir.123456789.55025&site=eds-live>

<http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/55025>

ภาษาอังกฤษ

- Breyfogle, F. W., III. (1999). *Implementing Six Sigma : smarter solutions using statistical methods* [Non-fiction]. John Wiley & Sons.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab05085a&AN=chu.b1568138&site=eds-live>
- Han, B., & Baruah, K. (2020). Structure-Functional Activity Relationship of β -Glucans From the Perspective of Immunomodulation: A Mini-Review. *Frontiers in Immunology*. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2020.00658>
- Jaspe, J., & Hagen, S. J. (2006). Do Protein Molecules Unfold in a Simple Shear Flow? [Article]. *Biophysical Journal*, 91(9), 3415-3424.
<https://doi.org/10.1529/biophysj.106.089367>
- Jin, Y.-L., Speers, R. A., Paulson, A. T., & Stewart, R. J. (2004). Barley beta-glucans and their degradation during malting and brewing. *Technical Quarterly-Master Brewers Association of the Americas*, 41(3), 231-240.
- Juran, J., Taylor, F., Shewhart, W., Deming, E., Crosby, P., Ishikawa, K., Feigenbaum, A., Taguchi, G., & Goldratt, E. (2005). Quality control. *Joseph M. Juran: Critical Evaluations in Business and Management*, 1, 50.
- Kaur, R., Sharma, M., Ji, D., Xu, M., & Agyei, D. (2019). Structural features, modification, and functionalities of beta-glucan. *Fibers*, 8(1), 1.
- Maa, Y. F., & Hsu, C. C. (1996). Effect of high shear on proteins. *Biotechnology and bioengineering*, 51(4), 458-465.
- Mitra, A. (2008). *Fundamentals of quality control and improvement* (3rd ed. ed.) [Non-fiction]. Wiley.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab05085a&AN=chu.b1800496&site=eds-live>
- Montgomery, D. C. (1976). *Design and analysis of experiments* [Non-fiction]. Wiley.
<https://chula.idm.oclc.org/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cab05085a&AN=chu.b1346205&site=eds-live>
- Netinbag.com. (2020). *What Are High Shear mixers?* Retrieved 8 October from <https://www.netinbag.com/en/manufacturing/what-are-high-shear-mixers.html>

- Qian, F., Sun, J., Cao, D., Tuo, Y., Jiang, S., & Mu, G. (2017). Experimental and modelling study of the denaturation of milk protein by heat treatment. *Korean journal for food science of animal resources*, 37(1), 44.
- Qu, R. (2020). Temperature distribution in a high shear mixer during heating.
- Wang, Q., Sheng, X., Shi, A., Hu, H., Yang, Y., Liu, L., Fei, L., & Liu, H. (2017). β -Glucans: Relationships between Modification, Conformation and Functional Activities. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 22(2).
<https://doi.org/10.3390/molecules22020257>
- Zhang, J., Xu, S., & Li, W. (2012). High shear mixers: A review of typical applications and studies on power draw, flow pattern, energy dissipation and transfer properties [Review Article]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 57-58, 25-41. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.04.004>

Uncategorized References

- Anderson, V. L., & McLean, R. A. (2018). *Design of experiments: a realistic approach*. CRC Press.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นางสาววรกาญจน์ คณกร
วัน เดือน ปี เกิด	04 ตุลาคม 2532
สถานที่เกิด	เมืองเหมยเสียน, มณฑลกว่างตุง, ประเทศจีน
วุฒิการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมกรรมการอาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
ที่อยู่ปัจจุบัน	เลขที่509-511 ซ.บ้านบาตร ถ.บำรุงเมือง แขวงบ้านบาตร เขตป้อมปราบ ศัตรูพ่าย จ.กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10100

