การลดต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องโดยการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

นายปณิธาน อินทร์ติยะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

KRAFT LINER BOARD COST REDUCTION BY IMPROVING DEINKING PULP QUALITY

Mr. Panithan Intiya

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องโดยการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน
โดย	นายปณิธาน อินทร์ติยะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา เชาวลิตวงศ์)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

…… กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์)

…… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.นันทชัย กานตานันทะ)

ปณิธาน อินทร์ติยะ : การลดต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องโดยการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน. (KRAFT LINER BOARD COST REDUCTION BY IMPROVING DEINKING PULP QUALITY) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ, 74 หน้า.

จากการศึกษากระบวนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวของโรงงานกรณีศึกษาพบว่ามีปัญหาต้นทุนการผลิตสูงจากการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาสูงในปริมาณมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวโดยยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าให้ได้ตามมาตรฐาน

ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อพบว่าการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์สามารถลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวได้ ในเบื้องต้นพบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมี 3 ปัจจัย คือ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion สรุปสภาวะที่ดีที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ทำให้ได้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุดได้ดังนี้ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ตั้งค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ 110 องศาเซลเซียส และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษทำการศึกษาหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ทำให้คุณภาพด้านความขาวและความแข็งแรงของกระดาษได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด และสรุปสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 45 และ 40 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และที่สภาวะดังกล่าวนี้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 395 บาทต่อตันกระดาษ หรือคิดเป็น 11.69 ล้านบาทต่อปี

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2555 .....

5371505021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS : DESIGN OF EXPERIMENT / DEINKING PULP / BRIGHTNESS

PANITHAN INTIYA : KRAFT LINER BOARD COST REDUCTION BY IMPROVING DEINKING PULP QUALITY. ADVISOR: ASST.PROF.WIPAWEE THARMMAPHORNPHILAS, Ph.D., 74 pp.

A study of a kraft liner board production process show that the consumption of virgin pulp is high. Since unit cost of virgin pulp is high compare to other types of raw material, the objective of this paper is to reduce an amount of virgin pulp used in producing the kraft liner board while maintaining the paper quality standard.

We found that increasing the brightness of deinking pulp by applying Sodium Hydrosulphite to the raw material preparation process could help reduce using virgin pulp. From a preliminary study, there are 3 main factors involving in the brightness process improvement: Sodium Hydrosulphite content, temperature, and concentration of deinking pulp at hot dispersion machine. The best condition for improving the brightness of deinking pulp is using 1.35 kilograms of Sodium Hydrosulphite per ton pulp, setting temperature of hot dispersion at 110 degree Celsius and using 25% deinking pulp concentration.

Next is determines the proportion of virgin pulp and deinking pulp in a paper production process to satisfy paper brightness and strength standard with the lowest cost. The most appropriate level is adjusting virgin pulp dosage to 45 g/m^2 and deinking pulp dosage to 40 g/m^2. With this proportion, manufacturing cost can be reduced 395 Bath per ton paper or 11.69 million Bath per year.

Department : Industrial Engineering Student's Signature .....

Field of Study : Industrial Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year : 2012

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี โดยความช่วยเหลือและเสียสละเวลาให้คำแนะนำจากรองศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดีโดยตลอด ผู้วิจัยขอถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณอาจารย์เป็นอย่างสูง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปวีณา เชาวลิตวงศ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดาริชา สุธีวงศ์และดร.นันทชัย กานตานันทะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสในการทำการทดลองต่างๆ รวมทั้งขอขอบคุณคณะทำงานที่ช่วยในการระดมสมองให้ความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณมารดา (คุณแม่จิตติมา อินทร์ติยะ) ขอกราบขอบพระคุณบิดา (คุณพ่อปณวิทย์ อินทร์ติยะ) และคุณอันนา โอวาสิทธิ์ ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มิได้กล่าวไว้ในที่นี้ด้วย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ฎ

สารบัญภาพ..... ฒ

บทที่ 1 บทนำ..... 1

1.1 ประวัติความเป็นมาและรายละเอียดของโรงงานกรณีศึกษา..... 1

1.2 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท..... 1

1.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ..... 2

1.4 กระบวนการผลิตของบริษัท..... 2

1.5 การตรวจสอบคุณภาพกระดาษ..... 3

1.6 ที่มาและความสำคัญของปัญหา..... 5

1.7 วัตถุประสงค์ของการวิจัย..... 7

1.8 ขอบเขตของการวิจัย..... 8

1.9 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย..... 8

1.10 ระยะเวลาดำเนินการ..... 9

1.11 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 9

1.12 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 9

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 10

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 10

2.1.1 ความหมายและจุดประสงค์ของการออกแบบการทดลอง..... 10

2.1.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง..... 11

2.1.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล..... 12

2.1.4 การออกแบบการทดลองโดยเทคนิคทากูชิ..... 12

หน้า

2.1.5 พื้นผิวตอบสนอง..... 13
2.1.6 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 15
2.1.6.1 การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ..... 15
2.1.6.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระ..... 16
2.1.6.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน..... 16
2.1.7 การวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบวัด..... 16
2.1.8 แผนภูมิควบคุม..... 18
2.1.9 การวัดสมรรถนะของกระบวนการ..... 20
2.1.10 การคำนวณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ..... 20
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 22
บทที่ 3 การนิยามปัญหา..... 24
3.1 กระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน..... 24
3.2 คุณภาพของวัตถุดิบเศษกระดาษพิมพ์เขียน..... 25
3.3 การวัดคุณภาพความขาวและความแข็งแรงของกระดาษ..... 26
3.3.1 การตรวจวัดความขาว..... 26
3.3.2 การตรวจวัดความแข็งแรงของกระดาษ..... 28
3.4 การวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา..... 30
บทที่ 4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 31
4.1 แนวทางในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมี..... 31
4.1.1 การคัดกรองปัจจัยในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน..... 33
4.1.2 การออกแบบการทดลองในระดับการผลิตจริง..... 35
4.1.3 การปรับปรุงคุณภาพความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน..... 35
4.1.4 รูปแบบที่ใช้ในการทดลอง..... 36
4.1.5 ขั้นตอนการทดลอง..... 38
4.1.6 ผลการทดลอง..... 40
4.1.7 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง..... 41
4.1.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 41

4.1.7.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 42
4.1.7.3 ผลของอิทธิพลหลัก..... 42
4.1.7.4 ผลของอิทธิพลร่วม..... 44
4.1.7.5 หาระดับปรับตั้งค่าที่เหมาะสมของการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลต์ 45
4.2 การหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อ 46
เศษกระดาษพิมพ์เขียน……..
4.2.1 การออกแบบการทดลองในระดับการผลิตจริง..... 47
4.2.2 รูปแบบที่ใช้ในการทดลอง…… 47
4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง…… 50
4.2.4 ผลการทดลอง..... 51
4.2.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง..... 52
4.2.5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง..... 53
4.2.5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 53
4.2.5.3 ผลของอิทธิพลหลัก..... 54
4.2.5.4 ผลของอิทธิพลร่วม..... 55
4.2.5.5 หาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ…. 56
บทที่ 5 การทดสอบยืนยันและการติดตามควบคุม…….. 54
5.1 การประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมในขั้นตอนของการบวนการเตรียมเยื่อ……. 58
5.2 การประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ…… 61
5.3 การลดต้นทุนกระดาษทำผิวกล่อง..... 66
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ…….. 68
6.1 สรุปสภาวะที่ดีที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์…… 68
6.2 สรุปสภาวะที่ดีที่สุดของสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับ 69
ปริมาณเยื่อเศษระดาษพิมพ์เขียน…….
6.3 สรุปการลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว…….. 70
6.4 สรุปการยืนยันผลการทดลองโดยทำการผลิตจริงต่อเนื่อง…… 70
6.5 ข้อเสนอแนะ..... 71
รายการอ้างอิง…… 72
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 74

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย…….……	9
4.1	สรุปสภาวะในการทำปฏิกิริยาของสารเคมีและต้นทุนในการใช้สารเคมี อ้างอิงข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษา.....	32
4.2	การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนแบบสามตัวแปร.....	36
4.3	ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง	37
4.4	การออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน เพื่อปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน	38
4.5	ผลทดลองการเพิ่มความขาวด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์.....……	40
4.6	การออกแบบส่วนประสมกลาง (CDC)…….....	48
4.7	ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง	49
4.8	..... การออกแบบส่วนประสมกลางของคุณภาพกระดาษในขั้นตอนการผลิตกระดาษ.....	50
4.9	ผลการทดลองคุณภาพกระดาษในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ.....	52
5.1	ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อ.	59
5.2	ตารางแสดงคุณภาพกระดาษ.....…...	62
6.1	สรุปการลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว……..	70
6.2	สมรรถนะกระบวนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว……..	71

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	กระดาษเกรด WK KI และ II	1
1.2	วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ.....	2
1.3	กระบวนการผลิตกระดาษ.....	2
1.4	แสดงขั้นตอนการผลิตกระดาษ.....	3
1.5	โครงสร้างกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น.....	5
1.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อชั้นบนสุด.....	6
1.7	โครงสร้างต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น.....	7
2.1	แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ.....	11
2.2	ความแตกต่างของความแม่นยำและความเที่ยงตรง.....	17
2.3	ความหมายของความผันแปรแบบรีพีททะบิลิตี้.....	17
2.4	ความหมายของความผันแปรแบบรีโปรดิวซิบิลิตี้.....	18
3.1	กระบวนการเตรียมเยื่อกระดาษพิมพ์เขียน.....	24
3.2	แสดงขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน.....	26
3.3	เศษกระดาษพิมพ์เขียน.....	26
3.4	ขั้นตอนในการวัดความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน.....	27
3.5	ขั้นตอนในการวัดความขาวของกระดาษ.....	28
3.6	ขั้นตอนในการวัดค่าแรงดันทะลุของกระดาษ.....	29
3.7	ขั้นตอนในการวัดค่ารับแรงกดแนววงแหวนของกระดาษ.....	29
4.1	สภาวะของเครื่องจักรที่สามารถใส่สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน.....	32
4.2	สรุปเลือกเครื่องจักร Hot Dispersion และสารเคมีโซเดียมไฮโรซัลไฟต์ในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน.....	33
4.3	แสดงผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆกับค่าความขาวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในระดับ Lab Scale.....	34
4.4	ตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ....	35

รูปที่		หน้า
4.5	รูปทรงเลขาคณิตของการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน…….....	37
4.6	เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ใช้ในการทดลอง……..	39
4.7	อุปกรณ์ในการทดลองสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์…….....	39
4.8	ปรับตั้ง ปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ และความเข้มข้น ที่ระบบ DCS Control……..	39
4.9	เก็บตัวอย่างเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน และตรวจวัดความขาว……..	40
4.10	การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน…….....	42
4.11	อิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน……..	43
4.12	อิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน…….....	44
4.13	รายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผล Optimization Plot……	46
4.14	ตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองในขั้นตอนการผลิตกระดาษ.....	47
4.15	รูปแบบทั่วไปของการออกแบบแบบส่วนประสม.....	48
4.16	การกำหนดการใช้เยื่อหรือเศษกระดาษแต่ละชั้นด้วยการตั้งค่าแกรมของกระดาษ...	51
4.17	การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของคุณภาพกระดาษ……..	53
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก 2 ปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ.....	54
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วมต่อคุณภาพกระดาษ……	55
4.20	รายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผล Optimization Plot คุณภาพกระดาษ…	57
5.1	การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน...	61
5.2	การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่าความขาวของกระดาษ……	63
5.3	การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่าแรงดันทะลุ (Burst)……..	64
5.4	การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT)…….	65
6.1	ลักษณะกระดาษหน้าลาย.....	69

บทที่ 1

บทนำ

1.บทนำ

1.1 ประวัติความเป็นมาและรายละเอียดของโรงงานกรณีศึกษา

บริษัท ไทยเคนเปเปอร์ จำกัด(มหาชน) ตั้งอยู่เลขที่ 70 หมู่ 4 ถ.หนองสังข์-วังตะเคียน ต.บ่อทอง อ.กบินทร์บุรี จ.ปราจีนบุรี ภายใต้พื้นที่ 600 ไร่ ประกอบธุรกิจหลักในการผลิตและจำหน่ายกระดาษคราฟท์สำหรับทำผิวกล่อง โดยมีเกรดสินค้าที่หลากหลาย เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ

โรงงานกรณีศึกษามีกำลังการผลิต 200,000 ตัน/ปี ใช้เครื่องจักรที่ทันสมัยด้วยเทคโนโลยีการผลิตกระดาษทำผิวกล่อง 4 ชั้น จากบริษัท Metso ประเทศฟินแลนด์ และระบบไฟฟ้าจาก Siemens ผู้นำด้านเทคโนโลยีระบบไฟฟ้าที่เชื่อถือได้ของโลก ซึ่งถือได้ว่าเป็นโรงงานที่มีเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยที่สุดแห่งหนึ่งในเอเชีย ด้วยเทคโนโลยีการผลิตที่ทันสมัยประกอบกับใช้ระบบคอมพิวเตอร์ควบคุมคุณภาพอัตโนมัติ Quality Control System (QCS) ทำให้ผลิตภัณฑ์ของบริษัทมีคุณภาพได้มาตรฐาน และบริษัทได้รับการรับรองคุณภาพมาตรฐาน ISO 9001 : 2000 จาก สถาบัน SGS (Thailand) และ United Registrar System ประเทศอังกฤษ

1.2 ผลิตภัณฑ์ของบริษัท

ผลิตภัณฑ์กระดาษทำผิวกล่องแบ่งออกได้เป็น 3 เกรด ตามประเภทการใช้งาน

- **เกรด WK** กระดาษคราฟท์ทำผิวกล่องสีขาว เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการงานพิมพ์ที่สวยงาม เช่น กล่องผลไม้ กล่องชาเขียว
- **เกรด KI** กระดาษคราฟท์ทำผิวกล่องสีเหลืองอ่อน เหมาะสำหรับบรรจุภัณฑ์ที่ต้องการความแข็งแรงปานกลาง เช่น กล่องบรรจุสินค้าอุปโภคบริโภค
- **เกรด II** กระดาษคราฟท์ทำผิวกล่องสีเปลือกไม้ เหมาะสำหรับทำกล่องบรรจุสินค้าทั่วไป

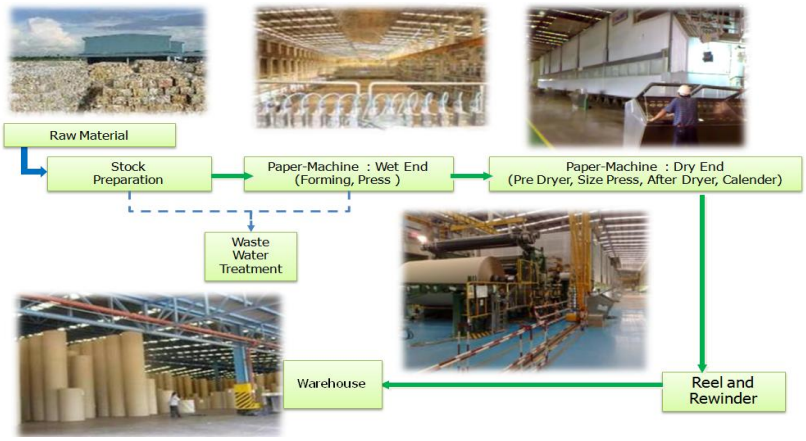
รูปที่ 1.1 กระดาษเกรด WK KI และ II

1.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกระดาษ

วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษทำผิวกล่อง ประกอบด้วย 4 ชนิด คือ กล่องกระดาษลูกฟูกเก่าที่ใช้แล้วทั้งภายในและต่างประเทศ (OCC: Old Corrugated Container) เยื่อใยสั้นและใยยาว (Virgin Fiber) ซึ่งเป็นเยื่อใหม่ที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน กระดาษพิมพ์เขียน หรือกระดาษ A4 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Deinking Pulp or Mixed Office Wasted) สารเคมีชนิดต่างๆ (Chemical Additive) ซึ่งมีหน้าที่ในการเพิ่มคุณสมบัติของกระดาษให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด รูปที่ 1.2 แสดงวัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษทำผิวกล่อง

รูปที่ 1.2 วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ

1.4 กระบวนการผลิตของบริษัท

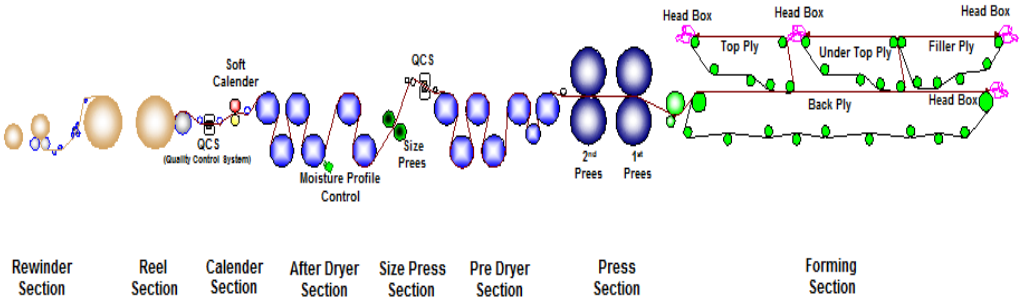


รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตกระดาษ

ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ มีขั้นตอนหลักอยู่ 2 ขั้นตอน คือ

1.1 ขั้นตอนการเตรียมเยื่อ (Stock Preparation) เป็นขั้นตอนของการนำเยื่อหรือเศษกระดาษมาผสมกับน้ำและใส่สารเคมีชนิดต่างๆตามอัตราส่วนที่กำหนดแตกต่างกันไปตามเกรดของกระดาษที่จะผลิต เพื่อที่จะนำส่งน้ำเยื่อที่ได้จากการเตรียมไปยังขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษต่อไป

1.2 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ (Paper Making) เป็นขั้นตอนของการนำน้ำเยื่อที่ผ่านการเตรียม ไปถ่ายน้ำออกบนตะแกรงลวดของกระบวนการเดินแผ่น (Wire Part) และส่งต่อไปยังชุดกด (Press Part) เพื่อรีดน้ำออก ตามด้วยชุดอบแห้ง (Pre Dryer) เพื่อระเหยน้ำออกจากกระดาษ หลังจากนั้นกระดาษจะถูกส่งไปเคลือบแป้ง (Size Press) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวหน้าของกระดาษ เมื่อผ่านกระบวนการนี้กระดาษจะกลับมาเปียกอีกครั้ง กระดาษจึงต้องผ่านการอบแห้งอีกครั้ง (After Dryer) เพื่อระเหยความชื้นออกจากกระดาษ และเข้าชุดขัดผิว (Calender) เพื่อให้ผิวกระดาษมันและเรียบ จากนั้นจึงนำกระดาษเข้าชุดม้วนเก็บ (Reel) และกรอแบ่ง (Rewinder) เป็นม้วนกระดาษให้ได้ขนาดหน้ากว้าง ความยาว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามความต้องการของลูกค้า รูปที่ 1.4 แสดงขั้นตอนการผลิตกระดาษ



รูปที่ 1.4 แสดงขั้นตอนการผลิตกระดาษ

1.5 การตรวจสอบคุณภาพกระดาษ

การตรวจสอบคุณภาพกระดาษจะทำการเก็บตัวอย่างกระดาษทุกม้วนตลอดหน้ากว้าง 4.4 เมตรของม้วนกระดาษ ที่ชุดม้วนเก็บ (Reel) หลังจากนั้นจะนำกระดาษมาทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) การทดสอบคุณภาพกระดาษสามารถจำแนกการทดสอบได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. การทดสอบด้านกายภาพ (Physical)
2. การทดสอบด้านความแข็งแรง (Strength)

3. การทดสอบด้านการมองเห็น (Optical)
4. การทดสอบความต้านการซึมน้ำของกระดาษ (Water Resistance)

1. การทดสอบด้านกายภาพ (Physical)

การทดสอบด้านกายภาพประกอบด้วยการทดสอบ 4 การทดสอบ คือ 1.การทดสอบน้ำหนักมาตรฐาน (Basis Weight) 2.การทดสอบความหนาของกระดาษ (Thickness) 3.การทดสอบความเรียบของผิวกระดาษ (Smoothness) 4.การทดสอบปริมาณความชื้นของกระดาษ (Moisture)

2. การทดสอบด้านความแข็งแรง (Strength)

การทดสอบด้านความแข็งแรงประกอบด้วยการทดสอบ 2 การทดสอบ คือ 1.การทดสอบค่าแรงดันทะลุ (Burst) 2.การทดสอบค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT)

2.1 การทดสอบค่าแรงดันทะลุ (Burst) คือ ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงดันที่กระทำบนแผ่นทดสอบด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จนทำให้แผ่นทดสอบนั้นขาด นิยมวัดค่าในหน่วย กิโลปาสคาล

2.2 การทดสอบค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT) คือ ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงที่กดในแนวระนาบเดียวกับกระดาษจนขอบกระดาษหักพับ นิยมวัดค่าในหน่วยนิวตัน

3. การทดสอบด้านการมองเห็น (Optical)

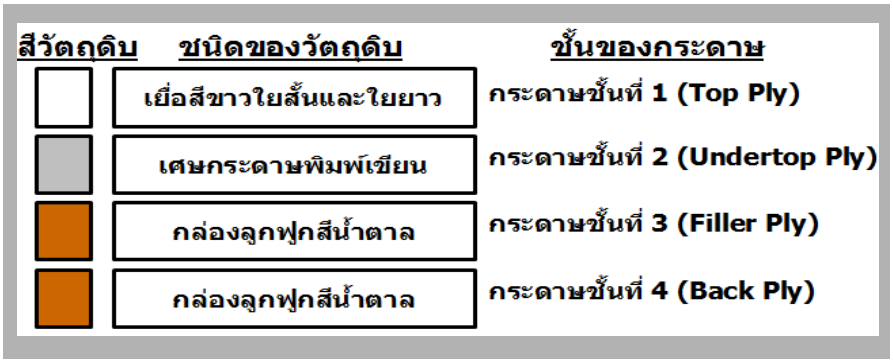
การทดสอบด้านการมองเห็น จะใช้เครื่องตรวจวัด Spectrophotometer วัดสีของกระดาษ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถอธิบายปริมาณสีที่มองเห็นเป็นตัวเลข ค่าที่วัดจากเครื่องตรวจวัด Spectrophotometer นี้จะเป็นค่าที่ไร้หน่วย (Dimensionless)

