การลดความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษ

นางสาวณัฐพร สุขป้อม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
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 University Graduate School.

BRIGHTNESS VARIATION REDUCTION OF PULP SENT TO A PAPER MILL

Miss Nattaporn Sookpom

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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 2013

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษ
โดย	นางสาวณัฐพร สุขป้อม
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน แสนจันทร์ฒิไชย)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ณัฐพร สุขป้อม : การลดความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษ. (BRIGHTNESS VARIATION REDUCTION OF PULP SENT TO A PAPER MILL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ, 81 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสูตรการผสมเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างเริ่มต้นแตกต่างกันจากขั้นตอน EOP และ D1 เพื่อลดความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อแผ่นแห้ง งานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมแบบหาพื้นผิวผลตอบร่วมกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของการผสมเยื่อในแต่ละช่วงความขาวสว่าง 7 ช่วง เพื่อให้เยื่อหลังการผสมมีค่าความขาวสว่างอยู่ที่ 86% และค่า pH อยู่ที่ 5.25 สูตรการผสมเยื่อประกอบไปด้วยการกำหนดอัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดซัลฟูริคที่เติม จากผลการทดลองพบว่าเมื่ออัตราการผสมเยื่อ EOP สูงขึ้นค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมลดลงและมีค่า pH สูงขึ้น และเมื่อใช้กรดเพิ่มขึ้นจะทำให้เยื่อหลังผสมมีค่า pH ลดลง และทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อมีค่าลดลง เมื่อนำค่าระดับที่เหมาะสมของอัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดซัลฟูริคไปใช้ในสายการผลิตจริงพบว่าสามารถทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงผลิตกระดาษมีค่าใกล้เคียงเป้าหมายมากขึ้นและมีความแปรปรวนลดลง โดยไม่กระทบต่อคุณภาพเยื่อแห้งเกรดอื่น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก .....

ปีการศึกษา 2556

5470936721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS: DESIGN OF EXPERIMENT / RESPONSE SURFACE METHODOLOGY / VARIATION REDUCTION / PULP TO PAPER MILL

NATTAPORN SOOKPOM: BRIGHTNESS VARIATION REDUCTION OF PULP SENT TO A PAPER MILL. ADVISOR: ASST. PROF. NAPASSAVONG ROJANAROWAN, Ph.D., 81 pp.

This research has the objective to determine the mixing formula of pulp with different brightness from the EOP and D1 stages to reduce the variation of the brightness of pulp sent to the paper mill during the changing period of dry pulp grades. This research uses the Design of Experiment technique with the response surface design type and the regression technique to find optimal mixing formula for each of the seven brightness levels to obtain the target brightness of 86% and the pH of 5.25. The mixing formulas are determined by the pulp mixing percentage and the sulfuric acid consumption. The experimental results reveal that when using higher EOP mixing ratio, the brightness decreases and the pH increases. Regarding the effect of the sulfuric acid, when increase the sulfuric acid, the brightness and the pH decrease. After implementing the optimal formula in the production line, the mean of pulp brightness is closer to the target and the brightness variation decreases without affecting the quality of other pulp grades.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department: Industrial Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ให้ข้อคิดเห็นต่างๆ คำแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขข้อผิดพลาดในการจัดทำวิทยานิพนธ์จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

และกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.อังศุมาลิน แสนจันทร์ฒิไชย ประธานกรรมการ ผศ.ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ และ ผศ.ดร.บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล กรรมการ ที่ได้ช่วยเหลือและปรับปรุงข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์

ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ร่วมงานในโรงงานกรณีศึกษา บุคลากรหน่วยงานควบคุมคุณภาพและหน่วยงานฟอกเยื่อ ที่ช่วยให้ข้อมูล ร่วมการดำเนินงาน และเสนอแนะข้อคิดเห็นต่างๆ

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้ที่สนใจที่จะนำไปเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 13
1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย 13
1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย 14
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 14
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 15
2.1 สหสัมพันธ์ (Correlation) 15
2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง 16
2.2.1 สมมติฐานของความเป็นปกติ 17
2.2.2 การพล็อตส่วนตกค้างตามลำดับเวลา 17
2.2.3 การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต 17
2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ 18
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 21
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 24
3.1 การระบุปัญหา 24
3.2 กระบวนการวัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์ 24
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล 24
3.4 การปรับปรุงกระบวนการและวิธีดำเนินการทดลอง 25
3.4.1 การกำหนดปัจจัยและแบ่งช่วงระดับเพื่อจัดกลุ่มชุดการทดลอง 25
3.4.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการเคมี 30
3.4.3 วิธีการวิเคราะห์คุณภาพเยื่อ 31
3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำสูตรการผสมเยื่อ 34

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.4.5 การทดลองในระดับโรงงาน 34
3.5 การควบคุมการดำเนินงาน 34
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง 35
4.1 ผลการทดลอง 35
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง 38
4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าความขาวสว่าง 38
4.2.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) 38
4.2.1.2 การทดสอบสมมติฐานของการเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) 40
4.2.1.3 การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability) 41
4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง 43
4.2.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) 43
4.2.2.2 การทดสอบสมมติฐานของการเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) 44
4.2.2.3 การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability) 46
4.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างและค่า pH 47
4.3 การหาค่าปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามค่าเป้าหมาย 54
บทที่ 5 การทดลองและการควบคุมในระดับโรงงาน 62
5.1 การควบคุมการดำเนินงานในระดับโรงงาน 64
5.2 การวางแผนการเก็บข้อมูลคุณภาพเยื่อขณะทำการทดลอง 64
5.3 ทำการทดลอง 65
5.4 สรุปผลการผสมเยื่อในระดับโรงงาน 66
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ 72
6.1 ขั้นตอนการนิยามปัญหา 72
6.2 ขั้นตอนการศึกษาตัวแปรเบื้องต้นก่อนทำการทดลอง 72
6.3 ขั้นตอนการวางแผนและทำการทดลอง 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

6.4 ขั้นตอนการสรุปผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง 74
6.5 ขั้นตอนการทดลองในระดับโรงงาน 75
6.6 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในงานวิจัย 75
6.7 ข้อเสนอแนะ 75
รายการอ้างอิง 77
ภาคผนวก 78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 82

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

รูปที่ 1. 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเยื่อตั้งแต่กระบวนการต้มเยื่อจนถึงกระบวนการฟอกเยื่อส่งให้หน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้งและโรงกระดาษ 3
รูปที่ 1. 2กระบวนการบีบล้างเยื่อ (Wash press) ของขั้นตอน EOP และ D1 3
รูปที่ 1. 3 ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างรายเดือน 4
รูปที่ 1. 4 ค่าเฉลี่ยความหนืดของเยื่อรายเดือน 5
รูปที่ 1. 5 ค่าเฉลี่ยการระบายน้ำของเยื่อรายเดือน 5
รูปที่ 1. 6 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่างของเยื่อรายเดือน 5
รูปที่ 1. 7 ค่าเฉลี่ยปริมาณสิ่งปนเปื้อนของเยื่อรายเดือน 5
รูปที่ 1. 8 ร้อยละปริมาณเยื่อที่แยกช่วงค่าความขาวสว่างตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด 6
รูปที่ 1. 9 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างรายเดือนเยื่อของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษ 7
รูปที่ 1. 10 (a-e) ค่าความสามารถของกระบวนการพิจารณาแยกรายคุณสมบัติ 8
รูปที่ 1. 11 Boxplot ปริมาณการใช้สาร OBA เมื่อความขาวสว่างของเยื่อมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ (< 0.6) และมากกว่าเกณฑ์ (> 0.6) 10
รูปที่ 1. 12 Boxplot ปริมาณการใช้สาร DYE เมื่อความขาวสว่างของเยื่อมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ (< 0.6) และมากกว่าเกณฑ์ (> 0.6) 10
รูปที่ 2. 1 การออกแบบประสมส่วนกลาง สำหรับ (a) k=2 และ (b) k=3 ปัจจัย 19
รูปที่ 2. 2 รูปแบบการทดลองสำหรับสองปัจจัย (a) แบบแฟคทอเรียลสามระดับ 23
รูปที่ 3. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และขั้นตอน D_1 26
รูปที่ 3. 2 แผนภาพการแบ่งชุดการทดลองตามระดับความสัมพันธ์ของค่าความขาวสว่าง 28
รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างของเยื่อ 31
รูปที่ 3. 4 เครื่องมือวัดค่าความขาวสว่าง Technidyne Color Touch PC 32
รูปที่ 3. 5 วิธีการวัดค่า pH ของตัวอย่างเยื่อ และเครื่อง pH meter ที่ใช้ในการวิเคราะห์ 32
รูปที่ 3. 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเยื่อ 33
รูปที่ 3. 7 เครื่อง Rapid dryer และเครื่องชั่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเยื่อ 34
รูปที่ 4. 1(a-g) Normal Probability Plot ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมชุดที่ 1 ถึง 7 40
รูปที่ 4. 2 (a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างกับเวลาที่เก็บข้อมูลชุดที่ 1 ถึง 7 42
รูปที่ 4. 3 (a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างกับค่าที่ถูกฟิตชุดที่ 1 ถึง 7 43
รูปที่ 4. 4 (a-g) Normal Probability Plot ค่า pH ของเยื่อหลังการผสมชุดที่ 1 ถึง 7 45

รูปที่ 4. 5 4.5(a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่า pH กับเวลาที่เก็บข้อมูลชุดที่ 1 ถึง 7 46
รูปที่ 4. 6 (a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่า pH กับค่าที่ถูกฟิตชุดที่ 1 ถึง 7 48
รูปที่ 4. 7 (a-g) กราฟผลหลัก (Main effect plot) ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการทดลองผสมเยื่อชุดที่ 1-7 52
รูปที่ 4. 8 (a-g) กราฟผลหลัก (Main effect plot) ของค่า pH หลังการทดลองผสมเยื่อชุดที่ 1 ถึง 7 55
รูปที่ 4. 9 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 1 56
รูปที่ 4. 10 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 2 57
รูปที่ 4. 11 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 3 57
รูปที่ 4. 12 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 4 58
รูปที่ 4. 13 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 5 58
รูปที่ 4. 14 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 6 59
รูปที่ 4. 15 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 7 59
รูปที่ 4. 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP 61
รูปที่ 4. 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดที่เติม 61
รูปที่ 5. 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเยื่อและสายการปรับปรุงเพื่อผสมเยื่อจากขั้นตอนEOP . 63
รูปที่ 5. 2 ท่อส่งเยื่อ EOP หลังการปรับปรุงเพื่อส่งเยื่อไปยังถัง LC โดยตรง 64
รูปที่ 5. 3 จุดที่ส่งเยื่อออกจากขั้นตอน EOP และจุดที่ต่อนำเยื่อเข้าสู่ขั้นตอน D1 64
รูปที่ 5. 4 ค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษก่อนปรับปรุงกระบวนการ 68
รูปที่ 5. 5 ค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษขณะทำการทดลองผสมเยื่อ 69
รูปที่ 5. 6 ค่า pH ของเยื่อส่งโรงกระดาษก่อนการปรับปรุงกระบวนการ 69
รูปที่ 5. 7 ค่า pH ของเยื่อส่งโรงกระดาษขณะทำการทดลองผสมเยื่อ 69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1. 1 ปริมาณการใช้สารเคมี OBA และ DYE ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแยกตามช่วงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างที่ได้ตามเกณฑ์และไม่ได้ตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด 9
ตารางที่ 2. 1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 16
ตารางที่ 3. 1 การแบ่งชุดการทดลองและแยกระดับค่าความขาวสว่างเยื่อ EOP และ D1 27
ตารางที่ 3. 2รูปแบบการทดลอง (Design Matrix) ที่ใช้ในงานวิจัย 28
ตารางที่ 3. 3 การระบุค่าของปัจจัยตามระดับการทดลอง 29
ตารางที่ 4. 1 ผลการทดลอง 35
ตารางที่ 4. 2 สรุปค่า p-value ของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างของผลการทดลองทั้ง 7 ชุด พร้อมสมการความสัมพันธ์และค่า R-Sq และ R-Sq(adj) 50
ตารางที่ 4. 3 สรุปค่า p-value ของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่า pH ของผลการทดลองทั้ง 7 ชุด พร้อมสมการความสัมพันธ์และค่า R-Sq และ R-Sq(adj) 53
ตารางที่ 4. 4 การกำหนดค่า Weight และ Important เพื่อใช้เทคนิค Response Optimizer ในการหาค่าปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามค่าเป้าหมาย 56
ตารางที่ 4. 5 สภาวะนำเข้าที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ของการทดลองทั้ง 7 ชุด 60
ตารางที่ 5. 1 สูตรการผสมเยื่อแบ่งตามช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP และ D1 65
ตารางที่ 5. 2 ผลการทดลองผสมเยื่อในระดับโรงงาน 67
ตารางที่ 5. 3 สรุปผลการผสมเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดลอง 68
ตารางที่ 5. 4 ผลการทดลองแยกตามสูตรการผสมเยื่อที่มีการทดลองในระดับโรงงาน 70
ตารางที่ 5. 5 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับแต่งค่าความขาวสว่างที่โรงกระดาษเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดลอง 71

บทที่ 1
บทนำ

ในกระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษจากชิ้นไม้สับ มีการใช้สารเคมีหลากหลายประเภท เพื่อให้เยื่อและกระดาษมีสมบัติตามที่ลูกค้าต้องการ เช่น ในกระบวนการผลิตเยื่อ มีการใช้ด่างในการต้มเยื่อเพื่อสกัดลิกนินออกจากชิ้นไม้สับ การใช้สารเคมีฟอกขาวประเภทต่างๆเพื่อเพิ่มความขาวให้แก่เยื่อ การใช้สารเคมีเพื่อกำจัดยางไม้ในเยื่อ และเมื่อนำเยื่อไปเข้าสู่เครื่องจักรผลิตกระดาษก็มีการใช้สารเติมแต่งเพื่อประเภทต่างๆเพื่อปรับสมบัติของกระดาษให้ได้ตรงตามความต้องการก่อนนำไปแปรรูปใช้งาน นับได้ว่าการผลิตเยื่อจึงมีวัตถุดิบที่สำคัญคือชิ้นไม้สับและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต เช่นเดียวกับกระบวนการผลิตกระดาษวัตถุดิบที่สำคัญจึงเป็นน้ำเยื่อที่นำมาขึ้นรูปและสารเคมีที่ใช้ในการเติมแต่งคุณภาพกระดาษ ดังนั้นการควบคุมคุณภาพวัตถุดิบเริ่มต้น หรือการควบคุมคุณภาพเยื่อให้ได้ตามต้องการจึงเป็นหนึ่งปัจจัยที่จะส่งผลต่อคุณภาพกระดาษและปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับแต่ง หากโรงผลิตเยื่อไม่สามารถควบคุมคุณภาพเยื่อซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักของโรงกระดาษให้อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการได้อาจจะส่งผลต่อคุณภาพของกระดาษและสารเคมีที่ต้องใช้ในการเติมแต่งเยื่อในขั้นตอนการขึ้นรูปกระดาษ นั่นหมายถึงต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการควบคุมคุณภาพเยื่อตั้งแต่ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตกระดาษจึงมีความสำคัญ เพื่อทำให้การควบคุมกระบวนการผลิตกระดาษเป็นไปได้โดยง่ายและสามารถลดการสิ้นเปลืองสารเคมีจากการปรับแต่งเยื่อที่ไม่ได้คุณภาพ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษเริ่มตั้งแต่การนำชิ้นไม้สับไปผ่านกระบวนการต้มเยื่อ บีบล้างเยื่อ และนำไปเข้าสู่กระบวนการฟอกเยื่อเพื่อให้เยื่อมีค่าความขาวสว่างมากขึ้น แล้วจึงนำเยื่อที่ได้ไปผสมกับสารเติมแต่งในอัตราส่วนต่างๆ เพื่อปรับสมบัติกระดาษให้ได้ตรงตามความต้องการใช้งาน จากนั้นนำไปทำเป็นแผ่นโดยใช้เครื่องจักรผลิตกระดาษ แล้วจึงนำไปแปรรูปใช้งาน กระบวนการผลิตจะแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนโดยเรียงลำดับตามขั้นตอนการปฏิบัติการจริงภายในโรงงานได้ดังนี้

(1) การผลิตเยื่อ (Pulping)
(2) การเตรียมน้ำเยื่อ (Stock preparation)
(3) การทำแผ่นกระดาษ (Papermaking)
(4) การปรับปรุงสมบัติกระดาษขณะเดินแผ่น (Web modification)
(5) การแปรรูป (Converting)

ในขั้นการเตรียมน้ำเยื่อนี้มีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ เพื่อพัฒนาศักยภาพของเส้นใยโดยการนำเยื่อไปบด และปรับปรุงสมบัติกระดาษให้ได้ตามวัตถุประสงค์การใช้งาน โดยการผสมหรือใส่สารเติมแต่งชนิดต่างๆ ตามอัตราส่วนที่กำหนด ส่วนผสมที่ได้นี้เรียกว่า “น้ำเยื่อ” หรือ “สต็อก” (stock) เยื่อที่นำมาทำกระดาษทุกชนิดจะต้องผ่านการบด (Refining) เพื่อให้เส้นใยเกิดการแตกแขนงเพิ่มศักยภาพของพันธะระหว่างเส้นใย มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับคุณภาพของเยื่อ และผ่านกระบวนการผสมน้ำเยื่อ (Blending) เป็นการเติมสารเติมแต่งลงไปผสมกับเยื่อที่ผ่านการบดแล้วโดย

ผสมในถังใบพัดกวน มีการใช้สารเคมีเพื่อปรับค่าความขาวสว่างของเยื่อ (Brightness) มีการนำน้ำจากกระบวนการขึ้นรูปกระดาษวนกลับมาใช้ในการปรับค่าความเป็นกรดด่างของเยื่อ (pH) เพื่อให้คุณภาพเยื่อเหมาะสมกับกระบวนการผลิตกระดาษมากที่สุด ดังนั้นคุณภาพเยื่อที่เป็นวัตถุดิบจึงมีความสำคัญต่อขั้นตอนการเตรียมน้ำเยื่อเป็นอย่างมากเพราะจะส่งผลถึงการปรับปริมาณสารเคมีที่ใช้

1. **ข้อมูลโรงงานกรณีศึกษา**

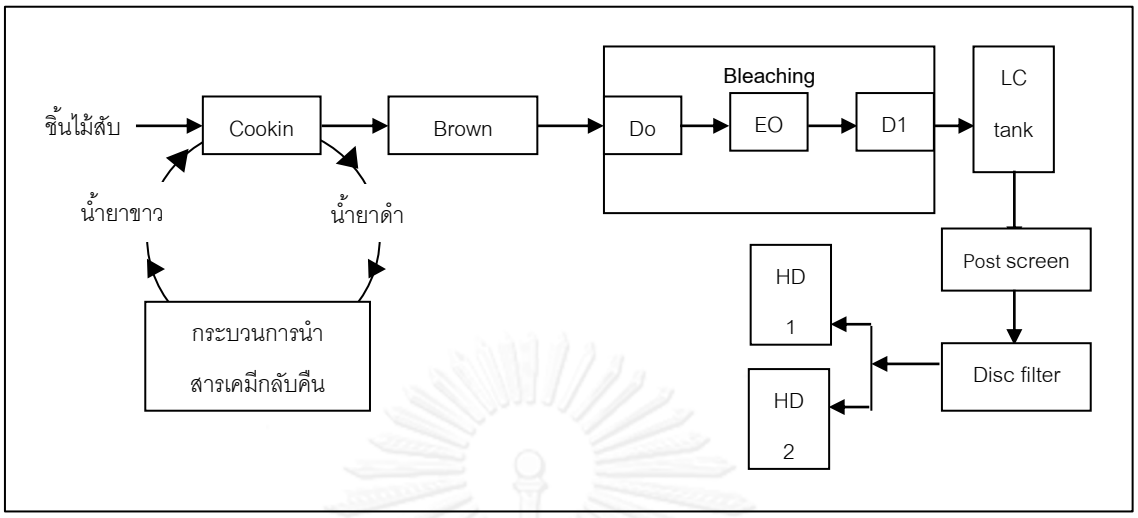
โรงงานกรณีศึกษาตั้งอยู่ที่นิคมอุตสาหกรรม 304 จังหวัดปราจีนบุรี เป็นโรงงานผลิตกระดาษที่เริ่มตั้งแต่กระบวนการผลิตไม้สับ ต้มเยื่อ ฟอกเยื่อ จนไปถึงกระบวนการผลิตกระดาษและผลิตเยื่อแผ่นแห้งส่งขาย มีโรงผลิตเยื่อ 2 แห่ง โดยโรงเยื่อที่ 1 ผลิตเยื่อกระดาษเพื่อส่งโรงกระดาษเพียงอย่างเดียว ส่วนโรงเยื่อที่ 2 ผลิตเยื่อเพื่อส่งไปยังโรงผลิตกระดาษและโรงผลิตเยื่อแผ่นแห้ง กระบวนการผลิตเยื่อของโรงงานกรณีศึกษาเป็นกระบวนการผลิตเยื่อโดยใช้กระบวนการทางเคมี เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการผลิตชิ้นไม้สับ แล้วนำชิ้นไม้สับมาเข้าสู่กระบวนการต้ม (Cooking stage) คือ การนำชิ้นไม้สับมาต้มกับน้ำยาขาว (White liquor) ในหม้อต้มเยื่อ(Digester) เพื่อละลายลิกนินออกจากเส้นใยเซลลูโลส เพราะลิกนินเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เยื่อมีสีคล้ำ จากกระบวนการต้มเยื่อทำให้ได้เยื่อเปียกสีคล้ำรวมกับสารเคมีที่มีลิกนินละลายอยู่ เรียกว่าน้ำยาดำ (Black liquor) หลังจากนั้นนำเยื่อเปียกสีคล้ำที่ได้เข้าสู่กระบวนการล้างบีบอัดเยื่อ เรียกขั้นตอนนี้ว่าบราวน์สตอก (Brown stock stage) เพื่อทำความสะอาดชำระสิ่งสกปรกและน้ำยาดำออกจากเยื่อ และกำจัดลิกนินด้วยออกซิเจน (Oxigen, O_2) ปรับความเข้มข้นของเยื่อ (%Consistency) ให้เหมาะสมก่อนนำเข้าสู่กระบวนการฟอกเยื่อ (Bleaching Stage) การฟอกเยื่อมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อและกำจัดสิ่งสกปรกต่างๆโดยใช้สารเคมีมาทำปฏิกิริยากับลิกนิน เพื่อกำจัดและฟอกสีลิกนินที่ค้างอยู่ในเส้นใยให้ได้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างตามที่ต้องการ ในกระบวนการฟอกเยื่อมีการใช้สารเคมีหลายประเภท จึงมีการแบ่งขั้นตอนย่อยตามสภาวะและประเภทของสารเคมีที่ใช้ ซึ่งในโรงงานกรณีศึกษาแบ่งย่อยออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

1. ขั้นตอนดีศูนย์ (D_0) ใช้คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) เพื่อกำจัดลิกนินในเยื่อในสภาวะกรด ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วง 2.8-3.2 เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 30 นาที ความขาวสว่างของเยื่อในขั้นตอนนี้ประมาณ 68-72%

2. ขั้นตอนอีโอพี (EOP) ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในการฟอกสีลิกนินที่เหลืออยู่ในสภาวะด่าง ค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในช่วง 10.5-11.5 เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 2 ชั่วโมง ความขาวสว่างของเยื่อในขั้นตอนนี้ประมาณ $\geq$ 77%

3. ขั้นตอนดีหนึ่งหรือดีวัน (D_1) ในคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) เพื่อกำจัดลิกนินที่เหลืออยู่และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้อยู่ในช่วง 3.8-5.5 เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 3 ชั่วโมง ค่าความขาวสว่างของเยื่อในขั้นตอนนี้คือ 85-89%

ขั้นตอน D_1เป็นขั้นตอนสุดท้ายก่อนส่งเยื่อไปเก็บที่ถังเก็บเยื่อเพื่อส่งต่อไปผลิตเป็นเยื่อแผ่นแห้งหรือกระดาษตามแผนการผลิตโดยไม่ได้มีการฟอกเพื่อเพิ่มความขาวสว่างอีก



รูปที่ 1. 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเยื่อตั้งแต่กระบวนการต้มเยื่อจนถึงกระบวนการฟอกเยื่อส่งให้หน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้งและโรงกระดาษ

รูปที่ 1. 2กระบวนการบีบล้างเยื่อ (Wash press) ของขั้นตอน EOP และ D1 ที่หน่วยงานฟอกเยื่อ

ดังนั้นเยื่อในขั้นตอน D1 ต้องเป็นเยื่อที่มีคุณภาพตรงตามที่โรงกระดาษและโรงผลิตเยื่อแผ่นแห้งกำหนด ซึ่งเยื่อแผ่นแห้งที่ทำการผลิตนั้นมีหลายเกรดตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นคุณภาพเยื่อจากโรงเยื่อที่ 2 ที่ส่งไปยังโรงผลิตกระดาษจึงมีความแปรปรวนมาก โดยเฉพาะด้านความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งผลต่อการปรับปริมาณสารเคมีเติมแต่ง โรงกระดาษได้กำหนดคุณภาพเยื่อที่ต้องการไว้ทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ

1. ค่าความขาวสว่าง, %Wet brightness (เกณฑ์จากโรงกระดาษ 85-87%, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน $\leq$ 0.6)
2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง, pH (เกณฑ์จากโรงกระดาษ ค่าเฉลี่ย 4.5-6.0, ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน SD $\leq$ 0.3)
3. ค่าความหนืดของเยื่อ, Viscosity (เกณฑ์จากโรงกระดาษ ค่าเฉลี่ย $\geq$ 510 mL/g)
4. ปริมาณสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ, Dirt (เกณฑ์จากโรงกระดาษ ค่าเฉลี่ย $\leq$ 5.0 mm^2/kg)
5. ค่าการระบายน้ำของเยื่อ, Initial freeness (เกณฑ์จากโรงกระดาษ > 525 ml)

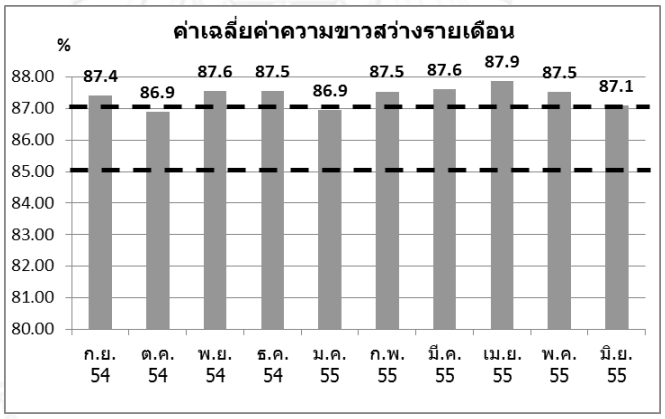
หน่วยงานที่ต้องทำการควบคุมคุณภาพเยื่อที่ส่งโรงกระดาษให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด คือ หน่วยงานฟอกเยื่อ (Bleaching Plant) ที่ต้องทำการผลิตเยื่อให้มีคุณภาพตามเกณฑ์ที่ต้องการ

(Specification) ก่อนส่งไปขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นแห้งที่หน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้ง และส่งไปขึ้นรูปเป็นกระดาษที่โรงกระดาษ

2. **การศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน**

กระบวนการผลิตกระดาษต้องมีการใช้สารเคมีหลากหลายชนิดเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพให้ได้ตามที่ลูกค้าต้องการ เช่น สารเติมแต่ง (Filler) สารเคมีลดการเกิดฟอง (Defoamer) ซึ่งสารเคมีที่มีความเกี่ยวเนื่องกับคุณภาพเยื่อจากโรงผลิตเยื่อ คือ สารเคมีที่ใช้เพื่อการปรับเฉดสีเยื่อ (DYE) ให้กระดาษมีเฉดสีฟ้าจากเดิมที่เยื่อมีเฉดสีเหลืองเนื่องจากการใช้สารคลอรีนไดออกไซด์ในการฟอกขาว และสารเคมีที่ใช้เพื่อทำให้กระดาษมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้น (OBA) ในกรณีที่ทางโรงเยื่อส่งเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างน้อยกว่าเกณฑ์ที่กำหนดมาให้ ดังนั้นคุณภาพเยื่อจากโรงเยื่อด้านความขาวสว่างทั้งค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงมีความสำคัญกับการปรับเติมสารเคมีเข้าสู่ระบบ ทั้งปริมาณการใช้สารเคมีและความเสถียรในการปรับค่าการเดินเครื่องจักรของโรงกระดาษ

จากสถานการณ์ในช่วงเดือนกันยายน 2554-มิถุนายน 2555 คุณภาพเยื่อที่ส่งโรงกระดาษมีคุณภาพที่ค่อนข้างแปรปรวนและมีร้อยละของผลการวิเคราะห์ที่นอกเหนือจากเป้าหมายคุณภาพที่กำหนด (%Off spec) สูง พิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) ของแต่ละปัจจัย



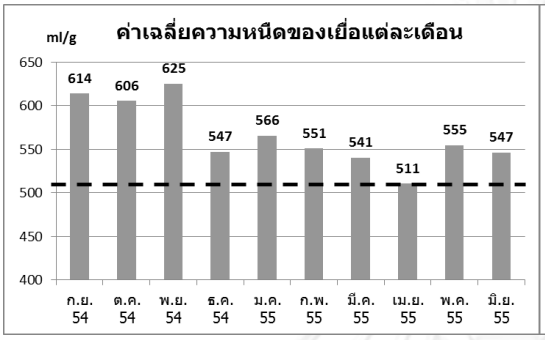
รูปที่ 1. 3 ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างรายเดือน

CHULALONGKORN UNIVERSITY

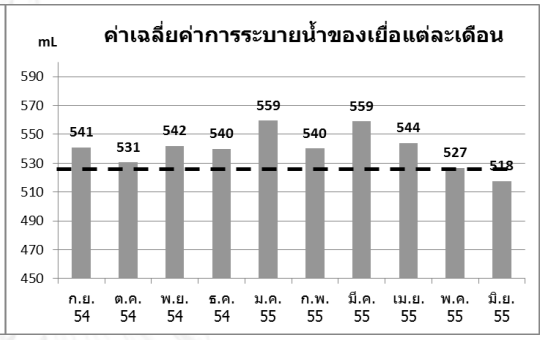
จากรูปที่ 1.2 พบว่าค่าเฉลี่ยความขาวสว่างรายเดือนของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษมีค่าสูงกว่าที่โรงกระดาษกำหนด (โรงกระดาษกำหนดค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วง 85-87% แสดงในรูปด้วยเส้นประต่อเนื่องตั้งแต่เดือนกันยายน 2554 ถึงเดือน มิถุนายน 2555 มีเพียงเดือนตุลาคม 2554 และมกราคม 2555 เท่านั้นที่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด แต่ก็มีแนวโน้มไปในทิศทางที่มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดเช่นเดียวกับเดือนอื่นๆ

จากรูปที่ 3-6 แสดงค่าเฉลี่ยคุณภาพด้านต่างๆ คือ ค่าความหนืด ค่าการระบายน้ำ ความเป็นกรด-ด่าง และปริมาณสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ แต่ละเดือนตามลำดับ เห็นได้ว่าปัจจัยส่วนใหญ่มีค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด โดยแสดงด้วยเส้นประเป็นเกณฑ์ที่กำหนดของแต่ละปัจจัยซึ่งแต่ละปัจจัยจะมีการตั้งเกณฑ์ขอบเขตกำหนดบน (Upper spec limit) และเกณฑ์ขอบเขตกำหนดล่าง (Lower spec

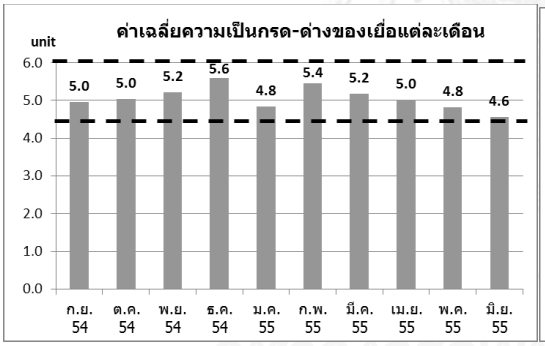
limit) แตกต่างกัน ค่าเฉลี่ยความหนืดและค่าการระบายน้ำของเยื่อมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ขอบเขตล่างที่กำหนด ค่าเฉลี่ยของค่า pH ของเยื่ออยู่ในเกณฑ์ระหว่างขอบเขตล่างและขอบเขตบน และค่าเฉลี่ยของปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อก็อยู่ภายในขอบเขตบนที่กำหนดเช่นเดียวกัน ดังนั้นปัจจัยที่นำมาพิจารณาในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อคือปัจจัยด้านความขาวสว่างเพราะมีค่าเฉลี่ยโดยส่วนใหญ่อยู่นอกเหนือขอบเขตบนที่กำหนด และพิจารณาเพิ่มเติมข้อมูลอัตราส่วนของเยื่อในแต่ละช่วงค่าความขาวสว่างดังรูปที่ 1.7



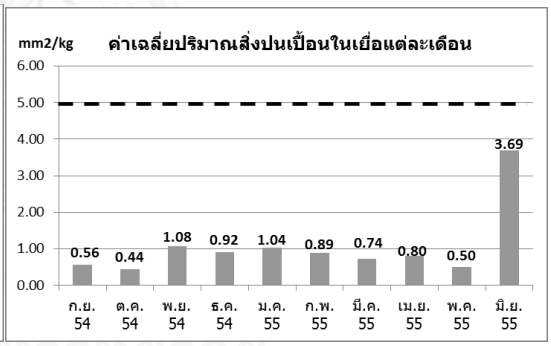
รูปที่ 1. 4 ค่าเฉลี่ยความหนืดของเยื่อรายเดือน



รูปที่ 1. 5 ค่าเฉลี่ยการระบายน้ำของเยื่อรายเดือน

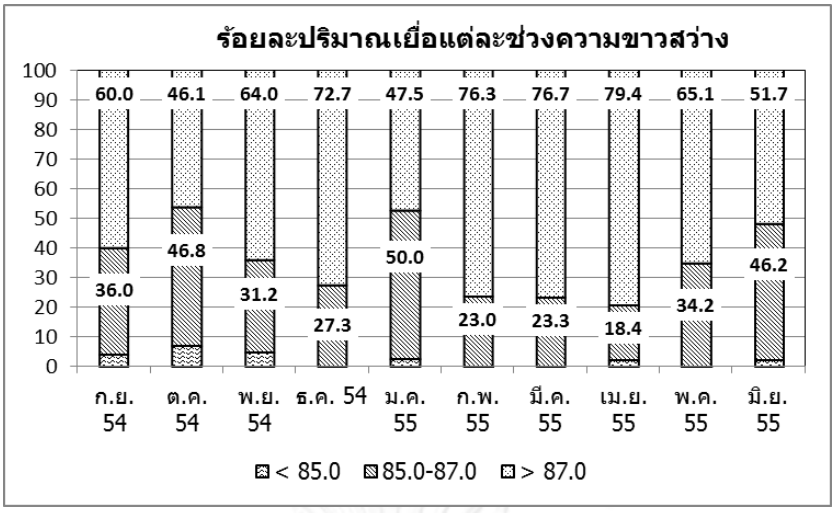


รูปที่ 1. 6 ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่างของเยื่อรายเดือน



รูปที่ 1. 7 ค่าเฉลี่ยปริมาณสิ่งปนเปื้อนของเยื่อรายเดือน

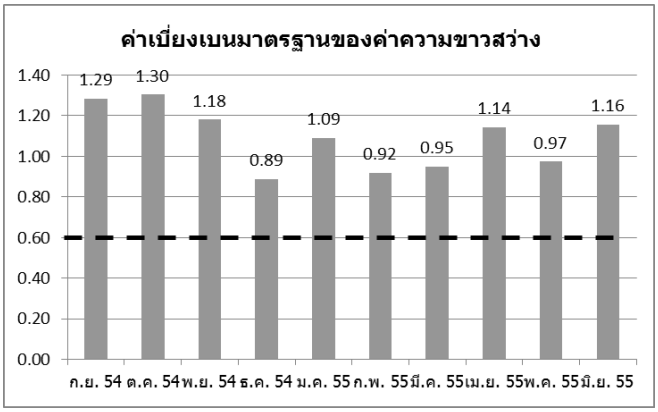
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1. 8 ร้อยละปริมาณเยื่อที่แยกช่วงค่าความขาวสว่างตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด

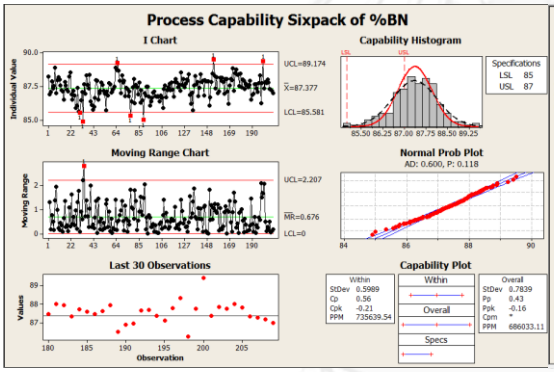
จากรูปที่ 1.8 แสดงให้เห็นว่าร้อยละของเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วงที่โรงกระดาษต้องการมีจำนวนน้อยมาก เฉลี่ยร้อยละของปริมาณเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด (ค่าความขาวสว่าง 85.0-87.0%) เฉลี่ยหกเดือนเท่ากับ 33.64% โดยโรงเยื่อคาดหวังให้มีปริมาณเท่ากับ 50% มีเพียงเดือนมกราคม 2555 เท่านั้น ที่มีปริมาณเยื่อส่งโรงกระดาษ 50% มีค่าความขาวสว่างตามที่โรงกระดาษต้องการ ส่วนเดือนอื่นๆนั้นค่าความขาวสว่างของเยื่อส่วนใหญ่สูงกว่าเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด ส่งผลต่อการปรับค่าความขาวสว่างของเยื่อที่นำมาเตรียมรวมกับโรงเยื่อที่ 1 เนื่องจากเยื่อจากโรงเยื่อที่ 1 มีค่าความขาวสว่างไม่ค่อยแปรปรวนมากนักเพราะทำการผลิตเยื่อส่งโรงกระดาษเพียงเกรดเดียว การส่งเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างมากกว่าที่โรงกระดาษกำหนดจะส่งผลถึงต้นทุนของหน่วยงานฟอกเยื่อที่ต้องใช้สารเคมีมากเกินความจำเป็น และยังส่งผลต่อการปรับปริมาณสารเคมีที่โรงกระดาษใช้เพื่อการปรับเฉดสีของเยื่อ เพราะค่าความขาวสว่างที่มากเกินไปจะทำให้ความต้องการใช้สารเคมีในการปรับเฉดสีเยื่อน้อยกว่าอัตราการไหลน้อยที่สุดของปั๊ม เนื่องจากค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งมามีค่าสูงจึงใช้สารเคมี OBA และ DYE ในการปรับเฉดสีเยื่อที่โรงกระดาษน้อยลง แต่ปริมาณสารเคมีที่โรงกระดาษต้องการเป็นปริมาณน้อยนั้นน้อยกว่าอัตราการไหลน้อยที่สุดของปั๊มสารเคมีที่สามารถปรับได้ ดังนั้นการปรับสารเคมีเมื่อความขาวสว่างของเยื่อมีค่าสูงจึงทำได้ยากและบางครั้งทำให้เกิดการใช้สารเคมีที่มากเกินความจำเป็น

และเมื่อพิจารณาเพิ่มเติมทางด้านค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน ของปัจจัยความขาวสว่างที่ทางโรงกระดาษมีการกำหนดเกณฑ์ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มเติม คือ ต้องไม่เกิน 0.6 แสดงด้วยเส้นประในรูปที่ 1.8 เนื่องจากความแปรปรวนของคุณภาพด้านความขาวสว่างมีผลต่อการปรับสารเคมีและการปรับสภาวะเดินเครื่องของหน่วยงานทำกระดาษ

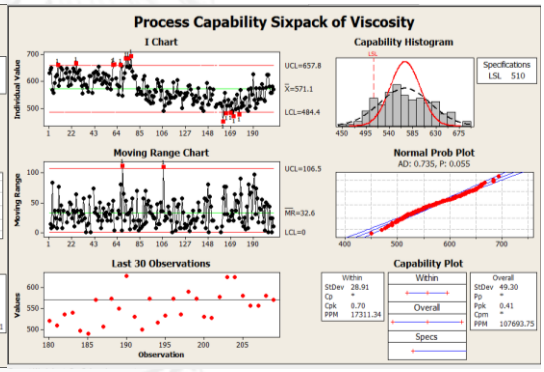


รูปที่ 1. 9 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างรายเดือนเยื่อของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษ

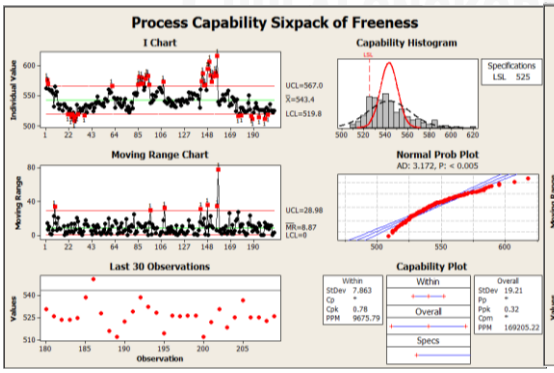
รูปที่ 1.9 (a-e) แสดงความสามารถของกระบวนการ (Process Capability) ของแต่ละคุณสมบัติ อันได้แก่ คุณสมบัติด้านความขาวสว่าง ความหนืดของเยื่อ ค่าการระบายน้ำ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อ ตามลำดับ



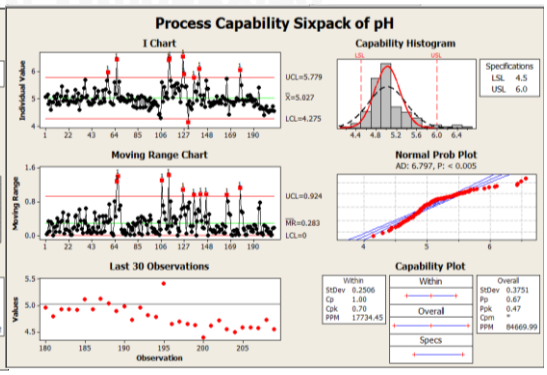
รูปที่ 1.10 a ความสามารถของกระบวนการด้านค่าความขาวสว่าง



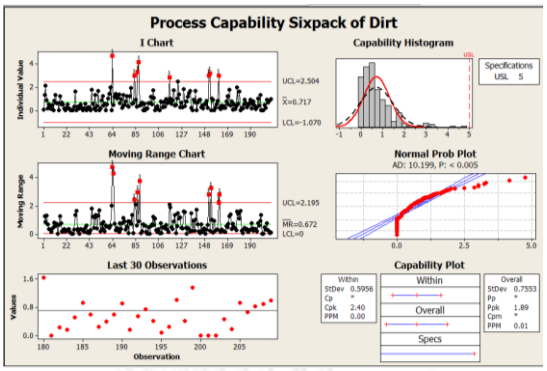
รูปที่ 1.10 b ความสามารถของกระบวนการด้านค่าความหนืดของเยื่อ



รูปที่ 1.10 c ความสามารถของกระบวนการด้านค่าการระบายน้ำ



รูปที่ 1.10 d ความสามารถของกระบวนการด้านความเป็นกรด-ด่าง



รูปที่ 1.10 e ความสามารถของกระบวนการด้านปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อ