4. การทดสอบความต้านการซึมน้ำของกระดาษ (Water Resistance)

การทดสอบความต้านทานการดูดซึมน้ำของกระดาษ หมายถึง ปริมาณน้ำหนักของน้ำหน่วยเป็นกรัม ที่กระดาษดูดซึมไว้ในพื้นที่ 1 ตารางเมตร ภายในระยะเวลาที่กำหนด 2 นาที หรือ ที่นิยมเรียกว่า ค่าคอบส์ (Cobb's) นิยมวัดค่าในหน่วย กรัมต่อตารางเมตร

1.6 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

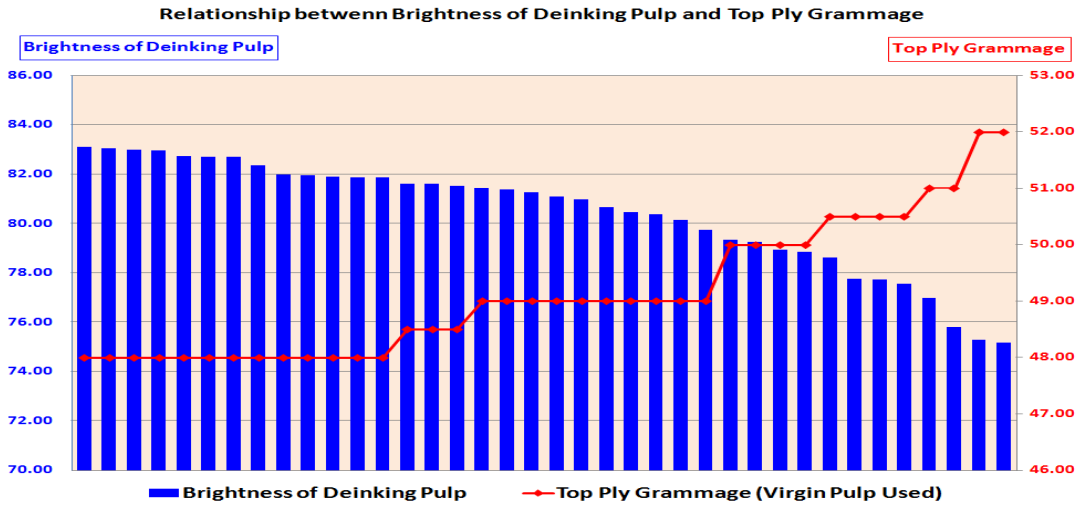
จากข้อมูลของโรงงานกรณีศึกษาพบว่า กระดาษทำผิวกล่องสีขาวมีปริมาณการผลิตและกำไรต่อตันกระดาษสูงสุด คุณสมบัติที่ต้องการของกระดาษทำผิวกล่องสีขาว ได้แก่ ความขาว (Brightness) และความแข็งแรง (Strength) ของกระดาษ การผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวใช้เทคโนโลยีผลิตกระดาษ 4 ชั้น ซึ่งวัตถุดิบของการผลิตในแต่ละชั้นจะแตกต่างกันออกไป กระดาษชั้นที่ 1 หรือชั้นบนสุดของกระดาษ (Top Ply) ใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อยาวเป็นวัตถุดิบในการผลิต กระดาษชั้นที่ 2 (Undertop Ply) ใช้เศษกระดาษพิมพ์เขียน หรือกระดาษ A4 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Deinking Pulp) เป็นวัตถุดิบ กระดาษชั้นที่ 3 และ 4 ใช้กล่องกระดาษลูกฟูกเก่าสีน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ซึ่งกระดาษ 2 ชั้นล่างสุดนี้จะถูกปูทับด้วยกระดาษชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โครงสร้างกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น แสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 โครงสร้างกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น

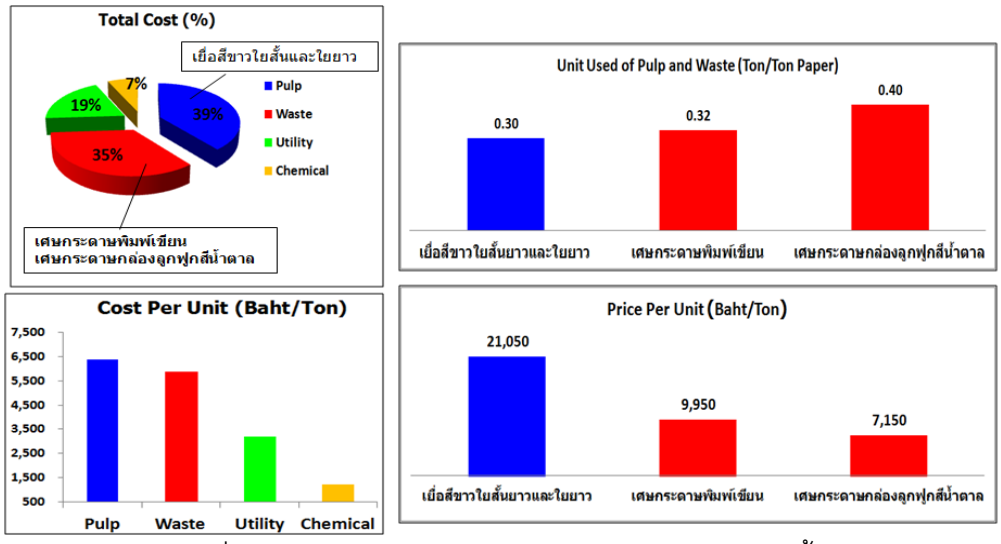
ปัจจัยหลักที่ส่งต่อผลคุณภาพด้านความแข็งแรงของกระดาษ คือ ปริมาณการใช้เยื่อในแต่ละชั้นในการผลิตกระดาษ โดยนิยมวัดค่าปริมาณการใช้เยื่อในแต่ละชั้นเป็นน้ำหนักของกระดาษชั้นนั้นๆต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร มีหน่วยวัดเป็น กรัมต่อตารางเมตร หรือที่นิยมเรียกว่า แกรมของกระดาษ ปริมาณแกรมกระดาษของกระดาษมาก หมายความว่า ปริมาณการใช้เยื่อมากตามไปด้วย และปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อคุณภาพด้านความขาวของกระดาษมาจากคุณภาพด้านความขาวของเยื่อ 2 ชั้นด้านบน (Top ply และ Undertop Ply) ชั้นบนสุดของกระดาษ (Top Ply) เป็นเยื่อใหม่สีขาวชนิดใยสั้นและเยื่อใยยาวที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีการตรวจวัดและกำหนดคุณภาพด้านความขาวและสิ่งเจือปนทุกครั้งก่อนนำไปใช้งาน คุณภาพด้านความขาวของเยื่อชั้นบนสุดจากการผลิตจริงมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 100-105 (มาตรฐานการผลิตกำหนดคุณภาพด้านความขาวต้องไม่น้อยกว่า 95 ก่อนส่งเยื่อที่ผ่านการเตรียมไปยังขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ) ส่วนชั้นที่ 2

นับจากด้านบนของกระดาษ (Undertop Ply) จะนำกระดาษ A4 หรือกระดาษพิมพ์เขียนจากสำนักงานที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต หรือที่นิยมเรียกว่า Deinking Pulp เนื่องจากวัตถุดิบเป็นกระดาษ Recycle จึงมีคุณสมบัติไม่คงที่ ควบคุมคุณภาพได้ยาก อีกทั้งในการผลิตปัจจุบันไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานของค่าความขาวของเยื่อชั้นนี้ก่อนส่งไปยังขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ จากการนำข้อมูลการผลิตจริงมาวิเคราะห์พบว่า คุณภาพด้านความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนของกระดาษชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 78-82 กรณีที่คุณภาพด้านความขาวของเยื่อชั้นที่ 2 มีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ค่าความขาวของกระดาษที่ได้จากการผลิตต่ำกว่าคุณภาพที่ควบคุมไว้ ในปัจจุบันแก้ปัญหาโดยเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวของกระดาษชั้นที่ 1 เพื่อปรับเพิ่มคุณภาพด้านความขาวให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ แสดงได้ดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อชั้นบนสุด

โครงสร้างต้นทุนของการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว ประกอบด้วย 4 ส่วน คือ ต้นทุนเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว (Pulp) ต้นทุนจากเศษกระดาษพิมพ์เขียนและเศษกระดาษกล่องกระดาษลูกฟูกเก่าที่ใช้แล้ว (Waste) ต้นทุนพลังงาน (Utility) และต้นทุนสารเคมี (Chemical) ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนต้นทุน 39% 35% 7% และ 19% ตามลำดับ รูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้างต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น



รูปที่ 1.7 โครงสร้างต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น

จะเห็นว่าต้นทุนต่อหน่วยของเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวมีราคาสูง หากต้องเพิ่มเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวในการผลิตจะทำให้ต้นทุนต่อตันกระดาษเพิ่มขึ้น ในปัจจุบันใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวเพื่อปรับเพิ่มคุณภาพด้านความขาวของกระดาษให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ โดยเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวที่ปริมาณ 1 ถึง 5 กรัมต่อตารางเมตรขึ้นกับของค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน คิดเป็นต้นทุนที่เพิ่มขึ้น 169-845 บาทต่อตันกระดาษ หรือคิดเป็นต้นทุนเยื่อที่เพิ่มขึ้น 2.64-13.21% ตามลำดับ

1.7 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ปรับปรุงคุณภาพของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อด้วยการนำสารเคมีมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเพื่อทดแทนการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ เพื่อลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว

1.8 ขอบเขตของการวิจัย

1. พิจารณาเฉพาะการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวเท่านั้น เกรด WK 170
2. พิจารณาคุณภาพของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากกระบวนการเตรียมเยื่อ โดยพิจารณาคุณสมบัติด้านความขาว (Brightness of Deinking Pulp)

3. พิจารณาคุณภาพกระดาษ ด้านความขาวของกระดาษ (Brightness of Paper) และคุณภาพด้านความแข็งแรงของกระดาษ 2 ปัจจัย คือ ค่าแรงดันทะลุ (Burst) และค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT :Ring Crush Test)
4. ไม่พิจารณากรณีที่เครื่องจักรเสีย หรือ เหตุฉุกเฉินอื่นๆ
5. ในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ การวิจัยครอบคลุมเฉพาะขั้นตอนของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่เครื่องจักร Hot Dispersion เท่านั้น
6. ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ การวิจัยครอบคลุมเฉพาะขั้นตอนการปรับเพิ่ม หรือลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน และพิจารณาคุณภาพกระดาษด้านความขาว และคุณภาพด้านความแข็งแรงของกระดาษเท่านั้น โดยไม่พิจารณาขั้นตอนอื่นๆของกระบวนการผลิต

1.9 ขั้นตอนในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิต โดยศึกษาถึงเครื่องจักร วัตถุดิบ และคุณภาพกระดาษ และโครงสร้างด้านต้นทุนการผลิต
2. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้นในการเตรียมเศษกระดาษพิมพ์เขียน ที่ส่งผลต่อการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว โดยระบุปัญหาและวัตถุประสงค์ในการดำเนินงานวิจัยให้ชัดเจน
3. ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
4. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหา
5. ออกแบบการทดลองสำหรับแก้ปัญหา
6. ดำเนินการทดลองในระดับ Lab Scale เพื่อลดค่าใช้จ่ายและข้อผิดพลาด
7. ดำเนินการทดลองในระดับการผลิตจริง
8. เปรียบเทียบผลลัพธ์ก่อนและหลังการปรับปรุง นำผลที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานจริง
9. วิเคราะห์และสรุปผลจากการวิจัย
10. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.10 ระยะเวลาดำเนินการ

กิจกรรม	2554		2555									
	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.
1. ศึกษาสภาพปัจจุบันของกระบวนการผลิต												
2. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น												
3. ศึกษาค้นค้วาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง												
4. รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัญหา												
5. ออกแบบการทดลองสำหรับแก้ปัญหา												
6. ดำเนินการทดลอง												
7. ประยุกต์ใช้ และเปรียบเทียบผลลัพธ์												
8. วิเคราะห์และสรุปผลจากการวิจัย												
9. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์												

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

1.11 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านความขาว
2. ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ ทราบปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบแต่ยังคงความขาวและความแข็งแรงของกระดาษ

1.12 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว
2. สามารถไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ หรือ การผลิตกระดาษประเภทอื่นๆ

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

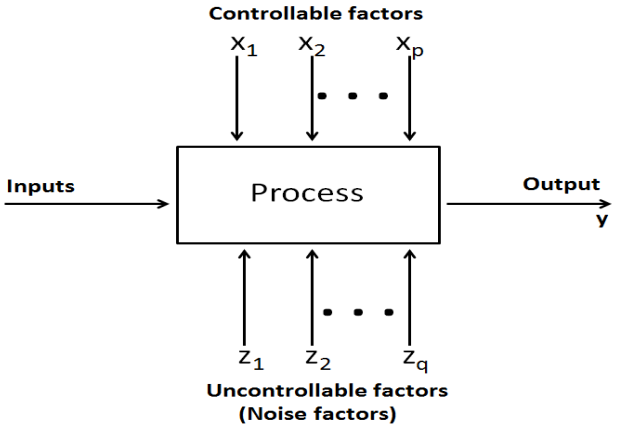
2.1.1 ความหมายและจุดประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง คือ การวางแผนการทดลองเพื่อตรวจสอบว่า ปัจจัย (Factor) ใดๆ หรือตัวแปร (Input Variable) ใดที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจสนใจ (Output Response)

ปารเมศ ชุติมา (2545) ได้นิยามการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) คือ กระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อจะได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้วิเคราะห์โดยวิธีการเชิงสถิติ ซึ่งทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

ซึ่งการออกแบบการทดลองจะเป็นการทดสอบทางสถิติเพื่อแน่ใจว่าปัจจัยนำเข้านั้นๆ ส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ และสามารถหาสภาวะที่เหมาะสมได้ นายวิชาญ (2545) ได้ให้ความหมายของปัจจัยนำเข้าไว้ดังนี้

- ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factor) คือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลองและปัจจัยสามารถกำหนดค่าได้ที่สภาวะต่างๆในการทดลอง
- ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factor) คือ ปัจจัยที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองในการทดลอง แต่ไม่สามารถกำหนดค่าได้ที่สภาวะต่างๆในการทดลอง อันเนื่องมาจากขีดความสามารถของเครื่องจักรและเครื่องมือ เช่น ตัวแปรรบกวน ในการทดลองอาจมีบางปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองแต่ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาหรือเป็นปัจจัยซ่อนเร้น หรือถูกละเลยไป เช่น Nuisance Variable สามารรถลดผลกระทบดังกล่าวลงได้ โดยทำการสุ่มลำดับในการทดลอง ตามปกติแล้วการทดลองถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการทำงานของกระบวนการและระบบ ซึ่งทั้งกระบวนการและระบบสามารถที่จะแทนด้วยแบบจำลองดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แบบจำลองทั่วไปสำหรับกระบวนการหรือระบบ (Mongomerty, 2005)

ดังนั้นสิ่งสำคัญ 2 ประการสำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับการทดลองคือ การออกแบบการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ เพราะวิธีการวิเคราะห์เชิงสถิติที่เหมาะสมนั้นจะขึ้นกับการออกแบบการทดลองที่จะนำมาใช้

จุดประสงค์ของการออกแบบการทดลองแบ่งได้เป็น

1.เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง คือการพิสูจน์ข้อเท็จจริงหรือความเชื่อจากประสบการณ์หรือทฤษฎีบางอย่างที่อธิบายเกี่ยวกับกระบวนการผลิต

2.เพื่อค้นหาข้อเท็จจริง คือ ศึกษาถึงอิทธิพลเงื่อนไขใหม่ที่มีผลต่อการทดลอง

2.1.2 หลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลอง

ปารเมศ ชุติมา (2545) ได้นิยามหลักการพื้นฐานของการออกแบบการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ประการ ดังนี้

1.เรพลิเคชั่น (Replication) หมายถึง การทดลองซ้ำ โดยมีคุณสมบัติสองประการคือ ประการแรกเรพลิเคชั่นทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ซึ่งตัวประมาณความผิดพลาดนี้กลายเป็นหน่วยของการวัดขั้นพื้นฐานสำหรับพิจารณาว่า ความแตกต่างสำหรับข้อมูลที่ได้จากการทดลองนั้นมีความแตกต่างกันในเชิงสถิติหรือไม่ ประการที่สอง ถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลอง ดังนั้นเรพลิเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

2.แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม (Random) วิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูล (หรือ

ความผิดพลาด) จะต้องเป็นแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ แรนดอมไมเซชันจะทำให้สมมุติฐานนี้เป็นจริง และทำให้สามารถลดปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้

3.บล็อกกิง (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันเดียวกันมากกว่าเซ็ตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดจากการทำบล็อกกิง

2.1.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design)

ปารเมศ ชุติมา (2545) ได้นิยามการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย a ระดับ และถ้าปัจจัย B ประกอบด้วย b ระดับ ในการทดลอง 1 เรพลิเคต (Replicate) จะประกอบการทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาขัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เราจะกล่าวว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลหลัก (Main Effect) หมายถึง ผลต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของผลตอบ (Response) ที่ระดับต่ำและระดับสูงของปัจจัยตัวหนึ่ง

การมีอันตรกิริยา (Interaction) หมายถึง ผลตอบของปัจจัยหนึ่งจะขึ้นกับปัจจัยอื่นๆ หรือระดับของปัจจัยจะทำให้ผลตอบมีความแตกต่างกัน ตามปกติแล้ว เมื่ออันตรกิริยามีค่าสูง ผลหลักจะมีค่าน้อยมากในทางปฏิบัติ

สรุปก็คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชนหลายประการ และเป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบทีละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็นสิ่งจำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่ผิดพลาดได้ นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้สามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่างๆของปัจจัยอื่นๆได้ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) คลอดเงื่อนไขการทดลองได้

2.1.4 การออกแบบการทดลองโดยเทคนิคทากุชิ (Taguchi Method)

Ross Phillip (1998) ได้กล่าวว่า วิศวกรชาวญี่ปุ่นที่ชื่อว่า Dr.Genichi Taguchi มีแนวคิดแบบใหม่ในการปรับปรุงคุณภาพ และได้กำหนดความหมายของคุณภาพผลิตภัณฑ์ คือ ความ

สูญเสียทั้งหมดที่เกิดแก่สังคมขึ้นนับจากเวลาที่ผลิตภัณฑ์นั้นถูกส่งออกสู่ท้องตลาด ดังนั้นทากูชิจึงได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อลดความผันแปรที่เกิดขึ้น และให้ค่าเป็นไปตามเป้าหมายที่กำหนดเพื่อให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจ ขณะเดียวกันการออกแบบกระบวนการผลิตก็เพื่อให้คุณลักษณพมีความไวกับปัจจัยรบกวนน้อยที่สุด หรือที่เรียกว่า การออกแบบอย่างแข็งแรง (Robust Design) การออกแบบการทดลองของทากุชิจะอาศัยเทคนิคที่ประกอบด้วย Orthogonal Array และ Linear Graph การปรับปรุงคุณภาพของหลักการทากุชิ คือ

1. กระบวนการผลิต ชิ้นงานถูกออกแบบไม่ให้อ่อนไหวต่อความผันแปรสิ่งรบกวนภายนอก
2. วิธีการออกแบบการทดลองเป็นเครื่องมือทางวิศวกรรมที่ช่วยให้ได้ตามวัตถุประสงค์
3. ชิ้นงานได้ค่าตามเป้าหมายเป็นสิ่งสำคัญ

2.1.5 **พื้นผิวตอบสนอง** (Response surface Methodology, RSM)

ปารเมศ ชุติมา (2545) ได้กล่าวว่า "วิธีการพื้นผิวผลตอบ เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหาโดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้" ตัวอย่างเช่น สมมติว่าวิศวกรเคมีคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (X_1) และความดัน (X_2) ที่จะทำให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน กล่าวคือ

$$y = f(X_1, X_2) + \varepsilon$$

โดยที่ ε คือค่าความผิดพลาดของผลตอบ y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง
ถ้าเรากำหนดว่า $E(y) = f(X_1, X_2) = \eta$ ดังนั้น เราสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้คือ

$$\eta = f(X_1, X_2)$$

ซึ่งเราจะเรียกว่า "พื้นผิวผลตอบ (Response Surface)"

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมาก เราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกก็คือ เราจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซ็ตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วเราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของ

ผลตอบมีความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่ใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \varepsilon$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมานี้ แน่นอนว่าแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ทว่าถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่นั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กแล้ว แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดีพอสมควร

วิธีการกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ดังนั้นการวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้จะสามารถประมาณได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง พารามิเตอร์ต่างๆของแบบจำลองสามารถที่จะถูกประมาณได้เป็นอย่างดี ถ้าเราทำการออกแบบการทดลองเพื่อที่จะเก็บค่าได้อย่างเหมาะสม การออกแบบสำหรับการสร้างพื้นผิวผลตอบเรียกว่าการออกแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

การปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด

บ่อยครั้งที่การประมาณค่าเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดเบื้องต้นสำหรับระบบที่กำลังศึกษานั้นจะอยู่ห่างไกลจากจุดที่ดีที่สุดตัวจริง ในกรณีเช่นนั้นวัตถุประสงค์ของผู้ทำการทดลองก็คือ การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากจุดตั้งต้นไปสู่บริเวณใกล้กับจุดที่ดีที่สุด วิธีการที่จะใช้ควรจะเป็นวิธีการที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ เมื่อเราอยู่ห่างไกลจากจุดที่ดีที่สุดนั้น โดยมากแล้วเราจะสมมติว่าแบบจำลองกำลังหนึ่งนั้นเป็นแบบจำลองที่สามารถประมาณพื้นผิวที่แท้จริงสำหรับบริเวณเล็กๆ ของตัวแปร X

วิธีการปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) เป็นวิธีการที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด กล่าวคือ ในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นของผลตอบสูง

ที่สุด แน่นอนว่าถ้าเราต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุดแทน เราจะเรียกวิธีการดังกล่าวว่า วิธีการปีนลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Descent) แบบจำลองกำลังหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาก็คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{i=1}^{k} \hat{\beta}_i x_i$$

และพื้นผิวผลตอบกำลังหนึ่ง (First-Order Response Surface) จะเป็นเส้นโครงร่างของ $\hat{y}$ ซึ่งจะเป็นอันดับของเส้นขนาน ทิศทางการปีนขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดคือทิศทางที่ค่า $\hat{y}$ มีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วที่สุด ทิศทางนี้คือเส้นที่ขนานกับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมา เราจะใช้เส้นทางเส้นที่ผ่านจุดศูนย์กลางของอาณาเขตที่กำลังสนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้เป็นเส้นทางในการปีนขึ้นที่มีความชันสูงสุด ดังนั้นการก้าวย่าง (Step) บนเส้นทางเดินนี้จะเป็นสัดส่วนกับสัมประสิทธิ์การถดถอย { $\hat{\beta}_i$ }ขนาดที่แท้จริงของก้าวย่างจะหาได้จากประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการของผู้ทำการทดลองหรือข้อพิจารณาทางปฏิบัติอื่นๆ

การทดลองจะมีการทำขึ้นบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุดจนกระทั่งค่าของผลตอบไม่สามารถที่จะเพิ่มขึ้นอีกต่อไปได้ หลังจากนั้นแบบจำลองกำลังหนึ่งตัวใหม่อาจจะถูกสร้างขึ้นมาจะต้องมีการหาเส้นทางที่มีความชันสูงสุดขึ้นมาใหม่ และกระบวนการดังที่กล่าวมาข้างต้นนี้ก็จะเกิดขึ้นอีกครั้ง ในที่สุดผู้ทำการทดลองก็จะมาสู่จุดที่อยู่ใกล้กับจุดที่มีค่าที่มีค่าที่ดีที่สุด ซึ่งจะถูกบ่งชี้โดยดูจาก Lack of Fit ของแบบจำลองกำลังหนึ่ง เมื่อถึงตอนนั้นการทดลองเพิ่มเติมจะถูกดำเนินการขึ้นเพื่อหาตัวประมาณของค่าที่ดีที่สุดที่เหมาะสม

2.1.6 **การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง** (Model Adequacy Checking)

Montgomery (2005) กล่าวว่า ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอของการทดลองที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability)

2.1.6.1 **การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ** (Normal Distribution)

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ให้ตัวแปรตอบสนองมีการกระจายแบบปกติ (Normal distribution) ใช้การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง

(Residual Analysis) เพื่อวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อน (ε) มีการกระจายตัวแบบปกติหรือไม่ คือ มีการแจกแจงแบบ $\varepsilon_{ij} \sim N(o,\sigma^2)$ และการสร้าง Noramal Probability Plot ของส่วนตกค้าง หากการแจกแจงของความผิดพลาดนั้นเป็นแบบปกติลักษณะจะเป็นกราฟเส้นตรง

2.1.6.2 **การทดสอบความเป็นอิสระ** (Independent)

ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูลทำได้โดยการพล็อตส่วนตกค้างกับลำดับเวลาในการทดลอง โดยใช้แผนภูมิกระจาย (Scatter Plot) ของค่าความคลาดเคลื่อน โดยพล็อตจุดของค่าความคลาดเคลื่อนเรียงตามลำดับของการเก็บข้อมูล การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) ข้อมูลจะมีลักษณะการกระจายเป็นอิสระ แล้วพิจารณาลักษณะการกระจายของจุดบนแผนภูมิว่าเป็นรูปแบบอิสระรอบๆค่าศูนย์หรือไม่

2.1.6.3 **การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน** (Variance Stability)

ใช้แผนภูมิการกระจายของค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) กับค่าฟิต (Fit) หรือค่าเฉลี่ยในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างของการกระจายของข้อมูลที่ออกมาไม่เป็นรูปแบบเฉพาะ (Pattern) ไม่มีลักษณะการเพิ่มขึ้นหรือลดลงแบบเป็นแนวโน้มของความแปรปรวน แสงดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

2.1.7 **การวิเคราะห์ความถูกต้องและแม่นยำของระบบวัด**

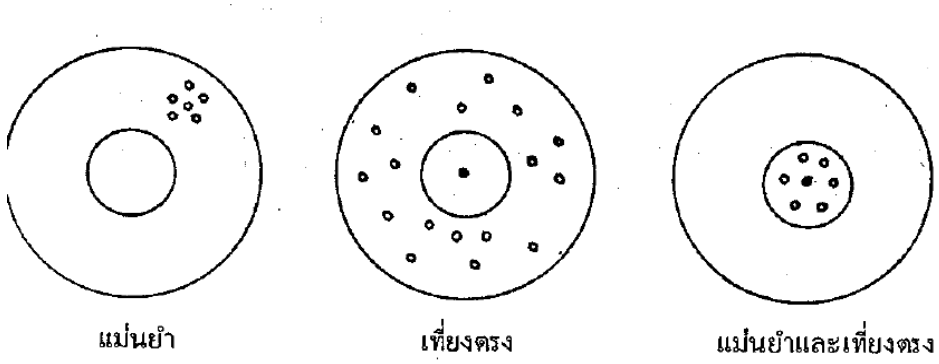
การวิเคราะห์ความผิดพลาดของระบบการวัดที่เป็นแหล่งที่มาของความผันแปรที่ส่งผลกับผลิตภัณฑ์ที่ทำการวิเคราะห์มี 2 ด้านคือความแม่นยำ (Precision) และความเที่ยงตรง (Accuracy) โดยเทียบกับพิกัดความเผื่อของชิ้นงานหรือความผันแปรของกระบวนการ

ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย (2553) ได้นิยามศัพท์คำว่า ความแม่นยำ (Precision) และความเที่ยงตรง (Accuracy) ของเครื่องมือวัดดังนี้

ความแม่นยำ (Precision) คือ “ความสามารถในการวัดที่ให้ผล ค่าที่ใกล้เคียงกันมาก ค่าไม่กระจัดกระจาย และจะให้ความแม่นยำไม่เปลี่ยนค่ามาก ไม่มีการปรับวิธีการหรือปรับเครื่องมือการวัด”

ความเที่ยงตรง (Accuracy) คือ “ความสามารถในการวัดที่ให้ค่าใกล้เคียงความจริงมาก ผลต่างของค่าจริงและค่าวัด โดยเฉลี่ยน้อยมาก”

ซึ่งการวัดหรือเครื่องมือที่ดีจะต้องให้ผลค่าความแม่นยำและความเที่ยงตรงดังรูปที่ 2.2

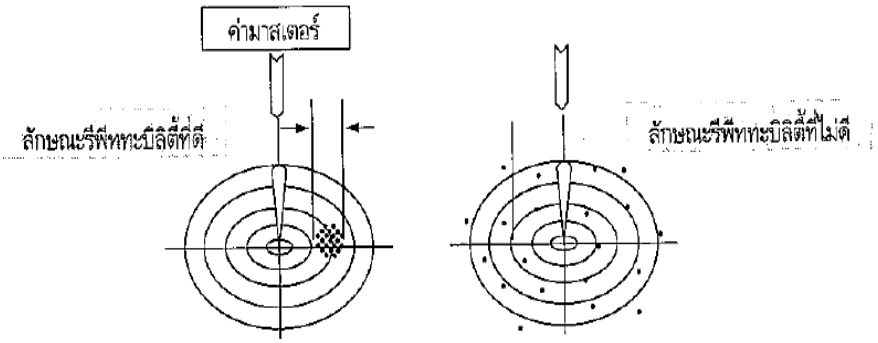


รูปที่ 2.2 ความแตกต่างของความแม่นยำและความเที่ยงตรง (ดำรงค์, 2553)

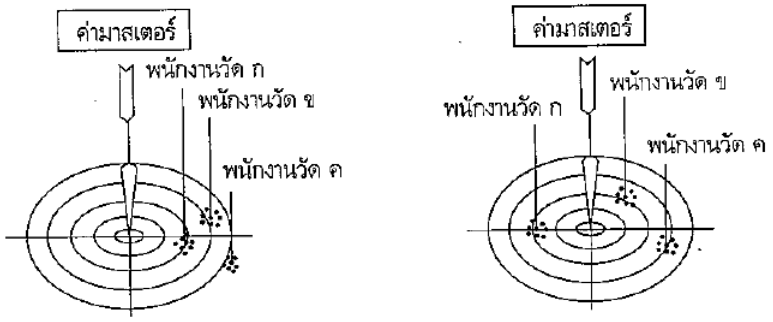
กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2553) ได้กล่าวถึงความผันแปรของความกว้างของระบบการวัดที่ประกอบด้วยคุณสมบัติ 2 ประการคือรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ซึ่งเป็นพื้นฐานของความสามารถของระบบการวัดความแม่นยำ โดยให้นิยามของรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ดังนี้

รีพีททะบิลิตี้ หมายถึง ความผันแปรภายใต้เงื่อนไขเดียวกันของระบบวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.3

รีโปรดิวซิบิลิตี้ หมายถึง ความผันแปรระหว่างเงื่อนไขของระบบการวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ความหมายของความผันแปรแบบรีพีททะบิลิตี้ (กิติศักดิ์, 2553)



รูปที่ 2.4 ความหมายของความผันแปรแบบรีโปรดิวซิบิลิตี้ (กิติศักดิ์, 2553)

ในการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดสามารถประเมินผลรีพีททะบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ ได้ 3 วิธีคือ

1.วิธีพิสัยเฉลี่ย (Range Method) เหมาะสมกับกรณีการทดลองในช่วงสั้นๆ และไม่มีการวัดซ้ำ แต่มีข้อเสียคือจะไม่สามารถแยกความแปรผันของรีพีททะบิลิตี้ออกจากรีโปรดิวซิบิลิตี้ได้

2.วิธีค่าเฉลี่ยและพิสัย (Average and Range Method) เหมาะกับการทดลองซ้ำของพนักงานแต่ละคน โดยมีข้อดีคือสามารถแยกความแปรผันของรีพีททะบิลิตี้ออกจากรีโปรดิวซิบิลิตี้ แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถวิเคราะห์ความผันแปรจากอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างชิ้นงานกับพนักงานได้

3.วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA Method) มีความเหมาะสมมากที่สุดกับการวิเคราะห์ระบบการวัด เพราะว่าสามารถแยกความผันแปรจากสาเหตุของอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วมระหว่าชิ้นงานและพนักงานออกจากค่ารีพีททะบิลิตี้ได้

2.1.8 แผนภูมิควบคุม

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ (2553) ได้นิยามแผนภูมิควบคุมคือ “เครื่องมือทางสถิติที่แยกความผันแปรจากสาเหตุที่ผิดธรรมชาติของข้อมูลออกจากความผันแปรจากสาเหตุโดนธรรมชาติของข้อมูล โดยผ่านกลไกที่สำคัญ คือ พิกัดควบคุม (Control Limit) ของแผนภูมิ“

ประเภทของแผนภูมิควบคุมได้รับการจำแนกแผนภูมิควบคุมแบ่งเป็น 2 ประเภท โดยจำแนกตามลักษณะการวัดคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ดังนี้

1.) แผนภูมิควบคุมประเภทตัวแปร (Control Chart for Variable) เป็นแผนควบคุมที่ใช้สำหรับการวัดคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยการชั่ง ตวง วัด เป็นค่าที่ต่อเนื่อง เช่น น้ำหนัก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง อายุการใช้งาน เป็นต้น แผนภูมิประเภทนี้ที่นิยมกันมากที่สุดมี 2 ชนิด คือ แผนภูมิควบคุมค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$ -Chart) และแผนควบคุมค่าพิสัย (R - Chart) ซึ่งแผนภูมิทั้ง 2 มักใช้ร่วมกัน ทั้งนี้ เนื่องจากเพื่อควบคุมการกระจายการผลิตและควบคุมค่าเฉลี่ย ถ้าเราพิจารณาแผนภูมิจะทราบว่า ค่าการกระจายของกระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุม ก็ต่อเมื่อไม่มีจุดใดของค่าเฉลี่ยและค่าพิสัยตกอยู่นอกการควบคุม ซึ่งถ้ากราฟที่ได้อยู่นอกเหนือการควบคุม จะต้องดำเนินการตรวจสอบถึงสาเหตุของกระบวนการต่อไปเพื่อดำเนินการแก้ไข

2.) แผนภูมิควบคุมประเภทเชิงลักษณะ (Control Chart for Attribute) เป็นแผนภูมิที่ใช้สำหรับควบคุมกระบวนการผลิตที่มีการตรวจวัดคุณภาพผลิตภัณฑ์โดยการนับ เช่น จำนวนของเสียหรือชำรุด จำนวนรอยตำหนิ แผนภูมิประเภทนี้ มี 2 ชนิด คือ 1.แผนภูมิควบคุมสัดส่วนของเสีย

(Proportion Defective Control Chart: P-Chart) เป็นแผนภูมิควบคุมสำหรับการวัดคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยวิธีนับจำนวนของเสีย หรือชิ้นงานชำรุดจากสายงานผลิต 2.แผนภูมิควบคุมรอยตำหนิ (Control Chart for the Number of Defective: C-Chart) เป็นแผนภูมิควบคุมสำหรับการวัดคุณภาพผลิตภัณฑ์ โดยใช้ในกรณีที่ควบคุมคุณภาพทำโดยการนับจำนวนรอยตำหนิของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นแต่ละกลุ่ม

วิธีการสร้างแผนภูมิควบคุม โดยทั่วไปมีหลักการสร้าง ดังนี้

1.กำหนดคุณสมบัติที่ต้องการควบคุม ซึ่งโดยทั่วไปผลิตภัณฑ์บางชนิดอาจจะไม่ต้องควบคุมทุกคุณสมบัติของ ผลิตภัณฑ์ควรเลือกเฉพาะคุณสมบัติที่สำคัญ โดยแผนภูมิหนึ่งแผนภูมิจะใช้ควบคุมคุณสมบัติเพียงหนึ่งคุณสมบัติเท่านั้น

2.เลือกชนิดของแผนภูมิควบคุม ว่าเป็นแผนภูมิควบคุมแบบใดระหว่างแผนภูมิควบคุมชนิดแปรผัน (Variable Control Chart) แผนภูมิควบคุมเชิงลักษณะ (Attribute Control Chart)

3.เก็บข้อมูลจากกระบวนการผลิต กำหนดจำนวนตัวอย่าง และกำหนดความถี่ในการเก็บข้อมูลระยะเวลา ในการเก็บข้อมูล ต้องคำนึงถึงต้นทุนในการเก็บข้อมูลและตรวจสอบ อัตราการผลิต ปริมาณการผลิต

4.บันทึกและเก็บรวบรวมข้อมูลในใบตรวจสอบหรือ Check lists ตามแบบฟอร์มที่ได้ออกแบบไว้

5.คำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิ ได้แก่ ขีดจำกัดควบคุมบน (Upper Control Limit: UCL) ขีดจำกัดควบคุมล่าง (Lower Control Limit: LCL) เส้นกลาง (Center line: CL)

6.วิเคราะห์ผลจากลักษณะของจุดที่ปรากฏบนแผนภูมิ ถ้ามีลักษณะจุดที่ปรากฏความผิดปกติเกิดขึ้น ในแผนภูมิที่ บ่งชี้ว่าเกิดความแปรผันที่มีสาเหตุระบุได้เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต เช่น มีจุดตกอยู่ภายนอกขีดจำกัดควบคุมบน หรือล่าง แสดงว่ากระบวนการผลิต ไม่อยู่ภายใต้การควบคุม ต้องค้นหาสาเหตุและปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยการกำจัดสาเหตุแห่งความแปรผันนี้ที่ระบุสาเหตุได้ออกไป แล้วทำการคำนวณขีดจำกัดควบคุมของแผนภูมิใหม่ จากข้อมูลที่เหลืออยู่ทำซ้ำ ๆ จนไม่เกิดจุดผิดปกติในแผนภูมิ

7.เมื่อกระบวนการผลิตอยู่ภายใต้การควบคุมแล้ว แสดงว่าสามารถควบคุมความผันแปรของการผลิตให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมตามค่าในเส้นกลางของแผนภูมิควบคุม ซึ่งถือว่าค่าที่เส้นกลางของแผนภูมิควบคุมคือค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่กระบวนการผลิตนี้ทำได้ ส่วนการประมาณค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่กระบวนการผลิตสามารถ

คำนวณได้จากแผนภูมิควบคุมนี้เช่นกัน และสามารถนำเอาแผนภูมิควบคุมที่ได้ไปใช้ในการควบคุมการผลิตในอนาคต

2.1.9 การวัดสมรรถนะของกระบวนการ

ลำปาง (2549) ได้ให้ความหมายและขอบเขตความสามารถของกระบวนการเชิงสถิติไว้ว่า ในการควบคุมคุณภาพของผลิตภัณฑ์ต้องมีตัวแปรที่เป็นตัวแทนสำหรับวัดค่า ซึ่งตัวแปรดังกล่าวต้องถูกควบคุมโดยผ่านขั้นตอนการออกแบบการทดลอง เพื่อนำมาทดสอบทางสถิติให้ค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงมาตรฐานเพื่อแน่ใจว่าผลิตภัณฑ์มีคุณภาพมากพอและกำหนดค่าที่ควบคุมให้อยู่ในช่วงระหว่างขอบเขตข้อกำหนดบน (Upper Specification Limited: USL) และขอบเขตข้อกำหนดล่าง (Lower Specification Limited: LSL) หากค่าที่ควบคุมของผลิตภัณฑ์อยู่นอกขอบเขตดังกล่าวถือว่าไม่มีคุณภาพ

การศึกษาความสามารถของกระบวนการ คือ การศึกษาความผันแปรที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ ซึ่งดัชนีความสามารถกระบวนการ (Process Capability Index: C_p) ได้จากการเปรียบเทียบสัดส่วนของความกว้างของขอบเขตข้อกำหนดบนและล่าง กับ 6 เท่าของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของกระบวนการ ซึ่งข้อมูลที่วิเคราะห์มีการแจกแจงแบบปกติ

การศึกษาว่า กระบวนการมีความสามารถตามขอบเขตของข้อกำหนด โดยให้ค่าเฉลี่ยของกระบวนการนั้นทำได้จริงและตรงกับค่าเป้าหมายของข้อกำหนดเฉพาะมากน้อยอย่างไร จะใช้ตัวชี้วัดคือ ดัชนีความสามารถของกระบวนการด้านสมรรถนะที่กระบวนการเบี่ยงเบนไป (Performance Capability) แบ่งออกได้ดังนี้

- ดัชนี้ C_{PK} = ดัชนีความสารถของกระบวนการด้านสมรรถนะที่กระบวนการเบี่ยงเบนระยะสั้น
- ดัชนี้ P_{PK} = ดัชนีความสารถของกระบวนการด้านสมรรถนะที่กระบวนการเบี่ยงเบนระยะยาว

2.1.10 การคำนวณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ

ลำปาง (2549) กล่าวว่า ค่าที่บอกถึงสมรรถภาพในการทำงานของกระบวนการว่าสามารถทำผลงานที่มีคุณภาพตามที่ลูกค้าต้องการได้ดีเพียงใด โดยทั่วไปจะรายงานของค่า 2 ค่า คือ C_p และ C_{PK}

C_p พิจารณาถึงการกระจายตัวโดยรวมของกระบวนการเมื่อเทียบกับความกว้างของสเปคเท่านั้น โดยไม่พิจารณาว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการจะอยู่ ณ ตำแหน่งใด ใกล้เคียงกับค่าเป้าหมายหรือไม่ ซึ่งโดยปกติแล้วค่าเป้าหมาย คือ ค่ากลางของสเปค หรือคุณภาพของสินค้าที่ต้องการ

C_{PK} เป็นอัตราส่วนสมรรถภาพกระบวนการที่สามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากลางจากเป้าหมาย โดย C_{PK} คือ ค่าอัตราส่วนสมรรถภาพกระบวนการด้านที่ใกล้กับข้อกำหนดมากที่สุด หรืออาจสรุปเพื่อให้เข้าใจง่ายได้ว่า $C_{PK} = \min (C_{PU}, C_{PL})$

การคำนวณค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการด้านศักยภาพระยะสั้นแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. ข้อกำหนด 2 ด้าน มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$C_P = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{within}}$$

เมื่อ USL (Upper Specification Limit) คือ ค่าสเปคด้านสูง
LSL (Lower Specification Limit) คือ ค่าสเปคด้านต่ำ
σ คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูล

2. ข้อกำหนดด้านเดียว มีสูตรการคำนวณดังนี้

$$C_{PU} = \frac{USL - \mu}{3\sigma} \qquad C_{PL} = \frac{\mu - LSL}{3\sigma}$$

เมื่อ C_{PU} คือ ค่าดัชนีวัดค่าด้านบน
C_{PL} คือ ค่าดัชนีวัดค่าด้านล่าง
μ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูล

ถ้า $C_P = C_{PK}$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการอยู่ตรงกับค่าเป้าหมาย
ถ้า $C_P < C_{PK}$ แสดงว่าค่าเฉลี่ยของกระบวนการไม่ได้อยู่ตรงกับค่าเป้าหมาย

เกณฑ์ทั่วไปสำหรับกระบวนการควรมีค่า C_p และ C_{PK}>1.33 แสดงว่ากระบวนการมีความสามารถสูง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการมีคุณภาพตามที่กำหนด