รูปที่ 1. 10 (a-e) ค่าความสามารถของกระบวนการพิจารณาแยกรายคุณสมบัติ

จากรูปที่ 1.9 พบว่าค่าเบี่ยงเบนมาตร ฐานของค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งไปโรงผลิตกระดาษนั้น มีค่าเกินที่โรงกระดาษกำหนดทุกเดือน (ค่าที่โรงกระดาษกำหนด คือ ไม่เกิน 0.6 แสดงในรูปที่ 8 ด้วยเส้นประ) ซึ่งส่งผลต่อการปรับปริมาณสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับค่าความขาวสว่าง เพราะค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ไม่คงที่ทำให้การควบคุมสภาวะการเติมสารเคมีที่โรงกระดาษต้องมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณการปรับสารเคมีบ่อยครั้ง การควบคุมปริมาณสารเคมีที่ต้องการปรับทำได้ยากอาจทำให้เกิดการสิ้นเปลืองสารเคมีที่ใช้ในโรงกระดาษเกินความจำเป็น

พบว่ามีเพียงคุณสมบัติเรื่องค่าความขาวสว่างที่ไม่สามารถควบคุมให้ค่าเฉลี่ยอยู่ในเงื่อนไขที่โรงกระดาษกำหนดได้ ส่วนปัจจัยอื่นๆ คือ ค่าความหนืดของเยื่อ ค่าการระบายน้ำ ค่าความเป็นกรดด่าง และปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อ มีค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด โดยค่าเฉลี่ยค่าความขาวสว่างที่ 87.4% มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบน (Upper specification limit) ที่โรงกระดาษกำหนดไว้ที่ 87% และความสามารถของกระบวนการ (Cp) เท่ากับ 0.56 และมีค่าความสามารถที่สัมพันธ์กับค่าเฉลี่ย (Cpk) ต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับปัจจัยอื่นๆ มีค่าเท่ากับ -0.21 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต่ำมาก และค่า Cp ของคุณสมบัติอื่นที่อยู่ในเกณฑ์ต่ำคือ ค่าการระบายน้ำและค่าความหนืดของเยื่อซึ่งมีค่า Cp เท่ากับ 0.7 เท่ากัน แต่ค่าการระบายน้ำ (Initial Freeness) ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ไม้ที่นำมาผลิตเยื่อไม่สามารถปรับปรุงได้ในขั้นตอนการฟอกเยื่อ ส่วนค่าความหนืดของเยื่อที่มีความสามารถของกระบวนการอยู่ในเกณฑ์ต่ำแต่ค่าเฉลี่ยยังมากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่โรงกระดาษกำหนดและไม่มีผลกระทบกับโรงกระดาษมากนัก ดังนั้นปัญหาด้านคุณภาพของปัจจัยด้านความขาวสว่างจึงเป็นปัจจัยที่ควรนำมาพิจารณาปรับปรุงมากที่สุด

ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของเยื่อที่สูงกว่าขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่เกินกว่าโรงกระดาษกำหนด ทำให้เกิดปัญหาในการปรับปริมาณสารเคมีในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยเฉพาะสารเคมีที่เกี่ยวข้องกับค่าความขาวสว่าง คือ สาร OBA และ DYE ซึ่ง OBA มีหน้าที่ทำให้กระดาษขาวสว่างโดยเปลี่ยนพลังงานช่วงความยาวคลื่นของ UV ให้เป็นแสงสีฟ้า และ DYE มีหน้าที่ทำให้กระดาษมีโทนสีอ่อนเป็นโทนสีฟ้า (Blue Shade) เพื่อผลิตกระดาษถนอมสายตา

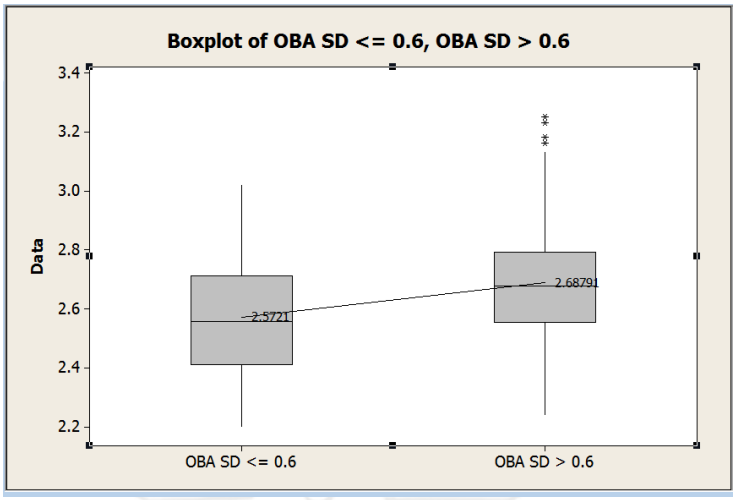
ราคาของสารเคมีทั้งสองชนิด OBA เท่ากับ 35.04 บาทต่อกิโลกรัม และ DYE เท่ากับ 590 บาทต่อกิโลกรัม และปริมาณสารเคมีที่ใช้เพิ่มขึ้นก็เป็นการเพิ่มต้นทุนในกระบวนการผลิตด้วย ดังนั้นผู้ทำวิจัยจึงตัดสินใจเลือกพิจารณาปัญหาเรื่องค่าความขาวสว่างของเยื่อเพื่อนำมาปรับปรุงกระบวนการเพื่อเป็นการลดความแปรปรวนในกระบวนการผลิตเยื่อ และลดต้นทุนด้านสารเคมีในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อให้เยื่อที่ส่งโรงกระดาษมีค่าความขาวสว่างอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดและมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการ

ตารางที่ 1 แสดงปริมาณการใช้สารเคมี OBA และ DYE ในกระบวนการผลิตกระดาษเปรียบเทียบเมื่อค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษมีค่าเฉลี่ยอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (85-87%) และเมื่อค่าเฉลี่ยของเยื่อมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด(> 87%) และเปรียบเทียบเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขาวสว่างของเยื่ออยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด ($\leq$ 0.6) และเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขาวสว่างของเยื่อมีค่ามากกว่าที่โรงกระดาษกำหนด (> 0.6)

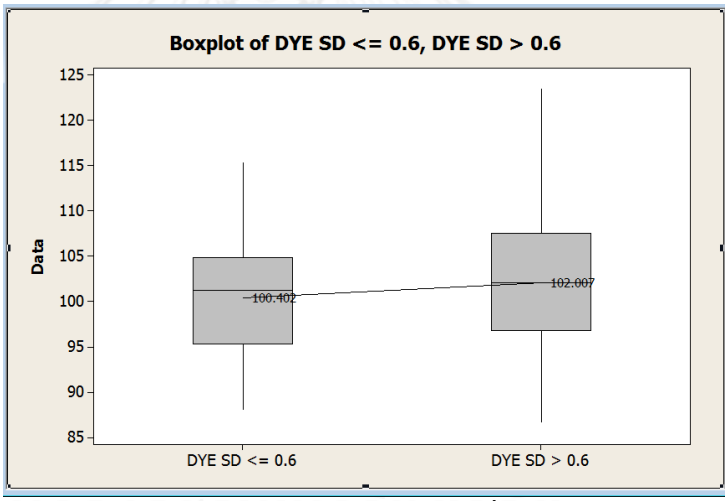
ตารางที่ 1. 1 ปริมาณการใช้สารเคมี OBA และ DYE ที่ใช้ในกระบวนการผลิตแยกตามช่วงค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างที่ได้ตามเกณฑ์และไม่ได้ตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด

		ค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้สารเคมี (กรัม/ตัน)	
ช่วงความขาวสว่าง	**ค่าเฉลี่ยความขาวสว่าง (%)**	**OBA**	**DYE**
85-87	86.49	2.81	98.60
$\geq$ 87	87.79	2.71	101.08
ช่วงค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ค่าเฉลี่ยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	**OBA**	**DYE**
$\leq$ 0.6	0.41	2.57	100.40
> 0.6	1.04	2.69	102.01

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 1. 11 Boxplot ปริมาณการใช้สาร OBA เมื่อความขาวสว่างของเยื่อมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ (< 0.6) และมากกว่าเกณฑ์ (> 0.6)



รูปที่ 1. 12 Boxplot ปริมาณการใช้สาร DYE เมื่อความขาวสว่างของเยื่อมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ (< 0.6) และมากกว่าเกณฑ์ (> 0.6)

จากรูปที่ 1.11 และรูปที่ 1.12 คือปริมาณการใช้สารเคมี OBA และ DYE เพื่อปรับความในกระบวนการผลิตกระดาษ โดยเปรียบเทียบข้อมูลของปริมาณการใช้สารเคมีแต่ละชนิดต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างของเยื่อ พบว่าเมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างของเยื่อมีค่ามากกว่าเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด หรือมากกว่า 0.6 นั่นหมายถึงค่าความขาวสว่างของเยื่อมีการกระจายตัวมากขึ้น ค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้สารเคมี OBA เพิ่มขึ้นจาก 2.57 กรัมต่อตันกระดาษ เป็น 2.69 กรัมต่อตันกระดาษ และค่าเฉลี่ยปริมาณการใช้สาร DYE เพิ่มขึ้นจาก 100.40 กรัมต่อตันกระดาษ เป็น 102.01 กรัมต่อตันกระดาษ ซึ่งปริมาณสารเคมีที่ใช้เพิ่มขึ้นคือต้นทุนการผลิตกระดาษที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง

คิดเป็นต้นทุนด้านสารเคมีที่เพิ่มขึ้น ณ
กำลังการผลิตกระดาษเฉลี่ย 35 ตันต่อชั่วโมง หรือเท่ากับ 840 ตันต่อวัน
ราคา OBA เท่ากับ 35.04 บาทต่อกิโลกรัม
ราคา DYE เท่ากับ 590 บาทต่อกิโลกรัม

<u>เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่า 0.6</u>

ต้นทุน OBA เฉลี่ย = 2.57 (g/ton) x (840ton/day) x (35.04 b/kg) x (1/1000)
= 76 บาทต่อวัน
ต้นทุน DYE เฉลี่ย = 100.40 (g/ton) x (840ton/day) x (590 b/kg) x (1/1000)
= 49,759 บาทต่อวัน

<u>เมื่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมากกว่า 0.6</u>

ต้นทุน OBA เฉลี่ย = 2.69 (g/ton) x (840ton/day) x (35.04 b/kg) x (1/1000)
= 80 บาทต่อวัน
ต้นทุน DYE เฉลี่ย = 102.01 (g/ton) x (840ton/day)x (590 b/kg) x (1/1000)
= 50,557 บาทต่อวัน

หรืออาจคิดเป็นต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น
= (50,557+80) – (49,759+76)
= 802 บาทต่อวัน
หรือ = 24,060 บาทต่อเดือน

นอกจากนี้อาจทำให้เกิดการสูญเสียโอกาสในการเดินเยื่อแผ่นแห้งเกรดความขาวสว่างพิเศษ (High brightness, HB) และเยื่อแผ่นแห้งเกรดพิเศษค่าความขาวสว่างมากกว่า 91% (เกรด Premium หรือ Prime, P) ซึ่งมีค่าความขาวสว่างที่ต้องการคือ 89-90.9% ซึ่งในกระบวนการผลิตเยื่อแผ่นแห้งที่โรงเยื่อ 2 การผลิตเยื่อเกรด HB และเกรด P จะเป็นการผลิตตามคำสั่งซื้อของลูกค้า ดังนั้นหากต้องการเดินเยื่อแผ่นแห้งเกรด HB และ P ต้องทำการผลิตเยื่อเปียกที่มีค่าความขาวสว่างมากกว่า 89% ซึ่งจะทำให้เกิดความแปรผันของคุณภาพเยื่อในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อ และจะต้องส่งเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงเกินขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนของโรงกระดาษ หรือหากไม่ต้องการให้เกิดความแปรผันดังกล่าวไม่ทำการผลิตเยื่อแผ่นแห้งที่มีค่าความขาวสว่างสูงเกินขีดจำกัดข้อกำหนดด้านบนของโรงกระดาษ อาจทำให้เกิดการเสียโอกาสในการขายเผื่อแผ่นแห้งเกรด HB และ P สามารถคำนวณเป็นมูลค่าที่อาจสูญเสียได้ดังนี้

ค่าเฉลี่ยปริมาณการสั่งซื้อเยื่อแห้ง 3 เดือนย้อนหลัง คือ เยื่อแผ่นแห้งเกรด HB เฉลี่ย 300 ตันต่อเดือน และเยื่อแผ่นแห้งเกรด P เฉลี่ย 2,600 ตันต่อเดือน

เกรด HB = (300 ตันต่อเดือน) x (24,300 บาทต่อตัน)
= 7,290,000 บาทต่อเดือน
เกรด P = (2,600 ตันต่อเดือน) x (20,000 บาทต่อตัน)

= 52,000,000 บาทต่อเดือน

แต่หากไม่สามารถผลิตเยื่อเกรด HB และ P ได้ค่าความขาวสว่างอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ก็จะต้องขายในราคาที่เป็น Standard grade ซึ่งมีราคาประมาณ 17,000 บาทต่อตัน จะทำให้เกิดการเสียโอกาสในการขายเยื่อเกรด HB และ P ดังนี้

ค่าเสียโอกาส = ราคาที่ขายได้เมื่อเยื่ออยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด – ราคาที่ขายได้เมื่อเยื่อไม่อยู่ ในเกณฑ์ที่ กำหนด

ราคาที่ขายได้เมื่อคุณภาพเยื่อไม่อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด
= (300+2,600 ตัน) x (17,000 บาทต่อตัน)
= 49,300,000 บาทต่อเดือน

ค่าเสียโอกาส = (7,290,000+52,000,000) – (49,300,000)
= 9,990,000 บาทต่อเดือน

เมื่อโรงผลิตเยื่อได้รับคำสั่งผลิตจะต้องทำการเปลี่ยนแผนการผลิตเยื่อจากเดิมที่ผลิตเพื่อส่งให้โรงผลิตกระดาษเพียงอย่างเดียวที่ค่าความขาวสว่างที่อยู่ในช่วง 85-87% ซึ่งเรียกว่าเกรดมาตรฐาน (Standard to Paper Mill grade, SPM) เปลี่ยนแผนการการผลิตจากเดิมเกรด SPM เป็นผลิตเยื่อเกรด HB หรือ P และระหว่างการเปลี่ยนแผนการเดินเยื่อจากเกรด HB และ P กลับมาเป็นเกรด SPM ตามคำสั่งซื้อ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการผลิตที่ต้องทำการเปลี่ยนเกรด เช่น การลดกำลังการผลิตเพื่อเพิ่มเวลาในการทำปฏิกิริยาของสารเคมี การเพิ่มปริมาณการใช้สารเคมีในการฟอกขาวที่หน่วยงานฟอกเยื่อ หรือกระบวนการอื่นๆ ซึ่งการดำเนินงานต่างๆเหล่านี้จะทำให้เกิดความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อที่ส่งโรงกระดาษเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในช่วงที่มีการเปลี่ยนแผนการผลิตเยื่อจากเกรด HB หรือเกรด P เป็นเกรด SPM เพื่อส่งเยื่อให้โรงกระดาษ เพราะในช่วงที่มีการผลิตเยื่อแผ่นแห้งเกรด HB จะใช้แผนการผลิตเยื่อที่อัตราการผลิตน้อย มีการผลิตเยื่อเพื่อส่งให้โรงผลิตเยื่อแผ่นแห้งเพียงอย่างเดียว แต่เมื่อสามารถผลิตเยื่อแผ่นแห้งเกรด HB ได้ครบตามจำนวนคำสั่งซื้อแล้ว โรงเยื่อต้องการกลับมาผลิตเยื่อเกรด SPM เพื่อส่งให้โรงกระดาษ จะต้องปรับแผนการผลิต ลดอัตราการผลิตในขั้นตอน D1 เปลี่ยนสูตรการฟอกเยื่อตั้งแต่ขั้นตอน D0 ปรับปริมาณการใช้สารเคมีในกระบวนการฟอก เพื่อให้ค่าความขาวสว่างของเยื่ออยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการ คือ ค่าความขาวสว่างเท่ากับ 85-87% ซึ่งในกระบวนการฟอกเยื่อจะมีเวลาในการทำปฏิกิริยาของแต่ละขั้นตอนย่อย (Retention time) รวมแล้วประมาณ 5 ชั่วโมง ซึ่งในระหว่างนั้นต้องส่งเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงให้แก่โรงกระดาษ ซึ่งทำให้เกิดการสิ้นเปลืองสารเคมีในกระบวนการฟอกเยื่อโดยไม่จำเป็น และเกิดความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อในช่วงที่มีการลดสารเคมี ซึ่งความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อที่เกิดขึ้นนั้นจะส่งผลต่อการควบคุมการผลิตกระดาษในลำดับต่อไป

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจในการปรับปรุงกระบวนการผลิตในกระบวนการย่อยของขั้นตอนการฟอกเยื่อและในกระบวนการส่งเยื่อให้โรงกระดาษ เพื่อลดความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อโดยเฉพาะความแปรปรวนของค่าความขาวสว่าง ซึ่งในปัจจุบันโรงเยื่อไม่สามารถควบคุมกระบวนการ

ให้คุณภาพเยื่อที่ส่งให้โรงกระดาษมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการได้ ทำให้เกิดความสูญเสียในเรื่องของต้นทุนด้านสารเคมีในกระบวนการผลิตกระดาษเพิ่มขึ้น ซึ่งในการปรับปรุงกระบวนการครั้งนี้มุ่งเน้นที่จะปรับปรุงให้ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนของค่าความขาวสว่างให้สามารถควบคุมได้ตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด และให้ความสามารถของกระบวนการเพิ่มขึ้น โดยยังไม่กำหนดเป้าหมายของความสามารถกระบวนการให้ได้เท่ากับ 1.33 เนื่องจากความสามารถกระบวนการของคุณสมบัติค่าความขาวสว่างเท่ากับ 0.56 ถือว่ายังคงห่างจาก 1.33 อยู่มาก

ในการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดความแปรปรวนที่ของคุณภาพเยื่อนั้นผู้วิจัยมีแนวทางที่จะปรับปรุงกระบวนการหลังกระบวนการฟอกซึ่งก็คือกระบวนการส่งเยื่อ โดยใช้แนวทางการผสมเยื่อ (Mixed pulp) ระหว่างขั้นตอน EOP และ D1 ในอัตราส่วนต่างๆเพื่อให้ได้ความขาวสว่างตามที่ต้องการ โดยไม่เข้าไปปรับปริมาณสารเคมีหรือสูตรการฟอกเยื่อ เนื่องจากยังคงต้องทำการฟอกเยื่อที่ความขาวสว่างมากกว่า 89% เพื่อส่งเยื่อไปผลิตเป็นเยื่อแผ่นแห้งเกรด Prime และ High brightness ที่หน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้งตามคำสั่งซื้อของลูกค้า ดังนั้นในงานวิจัยเพื่อปรับปรุงกระคุณภาพเยื่อครั้งนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการปรับค่าความขาวสว่างเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่างของเยื่อในขั้นตอน D1 ที่ต้องระหว่างการเปลี่ยนแผนการผลิตเกรดเยื่อ โดยการผสมเยื่อให้ได้ค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษมีค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการก่อนที่จะทำการส่งเยื่อให้โรงกระดาษ ดังนั้นความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมจึงจัดเป็นคุณสมบัติที่ใช้วัดความสำเร็จของงานวิจัยนี้ (Primary Metric) และในการผสมเยื่อระหว่างขั้นตอน EOP และขั้นตอน D1 ซึ่งเป็นเยื่อที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างต่างกันมาก ค่าความเป็นกรด-ด่างหรือค่า pH ของเยื่อหลังการผสมจึงเป็นอีกคุณสมบัติหนึ่งที่อาจได้รับผลกระทบจากการปรับปรุงกระบวนการที่ต้องติดตามและเฝ้าระวังให้อยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด ดังนั้นค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อหลังการผสมจึงจัดเป็น Consequential Metrics ปัจจัยที่หนึ่ง และแนวทางการผสมเยื่อดังกล่าวอาจส่งผลต่อปริมาณการใช้สารเคมีที่หน่วยงานฟอกเยื่อ เช่น คลอรีนไดออกไซด์ และกรดซัลฟูริคที่ขั้นตอน D1 ดังนั้นจึงต้องติดตามปริมาณสารเคมีที่ใช้ในหน่วยงานฟอก นับเป็น Consequential metrics ปัจจัยที่สอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

พัฒนาสูตรในการผสมเยื่อเพื่อทำให้ค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมมีค่าอยู่ในช่วง 85-87% และลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเยื่อส่งโรงกระดาษในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อ

1.3 ขอบเขตของการดำเนินงานวิจัย

1. งานวิจัยนี้สนใจศึกษาในโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษ โรงเยื่อที่ 2 ซึ่งมีกระบวนการผลิตเยื่อแบบต่อเนื่องเพื่อส่งเยื่อให้หน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้งและโรงผลิตกระดาษ

2. ศึกษาความแปรปรวนและค่าเฉลี่ยของค่าความขาวสว่างเยื่อน้ำจากหน่วยงานฟอกเยื่อเพื่อผลิตกระดาษ

3. ลดความแปรปรวนและควบคุมคุณภาพเยื่อน้ำทั้งในด้านของค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของเยื่อแผ่นแห้ง ในกรณีที่การแก้ไขไม่เปลี่ยนแปลงสูตรหรือสภาวะการเดินเยื่อ

4. ศึกษาแนวทางการปรับปรุงกระบวนการผลิตในขั้นตอนของการส่งเยื่อจากหน่วยงานฟอกเยื่อไปยังหน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้งและโรงผลิตกระดาษ

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ทำการศึกษาปัญหาและผลกระทบของปัญหาที่เกิดขึ้น ศึกษาขั้นตอนและกระบวนการฟอกเยื่อภายในหน่วยงานเพื่อหาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวสว่างของเยื่อ และศึกษาวิธีการทางสถิติต่างๆที่นำมาใช้เพื่อพิจารณาข้อมูล ออกแบบการทดลองในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนสุดท้าย เช่น DOE ANOVA เป็นต้น

2. การนิยามปัญหาที่เกิดขึ้นจากการรวบรวมข้อมูลผลการวิเคราะห์คุณภาพเยื่อส่งโรงกระดาษ ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในหน่วยงานผลิตกระดาษเพื่อบ่งชี้ปัญหาที่เกิดขึ้น

3. กระบวนการวัดสภาพของปัญหาโดยใช้หลักการทางสถิติเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์เพื่อเข้าใจขอบเขตของสภาพปัญหาและหาแนวทางปรับปรุงแก้ไข

4. การวิเคราะห์ข้อมูล ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความขาวสว่าง เปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่โรงกระดาษใช้ เมื่อค่าความขาวสว่างของเยื่อไม่ได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการ

5. ปรับปรุงกระบวนการ หาแนวทางลดความแปรปรวนของเยื่อที่เกิดขึ้นก่อนส่งเยื่อให้โรงกระดาษ

   (1) ออกแบบการทดลองและทำการทดลองเพื่อหาสูตรการผสมเยื่อของแต่ละช่วงค่าความขาวสว่าง

   (2) นำสูตรที่ได้ไปทำการทดลองในระดับโรงงานและติดตามผล

6. สรุปผลการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในระดับโรงงาน

7. สรุปผลงานวิจัย

8. จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. คุณภาพเยื่อน้ำจากโรงเยื่อที่ 2 มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนดทั้งด้านค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2. ลดต้นทุนด้านสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษและกระบวนการฟอกเยื่อ

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สหสัมพันธ์ (Correlation)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปหรือข้อมูล 2 ชุดขึ้นไป ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรว่ามีมากน้อยเพียงใดนั้น จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) ในการวัดความสัมพันธ์ ซึ่งสถิติสำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีหลายชนิดและการเลือกใช้แบบใดนั้นขึ้นอยู่กับเงื่อนไขหลายประการ ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองตัวบางครั้งเราเรียกตัวแปรอิสระว่า ตัวแปรทำนาย (Predictor variable) และเรียกตัวแปรอีกตัวว่าตัวแปรเกณฑ์ (Criterion variable) ในการวัดความสัมพันธ์แต่ละแบบจะต้องมีการทดสอบนัยสำคัญก่อนจึงจะสรุปได้ว่าตัวแปรคู่ใดมีความสัมพันธ์กันจริงหรือไม่ และมากน้อยเพียงใด สำหรับการแปรผลจะมองในแง่ของความเกี่ยวพัน ความสอดคล้อง การแปรผันร่วมกัน และมีขนาดของความสัมพันธ์มากน้อยเพียงใด แต่ไม่ได้หมายความว่าตัวแปรหนึ่งเป็นเหตุและอีกตัวแปรหนึ่งเป็นผล

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) จะใช้สัญลักษณ์ r แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของกลุ่มตัวอย่าง และ ρ แทนสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใช้วัดขนาดและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร มี 2 ลักษณะ คือ $-1 \leq r \leq 1$ และ $0 \leq r \leq 1$ การบอกระดับหรือขนาดของความสัมพันธ์ จะใช้ตัวเลขของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เครื่องหมาย + หรือ – หน้าตัวเลขสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จะบอกถึงทิศทางของความสัมพันธ์ โดยที่หาก r มีเครื่องหมายบวก (+) หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ ตัวแปรหนึ่งมีค่าสูงอีกตัวแปรหนึ่งจะมีค่าสูงไปด้วย) และหาก r มีเครื่องหมายลบ (–) หมายถึง การมีความสัมพันธ์กันไปในทิศทางตรงกันข้าม นั่นคือ ตัวแปรหนึ่งมีค่าสูง ตัวแปรอีกตัวหนึ่งจะมีค่าต่ำ ยกเว้นค่าสัมประสิทธิสหสัมพันธ์บางชนิดที่มีลักษณะ $0 \leq r \leq 1$ ซึ่งจะบอกได้เพียงขนาดหรือระดับของความสัมพันธ์เท่านั้น ไม่สามารถบอกทิศทางของความสัมพันธ์ได้ หากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเข้าใกล้ -1 หรือ 1 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงถึงการมีความสัมพันธ์กันในระดับน้อย หรือไม่มีเลย สำหรับการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ โดยทั่วไปอาจใช้เกณฑ์ดังนี้ (Hinkle D. E. et al, 2003)

ตารางที่ 2. 1 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และระดับความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

ค่า r	ระดับของความสัมพันธ์
0.90 ถึง 1.00 (-0.90 ถึง -1.00)	มีความสัมพันธ์กันทางบวก (หรือทางลบ) สูงมาก
0.70 ถึง 0.90 (-0.70 ถึง -0.90)	มีความสัมพันธ์กันทางบวก (หรือทางลบ) ในระดับสูง
0.50 ถึง 0.70 (-0.50 ถึง -0.70)	มีความสัมพันธ์กันทางบวก (หรือทางลบ) ในระดับปานกลาง
0.30 ถึง 0.50 (-0.30 ถึง -0.50)	มีความสัมพันธ์กันทางบวก (หรือทางลบ) ในระดับต่ำ
0.00 ถึง 0.30 (0.00 ถึง -0.30)	มีความสัมพันธ์กันทางบวก (หรือทางลบ) ในระดับต่ำมาก

2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การแยกเอาความแปรผันในค่าสังเกตออกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นความสัมพันธ์ทางพีชคณิตอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม การใช้การแบ่งเพื่อทำการทดลองอย่างเป็นทางการสำหรับกรณีไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับต้องอิงกับสมมติฐานบางประการ โดยเฉพาะสมมติฐานที่ว่า ค่าสังเกตจะต้องอธิบายได้โดยแบบจำลองดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

และความผิดพลาดจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและมีความเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนมีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริงกระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ย

ซึ่งในทางปฏิบัติมักไม่เป็นไปตามสมมติฐานที่กล่าวถึง ดังนั้นควรจะเชื่อในผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้จากการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} + \hat{y}_{ij}$$

โดยที่ $\hat{y}_{ij}$ คือ ค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned}\hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} + \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i.}\end{aligned}$$

การตรวจสอบส่วนตกค้างควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหากแบบจำลองถูกต้องส่วนตกค้างจะต้องไม่มีรูปแบบ การตรวจสอบส่วนตกค้างสามารถวิเคราะห์ตามสมมติฐานดังต่อไปนี้

2.2.1 สมมติฐานของความเป็นปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติสามารถทำได้โดยการพล็อตฮิสโทแกรมของส่วนตกค้าง ถ้าหากสมมติฐานที่ว่า ความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบ NID (0, σ^2) เป็นจริงแล้ว รูปแบบของส่วนตกค้างที่พล็อตออกมาควรจะมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติ แต่ในกรณีที่มีตัวอย่างน้อย พบว่ามักจะเกิดการแกว่งของข้อมูลขึ้นบ่อยครั้ง ดังนั้นการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติในระดับปานกลางไม่ได้หมายถึงการฝ่าฝืนสิ่งที่กล่าวอยู่ในสมมติฐานอย่างรุนแรง แต่ในกรณีที่มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติอย่างมาก จะมีผลกระทบอย่างรุนแรงและต้องมีการวิเคราะห์ต่อไป และขั้นตอนที่สำคัญขั้นตอนหนึ่ง คือ การสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้างซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นแบบปกติรูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะเป็นเส้นตรง

2.2.2 การพล็อตส่วนตกค้างตามลำดับเวลา

การพล็อตส่วนตกค้างตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลมีประโยชน์อย่างมากในการตรวจหาความเกี่ยวพันระหว่างส่วนตกค้าง แนวโน้มที่จะพบค่ารันของส่วนตกค้างที่มีค่าเป็นบวกหรือลบบ่งชี้ว่าข้อมูลไม่มีความเป็นอิสระ ซึ่งถือเป็นปัญหาที่สำคัญและทำการแก้ไขได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะป้องกันปัญหา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูล ดังนั้นการทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสมถือเป็นกระบวนการที่สำคัญเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เป็นอิสระ

ในบางครั้งทักษะของผู้ทำการทดลองอาจจะเปลี่ยนไปตามจำนวนเวลาการทำงาน หรือกระบวนการที่กำลังทำการศึกษามีการเปลี่ยนแปลงที่คาดการณ์ไม่ได้ ซึ่งบ่อยครั้งทำให้ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาดเปลี่ยนไปตามเวลา ซึ่งเมื่อเกิดปัญหาดังกล่าวแล้วการนำส่วนตกค้างไปพล็อตกับลำดับเวลา จะพบว่ากราฟที่พล็อตขึ้นมาจะมีการกระจายที่ปลายข้างหนึ่งมากกว่าปลายอีกข้างหนึ่ง

Chulalongkorn University

2.2.3 การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

ถ้าหากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรใดๆ รวมถึงค่าของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ (Predicted Response) อีกด้วย การตรวจสอบอย่างง่ายๆ คือ การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) $\hat{y}_{ij}$ (สำหรับแบบจำลองทิศทางเดียว จะมี $\hat{y}_{ij} = \bar{y}_{i.}$ หรือค่าเฉลี่ยของระดับที่ i) กราฟที่ได้จากการพล็อตนี้ไม่ควรจะมีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใดหรือไม่มีโครงสร้างที่ผิดสังเกตปรากฏให้เห็น

ในบางครั้งอาจมีสิ่งผิดปกติแสดงให้เห็นในกราฟ นั่นแสดงถึงความแปรปรวนที่ไม่คงตัว บางครั้งความแปรปรวนของค่าสังเกตเพิ่มในขณะที่จำนวนของการสังเกตเพิ่มขึ้น กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้น

ถ้าหากความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนที่อยู่เบื้องหลังในการทดลองมีขนาดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่คงที่เป็นจำนวนเท่าของขนาดของค่าสังเกต (ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นบ่อยๆในกรณีของเครื่องมือวัด กล่าวคือ ค่าความผิดพลาดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการอ่านสเกล) ถ้าเป็นเช่นนี้จริง ค่าของส่วนตกค้างจะมากขึ้นเมื่อ $\mathbf{y_{ij}}$ เพิ่มขึ้น และกราฟของส่วนตกค้างกับ $\hat{\mathbf{y}}_{\mathbf{ij}}$ จะมีรูปร่างเหมือนกรวยปลายเปิด ความแปรปรวนที่ไม่คงตัวจะเกิดในกรณีที่ข้อมูลนั้นไม่มีการแจกแจงแบบปกติและบิดเบี้ยวด้วย เพราะว่าการแจกแจงที่บิดเบี้ยวจะทำให้ความแปรปรวนมีแนวโน้มที่จะเป็นฟังชั่นของมัชฌิม

ถ้าหากสมมติฐานของความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันของความแปรปรวนไม่ถูกต้อง ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบคงที่แบบได้ดุล การทดสอบ F จะถูกกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการออกแบบที่ไม่ได้ดุล หรือกรณีที่ความแปรปรวนค่าหนึ่งมากกว่าค่าอื่นมากๆ ปัญหานี้จะมีความรุนแรงขึ้น ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม ความไม่เท่ากันของความแปรปรวนของความผิดพลาดจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของความแปรปรวนอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบที่ได้ดุลก็ตาม

2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบ

วิธีการพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติเพื่อทำการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่สนใจจะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบ เช่น ในการหาผลตอบที่ดีที่สุดของสองตัวแปร คือ X_1 และ X_2 ซึ่งผลตอบที่ได้เป็นฟังก์ชันของระดับของตัวแปร X_1 และ X_2 โดยมากแล้วเราจะแสดงพื้นผิวผลตอบในรูปแบบของกราฟิก โดยที่ผลตอบจากสมการพื้นผิว $\mathbf{n} = f(\mathbf{x_1}, \mathbf{x_2})$ จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อที่จะช่วยให้สามารถพิจารณารูปร่างของพื้นผิวผลตอบได้ดียิ่งขึ้น

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบส่วนมากจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรกจึงต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมสำหรับใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซ็ตของตัวแปรอิสระ ซึ่งตามปกติแล้วเราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามกำลังต่ำๆที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

$$\mathbf{y} = \beta_0 + \beta_1 \mathbf{x}_1 + \beta_2 \mathbf{x}_2 + \cdots + \beta_k \mathbf{x}_k + \varepsilon$$

แต่ถ้าความสัมพันธ์แสดงความเป็นส่วนโค้ง จะต้องใช้ฟังก์ชันพหนุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$\mathbf{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i \mathbf{x}_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_i \mathbf{x}_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ij} \mathbf{x}_i^2 + \sum \sum_{i<j} \beta_{ij} \mathbf{x}_i \, \mathbf{x}_j + \varepsilon$$

การออกแบบการทดลองสำหรับฟิตพื้นผิวผลตอบ

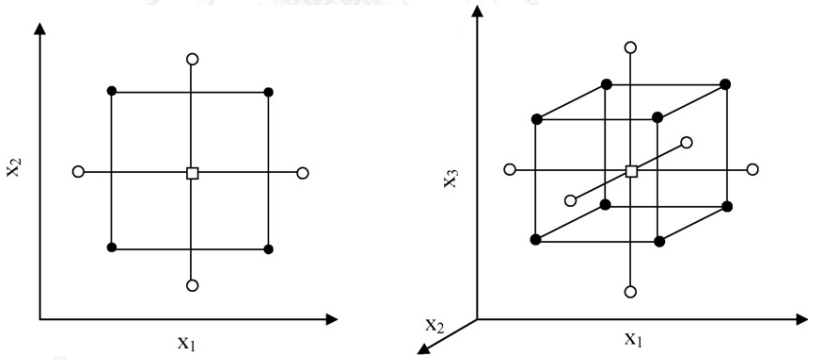
การฟิตและการวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบจะทำได้ง่ายขึ้น หากในงานวิจัยเลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสม ลักษณะของการออกแบบที่ควรพิจารณา คือ

1. ทำให้เกิดการแจกแจงหรือการกระจายที่เหมาะสมของจุดของข้อมูลตลอดบริเวณที่อยู่ในความสนใจ
2. ทำให้สามารถตรวจสอบความพอเพียงของแบบจำลอง และ Lack of fit ได้
3. ทำให้การทดลองสามารถเกิดขึ้นในบล็อก
4. ทำให้การออกแบบที่มีอันดับ (Order) สูงขึ้นสามารถสร้างขึ้นได้ตามลำดับ
5. ให้ค่าประมาณภายในของความผิดพลาด
6. ไม่ต้องรันการทดลองเป็นจำนวนมาก
7. ไม่ต้องมีหลายระดับของตัวแปรอิสระ
8. คำนวณพารามิเตอร์ในแบบจำลองได้ง่าย

ลักษณะสมบัติที่ต้องการเหล่านี้ในบางครั้งอาจจะขัดแย้งกันได้ ดังนั้น จะต้องมีการไตร่ตรองอย่างดีก่อนที่จะเลือกการออกแบบที่จะนำมาใช้งาน

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD)

รูปแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง หรือ CCD เป็นการออกแบบที่นิยมใช้ในการฟิตแบบจำลองอันดับที่สอง โดยทั่วไป CCD จะประกอบด้วย 2^k แฟกทอเรียลที่มี n_f รัน 2^k รัน ในแนวแกนหรือในแนวรูปดาว (star) และ n_c รัน ที่จุดศูนย์กลาง รูปที่ 2.1 แสดง CCD สำหรับการทดลองที่มีการศึกษาปัจจัย 2 ปัจจัย และ 3 ปัจจัย



รูปที่ 2.1(a) รูปที่ 2.1(b)

รูปที่ 2. 1 การออกแบบประสมส่วนกลาง สำหรับ (a) k=2 และ (b) k=3 ปัจจัย

CCD เป็นการออกแบบที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับแบบจำลองอันดับที่สอง มีการเพิ่มการทดลองเพิ่มในแนวแกนเพื่อทำให้สามารถใส่พจน์ควอดราติกลงในแบบจำลองได้ โดยจะต้องทำการกำหนดพารามิเตอร์ 2 ตัวในการออกแบบ คือ α ซึ่งเป็นระยะทางของการรันในแนวแกนจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัยซึ่งสามารถคำนวณได้จาก $\alpha = 2^{(k-p)/4}$ สำหรับปัจจัยจำนวน 2 3 และ 4 จะมีค่า α เท่ากับ 1.41 1.68 และ 2.00 ตามลำดับ และจำนวนของจุดศูนย์กลางในการรัน n_c ซึ่งในการออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย เพื่อทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพ และตามปกติแล้วจะมีการใช้ 3 ถึง 5 รัน

ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ วิธีการหนึ่งที่จะบอกว่าแบบจำลองนี้ดี คือ แบบจำลองนี้จะต้องมีความแปรปรวนที่มีเสถียรภาพของผลตอบที่จุด X ซึ่งอยู่ในความสนใจ ความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์ที่บางจุด X คือ

$$V[\hat{y}(x)] = \sigma^2 x'(X'X)x$$

การออกแบบพื้นผิวผลตอบอันดับที่สองควรจะมีความสามารถในการหมุน (Rotatable) ซึ่งหมายความว่า $V[\hat{y}(x)]$ คือ จุด X ทุกจุดที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของการออกแบบเท่ากัน นั่นคือ ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่ถูกพยากรณ์จะมีค่าคงตัวบนรูปทรงกลม การออกแบบที่มีคุณสมบัติเช่นนี้จะทำให้ค่าความแปรปรวนของ $\hat{y}$ ไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อการออกแบบถูกหมุนรอบจุดศูนย์กลาง (0, 0, ...,0) ดังนั้นทำให้เราเรียกการออกแบบเช่นนี้ว่า การออกแบบที่สามารถหมุนได้ (Rotatable design)

ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวผลตอบ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของ RSM คือ การหาค่าที่ดีที่สุด และจะไม่ถือว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะรันการทดลอง ดังนั้นการเลือกใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทางจึงเป็นตัวเลือกที่ดีสำหรับการเลือกรูปแบบการทดลอง และสามารถแสดงได้ว่าการออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่งจะเป็นแบบที่สามารถหมุนได้

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้เกิดคุณสมบัติของการหมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ซึ่งความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟคทอเรียลของการออกแบบ ความจริงแล้ว $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบประสมส่วนกลางที่สามารถหมุนได้ โดยที่ n_f คือ จำนวนของจุดที่ถูกใช้ในส่วนแฟกทอเรียลของการออกแบบ

Central Composite Design รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) ซึ่งถือเป็นสมบัติที่ดีในการออกแบบบริเวณที่สนใจศึกษา แต่อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ดีไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้องร้อยเปอร์เซนต์ ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ α จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ และหาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = \sqrt{k}$ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกนให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี $\sqrt{k}$

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษ (Lindedahl, 2008) เริ่มตั้งแต่กระบวนการต้มเยื่อ (Cooking) คือ การนำชิ้นไม้สับมาต้มกับน้ำยาขาว (White liquor) ที่มีองค์ประกอบหลักคือ

โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium Hydroxide, NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium Sulfide, Na_2S) เพื่อละลายลิกนินออจากเส้นใยเซลลูโลส (Cellulose) เพราะลิกนินเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เยื่อมีสีคล้ำ หลังจากนั้นจึงนำเยื่อเปียกสีคล้ำที่ได้ เข้าสู่กระบวนการล้างและกำจัดลิกนินด้วยออกซิเจน (Oxigen, O_2) ในขั้นตอนบราวน์สต็อก (Brown stock) เพื่อเป็นการล้างและกำจัดลิกนินออกจากเส้นใย ปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อสามารถวิเคราะห์ได้เป็นค่าแคปป้า (Kappa number) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความขาวสว่างของเยื่อ คือ ถ้าค่าแคปป้าสูงปริมาณลิกนินในเยื่อมีมากจะทำให้เยื่อมีสีคล้ำ หลังจากขั้นตอนบราวน์สต็อกจะได้เยื่อเปียกสีน้ำตาลเพื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการฟอกเยื่อ (Bleaching) (บริษัท สยามคราฟท์ จำกัด, 2525) ในโรงงานกรณีศึกษามีลำดับการฟอกเยื่อคือ D_0-EOP-D_1 ซึ่งในขั้นตอน D_0 และ D_1 เป็นการฟอกเยื่อด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide, ClO_2) ในสภาวะกรด และขั้นตอน EOP คือ การฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide, H_2O_2) ในสภาวะด่าง การฟอกเยื่อตามลำดับดังกล่าวมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน (Sevastyanova et al., 2012) เช่น คลอรีนไดออกไซด์เป็นสารเคมีที่มีความจำเพาะเจาะจงในการทำปฏิกิริยาเพื่อกำจัดลิกนินโดยไม่ทำลายเส้นใยเซลลูโลส แต่การฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์คือการฟอกสีเยื่อและอาจส่งผลต่อการทำลายเส้นใยเซลลูโลสได้ และในสภาวะกรดที่ขั้นตอน D_0 สารคลอรีนไดออกไซด์สามารถกำจัดองค์ประกอบในเยื่อที่เรียกว่า เฮกซานูโรนิคแอซิด หรือ เฮกซ์เอ (Hexanuronic acid, HexA) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้เกิดการผันกลับของค่าความขาวสว่าง (Brightness reversion) ของผลิตภัณฑ์สุดท้ายเมื่อมีการเก็บไว้เป็นระยะเวลานาน ดังนั้นลำดับการฟอกจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพของเยื่อที่ผลิตได้