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ทำการศึกษามีอยู่ 2 ส่วน คือ เทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพกระดาษ จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน (Deinking Pulp) ซึ่ง Pivi M. Forsberg และคณะ (2004) ได้ทำศึกษาการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในระดับ lab Scale โดยนำเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ไปผ่านการกระบวนการกรอง (Screen) และกระบวนการแยกหมึกออก (Flotation) หลังจากนั้นจะใช้สารเคมีสำหรับฟอกเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการใช้สารเคมีออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ขั้นตอนที่ 2 ใช้โอโซน และขั้นตอนสุดท้ายใช้เคมี 3 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ ออกซิเจนกับไฮโดรเจเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ และฟอร์มามีไดน์ซัลฟินิคเอซิด (FAS) ซึ่งจากผลการทดลอง การใช้สารเคมีฟอกเยื่อทั้ง 3 ชนิดที่แตกต่างกัน สามารถให้ค่า Brightness ของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เพิ่มขึ้นจาก 70 เป็น 85 ได้ตามวัตถุประสงค์ของการทดลองทั้งหมด ซึ่งการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มีต้นทุนในการฟอกเยื่อที่ต่ำที่สุด ส่วนงานวิจัยของ J. Wasshausen (2006) เป็นกรณีศึกษาของโรงงานเยื่อ ซึ่งพบว่าการเตรียมเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ จากการนำเคมีโซเดียมไบซัลไฟต์และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ มาผสมกันมีต้นทุนถูกกว่าการซื้อสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มาใช้งานโดยตรง

ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง เพื่อพัฒนาและปรับปรุงกระบวนการผลิตในระดับโรงงาน ในระดับ Lab Scale หรือลักษณะอื่นที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ทำการศึกษา แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การออกแบบการทดลองโดยวิธีของทากูชิ (Taguchi Method) และการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) (ประไพศรี, 2551) การออกแบบการทดลองโดยวิธีของทากูชิสามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบกระบวนการผลิตให้มีความไวกับปัจจัยรบกวนน้อยที่สุด หรือที่เรียกว่า การออกแบบอย่างแข็งแรง (Robust Design) การออกแบบการทดลองของทากูชิจะอาศัยเทคนิค Orthogonal array และ Linear Graph ข้อดีของวิธีนี้ คือ ลดจำนวนครั้งและเวลาของการทดลอง เหมาะกับงานวิจัยที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและต้นทุน โดย Ross Phillip (1998) ได้เสนอให้ใช้ค่า S/N Ratio (signal to noise ratio) ในการวิเคราะห์ผลการทดลองว่าปัจจัยใดมีผลต่อค่าตอบสนองและความผันแปรต่อกระบวนการผลิต ค่า S/N มีค่ามากแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองและความผันแปรต่อกระบวนการผลิตมาก และในทางกลับกันค่า S/N มีค่าน้อยแสดงว่าปัจจัยตัวนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองและความผันแปรต่อกระบวนการผลิตน้อย ในอดีตที่ผ่านมา มีผู้ที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองโดย

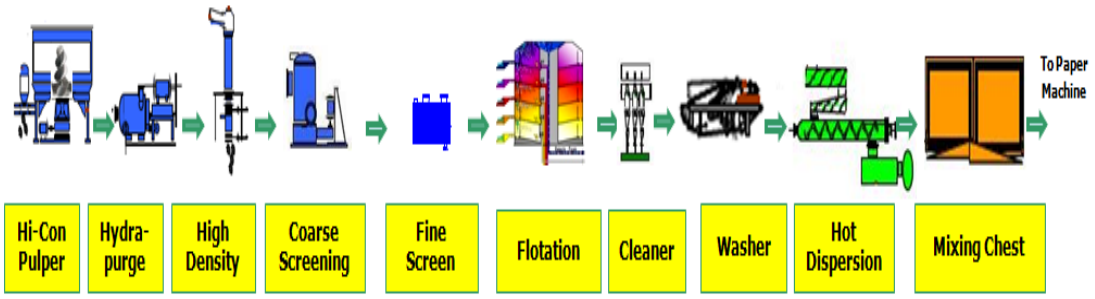
วิธีของทากูชิเช่น Toraj Mohammad และคณะ (2009) ได้ออกแบบการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดของเครื่อง Electro dialysis ในระดับ Lab Scale โดยมีวัตถุประสงค์ที่จะต้องการแยกประจุของคอปเปอร์ไอออนออกจากสาระลาย ซึ่งออกแบบการทดลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้งหมด 4 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของสารละลาย อุณหภูมิ อัตราการไหล และปริมาณกระแสไฟฟ้า ซึ่งในแต่ละตัวแปรจะเปลี่ยนแปลงสภาวะ 3 ระดับ จากการทดลองทำให้สามารถสรุปเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุดให้กับเครื่อง Electro dialysis เพื่อใช้ในการแยกประจุของคอปเปอร์ไอออนออกจากสารละลายได้ แต่ในการทดลองนี้ไม่ได้ระบุถึงต้นทุนและค่าใช้จ่ายในการทดลอง Jian-Ping Wang และคณะ (2011) ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของน้ำในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษในประเทศจีน โดยได้ออกแบบการทดลองเปลี่ยนแปลงปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียทั้งสองชนิดและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในกระบวนการ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัดที่สุด ซึ่งวัดผลจากประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินและค่าความขุ่นของน้ำหลังจากการบำบัด โดยวิเคราะห์ผลด้วยวิธีของ Uniform และ Surface Method ส่วน Nirdosha และคณะ (2006) นำหลักของการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในระดับ Lab Scale เพื่อหาอัตราส่วนผสมของเศษขี้เลื่อยที่นำไปใช้ในการผลิต Particle board โดยได้ทำการทดลองเปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้งหมด 7 ตัวแปร ซึ่งผลลัพธ์จากการนำวิธีออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ทำให้สามารถลดจำนวนการทดลอง เวลา และคน อีกทั้งยังสามารถวิเคราะห์ผลทางสถิติได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยพิจารณาจากค่า MOE (Modulus of Elasticity) และ MOR (Modulus of Rupture) ส่วนการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลสามารถวิเคราะห์การทดลองที่มีหลายปัจจัย โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) รูปแบบทั่วไปของการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ การออกแบบการทดลองแบบ 2^kและการออกแบบการทดลองแบบ 3^k เช่น งานวิจัยของ Mevra Yalvac Can และคณะ (2006) ได้ออกแบบการ ทดลองแบบ 2^3 เพื่อใช้ในการแยกปริมาณฟอสเฟตในน้ำโดยใช้ Fly Ash ซึ่งในการทดลองมีตัวแปรที่ใช้ศึกษาทั้งหมด 3 ตัวแปร คือ ความเข้มข้นของปริมาณฟอสเฟต, pH และ ปริมาณ Fly Ash ตัวแปรที่ใช้ในการศึกษามีการเปลี่ยนแปลง 2 ระดับ ในงานวิจัยของ Margarita Enid R. Carmona และคณะ (2005) ได้ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยนำมาใช้ในการสกัดโลหะโครเมียม 3+ และโครเมียม 6+ ซึ่งได้มีการนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ทางสถิติ T-Test F-Test ร่วมด้วย ผลจากการนำการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบ 2^3มาใช้ทำให้สามารถสรุปผลและความสัมพันธ์ของตัวแปรที่จะส่งผลกระทบหลักต่อกระบวนการ อีกทั้งยังสามารถลดจำนวนของการทดลองและประหยัดต้นทุนในการทดลอง

บทที่ 3

การนิยามปัญหา

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ขยายความเกี่ยวกับคุณภาพของวัตถุดิบเศษกระดาษพิมพ์เขียน การวัดคุณภาพกระดาษด้านความขาวและความแข็งแรง วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาปัจจุบันและการแก้ปัญหาในปัจจุบัน

3.1 กระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน



รูปที่ 3.1 กระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

จากรูปที่ 3.1 แสดงขั้นตอนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์ ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งหมด 10 ขั้นตอน ดังนี้

1. Hi-Con Pulper : เป็นขั้นตอนของการนำเศษกระดาษพิมพ์เขียนน้ำหนัก 6-8 ตันผสมกับน้ำ ใช้เวลาตีเยื่อประมาณ 30 นาที หลังจากสิ้นสุดขั้นตอนนี้จะได้ลักษณะเป็นน้ำเยื่อที่มีความเข้มข้นประมาณ 20-30%
2. Hydra-Purge : อาศัยแรงเหวี่ยงในแนวนอน เพื่อแยกสิ่งเจือปนในเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนออก เช่น คลิป เชือก พลาสติก เป็นต้น
3. High Density : ใช้แรงเหวี่ยงในแนวตั้งเพื่อแยกของที่มีน้ำหนักเบาและหนักออกจากกัน
4. Coarse Screen : เครื่องกรองหยาบ ใช้แยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดใหญ่ออกจากเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน
5. Fine Screen : เครื่องกรองละเอียด ใช้แยกสิ่งเจือปนที่มีขนาดเล็กออกจากเยื่อกระดาษพิมพ์เขียน

6. Flotation Cell : ใช้แยกหมึกที่ปนมากับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนออก โดยจะมีการอัดอากาศจากด้านล่างของถัง หมึกและฟองจะถูกแยกออกมาอยู่ที่ด้านบนของ Floatation Cell ส่วนน้ำเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ผ่านการแยกหมึกแล้วจะผ่านไปด้านล่างของ Floatation Cell
7. Cleaner : เป็นเครื่องจักรสำหรับล้างน้ำหมึกที่ติดมากับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน
8. Washer : นำเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ผ่านการล้างจากเครื่องจักร Cleaner มาเดินบนลวดเดินแผ่น เพื่อถ่ายน้ำออกให้เยื่อแห้งขึ้น หลังจากนั้นจะทำการล้างน้ำหมึกออกจากเยื่ออีกครั้ง
9. Hot Dispersion : ทางเข้าของเครื่องจักร Hot Dispersion จะมี Screw Dewatering สำหรับรีดน้ำออก เพื่อทำให้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนความเข้มข้นที่ 20-30% หลังจากนั้นจะมีการจ่าย Steam ที่อุณหภูมิ 105-115 ^{0}C เพื่อลดปริมาณจุดหมึกที่ยังสะสมอยู่ในน้ำเยื่อออก และที่ทางออกของเครื่องจักร Hot Dispersion จะมีการเปิดน้ำควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติเพื่อลดความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนให้มีค่าอยู่ 3-5% ตามที่ได้ตั้งค่าไว้
10. Mixing Chest : เป็นถังพักเยื่อ เพื่อรอปั๊มเยื่อไปสำหรับผลิตกระดาษ

3.2 คุณภาพของวัตถุดิบเศษกระดาษพิมพ์เขียน

เศษกระดาษพิมพ์เขียนเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว เป็นวัตถุดิบประเภทนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ซึ่งได้แก่ กระดาษ A4 หรือ กระดาษพิมพ์เขียนสำนักงานที่ใช้งานแล้ว ในขั้นตอนของการจัดซื้อวัตถุดิบจะมีการตรวจวัดความชื้นทุกมัด และสุ่มคัดแยกสิ่งเจอปนบางม้วน เพื่อตรวจสอบสิ่งเจือปนและสิ่งต้องห้ามที่อาจมากับม้วนเศษกระดาษ รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

รูปที่ 3.2 แสดงขั้นตอนการจัดหาวัตถุดิบเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

เนื่องจากไม่ได้มีการตรวจสอบคุณภาพและคัดแยกสิ่งเจือปนออกจากเศษกระดาษพิมพ์เขียนทุกมัด ก่อนนำไปใช้งาน มีเพียงการสุ่มเพียงบางมัดเท่านั้น จึงทำให้คุณภาพของเศษกระดาษพิมพ์เขียนซึ่งเป็นวัตถุดิบในการผลิจกระดาษทำผิวกล่องสีขาวมีคุณสมบัติไม่คงที่ ควบคุมคุณภาพได้ยาก รูปที่ 3.3 เศษกระดาษพิมพ์เขียน

รูปที่ 3.3 เศษกระดาษพิมพ์เขียน

3.3 การวัดคุณภาพความขาวและความแข็งแรง

คุณสมบัติที่สำคัญของกระดาษทำผิวกล่องสีขาว ได้แก่ ความขาว และความแข็งแรง

3.3.1 การตรวจวัดความขาว

ปัจจุบันมีการตรวจวัดคุณภาพความขาวอยู่ 2 ส่วน คือ ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน และความขาวของกระดาษ ซึ่งจะทำการตรวจวัดด้วยเครื่อง Spectrophotometer

1. **การวัดความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน** เป็นการวัดความขาวจากกระบวนการเตรียมเยื่อ ปัจจุบันไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนก่อนนำเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปผลิตกระดาษ

2. **การวัดความขาวของกระดาษ** เป็นการวัดความขาวของผลิตภัณฑ์ก่อนส่งไปยังลูกค้า มาตรฐานการผลิตกำหนดความขาวของกระดาษทำผิวกล่องสีขาวต้องมีความขาวไม่น้อยกว่า 83.5 ซึ่งความขาวนี้จะเป็นค่าไร้หน่วย (Dimensionlss)

1. การวัดความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

เก็บตัวอย่างเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ต้องการวัดความขาวไปวางในตะแกรงที่มีกระดาษกรองเบอร์ 40 หลังจากนั้นเปิดปั๊มเพื่อดูดน้ำออกจากเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน หลังจากนั้นนำเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนตัวอย่างหลังดูดน้ำออกไปอบที่เตาอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที นำเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปวัดค่าความขาวด้วยเครื่อง Spectrophotometer รูปที่ 3.4 แสดงขั้นตอนในการวัดความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

รูปที่ 3.4 ขั้นตอนในการวัดความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

2. การวัดความขาวของกระดาษ

เก็บตัวอย่างกระดาษที่ม้วนกระดาษตลอดหน้ากว้างของม้วนกระดาษ ตัดตัวอย่างกระดาษให้มีขนาดเท่ากับกระดาษ A4 สุ่มทำวัดความขาวจำนวน 10 จุด ด้วยเครื่อง

Spectrophotometer หาค่าเฉลี่ยที่ได้จากวัดทั้ง 10 จุด ค่าเฉลี่ยความขาวที่วัดได้เป็นค่าความขาวของม้วนกระดาษม้วนนั้น รูปที่ 3.5 ขั้นตอนในการวัดความขาวของกระดาษ

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนในการวัดความขาวของกระดาษ

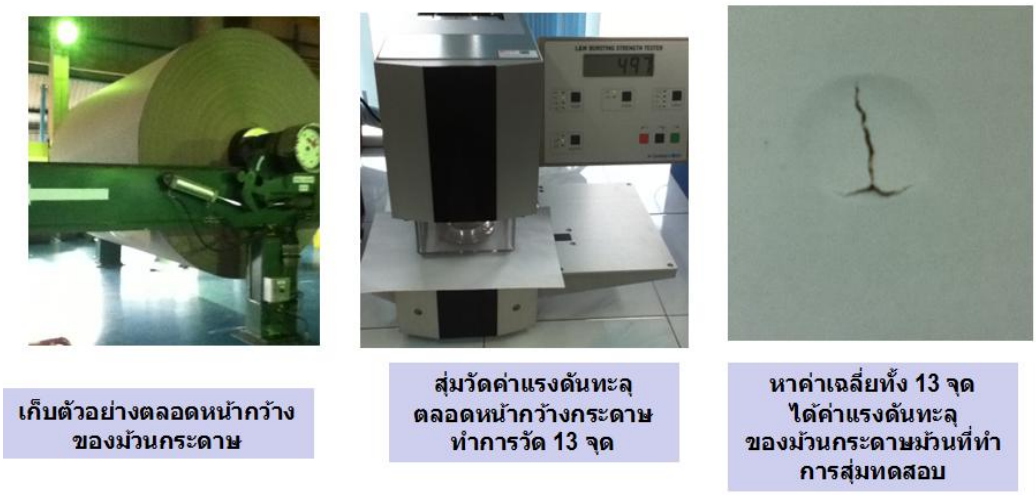
3.3.2 การตรวจวัดค่าความแข็งแรงของกระดาษ

การตรวจวัดคุณภาพด้านความแข็งแรงของกระดาษมี 2 ส่วนประกอบกัน คือ

1. การวัดค่าแรงดันทะลุ
2. การวัดค่ารับแรงกดแนววงแหวน

1. การวัดค่าแรงดันทะลุ

เก็บตัวอย่างกระดาษที่ม้วนกระดาษตลอดหน้ากว้างของม้วนกระดาษ ตัดตัวอย่างกระดาษให้มีขนาดเท่ากับกระดาษ A4 สุ่มทำวัดค่าแรงดันทะลุจำนวน 13 จุด ด้วยเครื่อง L&W Bursting Strength Tester หาค่าเฉลี่ยที่ได้จากวัดทั้ง 13 จุด ค่าเฉลี่ยค่าแรงดันทะลุที่วัดได้เป็นค่าแรงดันทะลุของม้วนกระดาษที่ทำการทดสอบ ค่าแรงดันทะลุตามมาตรฐานต้องไม่น้อยกว่า 530 กิโลปาสคาล รูปที่ 3.6 ขั้นตอนในการวัดค่าแรงดันทะลุของกระดาษ



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนในการวัดค่าแรงดันทะลุของกระดาษ

2. การวัดค่ารับแรงกดแนววงแหวน

เก็บตัวอย่างกระดาษที่ม้วนกระดาษตลอดหน้ากว้างของม้วนกระดาษ ตัดตัวอย่างกระดาษให้มีขนาด 1.5 x 15.2 เซนติมตร จำนวน 10 แผ่นตลอดหน้ากว้างของม้วนกระดาษ นำตัวอย่างกระดาษที่ผ่านการตัดไปใส่ในอุปกรณ์สำหรับรับแรงกดในแนววงแหวน ทำวัดค่ารับแรงกดแนววงแหวนด้วยเครื่อง L&W Crush Tester หาค่าเฉลี่ยที่ได้จากวัดทั้ง 10 จุด ค่าเฉลี่ยค่ารับแรงกดแนววงแหวนที่วัดได้เป็นค่ารับแรงกดแนววงแหวนของม้วนกระดาษที่ทำการทดสอบ ค่ารับแรงกดแนววงแหวนตามมาตรฐานต้องไม่น้อยกว่า 250 นิวตัน รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนในการวัดค่ารับแรงกดแนววงแหวนของกระดาษ

รูปที่ 3.7 แสดงขั้นตอนในการวัดค่ารับแรงกดแนววงแหวนของกระดาษ

3.4 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

คุณสมบัติที่ต้องการของกระดาษทำผิวกล่องสีขาว ได้แก่ ความขาวของกระดาษต้องไม่น้อยกว่า 83.5 ความแข็งแรงของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุและค่ารับแรงกดแนววงเหวนต้องไม่น้อยกว่า 530 กิโลปาสคาล และ 250 นิวตัน ตามลำดับ ค่าความขาวและความแข็งแรงของกระดาษขึ้นกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ปัจจุบันกรณีที่คุณสมบัติที่ของกระดาษทำผิวกล่องสีขาวไม่ได้ตามคุณภาพที่ควบคุมจะแก้ปัญหาด้วยการเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น

จากการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุของปัญหาที่คุณภาพของกระดาษด้านความขาวและความแข็งแรงไม่ได้ตามที่ต้องการ มีสาเหตุต่างๆดังนี้

1. ค่าความขาวของเศษกระดาษพิมพ์เขียนมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากวัตถุดิบเป็นกระดาษนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle)
2. กระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไม่มีการกำหนดค่าความขาวมาตรฐานจากการเตรียมเยื่อก่อนส่งเยื่อไปผลิตกระดาษ

บทที่ 4

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

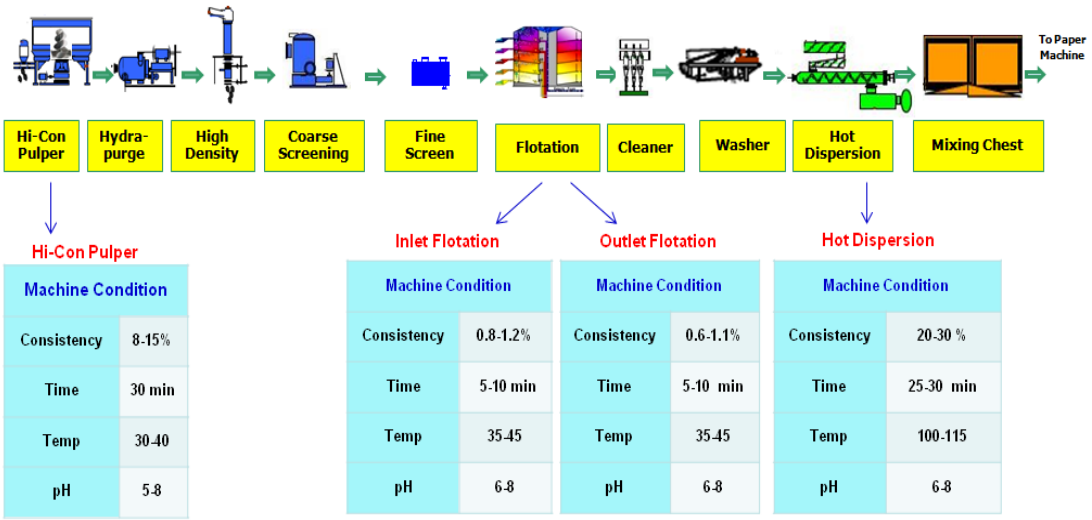
ขั้นตอนการดำเนินการวิจัยของกระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนต้องการหาสภาวะที่ดีที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ทำให้ได้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุด ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษทำการศึกษาหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ทำให้คุณภาพด้านความขาวและความแข็งแรงของกระดาษได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด

โดยในแต่ละขั้นตอนของการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการจะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) วิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลัก (Main Effect) ผลของอิทธิพลร่วม (Interaction) และหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย ตามลำดับ