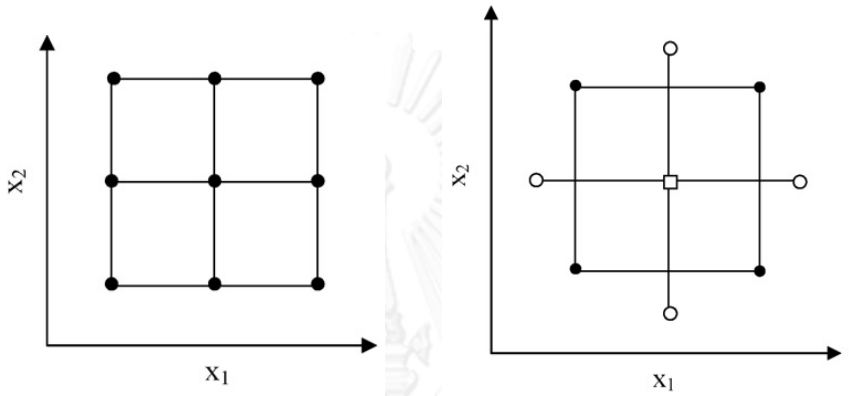
คุณภาพของเยื่อน้ำ (Slurry Pulp) ที่ได้จากกระบวนการฟอกเยื่อมีความสำคัญต่อคุณภาพของเยื่อแผ่นแห้งและคุณภาพของกระดาษ เพราะเยื่อน้ำจากกระบวนการฟอกเยื่อ คือ วัตถุดิบหลัก ดังนั้นในขั้นตอนการฟอกเยื่อ จึงจำเป็นต้องควบคุมคุณภาพให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด (Foelkel, 2007) โดยคุณสมบัติของเยื่อน้ำที่โรงกระดาษต้องการมีทั้งความต้องการด้านลักษณะของเส้นใย (Fiber Characteristics) และคุณสมบัติของเยื่อ (Pulp Properties) ลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสนั้นมีผลต่อการควบคุมกระบวนการผลิตและการควบคุมการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการผลิตกระดาษ และยังส่งผลถึงลักษณะของกระดาษที่ผลิตได้ ซึ่งลักษณะของเส้นใยนั้นเป็นผลมาจากสายพันธ์ของไม้ที่นำมาผลิตและสภาวะการผลิตเยื่อ ส่วนคุณสมบัติของเยื่อที่โรงกระดาษต้องการ เช่น ค่าความขาวสว่าง ปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อ ค่าความเป็นกรดด่าง ค่าความหนืด จะขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนดไว้ (Specification Limit) สำหรับการผลิตกระดาษเกรดต่างๆ นอกจากคุณสมบัติที่ต้องได้ตามเกณฑ์ที่กำหนดแล้ว โรงกระดาษยังต้องการความแปรปรวนของคุณภาพที่น้อยที่สุดและไม่มีสิ่งที่โรงกระดาษไม่ต้องการปนเปื้อนมากับเยื่อ และในท้ายที่สุด คือ การควบคุมการสูญเสียระหว่างกระบวนการผลิตให้มีค่าน้อยที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ ซึ่งในบางกรณีโรงกระดาษมองว่าปัญหาด้านความผันแปรของค่าความขาวสว่างหรือความแปรผันของคุณภาพเยื่อจากกระบวนการฟอกเยื่อ เป็นปัญหาสำคัญมากกว่าการที่ค่าความขาวสว่างสูงหรือต่ำกว่าขีดข้อจำกัดด้านบนและด้านล่าง (Anthony, 1999, Scott et al., 1989) เพราะความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อการควบคุมกระบวนการหรือการปรับค่าสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษ และในด้านของความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อ จะเกี่ยวข้องกับการใช้สารเคมีเพื่อปรับค่าความขาวของ

กระดาษ คือ DYE และ OBA (Zhang et al., 2009) ในกระบวนการผลิตกระดาษเพื่อแก้ไขปัญหาเรื่องค่าความขาวสว่างของเยื่อไม่ได้ตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด นอกจากผลกระทบของการที่ค่าความขาวสว่างของเยื่อไม่ได้คุณสมบัติตามเกณฑ์โรงกระดาษจะส่งผลต่อโรงกระดาษโดยตรงแล้ว การฟอกเยื่อเพื่อให้ได้ค่าความขาวสว่างมากเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีในกระบวนการฟอกเยื่อโดยเฉพาะสารคลอรีนไดออกไซด์ (Hans U. Suess et al., 2000) ดังนั้นการส่งเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงเกินความจำเป็นไปให้โรงกระดาษจึงส่งผลต่อปริมาณการใช้สารเคมีที่หน่วยงานฟอกเยื่อที่เพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อคุณภาพเยื่อจากหน่วยงานฟอกเยื่อจึงมีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตกระดาษมาก ในบางโรงงานจึงมีการปรับปรุงกระบวนการฟอกเยื่อเพื่อควบคุมความผันแปรของคุณสมบัติของเยื่อ เช่น มีการติดตั้งระบบวัดค่าความขาวสว่างแบบออนไลน์ (Goldman) ในระบบการฟอกเยื่อ เพื่อควบคุมให้ค่าความขาวสว่างอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ลดความผันแปรของค่าความขาวสว่าง และควบคุมการปรับสารเคมีได้ในทันที (Real time) พบว่าสามารถลดค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างได้ร้อยละ 50 และควบคุมคุณภาพเยื่อให้อยู่ในเกณฑ์ได้ร้อยละ 98 นอกจากการควบคุมค่าความขาวสว่างแบบออนไลน์แล้วบางโรงงานยังมีการปรับปรุงวิธีการวัดค่าแคปป้าในเยื่อ (Williamson, 1999) เพื่อลดความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อ โดยเฉพาะในขั้นตอน D_{100} ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการฟอกเยื่อในโรงงานดังกล่าว อีกหนึ่งการทดลองที่ให้ความสำคัญกับกระบวนการฟอกเยื่อในลำดับสุดท้ายเพื่อควบคุมค่าความขาวสว่างให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด คือการทดลองในห้องปฏิบัติการเพิ่มขั้นตอนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์(Loureiro et al., 2010) จากลำดับการฟอกเยื่อเดิม คือ DEDD เป็น DEDP เพื่อปรับปรุงคุณภาพเยื่อในขั้นตอนสุดท้ายให้ได้ค่าความขาวสว่างตามที่ต้องการ และในการทดลองนี้มีการศึกษาถึงคุณสมบัติด้านอื่นของเยื่อ คือ การศึกษาเรื่องการผันกลับของค่าความขาวสว่างของเยื่อ (Brightness reversion) พบว่า เมื่อเพิ่มขั้นตอนการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าไปในกระบวนการฟอกลำดับสุดท้าย จะทำให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นตามต้องการ และมีค่าการผันกลับของค่าความขาวสว่างลดลง

ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นความสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในกระบวนการฟอกเยื่อ โดยเฉพาะในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการฟอกเยื่อก่อนส่งเยื่อให้แก่โรงกระดาษ เพื่อให้คุณภาพเยื่อน้ำที่ผลิตได้มีคุณภาพอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนดและมีความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อน้อยที่สุด เพราะเยื่อที่ไม่มีคุณภาพตามเกณฑ์และมีความแปรปรวนสูงจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตกระดาษทั้งในด้านการควบคุมกระบวนการผลิต การปรับตั้งค่าเครื่องจักร รวมไปถึงการใช้สารเคมีในการผลิต ซึ่งล้วนส่งผลต่อต้นทุนการผลิตกระดาษทั้งสิ้น ดังนั้นเพื่อลดต้นทุนดังกล่าวผู้วิจัยจึงจัดทำโครงการปรับปรุงคุณภาพเยื่อที่ส่งให้โรงกระดาษ โดยปรับปรุงตั้งแต่กระบวนการฟอกเยื่อซึ่งเป็นการควบคุมคุณภาพของเยื่อน้ำซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตกระดาษให้มีคุณภาพตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการ ซึ่งในขั้นตอนการปรับปรุงมีการใช้หลักการออกแบบทางวิศวกรรม (Design of Experiment) (ปารเมศ ชุติมา, 2545) โดยเลือกใช้รูปแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลาง (Central Composite Design หรือ CCD) โดยไม่เลือกใช้การทดลองแบบการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบสามระดับ หรือ 3^k และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken (Bezerra et al.,

2008) เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีตัวแปรที่ต้องการศึกษาจำนวน 2 ปัจจัยซึ่งการทดลองแบบ Box-Behnken ไม่รองรับ และเมื่อเปรียบเทียบกับการการทดลองแบบแฟคทอเรียลสามระดับหรือ 3^k การออกแบบการทดลองรูปแบบ CCD มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมที่มีความสามารถในการหมุน จึงทำให้ผลตอบที่ถูกพยากรณ์มีความแปรปรวนที่เท่ากันทุกจุดบนรูปทรงกลมในขณะที่การทดลองแบบแฟคทอเรียลสามระดับไม่ได้มีรูปแบบการทดลองเป็นทรงกลมทำให้ไม่มีสมบัติของการหมุน ดังนั้นจึงทำให้ผลตอบที่ถูกพยากรณ์มีความแปรปรวนที่ไม่เท่ากันในทุกจุดการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 (a) **รูปที่ 2.2 (b)**

รูปที่ 2. 2 รูปแบบการทดลองสำหรับสองปัจจัย (a) แบบแฟคทอเรียลสามระดับ และ (b) แบบประสมส่วนกลาง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้การทดลองแบบประสมส่วนกลางหรือ CCD เพื่อให้การทดลองมีความครบถ้วน ลดจำนวนการทดลอง และสามารถมารถนำผลการทดลองไปใช้ในการวิเคราะห์และพยากรณ์ผลตอบได้อย่างถูกต้อง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนต่อไปนี้

3.1 การระบุปัญหา

พิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น ศึกษาและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1. ศึกษาปัญหาเกี่ยวกับค่าความขาวสว่างและค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อจากหน่วยงานฟอกเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษ ทั้งด้านค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ไม่ได้ตามมาตรฐานที่โรงกระดาษกำหนด และศึกษาผลกระทบจากปัญหาดังกล่าวที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตกระดาษ
2. ศึกษากระบวนการฟอกเยื่อเพื่อหาแนวทางและความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณสมบัติด้านค่าความขาวสว่างของเยื่อ
3. ศึกษาวิธีการวิเคราะห์คุณภาพเยื่อในห้องปฏิบัติการจากเอกสารวิธีปฏิบัติงาน (Work instruction หรือ WI) ในหน่วยงานควบคุมคุณภาพโรงเยื่อ 2 เพื่อนำมาออกแบบและทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ
4. ศึกษาวิธีการทางสถิติที่ใช้เพื่อนำมาพิจารณาข้อมูล ออกแบบการทดลองในการเก็บข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนสุดท้าย

3.2 กระบวนการวัดเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับวิเคราะห์

1. วัดค่าความขาวสว่างและค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษทุก 4 ชั่วโมง นำข้อมูลมาคำนวณค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานรายวัน
2. บันทึกปริมาณสารเคมี OBA และ DYE ที่ใช้ในกระบวนการผลิตกระดาษรายชั่วโมงในช่วงที่มีการรับเยื่อจากโรงผลิตเยื่อที่สอง นำข้อมูลมาคำนวณค่าเฉลี่ยรายวัน เปรียบเทียบปริมาณสารเคมีที่ใช้เมื่อคุณภาพเยื่อด้านค่าความขาวสว่างอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการ เทียบกับช่วงที่คุณภาพเยื่อด้านค่าความขาวสว่างไม่อยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษต้องการ

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลด้านคุณภาพเยื่อและปริมาณการใช้สารเคมีในโรงกระดาษมาทำการวิเคราะห์ร่วมกัน

1. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของปริมาณการใช้สารเคมีที่โรงกระดาษต้องใช้ เปรียบเทียบกับค่าความขาวสว่างที่ได้ พิจารณาผลกระทบเมื่อค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษไม่ได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการ
2. วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาที่อาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติด้านค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษร่วมกับหน่วยงานฟอกเยื่อและหน่วยงานผลิตเยื่อแผ่นแห้งเพื่อหาแนวทางแก้ไขและความเป็นไปได้ในการจัดทำโครงการ

3.4 การปรับปรุงกระบวนการและวิธีดำเนินการทดลอง

3.4.1 การกำหนดปัจจัยและแบ่งช่วงระดับเพื่อจัดกลุ่มชุดการทดลอง

กำหนดปัจจัยหรือตัวแปรอิสระที่ต้องทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงที่มีต่อตัวแปรตาม โดยมีการกำหนดทั้งหมด 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่หนึ่งอัตราการผสมเยื่อ EOP ในเยื่อ D1 กำหนดให้เป็น X_1 และปัจจัยที่สอง ปริมาณกรดซัลฟูริคที่ใช้ในการปรับค่า pH ของเยื่อหลังผสม กำหนดให้เป็น X_2 และปัจจัยตอบสนอง คือ ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสม กำหนดให้เป็นค่า Y_1 และค่าความเป็นกรด-ด่างของเยื่อ กำหนดให้เป็นค่า Y_2

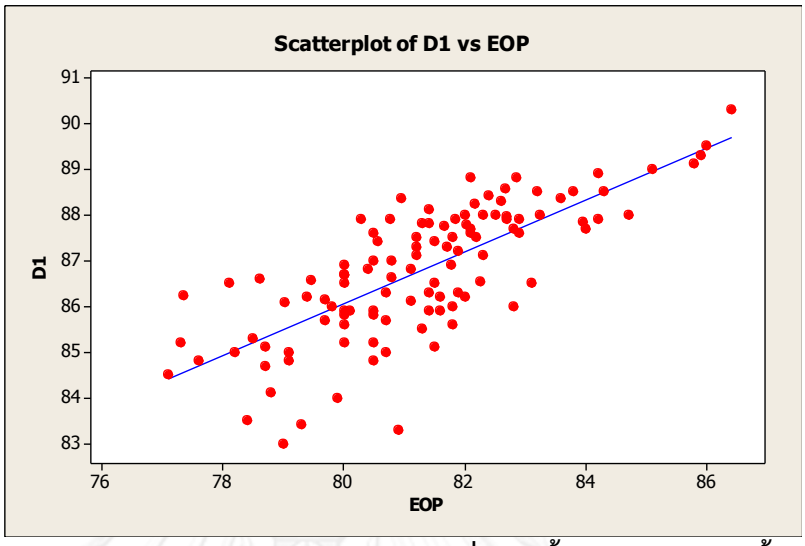
(1) ศึกษาการแนวทางการกำหนดระดับของค่าความขาวสว่างเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D_1 เพื่อทำการทดลองหาสูตรการผสมเยื่อของแต่ละช่วงระดับในห้องปฏิบัติการ โดยเริ่มจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (ค่า r) ระหว่างค่าความขาวสว่างเยื่อ EOP และค่าความขาวสว่างเยื่อ D_1 เพื่อหาขอบเขตของค่าความขาวสว่างที่ต้องทำการศึกษาไม่ให้ทำการทดลองนอกเหนือจากช่วงที่เป็นไปได้เพราะเป็นการเพิ่มจำนวนการทดลองโดยไม่จำเป็น นอกจากนั้นการพิจารณาความสัมพันธ์จะทำให้การทดลองในงานวิจัยครอบคลุมช่วงค่าความขาวสว่างที่เป็นไปได้โดยไม่ตกหล่นช่วงค่าความขาวสว่างใดๆ

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์เท่ากับ 0.75 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับสูง แสดงว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP มีความสัมพันธ์กับค่าความขาวสว่างของเยื่อ D1ไปในทิศทางเดียวกัน ดังนั้นในการกำหนดระดับช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ D1 เพื่อหาสูตรการผสมในแต่ละช่วงระดับจะขึ้นอยู่กับค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้น นั่นคือถ้าหากค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้นมีค่าสูง จะพิจารณาทดลองในระดับที่ค่าความขาวสว่างเยื่อ D1 ในช่วงที่ค่าสูงขึ้นด้วย โดยจะไม่พิจารณาทำการทดลองในระดับที่ค่าความขาวสว่างของเยื่อ D1 มีค่าต่ำอีก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Correlations: EOP, D1

```
Pearson correlation of EOP and D1 = 0.747
P-Value = 0.000
```



รูปที่ 3. 1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และขั้นตอน D_1

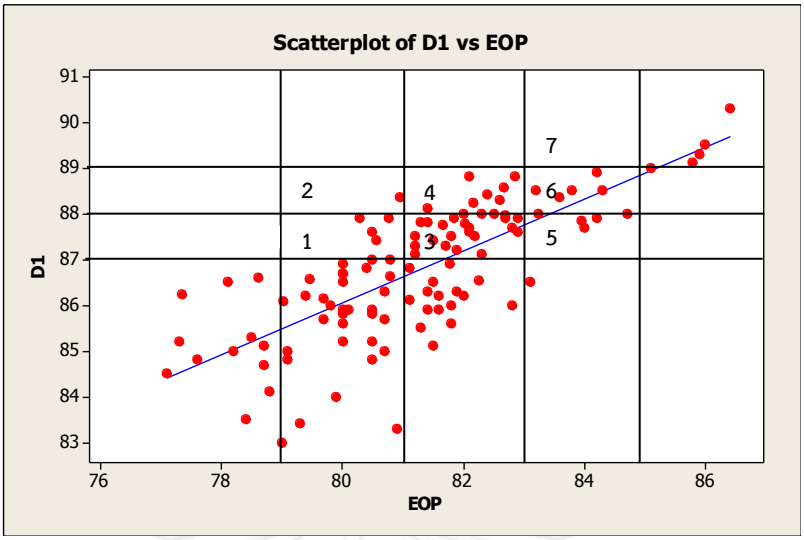
จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของเยื่อทั้งสองขั้นตอน ดังรูปที่ 3.1 จึงทำการแบ่งออกเป็นระดับช่วงความขาวสว่างได้เป็นทั้งหมด 7 กลุ่ม โดยทำการแบ่งระดับของค่าความขาวสว่างของเยื่อในขั้นตอน D_1 อย่างละเอียดเพราะเป็นขั้นตอนการปรับสภาวะเยื่อขั้นตอนสุดท้ายก่อนส่งให้โรงกระดาษ แต่ในช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP จะไม่แบ่งระดับค่าความขาวสว่างอย่างละเอียดเนื่องจากผู้ทดลองต้องการควบคุมจำนวนการทดลองไม่ให้มีมากเกินไป

ผู้วิจัยสามารถจัดชุดการทดลองแยกตามระดับค่าความขาวสว่าง โดยแบ่งระดับช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP มีค่าห่างกันช่วงระดับละ 2% และแต่ละช่วงระดับของค่าความขาวสว่างเยื่อ EOP สามารถแบ่งเป็นช่วงระดับของเยื่อ D_1 ย่อยจำนวน 2 ช่วงระดับ ห่างกันระดับละ 1% แต่ในชุดการทดลองที่ 7 จะเห็นว่าช่วงระดับของเยื่อ EOP ในช่วงค่าความขาวสว่าง 83.0-84.9% มีการแบ่งระดับย่อยของค่าความขาวสว่างเยื่อ D1 ออกเป็น 3 ระดับย่อย เนื่องจากในช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP ดังกล่าว เยื่อ D1 มีค่าความขาวสว่างสูงถึง 89.9% ดังนั้นจึงสามารถแบ่งช่วงระดับค่าความขาวสว่างของเยื่อ เพื่อจัดชุดการทดลองได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3. 1 การแบ่งชุดการทดลองและแยกระดับค่าความขาวสว่างเยื่อ EOP และ D1

การทดลองชุดที่	เยื่อจากขั้นตอน EOP		เยื่อจากขั้นตอน D1	
	ระดับที่	ช่วงความขาวสว่าง	ระดับที่	ช่วงความขาวสว่าง
1	1	79.0-80.9	1	87-87.9
2	1	79.0-80.9	2	88-88.9
3	2	81.0-82.9	1	87-87.9
4	2	81.0-82.9	2	88-88.9
5	3	83.0-84.9	1	87-87.9
6	3	83.0-84.9	2	88-88.9
7	3	83.0-84.9	3	89-89.9

จากตารางที่ 3.1 สามารถร่างแผนผังของชุดการทดลองที่แบ่งตามระดับความสัมพันธ์ของค่าความขาวสว่างได้ดังรูปที่ 3.2 จะเห็นได้ว่าชุดการทดลองที่แบ่งกลุ่มไว้นั้นค่อนข้างครอบคลุมค่าความขาวสว่างของเยื่อที่เป็นไปได้ทั้งหมดและมีการออกแบบชุดการทดลองที่ 7 ไว้รองรับสำหรับในกรณีที่มีการเดินเยื่อเกรดขาวสว่างสูงและจำเป็นต้องส่งเยื่อให้โรงกระดาษซึ่งค่าความขาวสว่างของเยื่อ D1 จะมีค่าสูงกว่า 89% สำหรับช่วงที่เยื่อมีคุณภาพอยู่นอกเหนือขอบเขตช่วงการทดลองจะไม่ทำการผสมเยื่อ เช่น ในช่วงที่เยื่อ D1 มีค่าความขาวสว่างต่ำกว่า 87% เป็นค่าความขาวสว่างของเยื่อตามที่โรงกระดาษต้องการอยู่แล้วจึงไม่จำเป็นต้องผสมเยื่อก่อนส่งให้โรงกระดาษ และในช่วงที่เยื่อ EOP มีค่าความขาวสว่างสูงกว่า 85% ซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างในระดับที่โรงกระดาษต้องการเช่นกัน ดังนั้นหน่วยงานฟอกเยื่อสามารถส่งเยื่อ EOP ให้โรงกระดาษได้โดยตรง (By pass) โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการฟอกที่ขั้นตอน D1 แต่ยังคงต้องปรับค่า pH ของเยื่อด้วยกรดซัลฟูริคให้ค่า pH ของเยื่อ EOP ที่จะส่งให้โรงกระดาษมีค่าอยู่ในช่วง 4.5-6.0 ตามที่โรงกระดาษต้องการก่อนจึงจะสามารถส่งเยื่อให้โรงกระดาษได้



รูปที่ 3. 2 แผนภาพการแบ่งชุดการทดลองตามระดับความสัมพันธ์ของค่าความขาวสว่าง

(2) ออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อหาสูตรการผสมเยื่อที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละช่วงระดับค่าความขาวสว่างของเยื่อทั้ง 2 โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (DOE) ด้วยวิธีการของพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design) โดยในงานวิจัยจะทำการทดลองที่จุดศูนย์กลาง (Center point) เพียง 3 การทดลองเพื่อลดจำนวนการทดลอง โดย จัดทำรูปแบบการทดลอง (Design Matrix) สำหรับแต่ละชุดการทดลองได้ดังตารางที่ 3.2

โดยเมื่อกำหนดตัวแปรดังนี้

X_1 คือ อัตราส่วนการผสมเยื่อ EOP ต่อเยื่อ D1

X_2 คือ ปริมาณกรดซัลฟูริคที่ใช้ในการปรับ pH เยื่อหลังผสม

ตารางที่ 3. 2รูปแบบการทดลอง (Design Matrix) ที่ใช้ในงานวิจัย

Central Composite Design

```
Factors:       2     Replicates:     1
Base runs:    11     Total runs:    11
Base blocks:   1     Total blocks:   1

Two-level factorial: Full factorial

Cube points:             4
Center points in cube:   3
Axial points:            4
Center points in axial:  0

Alpha: 1.41421
```

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	%Mixed	H2SO4
1	1	1	1	-1.00000	-1.00000
2	2	1	1	1.00000	-1.00000
3	3	1	1	-1.00000	1.00000
4	4	1	1	1.00000	1.00000
5	5	-1	1	-1.41421	0.00000
6	6	-1	1	1.41421	0.00000
7	7	-1	1	0.00000	-1.41421
8	8	-1	1	0.00000	1.41421
9	9	0	1	0.00000	0.00000
10	10	0	1	0.00000	0.00000
11	11	0	1	0.00000	0.00000

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 77 การทดลอง (7 ชุดการทดลอง x 11 การทดลองต่อหนึ่งชุด) และกำหนดระดับ ของแต่ละปัจจัย เพื่อทำการทดลอง ได้ดังนี้

ตารางที่ 3. 3 การระบุค่าของปัจจัยตามระดับการทดลอง

ระดับของปัจจัย	ร้อยละของเยื่อ EOP ที่ใช้ผสม (%)	ปริมาณกรด H_2SO_4 0.05 Mที่ใช้ (ml)	
		การทดลองชุดที่ 1	การทดลองชุดที่ 2-7
-1.414	1.7	0.0	1.0
-1	10	1.0	2.0
0	30	3.5	4.5
1	50	6.0	7.0
1.414	58.3	7.0	8.0

ในการทดลองชุดที่ 1 จะเห็นได้ว่าช่วงของปริมาณกรดที่เติมแตกต่างจากการทดลองชุดอื่นๆ เนื่องจากในการทดลองชุดที่ 1 เยื่อ D_1 ช่วงค่าความขาวสว่างเท่ากับ 87.0-87.9 ที่นำมาทำการผสมเป็นเยื่อที่มีค่า pH ต่ำกว่าเยื่อช่วงความขาวสว่างที่สูงกว่า เนื่องมาจากเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงเป็นเยื่อที่ผลิตโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) มากกว่า ซึ่งในกระบวนการผลิตเยื่อหากมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการผลิตจะต้องมีการใช้ด่างหรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) มากขึ้น เพื่อปรับสภาวะให้เหมาะสมกับการทำงานของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ จึงทำให้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงกว่าหรือมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกมากกว่า จะมีค่า pH สูงกว่าเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อนำมาผสมกับเยื่อ EOP ในช่วงที่มีค่าความขาวสว่างต่ำที่สุดก็มีค่า pH ต่ำกว่าเยื่อ EOP ช่วงความขาวสว่างสูงกว่าด้วยเช่นกัน ดังนั้นในชุดการทดลองที่ 1 จึงมีการปรับช่วงเพื่อกำหนด Code ในการทดลอง เป็น -1.414, -1, 0, 1, 1.414 เท่ากับ 0, 1, 3.5, 6, และ 7 มิลลิลิตร ตามลำดับ

3.4.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการเคมี

ทำการทดลองผสมเยื่อและใช้ปริมาณกรดซัลฟูริคตามรูปแบบการทดลองที่ออกแบบไว้ แล้ววิเคราะห์คุณภาพเยื่อหลังการผสมจากแต่ละการทดลอง การทดลองผสมเยื่อในห้องปฏิบัติการมีขั้นตอนดังนี้

1) เตรียมเยื่อจากกระบวนการผลิตโดยเก็บตัวอย่างเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D1 หลังจากขั้นตอนการบีบล้าง (Wash press) โดยทำการเก็บตัวอย่างแบบผสม (Composite sampling) ในแต่ละช่วงค่าความขาวสว่างตามที่ต้องการ

2) ทำการวิเคราะห์ค่าความขาวสว่าง (Brightness) และค่าความเข้มข้นของเยื่อ (Pulp consistency) เริ่มต้นซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 27-30% เพื่อนำมาค่าความเข้มข้นของเยื่อมาทำการเตรียมตัวอย่างเยื่อให้มีค่าความเข้มข้นของเยื่อ 4% เท่ากับค่าความเข้มข้นของเยื่อในระบบท่อก่อนเข้าถัง LC

3) ทำการผสมเยื่อและเติมกรดตามระดับที่กำหนด ซึ่งจะทำการผสมเยื่อให้ได้ปริมาณรวมเท่ากับ 500 กรัม เพื่อให้ปริมาณเพียงพอต่อการนำไปวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างและค่า pH การคำนวณปริมาณเยื่อเพื่อเตรียมให้ได้ความเข้มข้น 4% ดังนี้

$$\text{ปริมาณเยื่อที่ต้องใช้ (กรัม)} = \frac{(\text{ความเข้มข้นของเยื่อที่ต้องการ (4\%)}) \times (\text{ปริมาณเยื่อที่ต้องการ (กรัม)})}{(\text{ความเข้มข้นของเยื่อเริ่มต้นจากขั้นตอนบีบล้าง (\%)})}$$

ยกตัวอย่างการคำนวณ เช่น การทดลองในชุดที่ 1 ผสมเยื่อที่ระดับ -1 หรืออัตราการผสมเยื่อ EOP เท่ากับ 10%

จากเยื่อที่มีค่า %Consistency เท่ากับ 4% ทั้งหมดที่ต้องการ 500 กรัม

น้ำหนักของเยื่อ EOP ที่มีค่า %Consistency 4% ที่ต้องการคือ 50 กรัม

น้ำหนักของเยื่อ D1 ที่มีค่า %Consistency 4% ที่ต้องการคือ 450 กรัม

เพื่อให้ได้เยื่อ EOP ที่มีค่า %Consistency 4% และมีน้ำหนัก 50 กรัม

ค่าความเข้มข้นของเยื่อ EOP เริ่มต้น เท่ากับ 28.5%

ต้องชั่งเยื่อ EOP เริ่มต้น เท่ากับ $\frac{(4) \times (50)}{(28.5)}$ = 7.0 กรัม และเติมน้ำ 43.0 กรัม

เพื่อให้ได้เยื่อ D1 ที่มีค่า %Consistency 4% และมีน้ำหนัก 450 กรัม

ค่าความเข้มข้นของเยื่อ D1 เริ่มต้น เท่ากับ 26.9%

ต้องชั่งเยื่อ D1 เริ่มต้น เท่ากับ $\frac{(4) \times (450)}{(26.9)}$ = 66.9 กรัม และเติมน้ำ 383.1 กรัม

4) หลังจากได้เยื่อ EOP และเยื่อ D1 ที่มีความเข้มข้น 4% ในปริมาณที่ต้องการแล้ว จึงนำไปผสมกันในบีคเกอร์พลาสติกขนาด 1 ลิตร ที่แช่อยู่ในอ่างน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิ 80 ± 5 องศาเซลเซียส เติมกรดตามระดับที่กำหนดในบีคเกอร์ แล้วทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบมือจับเป็นเวลา 30 วินาที

5) นำเยื่อที่ได้จากการผสมไปทำการวิเคราะห์ค่าความขาวสว่าง และค่า pH บันทึกค่าที่วิเคราะห์ได้

3.4.3 วิธีการวิเคราะห์คุณภาพเยื่อ

การทดลองในห้องปฏิบัติการมีวิธีการปฏิบัติตามวิธีการที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ ดังต่อไปนี้

(1) <u>การวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างของเยื่อแบบเปียก (Wet brightness)</u>

เป็นวิธีการใช้หาความขาวสว่างของเยื่ออย่างรวดเร็ว โดยเป็นการประยุกต์มาจากมาตรฐาน SCAN C11:75 Pulp ISO brightness เพื่อช่วยในการควบคุมค่าความขาวสว่างของเยื่อในกระบวนการฟอกเยื่อ ใช้เครื่องมือยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color Touch PC มีการสอบเทียบเครื่องมือ(Calibration) ด้วยแผ่นเซรามิคมาตรฐานในตัวเครื่องทุกครั้งก่อนการวัด และสอบเทียบด้วยกระดาษมาตรฐานเดือนละ 1 ครั้ง รายงานค่าความขาวสว่างที่วัดได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์ มีลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์ ดังขั้นตอนต่อไปนี้ โดยแสดงวิธีการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการได้ตามรูปที่ 3.3 และ 3.4

1. ชั่งตัวอย่างประมาณ 20 กรัม ลงในบีคเกอร์ 1 ลิตร
2. เติมน้ำปราศจากไอออน 500 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้เยื่อกระจายตัวโดยการปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบมือจับ ประมาณ 1-3 นาที
3. ล้างเยื่อด้วยน้ำปราศจากไอออน 2 ลิตร
4. กรองเยื่อทั้งหมดผ่านกรวยกรองแบบมีปั๊มลมดูดโดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 3
5. ปิดด้านบนของแผ่นเยื่อด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และนำแผ่นเยื่อไปทำการกดอัดที่ความดัน 300 kPa เป็นเวลา 1 นาที
6. วัดค่า Reflectance factor 4 ค่า ด้วยเครื่อง Technidyne รุ่น Color Touch PC เฉพาะจากด้านบนของแผ่นชีท โดยค่าที่วัดได้แต่ละค่าไม่ควรแตกต่างกันมากกว่า 1%
7. คำนวณค่าเฉลี่ยและรายงานค่าในหน่วย %

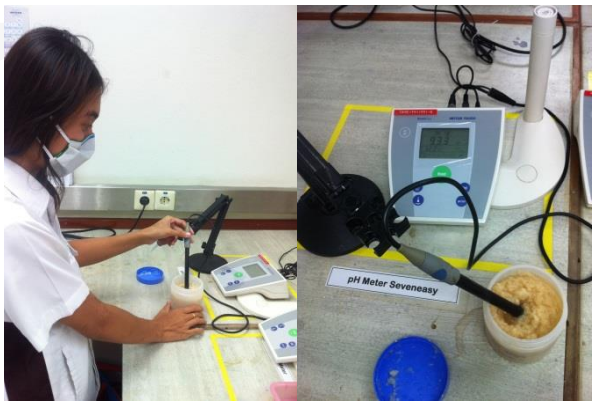
รูปที่ 3. 3 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างของเยื่อ

รูปที่ 3. 4 เครื่องมือวัดค่าความขาวสว่าง Technidyne Color Touch PC

(2) <u>การวิเคราะห์ค่า pH ด้วย pH Meter</u>

วิธีการนี้มีจุดมุ่งหมายที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตที่เป็นประจำ โดยต้องควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างไม่ให้เกิน 35-40 องศาเซลเซียส เพื่อให้ค่าที่ได้มีความถูกต้องและแม่นยำ เครื่องที่ใช้ในการวัด คือ เครื่อง pH Meter ยี่ห้อ Mettler รุ่น 7-EASY โดยจะทำการสอบเทียบกับสารมาตรฐาน (Buffer) ที่มีค่า pH คงที่เป็นประจำทุกวัน ทำการสอบเทียบทั้งหมด 3 จุด ที่ค่า pH เท่ากับ 4 7 และ 10 เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการใช้งาน โดยมีขั้นตอนวิธีการวัดตามวิธีการต่อไปนี้ และสามารถแสดงวิธีการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 3.5

1. ล้าง Electrode ด้วยน้ำปราศจากไอออน
2. จุ่ม Electrode ลงในตัวอย่าง
3. กดปุ่ม Read รอจนหน้าจอแสดงสัญลักษณ์ $\sqrt{A}$
4. อ่านค่า pH ที่แสดงที่หน้าจอ และล้าง Electrode ด้วยน้ำปราศจากไอออนอีกครั้งหลังยกเลิกการใช้



รูปที่ 3. 5 วิธีการวัดค่า pH ของตัวอย่างเยื่อ และเครื่อง pH meter ที่ใช้ในการวิเคราะห์

(3) การวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเยื่อ (%Consistency)

เป็นวิธีการหาความเข้มข้นของเยื่อ โดยใช้ความสัมพันธ์จากน้ำหนักของเยื่อแห้งที่ได้จากการกรองตัวอย่างที่รู้น้ำหนักหรือปริมาตรที่แน่นอนจากตัวอย่างส่วนที่ไม่ได้กรอง วิธีนี้ดัดแปลงมาจากมาตรฐาน SCAN C17:64 “Stock Concentration” เครื่องมือสำหรับชั่งน้ำหนักที่ใช้ในวิธีการนี้จะทำการสอบเทียบจากหน่วยงานภายนอก ปีละ 2 ครั้ง เพื่อความน่าเชื่อถือของเครื่องมือวัด วิธีการเตรียมตัวอย่างและวิธีการวิเคราะห์มีขั้นตอนดังนี้ โดยสามารถแสดงวิธีการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้ในห้องปฏิบัติการได้ดังรูปที่ 3.6 และ 3.7

1. อบกระดาษกรองในเครื่องให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว (Rapid Dryer) เป็นเวลา 7 นาที และชั่งน้ำหนักกระดาษกรองทันทีขณะร้อน ด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียด 0.001 กรัม บันทึกน้ำหนักเป็น A กรัม
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง บันทึกน้ำหนักเป็น B กรัม ซึ่งตัวอย่างที่ใช้ในงานวิจัยเป็นตัวอย่างจากขั้นตอนการบีบล้าง จึงใช้น้ำหนักตัวอย่าง 40 กรัม
3. เติมน้ำให้มีน้ำหนักรวมประมาณ 2500 กรัม จดน้ำหนักที่แน่นอนเป็น C กรัม แล้วทำการปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบมือจับ เพื่อผสมให้ตัวอย่างเข้ากัน
4. ตวงตัวอย่างที่เจือจางจากข้อ 3 ประมาณ 300 กรัม ใส่ในบีคเกอร์ขนาด 500 มิลลิลิตร จดน้ำหนักเป็น D กรัม
5. นำกระดาษกรองที่ทราบน้ำหนักใส่ในกรวยกรองแบบมีปั๊มดูดอากาศ ทำให้กระดาษกรองชื้นและแนบกับกรวยกรอง เปิดปั๊มดูดอากาศและเทตัวอย่างใส่กรวยกรอง
6. กลั้วบีคเกอร์ด้วยน้ำ และเทลงในกรวยกรองเพื่อให้เยื่อที่ติดในบีคเกอร์ลงไปในกรวยกรองให้หมด
7. นำกระดาษกรองพร้อมตัวอย่างออก
8. อบในเครื่องให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว นาน 7 นาที โดยเมื่อผ่านไป 3-4 นาที ให้กลับด้านของตัวอย่างเมื่อครบ 7 นาที นำตัวอย่างออกมาชั่งน้ำหนักทันทีขณะร้อน บันทึกน้ำหนักเป็น E กรัม
9. การคำนวณและรายงานผล %Consistency = $\frac{(E-A) \times C \times 100}{(B \times D)}$ รายงานเป็นหน่วยเปอร์เซนต์

Chulalongkorn University

รูปที่ 3. 6 ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างและการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเยื่อ

รูปที่ 3. 7 เครื่อง Rapid dryer และเครื่องชั่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความเข้มข้นของเยื่อ

3.4.4 การวิเคราะห์ข้อมูลและจัดทำสูตรการผสมเยื่อ

เมื่อทำการทดลองจนครบจำนวนรันที่กำหนดแล้วนำผลการทดลองทั้งหมดจากทุกชุดการทดลองมาทำการวิเคราะห์ข้อมูลตามหลักการทางสถิติเพื่อหาสูตรในการผสมเยื่อของแต่ละชุดการผสม ที่ทำให้คุณภาพเยื่อที่ได้มีค่าความขาวสว่างและค่าความเป็นกรดด่างอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด เท่ากับช่วง 85-87% และ 4.5-6 ตามลำดับ

3.4.5 การทดลองในระดับโรงงาน

นำสูตรที่ได้จากห้องปฏิบัติการไปปรับใช้ในระดับโรงงานเพื่อยืนยันสูตรการผสมเยื่อที่ได้ โดยพิจารณาจากค่าความขาวสว่างเริ่มต้น (Brightness input) ของเยื่อ EOP และเยื่อ D_1 ก่อนผสม เลือกช่วงค่าความขาวสว่างตามชุดการทดลอง แล้วทำการทดลองปรับอัตราการผสมและปริมาณกรดซัลฟูริคให้ได้ตามสูตรจากห้องปฏิบัติการ บันทึกค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังการผสมตามสูตร

วิเคราะห์ผลการทดลองในระดับโรงงาน เปรียบเทียบคุณภาพเยื่อในกรณีที่ไม่มีการผสมเยื่อและในกรณีที่มีการผสมเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษ สรุปผลการทดลอง

3.5 การควบคุมการดำเนินงาน

นำผลการสรุปข้อมูลจากการทดลองไปจัดทำแผนการผลิตในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อในกระบวนการผลิตเยื่อแผ่นแห้ง ติดตามและควบคุมคุณภาพเยื่อให้อยู่ในเกณฑ์

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

จากการทดลองผสมเยื่อทั้ง 7 ชุดการทดลองในห้องปฏิบัติการได้ผลการวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังผสมดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4. 1 ผลการทดลอง

ชุดการทดลอง	การทดลอง	ปัจจัย (Coded Unit)		ปัจจัย (Uncoded Unit)		ค่าความขาวสว่าง (%)	pH
		%Mixed	H2SO4	%EOP Mixed	0.05 M H2SO4 (ml)		
1 ช่วงความขาวสว่าง EOP 79.0%-80.9% D1 81.0%-87.9%	1	-1	-1	10	2	86.90	4.63
	2	1	-1	50	2	84.20	6.12
	3	-1	1	10	7	86.65	3.9
	4	1	1	50	7	83.96	5.09
	5	-1.414	0	1.7	4.5	87.27	3.94
	6	1.414	0	58.3	4.5	83.61	5.93
	7	0	-1.414	30	1	85.45	5.43
	8	0	1.414	30	8	85.29	4.32
	9	0	0	30	4.5	84.97	4.95
	10	0	0	30	4.5	85.42	4.82
	11	0	0	30	4.5	85.41	4.87

ชุดการทดลอง	การทดลอง	ปัจจัย (Coded Unit)		ปัจจัย (Uncoded Unit)		ค่าความขาวสว่าง (%)	pH
		%Mixed	H2SO4	%EOP Mixed	0.05 M H2SO4 (ml)		
2 ช่วงความขาวสว่าง EOP 79.0%-80.9% D1 88.0%-88.9%	12	-1	-1	10	2	87.65	5.12
	13	1	-1	50	2	84.74	6.59
	14	-1	1	10	7	87.39	3.98
	15	1	1	50	7	84.42	5.15
	16	-1.414	0	1.7	4.5	88.79	4.18
	17	1.414	0	58.3	4.5	84.05	6.12
	18	0	-1.414	30	1	85.92	6.35
	19	0	1.414	30	8	86.08	4.39
	20	0	0	30	4.5	85.76	5.15
	21	0	0	30	4.5	85.78	5.11
	22	0	0	30	4.5	85.98	5.25
3 ช่วงความขาวสว่าง EOP 81.0%-82.9% D1 87.0%-87.9%	23	-1	-1	10	2	87.20	4.98
	24	1	-1	50	1	85.86	6.31
	25	-1	1	10	7	87.01	3.89
	26	1	1	50	7	84.97	5.10
	27	-1.414	0	1.7	4.5	87.56	4.10
	28	1.414	0	58.3	4.5	84.64	5.97
	29	0	-1.414	30	1	86.42	5.88
	30	0	1.414	30	8	85.04	4.21
	31	0	0	30	4.5	86.45	5.08
	32	0	0	30	4.5	86.37	5.15
	33	0	0	30	4.5	86.58	5.09

ชุดการทดลอง	การทดลอง	ปัจจัย (Coded Unit)		ปัจจัย (Uncoded Unit)		ค่าความขาวสว่าง (%)	pH
		%Mixed	H2SO4	%EOP Mixed	0.05 M H2SO4 (ml)		
4 ช่วงความขาวสว่าง EOP 81.0%-82.9% D1 88.0%-88.9%	34	-1	-1	10	2	88.51	4.0
	35	1	-1	50	2	86.37	7.01
	36	-1	1	10	7	88.23	3.85
	37	1	1	50	7	84.43	5.31
	38	-1.414	0	1.7	4.5	88.74	4.01
	39	1.414	0	58.3	4.5	84.30	6.56
	40	0	-1.414	30	1	87.51	7.04
	41	0	1.414	30	8	85.20	3.8
	42	0	0	30	4.5	87.38	5.33
	43	0	0	30	4.5	87.30	5.36
	44	0	0	30	4.5	87.12	5.24
5 ช่วงความขาวสว่าง EOP 83.0%-84.9% D1 87.0%-87.9%	45	-1	-1	10	2	87.20	3.97
	46	1	-1	50	2	85.55	5.34
	47	-1	1	10	7	87.14	3.22
	48	1	1	50	7	85.01	4.23
	49	-1.414	0	1.7	4.5	87.90	3.31
	50	1.414	0	58.3	4.5	84.89	5.04
	51	0	-1.414	30	1	86.35	4.81
	52	0	1.414	30	8	85.56	3.52
	53	0	0	30	4.5	85.73	4.15
	54	0	0	30	4.5	85.93	4.00
	55	0	0	30	4.5	85.80	4.09