4.1 แนวทางในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมี

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวกับการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีพบว่า มีสารเคมีหลายชนิดที่สามารถเพิ่มความขาวให้กับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อได้ การที่จะสรุปเลือกสารเคมีเพื่อนำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน คำนึงถึงปัจจัยต่างๆดังนี้ สภาวะของเครื่องจักร (Machine Condition) สภาวะในการทำปฏิกิริยาของสารเคมี (Chemical Condition) ต้นทุนของสารเคมี (Cost of Chemical Treatment Program) ตำแหน่งในการใช้สารเคมี (Chemical Feed Point) เพื่อให้เกิดการสูญเสียสารเคมีน้อยที่สุด ซึ่งโดยปกติมักจะไม่นิยมใส่สารเคมีตอนต้นของกระบวนการเตรียมเยื่อและที่บริเวณ Screen เนื่องจากที่บริเวณดังกล่าวจะเกิดการสูญเสียสารเคมีและต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่มากกว่าที่ตำแหน่งอื่นๆ กระบวนการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสามารถใส่สารเคมีเพื่อเพิ่มความขาวให้กับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักรได้ทั้งหมด 4 ตำแหน่ง ได้แก่ Hi-Con Pulper Inlet Flotation Outlet Flotation และ Hot Disepersion ตามลำดับ ตำแหน่งที่เลือกในการใช้สารเคมีของงานวิจัยนี้ ได้แก่ Hot Dispersion เนื่องจากเมื่อเทียบสภาวะของเครื่องจักร (Machine Condition) กับเครื่องจักรตัวอื่นๆ Hot Dispersion เป็นเครื่องจักรที่อยู่ท้ายของกระบวนการทำให้เกิดการสูญเสียสารเคมีน้อยที่สุด อีกทั้งสภาวะเครื่องจักร มีความเข้มข้นสูง อุณภูมิสูง และมีเวลาในการทำปฏิกิริยาเคมีนาน ด้วยสภาวะดังกล่าวซึ่งเอื้อแก่การใช้

สารเคมีเพราะการทำปฏิกิริยาเคมีส่วนใหญ่เหมาะแก่การทำปฏิกิริยาที่อุณภูมิสูงความเข้มข้นสูง และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม รูปที่ 4.1 สภาวะของเครื่องจักรที่สามารถใส่สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน



Machine Condition	
Consistency	8-15%
Time	30 min
Temp	30-40
pH	5-8

Machine Condition	
Consistency	0.8-1.2%
Time	5-10 min
Temp	35-45
pH	6-8

Machine Condition	
Consistency	0.6-1.1%
Time	5-10 min
Temp	35-45
pH	6-8

Machine Condition	
Consistency	20-30 %
Time	25-30 min
Temp	100-115
pH	6-8

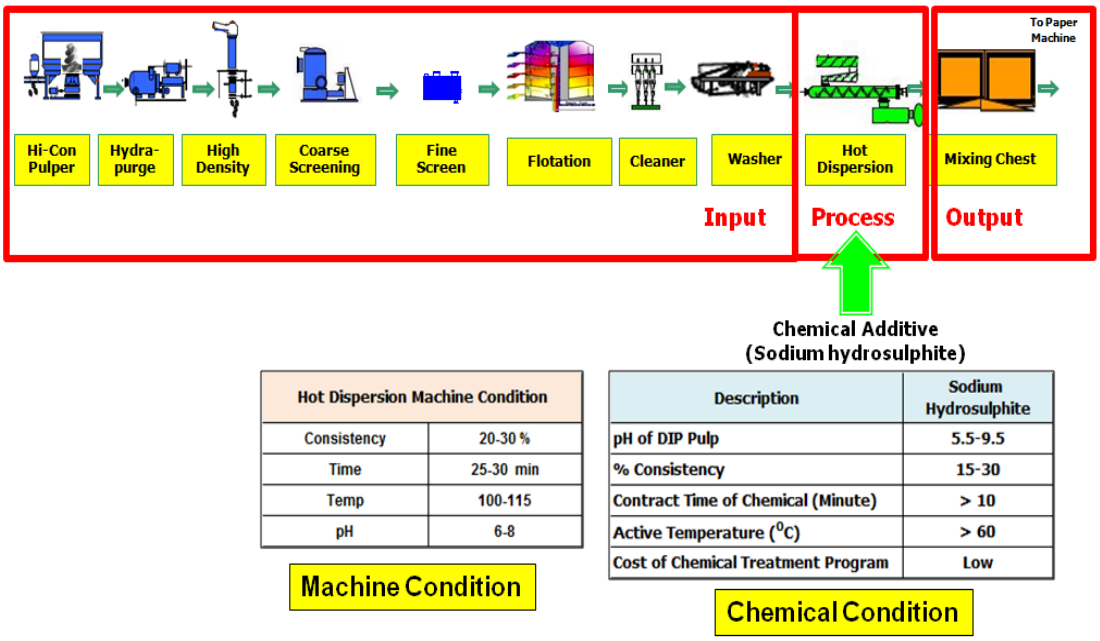
รูปที่ 4.1 สภาวะของเครื่องจักรที่สามารถใส่สารเคมีในการปรับปรุงคุณภาพของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

ตารางที่ 4.1 สรุปสภาวะในการทำปฏิกิริยาของสารเคมี (Chemical Condition) และต้นทุนในการใช้สารเคมี (Cost of Chemical Treatment Program) อ้างอิงข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษา

Description	Mill Reqiurement	Type of Chemical						
		Sodium Hydroxide	Hydrogen Peroxide	Oxygen	Ozone	Sodium Hypochlorite	FAS	Sodium Hydrosulphite
pH of Deinking Pulp	5-8	9-12	9-11	9-11	7-8	9-11	5.5-9.5	5.5-9.5
% Consistency	20-30	15-30	15-30	15-30	15-30	15-25	10-25	15-30
Contract Time of Chemical (Minute)	90 <	> 60	60-120	120-180	5-45	40-180	30-120	> 10
Active Temperature (^{0}C)	120 <	90-115	70-90	90-130	25-45	20-80	55-90	> 60
Cost of Chemical Treatment Program	Low or Medium	Low	Low	High	High	High	Medium	Low

จากการเลือกเครื่องจักร Hot Dispersion เป็นเครื่องจักรที่จะใส่สารเคมี ดังนั้นจึงนำสภาวะของเครื่องจักรมากำหนดเป็นสภาวะของการใส่สารเคมีของโรงงาน (Mill Requiremet) จากตารางที่ 4.1 จึงสรุปเลือกใช้สารเคมีโซเดียมไฮโรซัลไฟต์เพื่อใช้ในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ที่บริเวณเครื่องจักร Hot Dispersion เนื่องจากสารเคมีดังกล่าวเหมาะสมกับสภาวะของเครื่องจักรของโรงงานและมีต้นทุนของสารเคมีต่ำที่สุด รูปที่ 4.2 สรุปเลือกเครื่องจักร

Hot Dispersion และสารเคมีโซเดียมไฮโรซัลไฟต์ในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน



Hot Dispersion Machine Condition	
Consistency	20-30 %
Time	25-30 min
Temp	100-115
pH	6-8

Machine Condition

Description	Sodium Hydrosulphite
pH of DIP Pulp	5.5-9.5
% Consistency	15-30
Contract Time of Chemical (Minute)	> 10
Active Temperature (^{0}C)	> 60
Cost of Chemical Treatment Program	Low

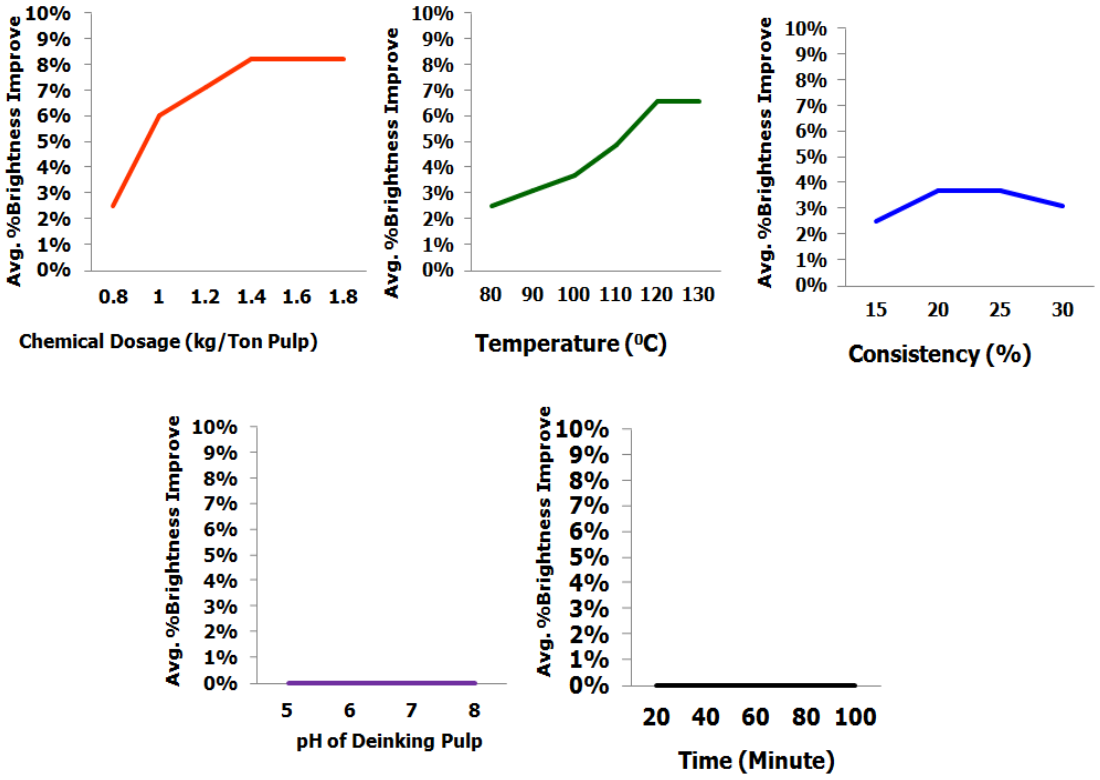
Chemical Condition

รูปที่ 4.2 สรุปเลือกเครื่องจักร Hot Dispersion และสารเคมีโซเดียมไฮโรซัลไฟต์ในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

4.1.1 การคัดกรองหาปัจจัยในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำสารเคมีมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อสามารถจำลองสภาวะการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับ Lab Scale ได้

จากข้อมูลปัจจุบันพบว่าค่าความขาวจากขั้นตอนของการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมีค่าอยู่ระหว่าง 78-82 ค่าความขาวของกระดาษวัดจากค่า Brightness จากเครื่อง Spectrophotometer ฉะนั้นงานวิจัยนี้จะทำการเพิ่มค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนโดยใส่สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ ซึ่งต้องหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมต่อไป เพื่อเป็นการลดเวลาและต้นทุนจากการทดลองในระดับการผลิตจริง จึงได้จำลองการทดลองในระดับ Lab Scale เพื่อคัดกรองหาว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อการเพิ่มค่าความขาวบ้าง รูปที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆกับค่าความขาวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในระดับ Lab Scale

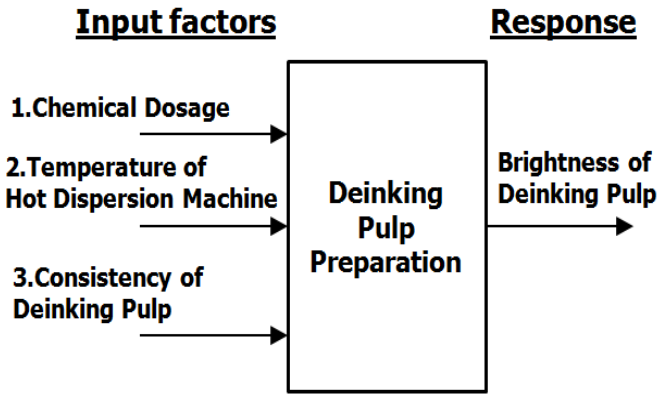


รูปที่ 4.3 แสดงผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆกับค่าความขาวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในระดับ Lab Scale

จากผลจากการทดลองในระดับ Lab Scale สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน (ความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน เป็นอัตราส่วนร้อยละระหว่างน้ำหนักเยื่อแห้งต่อน้ำหนักเยื่อเปียก) ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.2 ถึง 1.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ผลของการเพิ่มค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ดีที่สุด การเพิ่มปริมาณสารเคมีที่มากกว่า 1.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่อไม่ส่งผลให้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเพิ่มขึ้นและทำให้ต้นทุนสารเคมีในการทดลองเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ 105-115°C และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 20-30% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ผลของการเพิ่มค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ดีที่สุดและเป็นข้อจำกัดของการตั้งค่าที่เครื่องจักร (Machine Setting) ดังนั้นจึงเลือกสภาวะดังกล่าวไปกำหนดเป็นขอบเขตของการทดลองในระดับการผลิตจริง

4.1.2 การออกแบบการทดลองในระดับการผลิตจริง

จากผลจากการทดลองในระดับ Lab Scale ทำให้สามารถสรุปเลือกศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ขอบเขตของปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.2 ถึง 1.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ขอบเขตของอุณหภูมิที่ 105-115°C และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 20-30% ของเครื่องจักร Hot Dispersion เป็นการกำหนดขอบเขตจากผลการทดลองระดับ Lab Scale ส่วนตัวแปรตอบสนองจากการทดลองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ถังพักเยื่อเพื่อรอใช้งาน (Mixing Tank) ก่อนส่งเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปเดินเป็นแผ่นกระดาษ รูปที่ 4.4 แสดงตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน



รูปที่ 4.4 ตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ

4.1.3 การปรับปรุงคุณภาพความขาวของเยื่อเศษกระดาษเพิมพ์เขียน

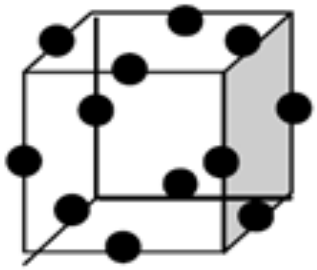
ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งก่อนจะสามารถสรุปผลจากการทดลองได้จะทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ด้วยการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง หลังจากนั้นจะวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลัก ผลของอิทธิพลร่วม และหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย โดยใช้หลักการ Optimization โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลต์

4.1.4 รูปแบบที่ใช้ในการทดลอง

ในการเลือกรูปแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ปัจจัยที่ได้ทำการศึกษาจะถูกทำการทดลองที่การผลิตจริง ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงตัดสินใจเลือกชนิดของการทดลองเป็นการออกแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Benhken Design) เนื่องจากเป็นการออกแบบสามระดับสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ การออกแบบนี้ถูกสร้างขึ้นจากการรวมการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อกไม่บริบูรณ์ ซึ่งผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจำนวนของการรันที่ต้องการ และการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย ตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคนสามตัวแปร และรูปที่ 4.5 แสดงรูปทางเรขาคณิตของการออกแบบแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน (Geometric presentation of Box-Behnken design)

ตารางที่ 4.2 การออกแบบแบบบ็อกซ์- เบห์นเคนแบบสามตัวแปร

RUN	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	0
2	-1	1	0
3	1	-1	0
4	1	1	0
5	-1	0	-1
6	-1	0	1
7	1	0	-1
8	1	0	1
9	0	-1	-1
10	0	-1	1
11	0	1	-1
12	0	1	1
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0



รูปที่ 4.5 รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบออกแบบบ็อกซ์- เบห์นเคน

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน และระดับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้ง 3 ระดับ แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 ส่วนตัวแปรตอบสนองเป็นค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ถังพักเยื่อเพื่อรอใช้งาน (Mixing Tank) ก่อนส่งเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปเดินเป็นแผ่นกระดาษ

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

Factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
Chemical	kg/Ton Pulp	1.2	1.35	1.5
Temperature	Degree Celcius	105	110	115
Consistency	%	20	25	30

ลำดับของการทดลองเป็นแบบสุ่ม (Randomization) เพื่อให้ผลการทดลองไม่เป็นลำดับและมีความเป็นอิสระ (Independent) ต่อกัน และไม่มีการทำการทดลองซ้ำ (Replicate=1) เนื่องจากสารเคมีในการทดลองมีราคาแพง ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 การออกแบบแบบบ็อกซ์- เบห์นเคน ปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

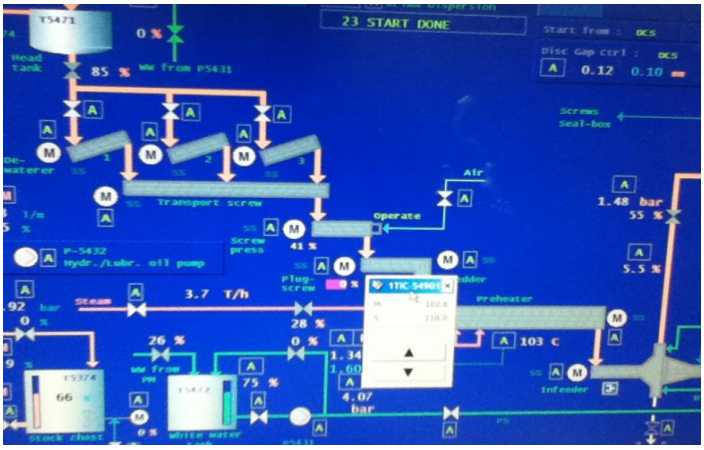
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Chemical	Temperature	Consistency
11	1	2	1	1.35	105	30
9	2	2	1	1.35	105	20
14	3	0	1	1.35	110	25
4	4	2	1	1.50	115	25
7	5	2	1	1.20	110	30
12	6	2	1	1.35	115	30
13	7	0	1	1.35	110	25
15	8	0	1	1.35	110	25
10	9	2	1	1.35	115	20
3	10	2	1	1.20	115	25
2	11	2	1	1.50	105	25
1	12	2	1	1.20	105	25
6	13	2	1	1.50	110	20
8	14	2	1	1.50	110	30
5	15	2	1	1.20	110	20

4.1.5 ขั้นตอนการทดลอง

ก่อนการทดลองผู้จัดทำวิทยานิพนธ์นำแผนการทดลองมาอธิบายให้พนักงานผู้ปฏิบัติงานมีความเข้าใจในขั้นตอนการการทดลอง ตำแหน่งในการเก็บตัวอย่าง วิธีในการวัดความขาว เพื่อให้ได้ผลการทดลองถูกต้องสอดคล้อง สามารถแสดงรายละเอียดของการทดลองดังต่อไปนี้

รูปที่ 4.6 เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ใช้ในการทดลอง

รูปที่ 4.7 อุปกรณ์ในการทดลองสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์



รูปที่ 4.8 ปรับตั้ง ปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ และความเข้มข้น ที่ระบบ DCS Control

รูปที่ 4.9 เก็บตัวอย่างเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน และตรวจวัดความขาว

4.1.6 ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง ได้ผลการทดลองเป็นความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน โดยแสดงผลได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลทดลองการเพิ่มความขาวด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์

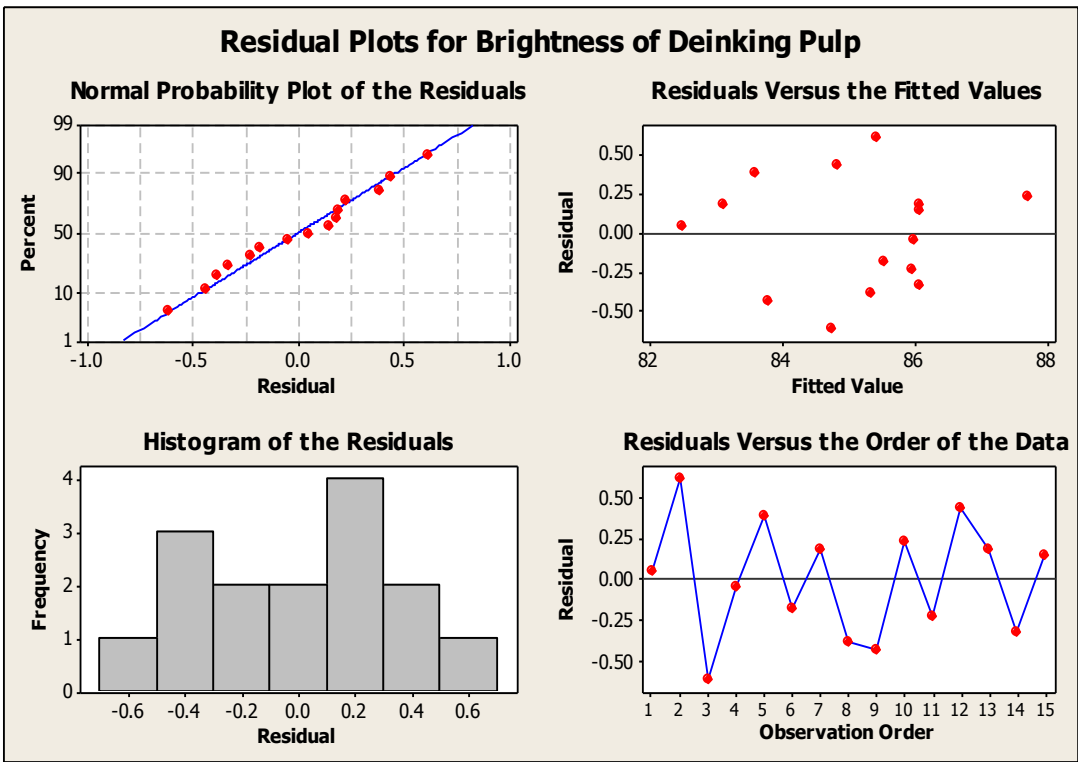
StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Chemical	Temperature	Consistency	Brightness of Deinking Pulp
11	1	2	1	1.35	105	30	85.74
9	2	2	1	1.35	105	20	83.35
14	3	0	1	1.35	110	25	86.25
4	4	2	1	1.50	115	25	85.95
7	5	2	1	1.20	110	30	83.28
12	6	2	1	1.35	115	30	85.28
13	7	0	1	1.35	110	25	85.73
15	8	0	1	1.35	110	25	86.21
10	9	2	1	1.35	115	20	87.95
3	10	2	1	1.20	115	25	84.12
2	11	2	1	1.50	105	25	86.05
1	12	2	1	1.20	105	25	82.55
6	13	2	1	1.50	110	20	85.37
8	14	2	1	1.50	110	30	84.95
5	15	2	1	1.20	110	20	83.98