ชุดการทดลอง	การทดลอง	ปัจจัย (Coded Unit)		ปัจจัย (Uncoded Unit)		ค่าความขาวสว่าง (%)	pH
		%Mixed	H2SO4	%EOP Mixed	0.05 M H2SO4 (ml)		
6 ช่วงความขาวสว่าง EOP 83.0%-84.9% D1 88.0%-88.9%	56	-1	-1	10	2	87.29	4.95
	57	1	-1	50	2	85.14	6.3
	58	-1	1	1.7	7	86.99	3.57
	59	1	1	50	7	84.41	4.86
	60	-1.414	0	1.7	4.5	88.42	4.02
	61	1.414	0	58.3	4.5	85.01	5.94
	62	0	-1.414	30	1	85.69	6.09
	63	0	1.414	30	8	85.99	4.13
	64	0	0	30	4.5	86.10	4.97
	65	0	0	30	4.5	87.13	4.81
	66	0	0	30	4.5	86.20	4.81
7 ช่วงความขาวสว่าง EOP 83.0%-84.9% D1 89.0%-89.9%	67	-1	-1	10	2	88.71	5.14
	68	1	-1	50	2	85.64	6.47
	69	-1	1	10	7	88.16	3.78
	70	1	1	50	7	85.53	4.88
	71	-1.414	0	1.72	4.5	88.49	4.11
	72	1.414	0	58.28	4.5	84.61	5.96
	73	0	-1.414	30	1	87.06	6.31
	74	0	1.414	30	8	85.81	4.12
	75	0	0	30	4.5	87.08	5.07
	76	0	0	30	4.5	87.13	5.08
	77	0	0	30	4.5	87.31	4.94

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบก่อนนำไปทำการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป เพื่อทดสอบว่าผลการทดลองทั้งสองปัจจัยจากทุกชุดการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ หรือให้รูปแบบความผิดพลาดของข้อมูลเป็นไปตามหลักการ $\varepsilon_{ij} \approx NID(0, \sigma^2)$ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลนั้นถูกต้องและเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด โดยทำการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่

1) สมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption) ทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ โดยพิจารณาจาก Normality plot ดูการกระจายตัวของข้อมูลตามแนวเส้นตรง และพิจารณาจากค่า p-value ที่ต้องมากกว่า 0.05 จึงจะยอมรับว่าข้อมูลแต่ละชุดมีการกระจายตัวแบบปกติ

2) สมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence Assumption) โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล (Observation Order) พิจารณาความสัมพันธ์ของการกระจายตัวของส่วนตกค้างเทียบกับลำดับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งข้อมูลที่เป็นอิสระต่อกันนั้นการกระจายตัวจะต้องไม่มีรูปแบบที่แน่นอนหรือไม่มีลักษณะเป็นแนวโน้มใดๆ

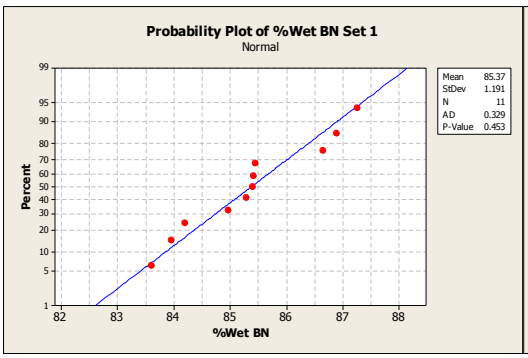
3) สมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) สามารถวิเคราะห์ได้โดยการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted Value) กราฟที่ได้ไม่ควรมีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างอย่างใดทั้งสิ้น

โดยทำการแยกวิเคราะห์รายปัจจัยของทุกชุดการทดลองแยกตามปัจจัยตอบสนองที่ต้องการศึกษา คือ ค่าความขาวสว่าง และค่า pH ของเยื่อหลังการผสม ดังนี้

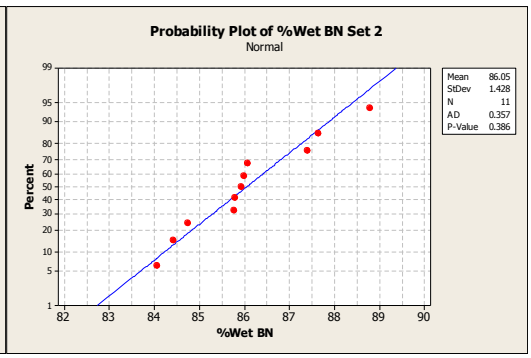
4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าความขาวสว่าง

4.2.1.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

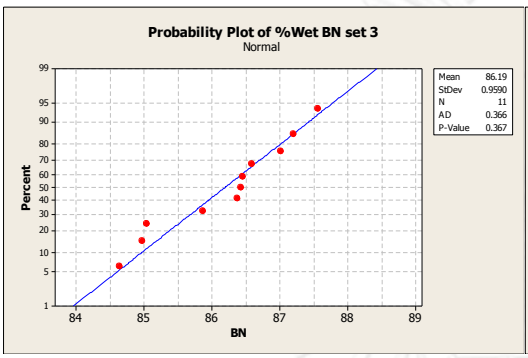
จากการทดสอบสมมติฐานเรื่องการกระจายตัวของข้อมูลค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังผสมจากการทดลองทั้ง 7 ชุด โดยการใช้ Normality plot ได้ผลดังรูปที่ 4.1 (a-g)



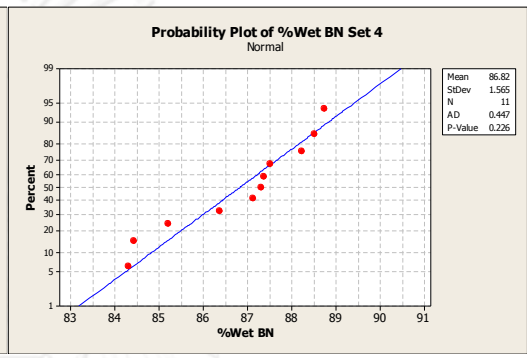
รูปที่ 4.1(a)



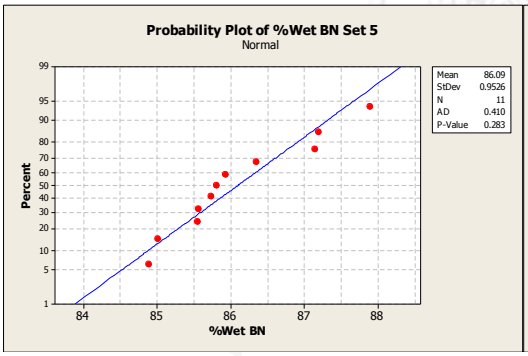
รูปที่ 4.1(b)



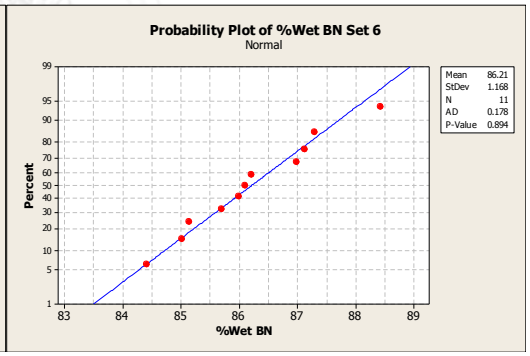
รูปที่ 4.1(c)



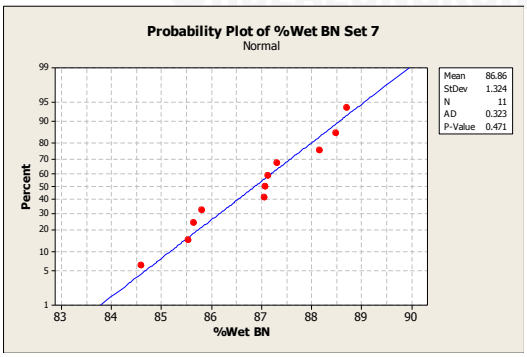
รูปที่ 4.1(d)



รูปที่ 4.1(e)



รูปที่ 4.1(f)



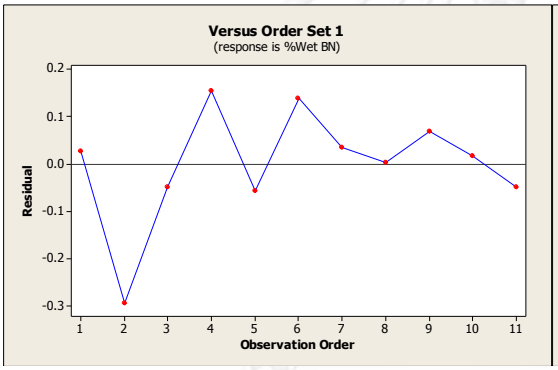
รูปที่ 4.1(g)

รูปที่ 4. 1(a-g) Normal Probability Plot ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมชุดที่ 1 ถึง 7

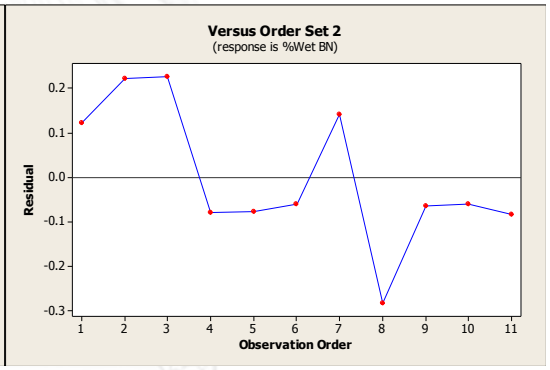
รูปที่ 4.1(a-g) ผลการทดสอบรูปแบบการกระจายตัวของค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสม พบว่าทุกชุดการทดลองมีผลค่าความขาวสว่างกระจายตัวตามแนวเส้นตรงใน Normality Plot และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของแต่ละชุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.453 0.386 0.367 0.226 0.283 0.894 และ 0.471 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกชุดการทดลองมีค่า p-value มากกว่า 0.05 ทั้งหมด นั่นคือยอมรับสมมติฐาน H_0 ข้อมูลค่าความขาวสว่างของทุกชุดการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

4.2.1.2 การทดสอบสมมติฐานของการเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual)

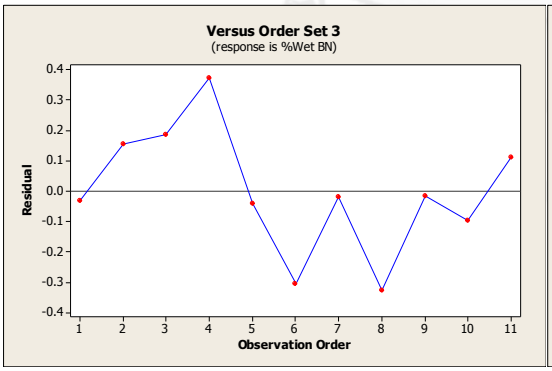
ผลการทดสอบสมมติฐานของการเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างจากการทดลองทั้ง 7 ชุด โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.2 (a-g)



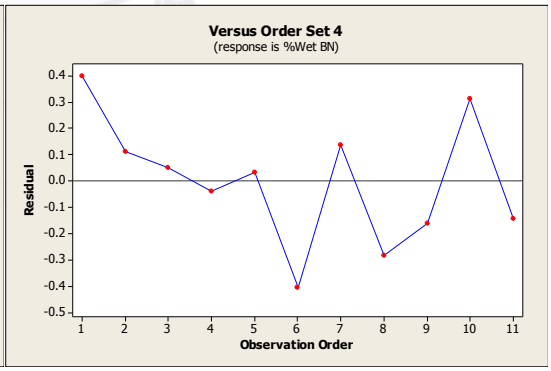
รูปที่ 4.2(a)



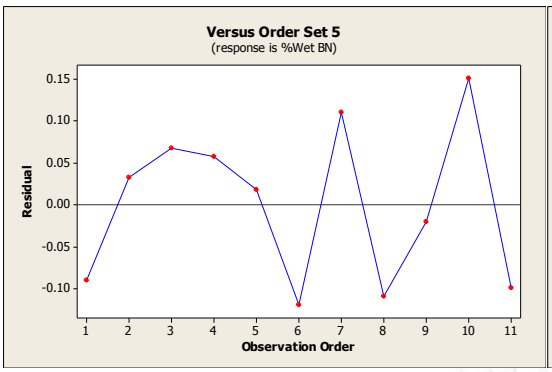
รูปที่ 4.2(b)



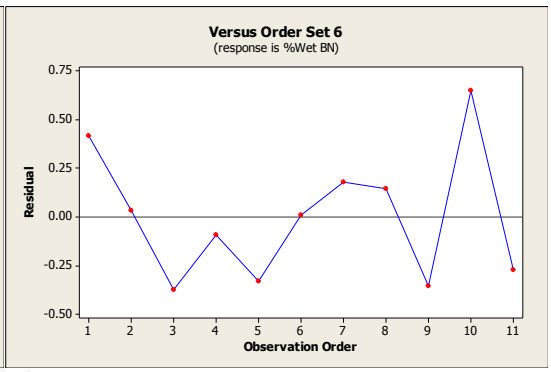
รูปที่ 4.2(c)



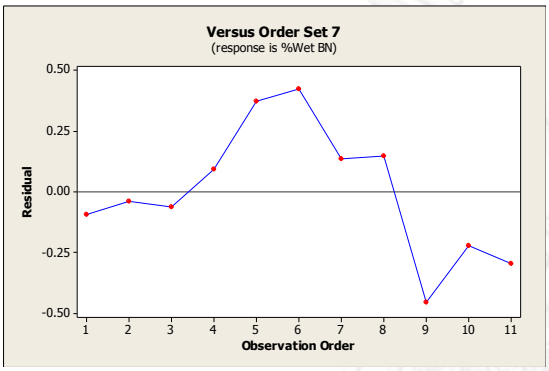
รูปที่ 4.2(d)



รูปที่ 4.2(e)



รูปที่ 4.2(f)



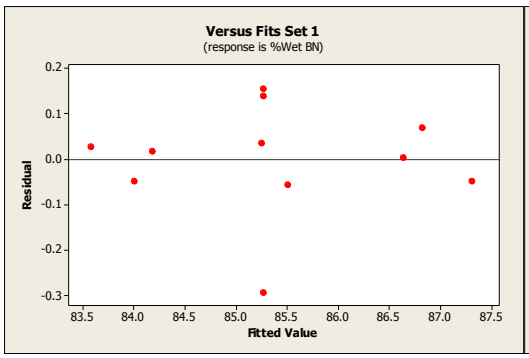
รูปที่ 4.2(g)

รูปที่ 4. 2 (a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างกับเวลาที่เก็บข้อมูลชุดที่ 1 ถึง 7

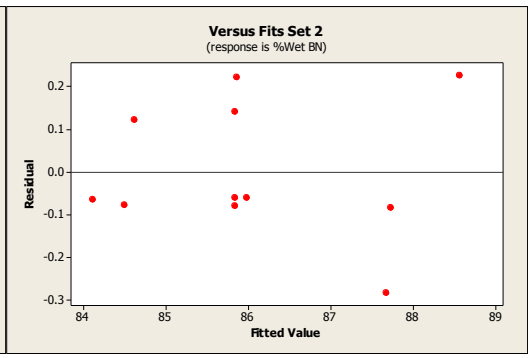
จากรูปที่ 4.2(a-g) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างของแบบจำลองที่เกิดขึ้นและลำดับการเก็บข้อมูลของข้อมูลทั้ง 7 ชุดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่แสดงเป็นแนวโน้ม และไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลค่าความขาวสว่างมีความเป็นอิสระต่อกันในข้อมูลทุกชุด

4.2.1.3 การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

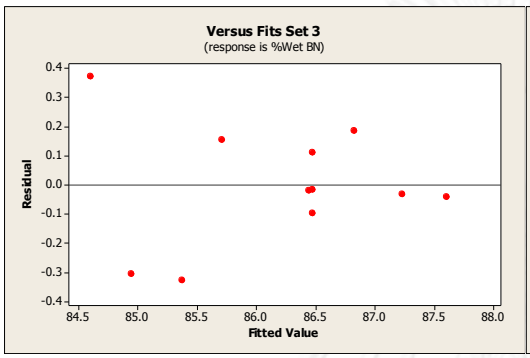
ผลการทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างจากผลการทดลองทั้ง 7 ชุด โดยพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างกับค่าที่ถูกฟิต แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 (a-g)



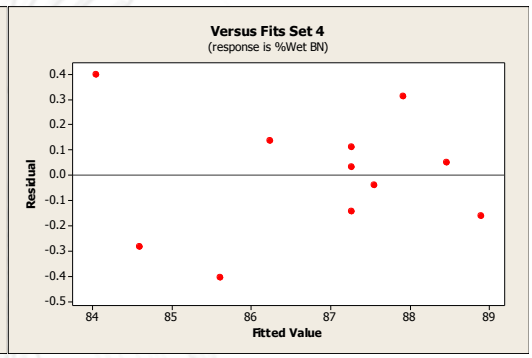
รูปที่ 4.3(a)



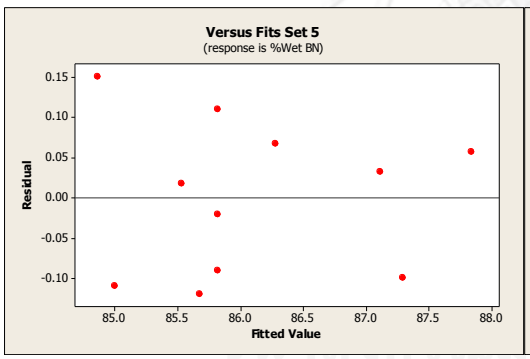
รูปที่ 4.3(b)



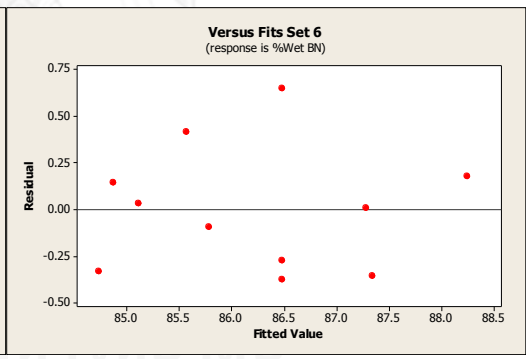
รูปที่ 4.3(c)



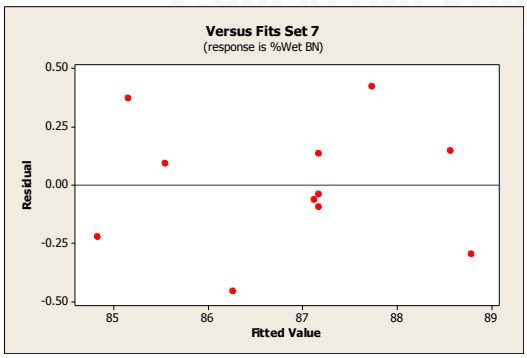
รูปที่ 4.3(d)



รูปที่ 4.3(e)



รูปที่ 4.3(f)



รูปที่ 4.3(g)

รูปที่ 4. 3 (a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างกับค่าที่ถูกฟิตชุดที่ 1 ถึง 7

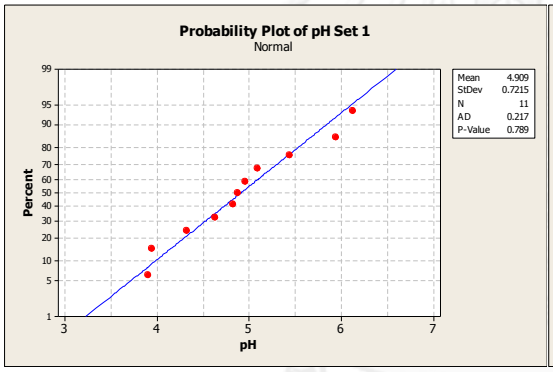
จากรูปที่ 4.3(a-g) พบว่าความสัมพันธ์ส่วนตกค้างของแบบจำลองที่เกิดขึ้นและค่าที่ถูกฟิตของข้อมูลทั้ง 7 ชุดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่มีลักษณะที่บานออกเป็นกรวยปลายเปิดหรือไม่มีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลทุกชุดมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสม พบว่าข้อมูลของค่าความขาวสว่างจากทุกชุดการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระ และมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลค่าความขาวสว่างไปทำการวิเคราะห์ต่อได้อย่างถูกต้องและเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด

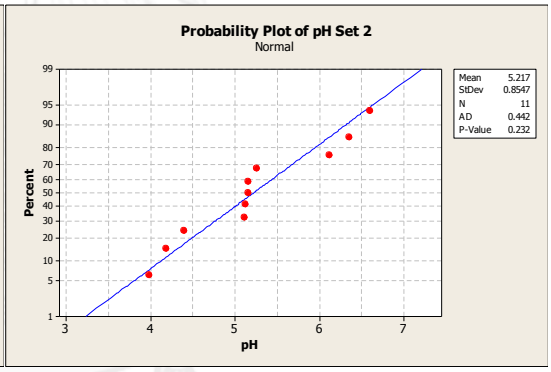
4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง

4.2.2.1 การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

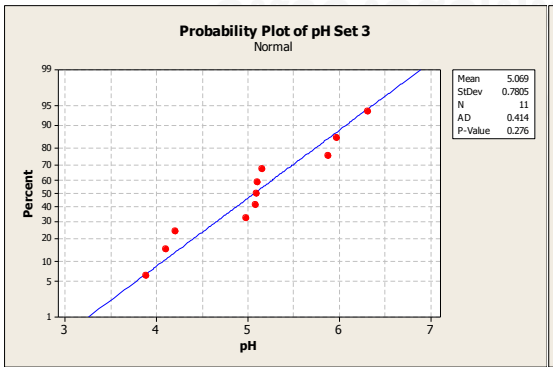
จากการทดสอบสมมติฐานเรื่องการกระจายตัวของข้อมูลค่า pH ของเยื่อหลังผสมจากการทดลองทั้ง 7 ชุด โดยการใช้ Normality plot ได้ผลดังรูปที่ 4.4 (a-g)