4.1.7 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์และการสรุปผลการทดลอง จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำมาใช้เสียก่อน หากข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลเป็นไปตามข้อสมมติที่กำหนดตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0,\sigma^2)$ จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อสภาวะของระดับของปัจจัยที่เหมาะสมในการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.7.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability) ในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางสถิติมาทำการวิเคราะห์ผล พบว่าการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ จากการตรวจสอบความเป็นอิสระพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบและไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน ซึ่งพบว่าค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง และไม่พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ สามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์สรุปผลต่อไปได้ รูปที่ 4.5 แสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ



รูปที่ 4.10 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

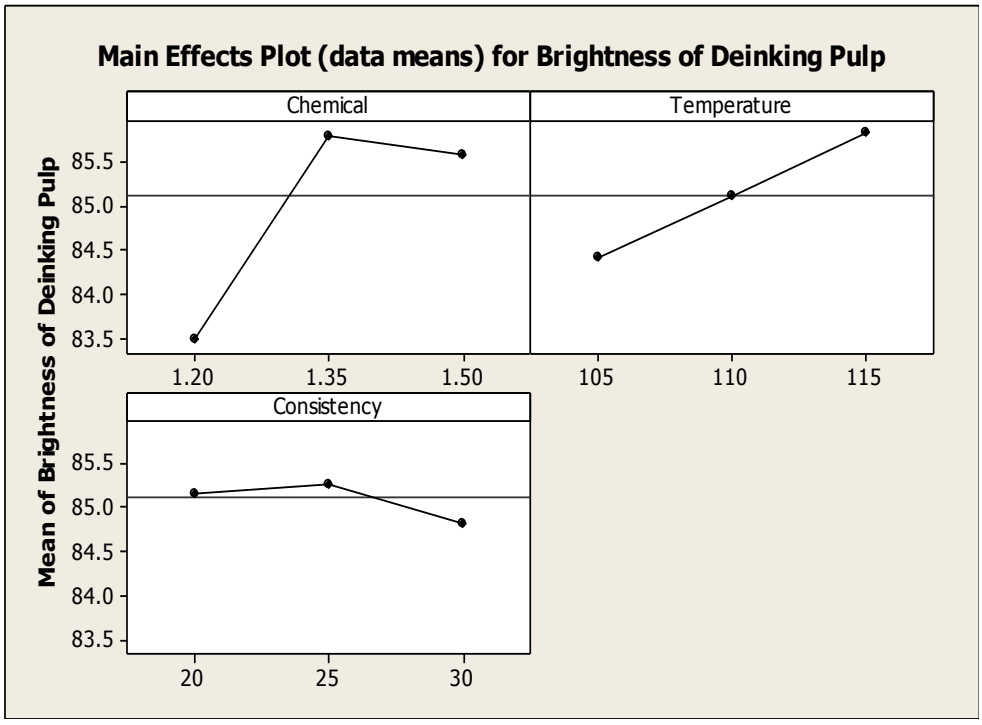
4.1.7.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลัก ผลของอิทธิพลร่วมของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ถังพักเยื่อเพื่อรอใช้งาน (Mixing Tank) ก่อนส่งเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปเดินเป็นแผ่นกระดาษ และหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลต์

4.1.7.3 ผลของอิทธิพลหลัก

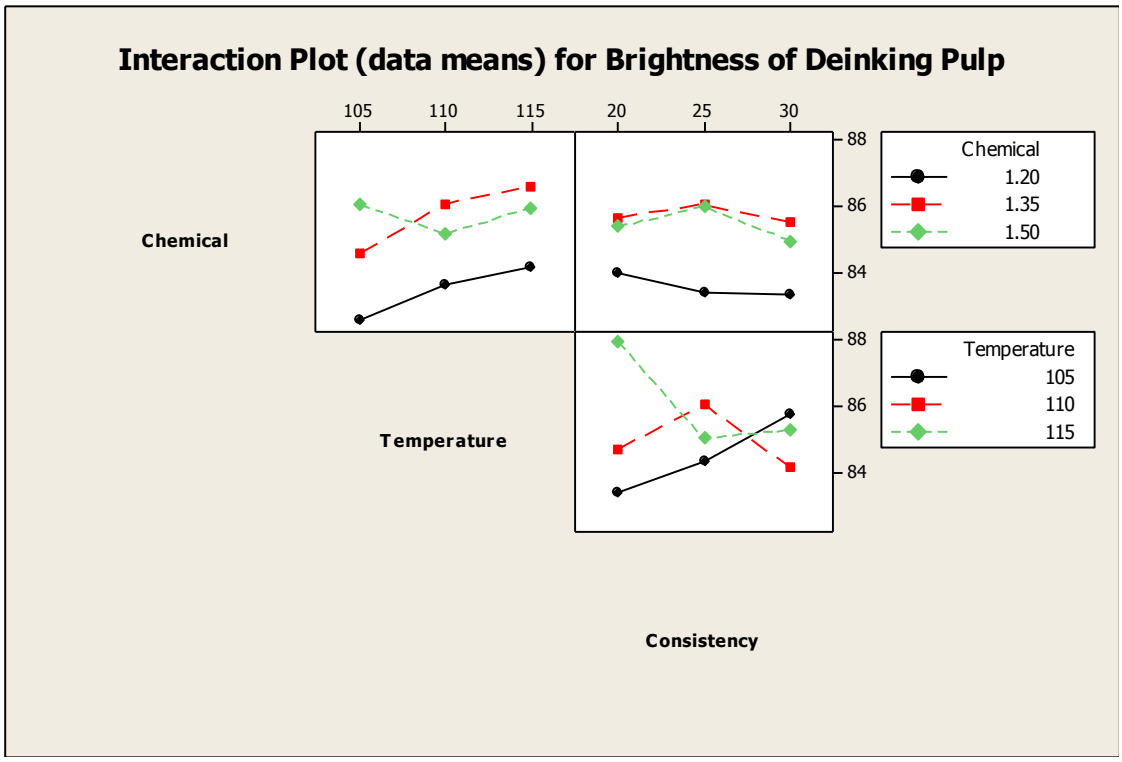
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง คือ ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์

เขียนที่ถังพักเยื่อเพื่อรอใช้งาน (Mixing Tank) ก่อนส่งเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปเดินเป็นแผ่นกระดาษ จะพบว่าปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เท่ากับ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ จะมีผลให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงกว่าที่ปริมาณสารเคมี 1.2 และ 1.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ อุณหภูมิที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ 115 องศาเซลเซียส จะมีผลให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงกว่าที่อุณหภูมิ 110 และ 105 องศาเซลเซียส อุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสเป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถปรับตั้งค่าได้ (Machine Setting) และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ 25% จะมีผลให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงกว่าที่ความเข้มข้น 20% และ 30% หลังจากเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนผ่านเครื่องจักรนี้ไม่ว่าจะมีความเข้มข้นเป็นเท่าใดก็ตาม ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ (DCS Control) ก็จะทำการเปิดน้ำเพื่อเจือจาง (Dilution Water) เพื่อให้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมีความเข้มข้นที่ 0.3-0.5% ตามที่มาตรฐานการผลิตกำหนดไว้ หลังจากนั้นเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจะถูกส่งต่อไปเดินแผ่นในขั้นตอนของการผลิตกระดาษต่อไป รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก (Main Effect) 3 ปัจจัยต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ



รูปที่ 4.11 อิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

4.1.7.4 **ผลของอิทธิพลร่วม**



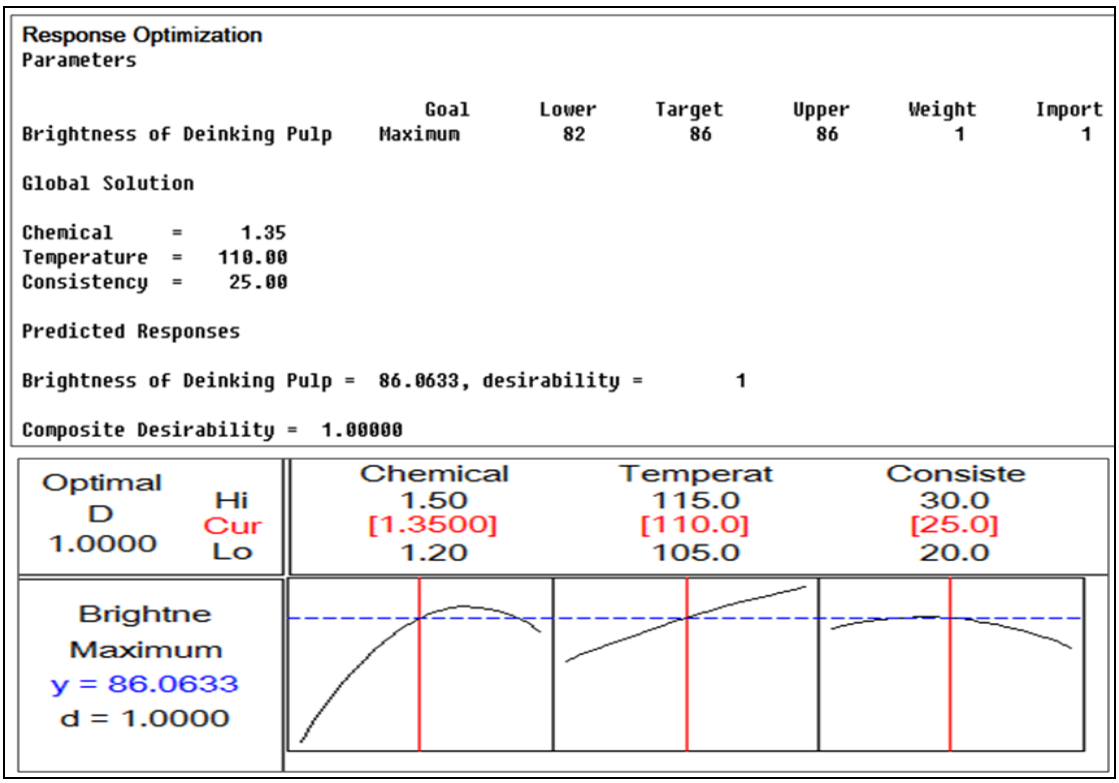
รูปที่ 4.12 อิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

จากรูปที่ 4.12 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วม 2 ระดับ (Interaction) ของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ จากการวิเคราะห์ภาพบนซ้ายจะแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์กับอุณหภูมิที่เครื่องจักร Hot Dispersion ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณสารเคมีและอุณหภูมิ มีผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าควรใช้ปริมาณสารเคมีที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อและอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสที่เครื่องจักร Hot Dispersion ทำให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงที่สุด ภาพบนขวาแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์กับความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณสารเคมีและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน มีผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าควรใช้ปริมาณสารเคมีที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 25% ทำให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงที่สุด และภาพล่าง

ขวาแสดงผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน มีผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าควรตั้งค่าอุณหภูมิ 115 องศาเซลเซียสที่เครื่องจักร Hot Dispersion และควรใช้ความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 20% ทำให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงที่สุด ในส่วนขั้นตอนของการผลิตกระดาษเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและลดการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว

4.1.7.5 หาระดับปรับตั้งค่าที่เหมาะสมของการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลต์

ในการหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย สามารถใช้หลักการ Optimization โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลต์ สรุปผลได้ว่าระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน คือ ต้องทำการปรับปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ปรับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion 110 องศาเซลเซียส และ 25% ตามลำดับ จึงจะทำให้ได้ค่าค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุดตามวัตถุประสงค์ของการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 86 แสดงรายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผล Optimization Plot ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ดังรูปที่ 4.13



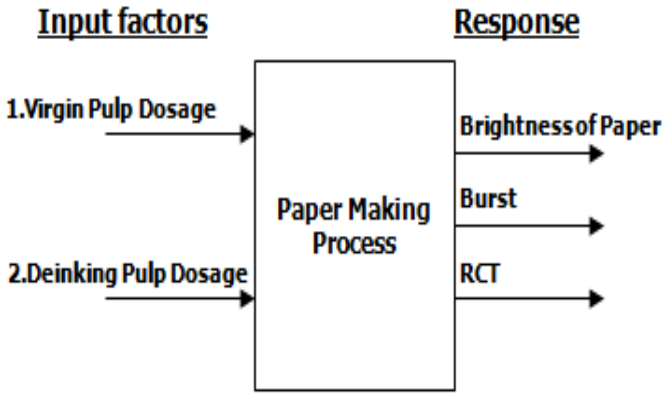
รูปที่ 4.13 รายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผล Optimization Plot

4.2 การหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

คุณสมบัติของกระดาษด้านความขาวและความแข็งแรง จากการเพิ่มการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและลดการเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ มีความจำเป็นที่จะต้องทดลองในการผลิตจริง เนื่องจากในการทดลองระดับ Lab Scale ไม่สามารถอ้างอิงผลการทดลองและจำลองสภาวะของการผลิตกระดาษจริงได้ ยกตัวอย่างเช่น ไม่สามารถจำลองการเดินแผ่นกระดาษด้วยการนำวัตถุดิบทั้ง 4 ชนิดมาทำเป็นกระดาษ 4 ชั้น ไม่สามารถจำลองการปรับเพิ่มหรือลดปริมาณแกรมของกระดาษแต่ละชั้น ไม่สามารถจำลองการเคลือบแป้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ และไม่สามารถการขัดมันกระดาษเพื่อเพิ่มความเรียบให้กับกระดาษได้ ซึ่งขั้นตอนต่างๆที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่ส่งผลต่อคุณภาพของกระดาษโดยตรง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำหลักของการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการผลิตจริง เพื่อพัฒนากระบวนการผลิตสินค้าโดยยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าและลดต้นทุนการผลิต

4.2.1 การออกแบบการทดลองในระดับการผลิตจริง

ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษจะหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนหลังจากทำการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนแล้ว ตัวแปรตอบสนองจากการทดลองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ คุณภาพกระดาษ ซึ่งจะทำการวัดคุณภาพด้านความขาวและคุณภาพด้านความแข็งแรงซึ่งวัดจากค่าแรงดันทะลุและค่ารับแรงกดแนววงแหวน รูปที่ 4.14 แสดงตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ



รูปที่ 4.14 แสดงตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ

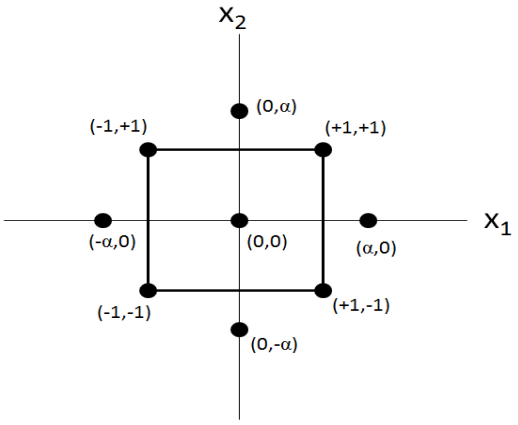
4.2.2 รูปแบบที่ใช้ในการทดลอง

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ตัดสินใจเลือกชนิดของการทดลองเป็นการออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design: CCD) เนื่องจากการทดลองแบบนี้ครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษามากกว่าวิธีของ 2^n Factorial ตารางที่ 4.6 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบส่วนประสมกลาง ที่กำหนดค่า α= Faced Center จำนวน Center Point เท่ากับ 6 รัน และรูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบทั่วไปของการออกแบบส่วนประสมกลาง

ตารางที่ 4.6 การออกแบบส่วนประสมกลาง

กำหนดค่า α= Faced Center และ Center Point เท่ากับ 6 รัน

RUN	x_1	x_2
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	-1	0
9	1	0
10	0	-1
11	0	1
12	0	0
13	0	0
14	0	0



รูปที่ 4.15 แสดงรูปแบบทั่วไปของการออกแบบส่วนประสมกลาง (ปารเมศ ชุติมา, 2545)

ปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว ปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ตัวแปรตอบสนองที่สนใจ 3 ปัจจัย ได้แก่ ความขาวของกระดาษต้องไม่น้อยกว่า 83.5 ค่าแรงดันทะลุต้องไม่น้อยกว่า 530 กิโลปาสคาล และค่ารับแรงกดแนววงแหวนต้องไม่น้อยกว่า 250 นิวตัน ปัจจัยและระดับปัจจัยของการทดลอง แสดงได้ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ปัจจัยและระดับปัจจัยในการทดลอง

Factor	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
Virgin Pulp Dosage	g/m^2	45.0	47.5	50.0
Deinking Pulp Dosage	g/m^2	35.0	37.5	40.0

ขอบเขตของการปรับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ปริมาณ 45-50 กรัมต่อตารางเมตร แผนกควบคุมคุณภาพของโรงงานได้กำหนดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวต้องไม่น้อยกว่า 45 กรัมต่อตารางเมตร เนื่องจากหากใช้ปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวน้อยกว่าค่าที่กำหนดนี้จะทำให้กระดาษไม่ได้คุณภาพ คือ กระดาษจะมีลักษณะหน้าลาย ค่าความขาวและ Appearance ของกระดาษจะไม่สม่ำเสมอและไม่ได้ตามข้อกำหนดด้านคุณภาพ ส่วนขอบเขตบนของการปรับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 50 กรัมต่อตารางเมตร กำหนดโดยมาตรฐานปริมาณการผลิตต่อหน่วย (Standard Unit Used) หากใช้ปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวมากกว่าค่าขอบเขตบนนี้จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่ามาตรฐาน การปรับเพิ่มหรือลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว 1 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนเยื่อที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 169 บาทต่อตันกระดาษ หรือคิดเป็น 2.64% ตามลำดับ ส่วนการกำหนดขอบเขตของการปรับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 35-40 กรัมต่อตารางเมตร ขอบเขตล่างกำหนดจากมาตรฐานปริมาณการผลิตต่อหน่วย (Standard Unit Used) ส่วนขอบเขตบน กำหนดจากคุณภาพความด้านแข็งแรงและ Appearance ของกระดาษ การที่เพิ่มการใช้ปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมากกว่า 40 กรัมต่อตารางเมตร จะส่งผลให้ค่าแรงดันทะลุ ค่ารับแรงกดแนววงแหวน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของกระดาษและค่าความขาวของกระดาษต่ำกว่ามาตรฐานของค่าควบคุม การปรับเพิ่ม หรือลดปริมาณการใช้เยื่อเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 1 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนเศษกระดาษที่เพิ่มขึ้น หรือลดลง 83 บาทต่อตันกระดาษ หรือคิดเป็น 1.41% ตามลำดับ

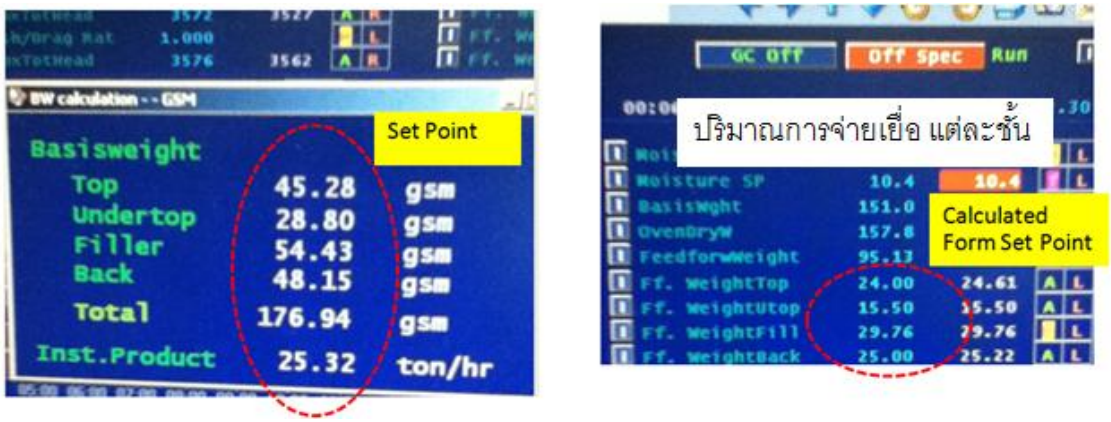
ในการออกแบบการทดลองกำหนดให้ลำดับการทดลองมีการสุ่ม (Randomization) และไม่ทำการทดลองซ้ำ เพื่อให้ผลการทดลองไม่เป็นลำดับและมีความเป็นอิสระ (Independent) ต่อกัน ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การออกแบบการทดลองส่วนประสมกลางของคุณภาพกระดาษ
ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Virgin Pulp Dosage	Deinking Pulp Dosage
12	1	0	2	47.5	37.5
13	2	0	2	47.5	37.5
14	3	0	2	47.5	37.5
10	4	-1	2	47.5	35.0
9	5	-1	2	50.0	37.5
11	6	-1	2	47.5	40.0
8	7	-1	2	45.0	37.5
2	8	1	1	50.0	35.0
5	9	0	1	47.5	37.5
7	10	0	1	47.5	37.5
4	11	1	1	50.0	40.0
3	12	1	1	45.0	40.0
1	13	1	1	45.0	35.0
6	14	0	1	47.5	37.5

4.2.3 ขั้นตอนการทดลอง

เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตในขั้นของการผลิตกระดาษซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณการเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว โดยจะทำการปรับตั้งค่าปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ระบบ DCS Control หลังจากนั้นจะทำการทดสอบคุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่า ซึ่งได้แก่ ค่าความขาวของกระดาษ แรงดันทะลุ ค่ารับแรงกดแนววงแหวน รูปที่ 4.16 การกำหนดปริมาณการใช้เยื่อหรือเศษกระดาษแต่ละชั้นด้วยการตั้งค่าแกรมของกระดาษ



รูปที่ 4.16 การกำหนดปริมาณการใช้เยื่อหรือเศษกระดาษแต่ละชั้น
ด้วยการตั้งค่าแกรมของกระดาษ

4.2.4 ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลอง ได้ผลการทดลองเป็นค่าความความของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวน ตามลำดับ แสดงผลได้ดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการทดลองคุณภาพกระดาษในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Virgin Pulp Dosage	Deinking Pulp Dosage	Brightness of Paper	Burst (kpa)	RCT (N)	Quality Remark
12	1	0	2	47.5	37.5	83.95	569	283	Pass
13	2	0	2	47.5	37.5	83.97	560	282	Pass
14	3	0	2	47.5	37.5	83.86	562	283	Pass
10	4	-1	2	47.5	35.0	83.98	573	291	Pass
9	5	-1	2	50.0	37.5	84.12	580	301	Pass
11	6	-1	2	47.5	40.0	83.9	565	261	Pass
8	7	-1	2	45.0	37.5	83.76	521	242	Fail
2	8	1	1	50.0	35.0	84.21	595	309	Pass
5	9	0	1	47.5	37.5	83.89	571	286	Pass
7	10	0	1	47.5	37.5	83.82	565	289	Pass
4	11	1	1	50.0	40.0	84.05	571	290	Pass
3	12	1	1	45.0	40.0	83.58	539	261	Pass
1	13	1	1	45.0	35.0	83.82	515	231	Fail
6	14	0	1	47.5	37.5	83.91	563	284	Pass

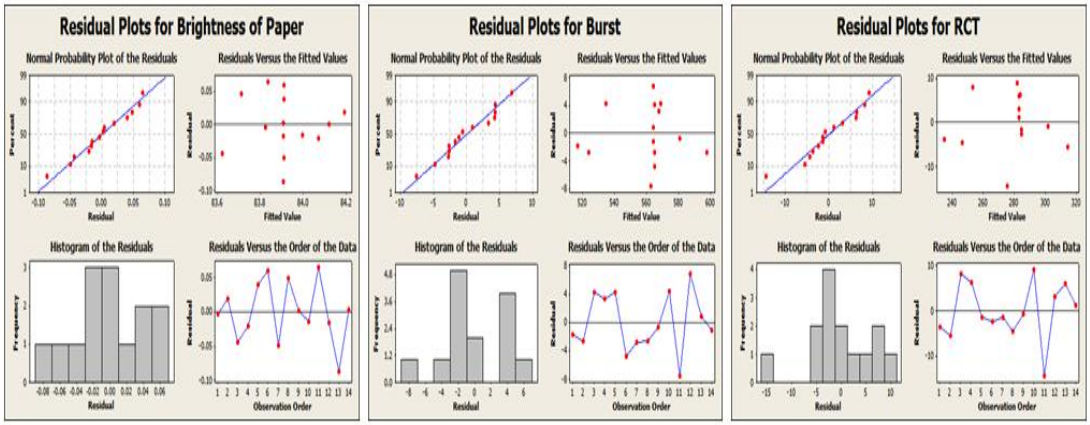
ซึ่งก่อนจะสามารถสรุปผลจากการทดลองได้จะทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) ด้วยการวิเคราะห์ส่วนตกค้าง หลังจากนั้นจะวิเคราะห์ผลของอิทธิพลหลัก ผลของอิทธิพลร่วม และหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย โดยใช้หลักการ Optimization โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

4.2.5 การวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

ในขั้นตอนของการวิเคราะห์และการสรุปผลการทดลอง จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่นำมาใช้เสียก่อน หากข้อมูลที่จะนำมาวิเคราะห์ผลเป็นไปตามข้อสมมติที่กำหนดตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0,\sigma^2)$ จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.2.5.1 **การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง** (Model Adequacy Checking)

เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบด้วยการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability) ในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางสถิติมาทำการวิเคราะห์ผล จากการทดสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างพบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ จากการตรวจสอบความเป็นอิสระพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบและไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน ซึ่งพบว่าค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสรุปว่าข้อมูลมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือและสามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์สรุปผลต่อไปได้ รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของคุณภาพกระดาษ



รูปที่ 4.17 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของคุณภาพกระดาษ

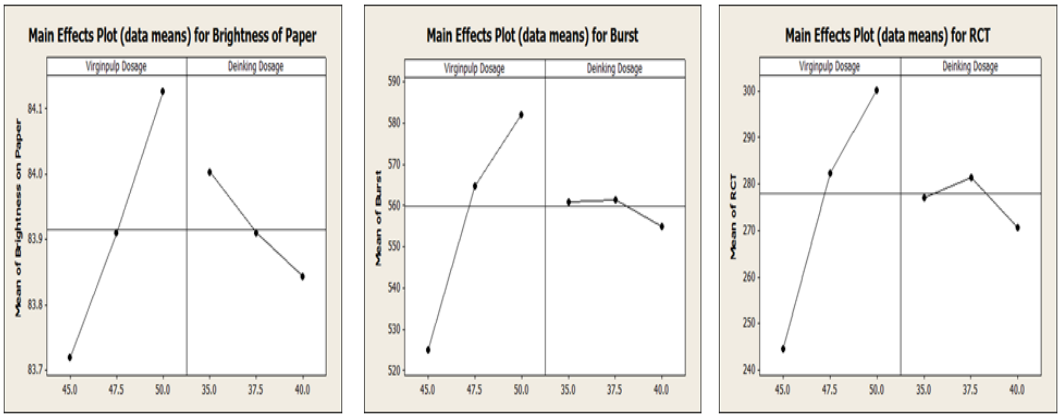
4.2.5.2 **การวิเคราะห์ผลการทดลอง**

หลังจากตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking) แล้ว จะเข้าสู่ขั้นตอนการวิเคราะห์ผลการของอิทธิพลหลัก ผลของอิทธิพลร่วมของตัวแปรอิสระทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว ปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนหลังจากทำการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนแล้ว ที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง 3 ตัว คือ ค่า

ความขาวของกระดาษ (Brightness of Paper) ค่าแรงดันทะลุ (Burst) และค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT) และหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว กับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนหลังจากทำการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนแล้ว

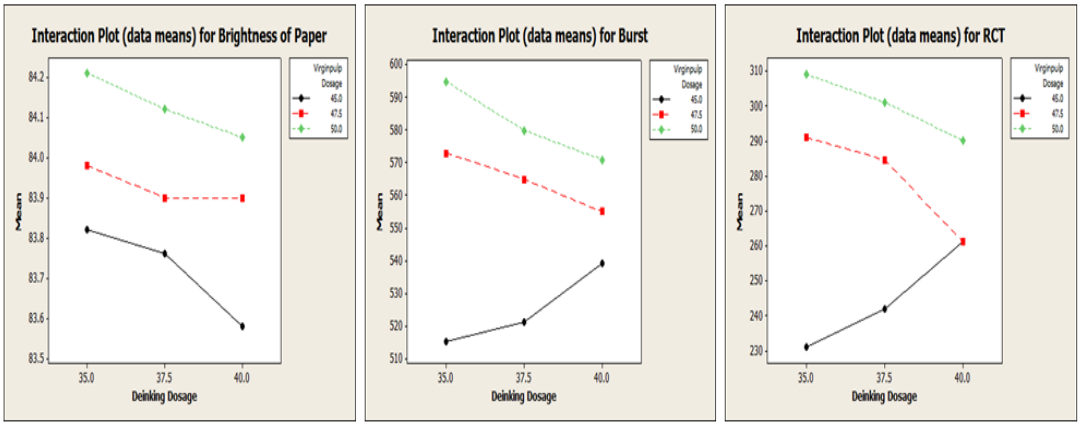
4.2.5.3 **ผลของอิทธิพลหลัก**

จากผลการทดลองจะพบว่า การเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและยาวจะทำให้ค่าความขาวของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวน เพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและยาว ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน จะทำให้ค่าความขาวของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวนลดลง ซึ่งตรงข้ามกับตามปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เพิ่มขึ้น รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก 2 ปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก 2 ปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ

4.2.5.4 ผลของอิทธิพลร่วม



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วมต่อคุณภาพกระดาษ

จากรูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วม 2 ระดับ (Interaction) ของ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ที่มีผลต่อคุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่า จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.19 ด้านซ้าย แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว ที่มีผลต่อค่าความขาวของกระดาษ ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวมีผลต่อค่าความขาวของกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าควรปรับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเท่ากับ 40 กรัมต่อตารางเมตร และปรับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อให้ได้ค่าความขาวของกระดาษผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดที่ 83.5 และมีต้นทุนต่ำที่สุด จากการวิเคราะห์รูปที่ 4.19 ตรงกลาง แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว ที่มีผลต่อค่าแรงดันทะลุ ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว มีผลต่อค่าแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าควรปรับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเท่ากับ 40 กรัมต่อตารางเมตร และปรับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อให้ได้ค่าแรงดันทะลุผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดที่ 530 กิโลปาสคาล และมีต้นทุนต่ำที่สุด และจากการวิเคราะห์รูปที่ 4.22 ด้านขวา แสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว ที่มีผลต่อค่ารับแรงกด

แนวงแหวน ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนกับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว มีผลต่อค่าแรงดันทะลุอย่างมีนัยสำคัญ ผลการวิเคราะห์พบว่าควรปรับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเท่ากับ 40 กรัมต่อตารางเมตร และปรับปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตร เพื่อให้ได้ค่ารับแรกดแนววงแหวนผ่านตามมาตรฐานที่กำหนดที่ 250 นิวตัน และมีต้นทุนต่ำที่สุด

4.2.4.5 หาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ

ในการหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน เลือกใช้หลักการ Optimization โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ของโปรแกรม Minitab สรุปผลได้ว่า ระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมต้องทำการปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและต้องทำการปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร จึงจะทำให้คุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่าผ่านเกณฑ์ตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ รูปที่ 4.20 แสดงรายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผล Optimization Plot คุณภาพกระดาษ

Response Optimization
Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Brightness of Paper	Minimum	83.5	83.5	83.7	1	1
Burst	Minimum	530.0	530.0	550.0	1	1
RCT	Minimum	250.0	250.0	270.0	1	1

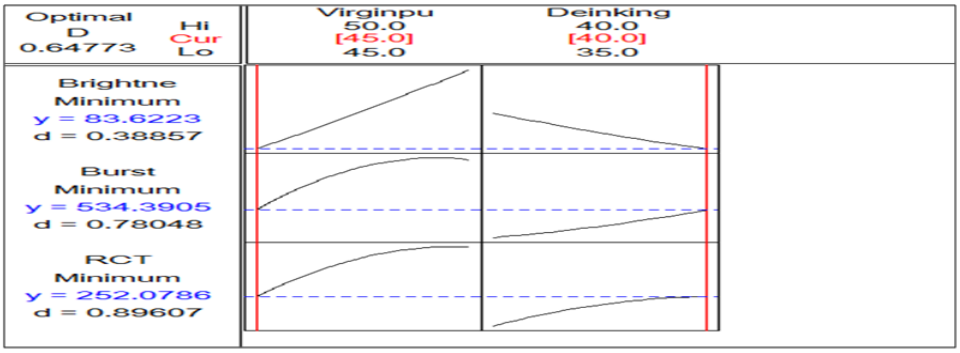
Global Solution

Virgin pulp Dosage = 45
Deinking Dosage = 40

Predicted Responses

Brightness of Paper = 83.622, desirability = 0.38857
Burst = 534.390, desirability = 0.78048
RCT = 252.079, desirability = 0.89607

Composite Desirability = 0.64773



รูปที่ 4.20 รายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผล Optimization Plot คุณภาพกระดาษ

บทที่ 5

การทดสอบยืนยันผลและการตรวจติดตามควบคุม

การทดสอบยืนยันผลและตรวจติดตามเป็นขั้นตอนสุดท้ายของงานวิจัยนี้ โดยมีการนำแผนภูมิควบคุมเข้ามาใช้เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตให้อยู่ในค่าควบคุม รวมถึงมีการวัดสมรรถนะของกระบวนการ ซึ่งในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อเป็นการนำสภาวะที่ทำให้ได้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุดมาทำการผลิตอย่างต่อเนื่อง คือ ปรับปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ปรับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion 110 องศาเซลเซียส และ 25% ตามลำดับ ส่วนในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษนำระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมของการปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ที่ทำให้คุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานกำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดมาทำการผลิตอย่างต่อเนื่อง คือ ปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร และในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการสรุปผลของการลดต้นทุนการผลิตจากงานวิจัยนี้

5.1 การประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมในขั้นตอนของการบวนการเตรียมเยื่อ

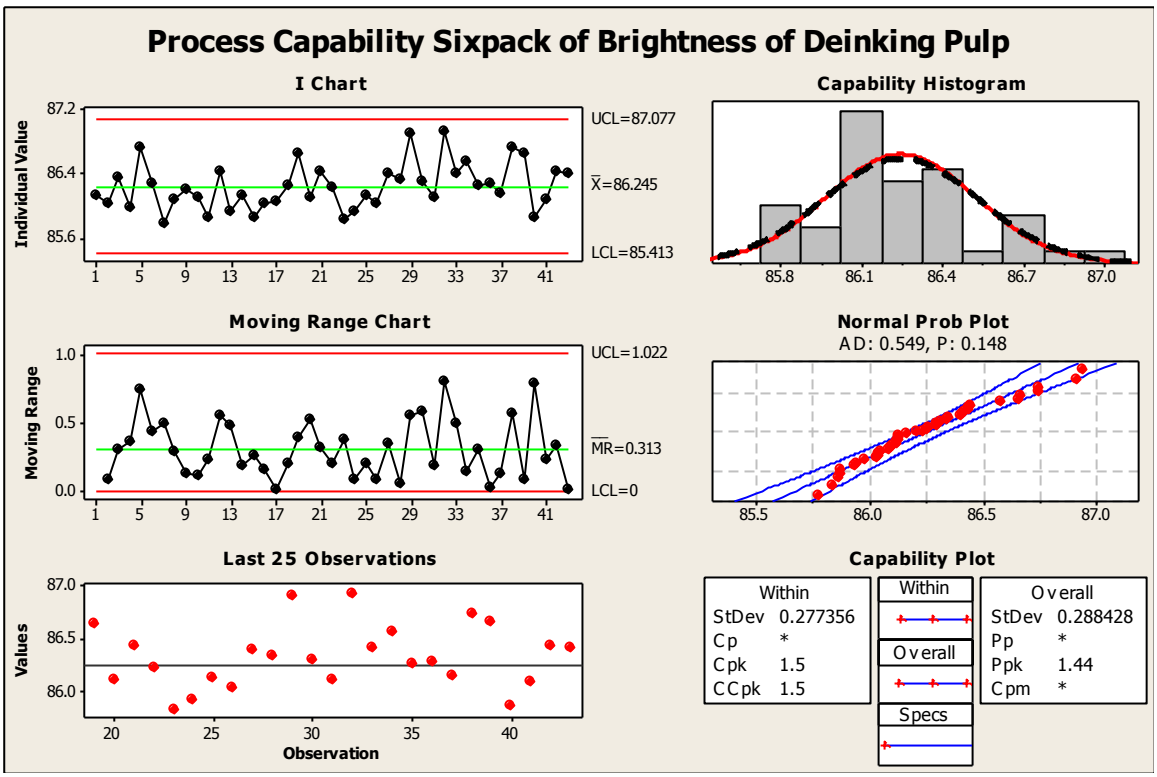
ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อ ซึ่งโรงงานกรณีศึกษามีรูปแบบในการเก็บข้อมูลความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ทุกๆ 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นข้อมูลชนิดต่อเนื่อง ซึ่งได้ข้อมูลดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อ

No. of Experiment	Brightness of Deinking Pulp
1	86.13
2	86.04
3	86.35
4	85.98
5	86.74
6	86.29
7	85.78
8	86.08
9	86.21
10	86.1
11	85.87
12	86.43
13	85.94
14	86.13
15	85.87
16	86.03
17	86.05
18	86.25
19	86.65
20	86.12
21	86.44
22	86.23
23	85.84
24	85.93
25	86.13
26	86.04
27	86.4
28	86.34
29	86.91
30	86.31
31	86.12
32	86.93
33	86.42
34	86.57
35	86.26

No. of Experiment	Brightness of Deinking Pulp
36	86.29
37	86.16
38	86.74
39	86.66
40	85.86
41	86.09
42	86.43
43	86.31

การเก็บข้อมูลความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ทุกๆ 2 ชั่วโมง ซึ่งเป็นข้อมูลชนิดต่อเนื่อง ต่อเนื่อง ดังนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงทำการเลือกแผนภูมิที่มีความเหมาะสมสำหรับวิทยานิพนธ์นี้คือ แผนภูมิควบคุม I - MR Chart ซึ่งมีการเก็บข้อมูลผลการทดลอง โดยปรับปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ปรับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion 110 องศาเซลเซียส และ 25% ตามลำดับ ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ได้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุด รูปที่ 5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน โดยกำหนดเฉพาะค่า Lower Spec ที่ขอบเขตล่างเท่านั้น โดยกำหนดเท่ากับ 85 เนื่องจากค่าเป้าหมายของความขาวในขั้นตอนของกระบวนเตรียมเยื่ออยู่ที่ 86 ซึ่งค่า 85 เป็นค่า Tolerance ที่ต่ำที่สุดจากค่าเป้าหมายที่ยอมรับได้ ซึ่งกรณีที่ค่าความขาวจากกระบวนการเตรียมเยื่อต่ำกว่าค่านี้ อาจส่งผลให้ค่าความขาวของกระดาษไม่ได้ตามที่มาตรฐานกำหนด



รูปที่ 5.1 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

จากผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อเท่ากับ 86.24±0.27 ซึ่งค่า UCL และ LCL มีค่าเท่ากับ 87.077 และ 85.413 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าขอบเขตบนและล่างของแผนภูมิควบคุมเพื่อใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการ ซึ่งค่า UCL และ LCL กำหนดค่ามาจากค่าเฉลี่ย $\pm 3\sigma$ (โดยที่ σ มีค่าเท่ากับ 0.277) และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.5 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี (เกณฑ์ทั่วไปสำหรับกระบวนการควรมีค่า C_{pk}>1.33)

5.2 การประยุกต์ใช้แผนภูมิควบคุมในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ

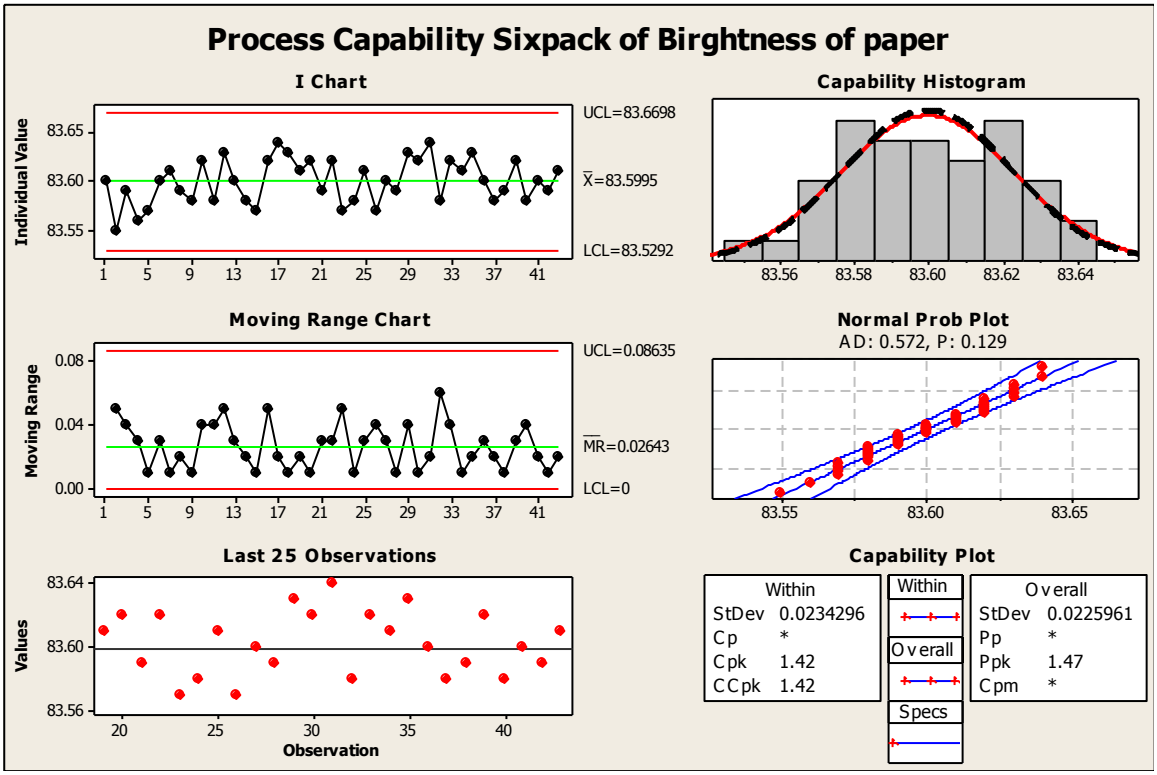
ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษทำการปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากที่เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนได้ผ่านการเพิ่มความขาวจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์จากกระบวนการเตรียมเยื่อแล้ว ซึ่งโรงงานกรณีศึกษามีรูปแบบในการเก็บข้อมูลคุณภาพกระดาษต่อเนื่องทุกม้วนกระดาษที่ผ่านการผลิต หรือทุกๆ 50 นาที ซึ่งกระดาษ 1 ม้วนมีน้ำหนักประมาณ 25 ตัน โดยควบคุมคุณภาพกระดาษ 3 ค่า ความขาวต้องไม่น้อยกว่า 83.5

ค่าแรงดันทะลุและค่ารับแรงกดแนววงแหวนต้องไม่น้อยกว่า 530 กิโลปาสคาล และ 250 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งได้ข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ตารางแสดงคุณภาพกระดาษ

No.	กระบวนการเตรียมเยื่อ	คุณภาพกระดาษจากกระบวนการผลิตกระดาษ			Quality
Experiment	Brightness of Deinking Pulp	Birghtness of paper	Burst (kpa)	RCT (N)	Remark
1	86.13	83.60	546	263	PASS
2	86.04	83.55	545	269	PASS
3	86.35	83.59	549	265	PASS
4	85.98	83.56	545	268	PASS
5	86.74	83.57	550	266	PASS
6	86.29	83.60	547	263	PASS
7	85.78	83.61	545	265	PASS
8	86.08	83.59	539	262	PASS
9	86.21	83.58	542	265	PASS
10	86.10	83.62	545	266	PASS
11	85.87	83.58	547	268	PASS
12	86.43	83.63	548	271	PASS
13	85.94	83.60	547	270	PASS
14	86.13	83.58	551	269	PASS
15	85.87	83.57	553	271	PASS
16	86.03	83.62	550	267	PASS
17	86.05	83.64	543	265	PASS
18	86.25	83.63	545	266	PASS
19	86.65	83.61	545	262	PASS
20	86.12	83.62	548	269	PASS
21	86.44	83.59	551	266	PASS
22	86.23	83.62	550	267	PASS
23	85.84	83.57	541	268	PASS
24	85.93	83.58	547	263	PASS
25	86.13	83.61	550	269	PASS
26	86.04	83.57	542	265	PASS
27	86.40	83.60	546	266	PASS
28	86.34	83.59	548	262	PASS
29	86.91	83.63	544	264	PASS
30	86.31	83.62	543	269	PASS
31	86.12	83.64	548	263	PASS
32	86.93	83.58	545	261	PASS
33	86.42	83.62	555	269	PASS
34	86.57	83.61	543	263	PASS
35	86.26	83.63	548	260	PASS
36	86.29	83.60	540	260	PASS
37	86.16	83.58	543	261	PASS
38	86.74	83.59	548	262	PASS
39	86.66	83.62	546	260	PASS
40	85.86	83.58	543	264	PASS
41	86.09	83.60	548	267	PASS
42	86.43	83.59	550	263	PASS
43	86.41	83.61	546	261	PASS

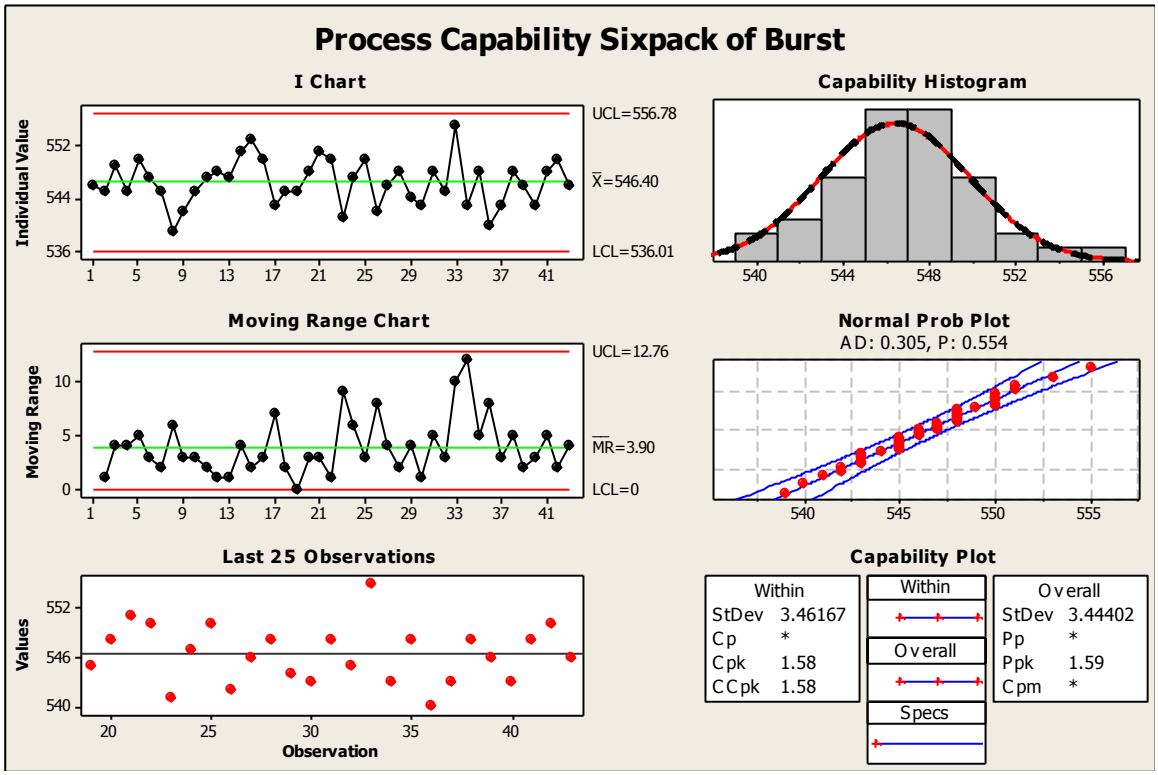
การเก็บข้อมูลความขาวของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวน ของม้วนกระดาษที่ผ่านการผลิตทุกม้วน ซึ่งเป็นข้อมูลชนิดต่อเนื่อ ดังนั้นผู้จัดทำวิทยานิพนธ์จึงทำการเลือกแผนภูมิที่มีความเหมาะสมสำหรับวิทยานิพนธ์นี้คือ แผนภูมิควบคุม I - MR Chart ซึ่งมีการเก็บข้อมูลผลการทดลองโดยปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเป็นขั้นตอนหลังจากที่เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนได้ผ่านการเพิ่มความขาวจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อแล้ว ซึ่งเป็นสภาวะที่ทำให้ได้ค่าคุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่าผ่านเกณฑ์มาตรฐานตามที่โรงงานกรณีศึกษากำหนด แสดงได้ดังรูปที่ 5.2-5.4



รูปที่ 5.2 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองความขาวของกระดาษ

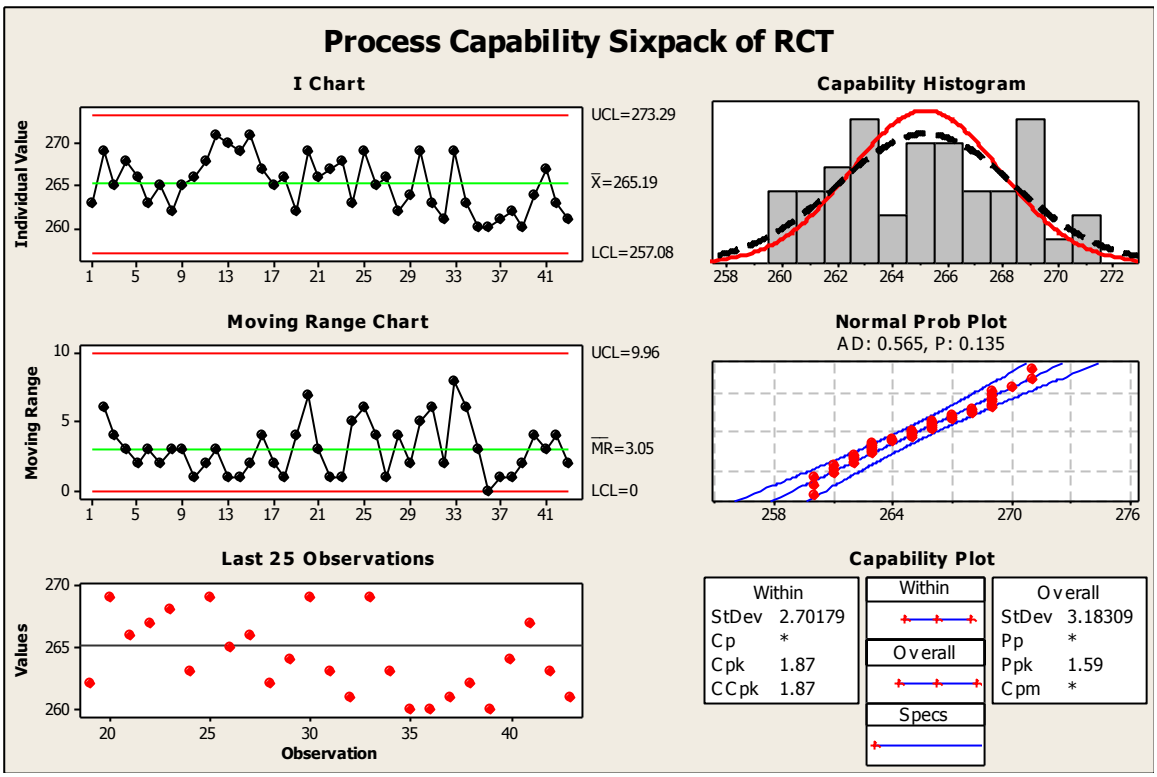
จากการปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร โดยกำหนดเฉพาะค่า Lower Spec ของความขาวของกระดาษเท่านั้น โดยกำหนดค่าเท่ากับ 83.5 เนื่องจากค่าเป็นค่า Tolerance ต่ำที่สุดของความขาวกระดาษที่ยอมรับได้ โดยกำหนดค่านี้จากค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยของความขาวกระดาษเท่ากับ 83.59 $\pm$0.02 ซึ่งค่า UCL และ LCL มีค่าเท่ากับ 83.66 และ 83.52 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าขอบเขตบนและล่างของแผนภูมิควบคุมเพื่อใช้ในการตรวจจับ

ความผิดปกติของกระบวนการ ซึ่งค่า UCL และ LCL กำหนดค่ามาจากค่าเฉลี่ย $\pm 3\sigma$ (โดยที่ σ มีค่าเท่ากับ 0.023) และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.42 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี (เกณฑ์ทั่วไปสำกรับกระบวนการควรมีค่า C_{pk}>1.33)



รูปที่ 5.3 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่าแรงดันทะลุ (Burst)

จากการปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร โดยกำหนดเฉพาะค่า Lower Spec ของค่าความแรงดันทะลุ โดยกำหนดค่าเท่ากับ 530 เนื่องจากค่าเป็นค่า Tolerance ต่ำที่สุดของค่าแรงดันทะลุของกระดาษที่ยอมรับได้ โดยกำหนดค่านี้จากค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันทะลุเท่ากับ 546.40 ± 3.46 ซึ่งค่า UCL และ LCL มีค่าเท่ากับ 556.78 และ 536.01 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าขอบเขตบนและล่างของแผนภูมิควบคุมเพื่อใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการ ซึ่งค่า UCL และ LCL กำหนดค่ามาจากค่าเฉลี่ย $\pm 3\sigma$ (โดยที่ σ มีค่าเท่ากับ 3.461) และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.58 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี (เกณฑ์ทั่วไปสำกรับกระบวนการควรมีค่า C_{pk}>1.33)



รูปที่ 5.4 การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT)

จากการปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร โดยกำหนดเฉพาะค่า Lower Spec ของค่ารับแรงกดแนววงแหวน โดยกำหนดค่าเท่ากับ 250 เนื่องจากค่านี้เป็นค่า Tolerance ต่ำที่สุดของค่าค่ารับแรงกดแนววงแหวนของกระดาษที่ยอมรับได้ โดยกำหนดค่านี้จากค่ามาตรฐานของผลิตภัณฑ์ ผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยของค่ารับแรงกดแนววงแหวนเท่ากับ 266.19 ± 2.70 ซึ่งค่า UCL และ LCL มีค่าเท่ากับ 273.29 และ 257.08 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าขอบเขตบนและล่างของแผนภูมิควบคุมเพื่อใช้ในการตรวจจับความผิดปกติของกระบวนการ ซึ่งค่า UCL และ LCL กำหนดค่ามาจากค่าเฉลี่ย $\pm 3\sigma$ (โดยที่ σ มีค่าเท่ากับ 2.701) และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.87 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี (เกณฑ์ทั่วไปสำกรับกระบวนการควรมีค่า $C_{pk}>1.33$)

5.3 การลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว

ก่อนที่จะดำเนินงานวิจัยนี้ ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อไม่มีการใส่สารเคมีเพื่อเพิ่มความขาวให้กับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน และในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษได้กำหนดมาตรฐานปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ปริมาณ 50 และ 35 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ

ซึ่งงานวิจัยนี้ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อได้มีการนำสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ไปใช้ปรับปรุงคุณภาพความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่งหลังจากสามารถเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนแล้ว ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษสามารถลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวจาก 50 กรัมต่อตารางเมตร ลดลงเหลือ 45 กรัมต่อตารางเมตร และสามารถเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจาก 35 กรัมต่อตารางเมตร เพิ่มเป็น 50 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ

การลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว 1 กรัมต่อตารางเมตร สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 169 บาทต่อตันกระดาษ งานวิจัยนี้สามารถลดต้นทุนปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวได้ 5 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ลดลง 845 บาทต่อตันกระดาษ

การเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน 1 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น 83 บาทต่อตันกระดาษ งานวิจัยนี้เพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 5 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เพิ่มขึ้น 415 บาทต่อตันกระดาษ

จากเดิมการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อ ไม่มีการใส่สารเคมีเพื่อเพิ่มความขาวให้กับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน งานวิจัยนี้มีการเพิ่มการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ปริมาณ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ คิดเป็นต้นทุนสารเคมีที่เพิ่มขึ้น 35 บาทต่อตันกระดาษ ดังนั้นการลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวของงานวิจัยนี้ สามารถคำนวณได้จาก

การลดต้นทุนการผลิต = ต้นทุนการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ลดลงจากมาตรฐานการผลิต –
ต้นทุนการใช้เยื่อกระดาษพิมพ์เขียนที่เพิ่มขึ้นจากมาตรฐานการผลิต –
ต้นทุนสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่เพิ่มขึ้นจากมาตรฐานการผลิต

การลดต้นทุนการผลิต = 845 – 415 – 35 = 395 บาทต่อตันกระดาษ

อ้างอิงมูลของโรงงานกรณีศึกษาปี 2555 วางแผนผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวที่ปริมาณ 29,610 ตันต่อปี ดังนั้นงานวิจัยนี้สามารถประเมินการลดต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องสีขาวได้ 11.69 ล้านบาทต่อปี

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและเยื่อใยยาวของการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวโดยยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าให้ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ซึ่งในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อต้องการหาสภาวะที่ดีที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ทำให้ได้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุด และในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษต้องการหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ทำให้คุณภาพด้านความขาวและความแข็งแรงของกระดาษได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด และทำการทดสอบยืนยันผลและตรวจติดตามควบคุม โดยบทสรุปของการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

6.1 สรุปสภาวะที่ดีที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

จากผลจากการทดลองในระดับ Lab Scale เพื่อคัดกรองปัจจัยสามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

ระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน คือ ต้องทำการปรับปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ปรับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion 110 องศาเซลเซียส และ 25% ตามลำดับ จึงจะทำให้ได้ค่าค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุดตามวัตถุประสงค์ของการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 86

ส่วนสภาวะของการตั้งค่าของเครื่องจักร Hot Dispersion ที่ให้ผลของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนได้น้อยกว่าที่สภาวะอื่นๆ ได้แก่ ที่สภาวะของอุณภูมิ 105 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน 20% เนื่องจากสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์จะทำปฏิกิริยาเพิ่มความขาวได้ดีที่อุณหภูมิสูง และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เหมาะสม ส่วนการเพิ่มปริมาณสารเคมีที่มากกว่า 1.5 กิโลต่อตันเยื่อไม่ส่งผลให้ค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากสารเคมีแต่ละ

ชนิดจะมีช่วงของการทำปฏิกิริยาที่จำกัด การเพิ่มปริมาณสารเคมีที่มากเกินไปทำให้สิ้นเปลืองต้นทุนในการทดลองโดยเปล่าประโยชน์

6.2 สรุปสภาวะที่ดีที่สุดของสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษทำการศึกษาหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ทำให้คุณภาพด้านความขาวและความแข็งแรงของกระดาษได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด และสรุปสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวกับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 45 และ 40 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ

ความขาวของกระดาษไม่ควรพิจารณาเฉพาะความขาวของกระดาษที่ได้จากการวัดค่าเท่านั้น ต้องพิจารณา Apperance ของกระดาษโดยรวมร่วมด้วย คือ ต้องนำกระดาษไปส่องไฟเพื่อดูลักษณะการเรียงตัวของเส้นใยและดูว่ากระดาษมีลักษณะหน้าลายหรือไม่ เพราะถึงแม้ว่าความขาวของกระดาษที่ได้จากการวัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน แต่กระดาษมีลักษณะหน้าลาย ก็ไม่สามารถนำกระดาษนี้ไปส่งขายให้ลูกค้าได้ ซึ่งจัดว่าเป็นกระดาษที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (Off Grade) รูปที่ 6.1 ลักษณะกระดาษหน้าลาย ซึ่งเกิดจากการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่น้อยเกินไป (44 กรัมต่อตารางเมตร)

รูปที่ 6.1 ลักษณะกระดาษหน้าลาย

6.3 สรุปการลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว

งานวิจัยนี้ได้มีการนำสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์มาใช้เพื่อปรับปรุงคุณภาพความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของกระการเตรียมเยื่อ ซึ่งทำให้ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษสามารถลดปริมาณการใช้เยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวจาก 50 กรัมต่อตาตางเมตร ลดลงเหลือ 45 กรัมต่อตารางเมตร ด้วยการเพิ่มการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนทดแทนจาก 35 กรัมต่อตาตางเมตร เพิ่มขึ้นเป็น 40 กรัมต่อตารางเมตร สามารถสรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 สรุปการลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว

รายละเอียด	**เพิ่มขึ้น/ ลดลง**	**ปริมาณ**	**ราคาต่อหน่วย (บาท)**	**ต้นทุน (บาทต่อตันกระดาษ)**
ต้นทุนเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาว	ลดลง	5 g/m^2	169	= 169 x 5 = 845
ต้นทุนเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน	เพิ่มขึ้น	5 g/m^2	83	= 83 x 5 = 415
ต้นทุนสารเคมี	เพิ่มขึ้น	1.35 kg/Ton Pulp	71	= 71 x 1.35 x 0.365* = 35
ต้นทุนรวม	**ลดลง**			**= 845 - 415 - 35** **= 395**

*การผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 1 ตัน ใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน 0.365 ตัน

6.4 สรุปการยืนยันผลการทดลองโดยทำการผลิตจริงต่อเนื่อง

ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อปรับปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ที่ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ปรับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion 110 องศาเซลเซียส และ 25% ตามลำดับ ได้ค่าเฉลี่ยของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เท่ากับ 86.24±0.27 และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.50 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ดี

ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ ปรับปริมาณเยื่อสีขาวใยสั้นและใยยาวที่ 45 กรัมต่อตารางเมตรและปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร ผลการ

ทดลองได้ค่าเฉลี่ยของความขาวกระดาษเท่ากับ 83.59±0.02 และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.42 ผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยของค่าแรงดันทะลุเท่ากับ 546.40±3.46 และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.58 ผลการทดลองได้ค่าเฉลี่ยของค่ารับแรงกดแนววงแหวนเท่ากับ 266.19±2.70 และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่าเท่ากับ 1.87 สามารถรุปข้อมูลได้ดังตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 สมรรถนะกระบวนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาว

ราละเอียด	**ค่าควบคุม / ค่าเป้าหมาย**	**ค่าเฉลี่ย**	C_{PK}
ความขาวเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน	86.0	86.24±0.27	1.50
ความขาวของกระดาษ	83.5	83.59±0.02	1.42
ค่าแรงดันทะลุ	530 กิโลปาสคาล	546.40±3.46	1.58
ค่ารับแรงกดแนววงแหวน	250 นิวตัน	266.19±2.70	1.87

6.5 **ข้อเสนอแนะ**

1. สามารถนำข้อมูลในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ หรือ การผลิตกระดาษประเภทอื่นๆที่มีลักษณะใกล้เคียงกันได้
2. สามารถขยายผลการปรับลดปริมาณการใช้เยื่อโดยใช้เศษกระดาษทดแทน ในการผลิตกระดาษเกรดอื่นๆของโรงงานกรณีศึกษาได้
3. หลังจากที่ได้มีการปรับปรุงกระบวนการใดๆ ควรมีการสอนงานแก่พนักงานผู้ปฏิบัติงานประจำและจัดทำมาตรฐานการปฏิบัติงาน เพื่อพนักงานเกิดความเข้าใจและสามารถปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งยังทำให้กระบวนการที่ได้มีการปรับปรุงไปแล้วมีสมรรถภาพของกระบวนการสูงอย่างต่อเนื่อง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ.2553.หลักการการควบคุมคุณภาพ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น),

ดำรงค์ ทวีแสงสกุลไทย.2553.การควบคุมคุณภาพสำหรับนักบริหารและกรณีศึกษา. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพมหานคร: เอ็มแอนด์อี,

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์.2551.การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง.กรุงเทพมหานคร: ท้อป,

ปารเมศ ชุติมา.2545.การออกแบบทดลองทางวิศวรรม.กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์วิทยาลัย,

ลำปาง แสงจันทร์.2549.การควบคุมคุณภาพเชิงสถิติ. เชียงใหม่ : สถานบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ม.เชียงใหม่

ภาษาอังกฤษ

D.C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiment*, USA: John Willey & Sons, 2005.

Jian, W.; Yong, C.; Yi, W.; Shi, Y. and Han, Y. (2011) Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology. Water Research, 45 : 5633 – 5640

Margarita, C.; Monica, P.; Selma, G. and Ferreira L. (2005) Biosorption of chromium using factorial experimental design. Process Biochemistry, 40: 779-788

Mevra, Y.C. and Ergun, Y. (2006) Phosphate removal from water by fly ash: Factorial experimental design. Journal of Hazardous Materials, B135: 165-170

Nirdosha, G. and Setunge, S. (2006) Formulation and process modeling of particleboard production using hardwood saw mill wastes using experimental design. Composite Structures, 75: 520-523

Päivi, F. and Joseph, G. (1997) Bleaching mixed office waste to high brightness. Tappi Journal, 77: 253-259

Ross, J. (1998) Taguchi Techniques for Quality Engineering. New York : McGraw-Hill Book Company,

Toraj, M. and Mohammad, (2009) A.S. Application of Taguchi method in optimization of desalination by vacuum membrane distillation. 249: 83–89

Wasshausen, J.; Rangamannar, G.; Amyotte, R. and Cordy, B. (2006) A novel process for improved bleaching of mechanical pulps using a mixture of reductive agents. Pulp & Paper Canada, 107 : 44-4

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปณิธาน อินทร์ติยะ เกิดเมื่อวันที่ 7 มกราคม พ.ศ. 2530 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2551 หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2553