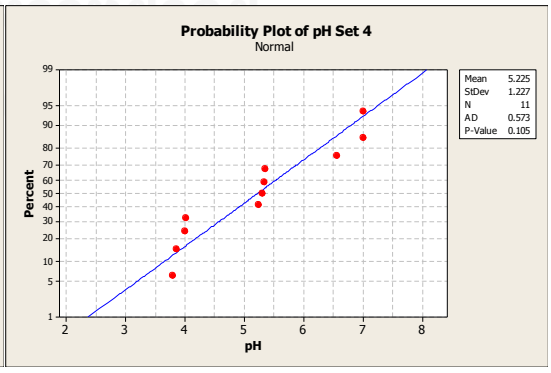
รูปที่ 4.4(a)



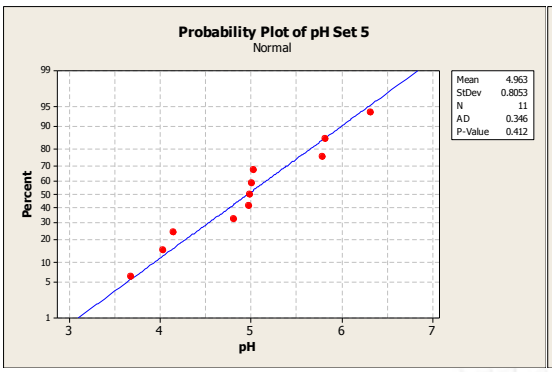
รูปที่ 4.4(b)



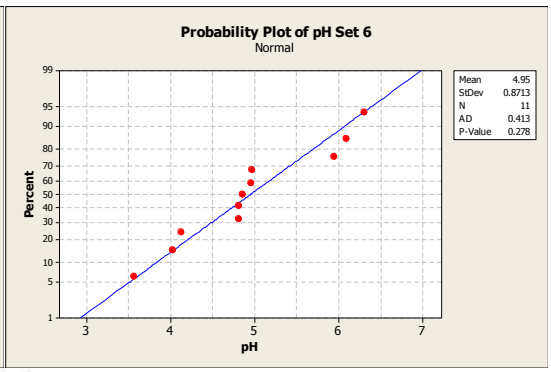
รูปที่ 4.4(c)



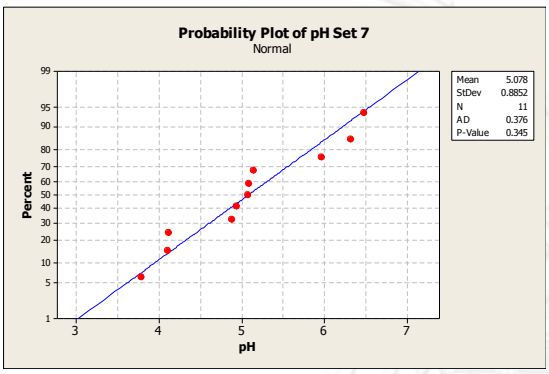
รูปที่ 4.4(d)



รูปที่ 4.4(e)



รูปที่ 4.5(f)



รูปที่ 4.4(g)

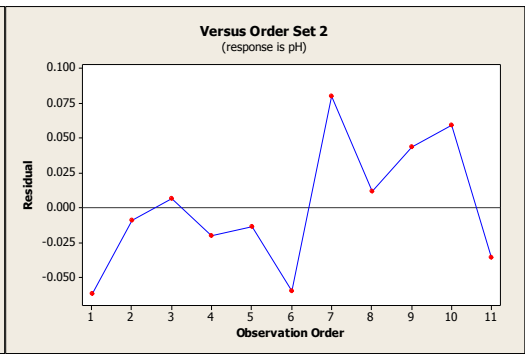
รูปที่ 4. 4 (a-g) Normal Probability Plot ค่า pH ของเยื่อหลังการผสมชุดที่ 1 ถึง 7

รูปที่ 4.4(a-g) ผลการทดสอบรูปแบบการกระจายตัวของค่า pH ของเยื่อหลังการผสม พบว่าทุกชุดการทดลองมีผลค่า pH กระจายตัวตามแนวเส้นตรงใน Normality Plot และเมื่อพิจารณาค่า p-value ของข้อมูลแต่ละชุดการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.789 0.232 0.276 0.105 0.421 0.278 และ 0.345 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าทุกชุดการทดลองมีค่า p-value มากกว่า 0.05 ทั้งหมด นั่นคือยอมรับสมมติฐาน H_0 ข้อมูลค่าความขาวสว่างของทุกชุดการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

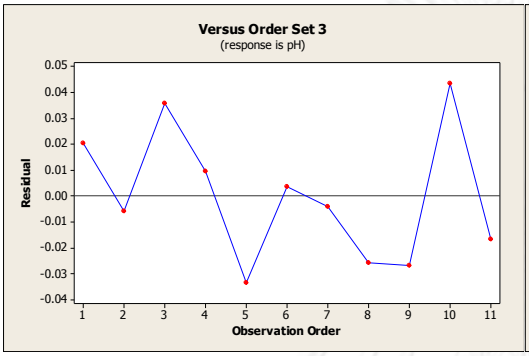
4.2.2.2 การทดสอบสมมติฐานของการเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual)

ผลการทดสอบสมมติฐานของการเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่า pH จากการทดลองทั้ง 7 ชุด โดยการพล็อตกราฟระหว่างค่าของส่วนตกค้างกับลำดับการทดลอง แสดงได้ดังรูปที่ 4.5 (a-g)

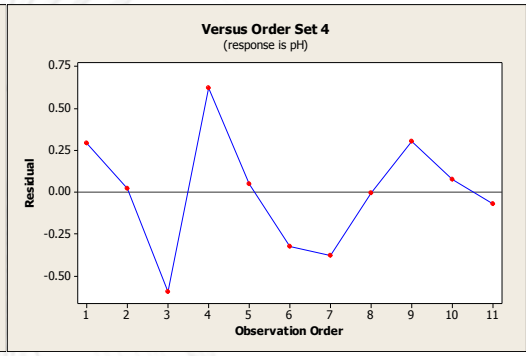
รูปที่ 4.5(a)



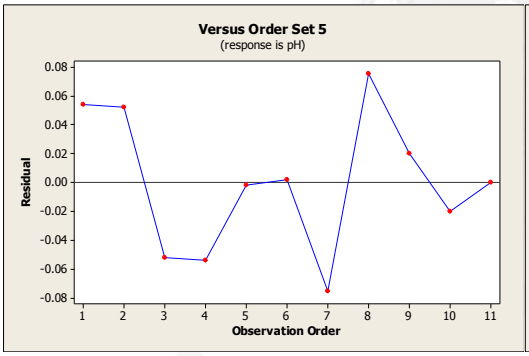
รูปที่ 4.5(b)



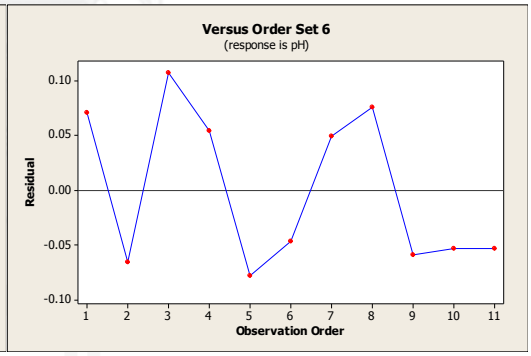
รูปที่ 4.5(c)



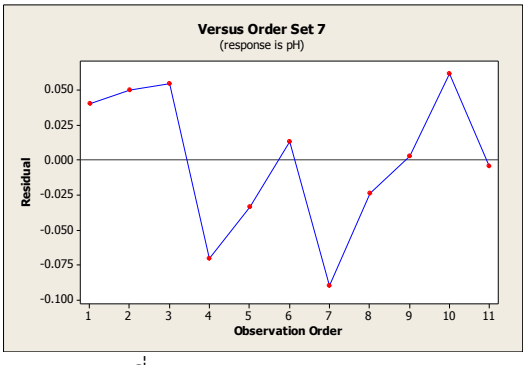
รูปที่ 4.5(d)



รูปที่ 4.5(e)



รูปที่ 4.5(f)



รูปที่ 4.5(g)

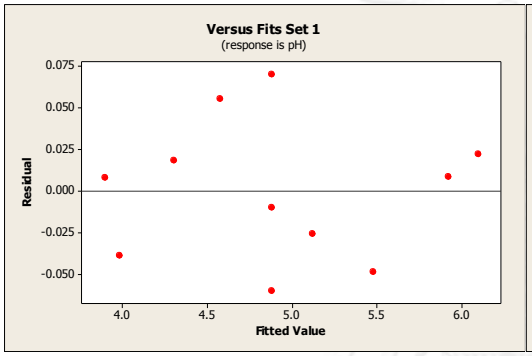
รูปที่ 4. 5 4.5(a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่า pH กับเวลาที่เก็บข้อมูลชุดที่ 1 ถึง 7

CHULALONGKORN UNIVERSITY

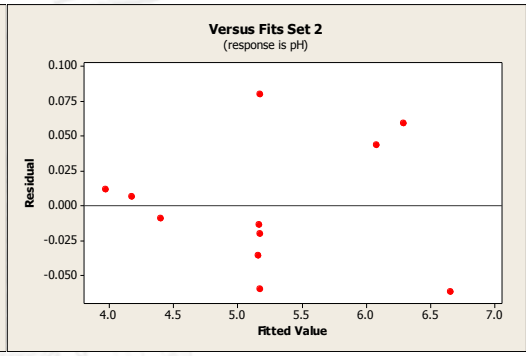
จากรูปที่ 4.5(a-g) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างของแบบจำลองที่เกิดขึ้นและลำดับการเก็บข้อมูลของข้อมูลทั้ง 7 ชุดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่แสดงเป็นแนวโน้ม และไม่มีความสัมพันธ์กับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลค่า pH ทุกชุดมีความเป็นอิสระต่อกัน

4.2.2.3 การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

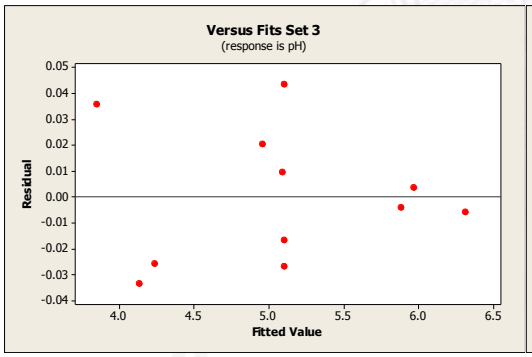
ผลการทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของค่า pH จากผลการทดลองทั้ง 7 ชุด โดยพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่างกับค่าที่ถูกฟิต แสดงได้ดังรูปที่ 4.6 (a-g)



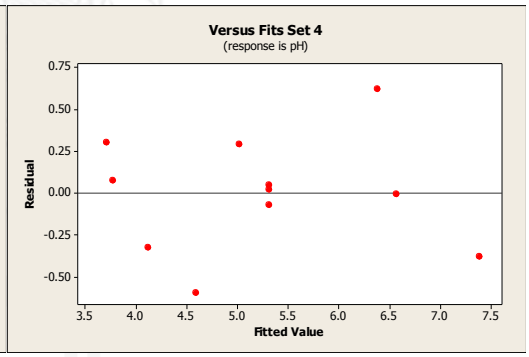
รูปที่ 4.6(a)



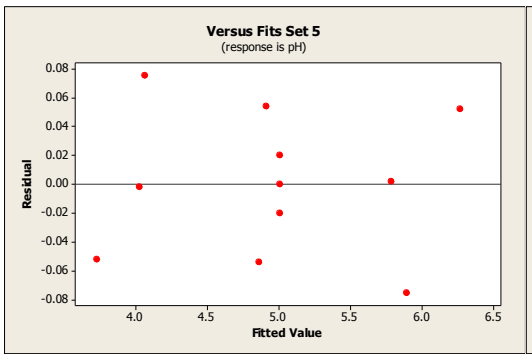
รูปที่ 4.6(b)



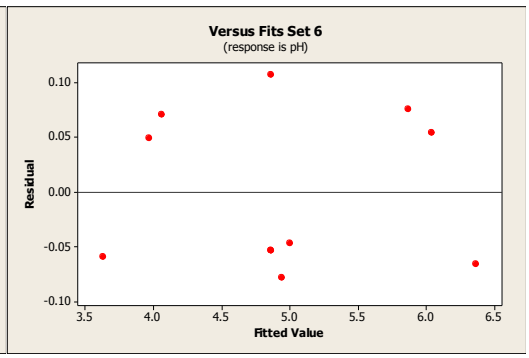
รูปที่ 4.6(c)



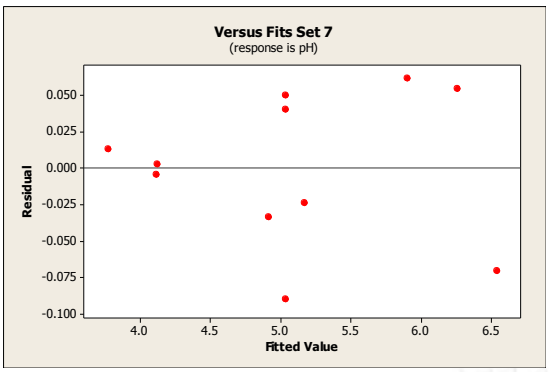
รูปที่ 4.6(d)



รูปที่ 4.6(e)



รูปที่ 4.6(f)



รูปที่ 4.6(g)

รูปที่ 4. 6 (a-g) กราฟส่วนตกค้างของค่า pH กับค่าที่ถูกฟิตชุดที่ 1 ถึง 7

จากรูปที่ 4.6(a-g) พบว่าความสัมพันธ์ส่วนตกค้างของแบบจำลองที่เกิดขึ้นและค่าที่ถูกฟิตของข้อมูลทั้ง 7 ชุดไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ไม่มีลักษณะที่บานออกเป็นกรวยปลายเปิดหรือไม่มีรูปร่างเฉพาะแต่อย่างใด ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลค่า pH ทุกชุดมีเสถียรภาพของความแปรปรวน

สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลค่า pH ของเยื่อหลังการผสม พบว่าข้อมูลของค่า pH จากทุกชุดการทดลองมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระ และมีเสถียรภาพของความแปรปรวน เช่นเดียวกับการวิเคราะห์ข้อมูลค่าความขาวสว่างในหัวข้อที่ 4.2.1 ที่ข้อมูลทุกชุดการทดลอง มีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระและมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังนั้นจึงสามารถนำข้อมูลค่าความขาวสว่างและค่า pH ไปทำการวิเคราะห์ต่อได้อย่างถูกต้องในลำดับต่อไป

4.2.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อหาตัวแปรที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างและค่า pH

หลังจากการวิเคราะห์สมมติฐานทั้งสามประการ คือ การกระจายตัวเป็นปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน และมีเสถียรภาพด้านความแปรปรวนแล้ว นำข้อมูลของค่าความขาวสว่างและค่า pH จากการทดลองแต่ละชุดมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความขาวสว่างและค่า pH ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบ Full quadratic โดยจะทำการทดสอบผลหลัก ผลกำลังสอง และอันตรกริยาระหว่างปัจจัยที่อาจมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ซึ่งปัจจัยนำเข้าที่ทำการศึกษา ได้แก่

1) %Mixed คือ ร้อยละการผสมเยื่อ EOP ในเยื่อ D1 (%)
2) H2SO4 คือ ปริมาณกรดซัลฟูริคที่ใช้ในการปรับค่า pH (ml, 0.5 M H_2SO_4)

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลทั้ง 7 ชุด ในแต่ละชุดการทดลองผู้วิจัยจะทดสอบว่าเทอมใดมีนัยสำคัญด้วย t-test โดยเทอมที่มีนัยสำคัญเป็นเทอมที่มีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จากนั้นผู้วิจัยจะหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าทั้งสองกับปัจจัยผลตอบแต่ละตัว ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย (Regression) แบบ Stepwise เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรตอบสนองกับเทอมที่มีนัยสำคัญ ตารางที่ 4.2 และ 4.3 แสดงค่า p-value ของเทอมปัจจัยนำเข้าทั้งสองที่มีผล

ต่อค่าความขาวสว่างและค่า pH และแสดงสมการความสัมพันธ์และค่า R-square จากการทดลองทั้ง 7 ชุด

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4. 2 สรุปค่า p-value ของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างของผลการทดลองทั้ง 7 ชุด พร้อมสมการความสัมพันธ์และค่า R-Sq และ R-Sq(adj)

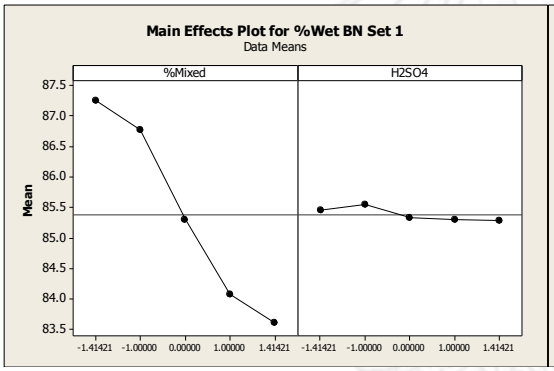
การทดลองชุดที่	constant	%Mixed	H2SO4	%Mixed* %Mixed	H2SO4* H2SO4	%Mixed* H2SO4	สมการความสัมพันธ์ (จากคำสั่ง Stepwise)	R-Sq	R-Sq(adj)
1	**0.000**	**0.000**	0.198	0.259	0.458	0.978	%BN = 85.37 – 1.319*X_1	98.14	97.94
2	**0.000**	**0.000**	0.606	**0.044**	0.687	0.897	%BN = 86.05 – 1.572*X_1+0.237*X_1*X_1	98.68	98.35
3	**0.000**	**0.000**	**0.014**	0.465	0.070	0.284	%BN = 86.19 – 0.94*X_1 – 0.38X_2	89.14	86.42
4	**0.000**	**0.000**	**0.002**	0.130	0.062	0.060	%BN = 86.82 – 1.53*X_1 – 0.69*X_2	91.47	89.34
5	**0.000**	**0.000**	**0.007**	**0.003**	0.222	0.133	%BN = 86.09 – 1.00*X_1 – 0.21*X_2	92.74	90.93
6	**0.000**	**0.001**	0.663	0.851	0.100	0.664	%BN = 86.21 – 1.19*X_1	83.45	81.61
7	**0.000**	**0.000**	0.075	0.306	0.198	0.593	%BN = 86.86 – 1.4*X_1	89.13	87.92

เมื่อ X_1 คือ อัตราการผสมเยื่อ (%Mixed)

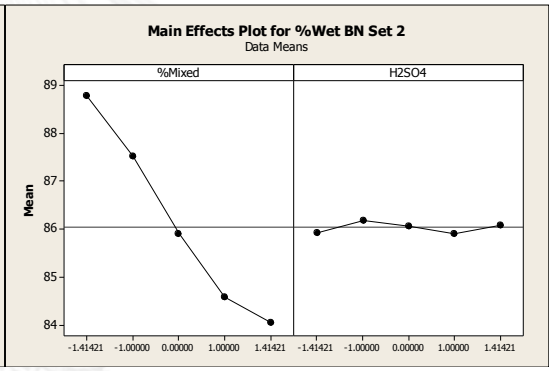
X_2 คือ ปริมาณกรดซัลฟูริค (H_2SO_4)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

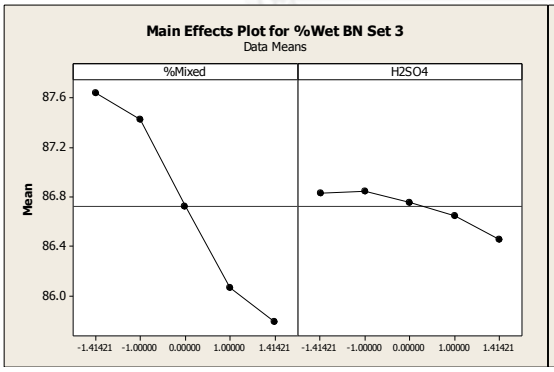
เมื่อพิจารณาจากค่า p-value ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขาวสว่าง พบว่า อัตราการผสมหรือ %Mixed มีผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดการทดลอง คือ เมื่อมีอัตราส่วนผสมเยื่อ EOP ที่มากขึ้น จะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมลดลง สำหรับปริมาณกรดพบว่า ปริมาณกรดมีผลต่อค่าความขาวสว่างอย่างมีนัยสำคัญในการทดลองชุดที่ 3 4 และ 5 ค่า R-Square Adjusted มีค่าสูงกว่า 80% ในทุกชุดการทดลอง แสดงว่าสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายความผันแปรในข้อมูลได้ดี นอกจากนี้พบว่าในชุดการทดลองที่ 2 พจน์ X_1^2 หรือ ปัจจัย %Mixed*%Mixed มีผลต่อค่าความขาวสว่างด้วยเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณา main effect plot พบว่าความสัมพันธ์ยังคงเป็นไปในทิศทางที่เมื่อ X_1 หรืออัตราการผสมเยื่อ EOP เพิ่มขึ้นค่าความขาวสว่างของเยื่อจะลดลง ดังนั้นพจน์กำลังสองของ X_1 ที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จึงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งที่มีค่าความชันไม่คงที่ พิจารณา main effect plot ที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างของแต่ละชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.7 (a-g) ตามลำดับการทดลองชุดที่ 1 ถึง 7



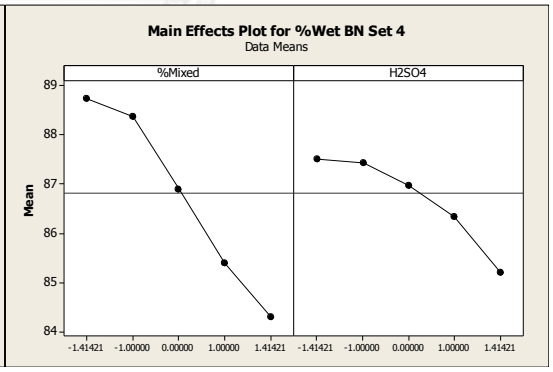
รูปที่ 4.7 (a)



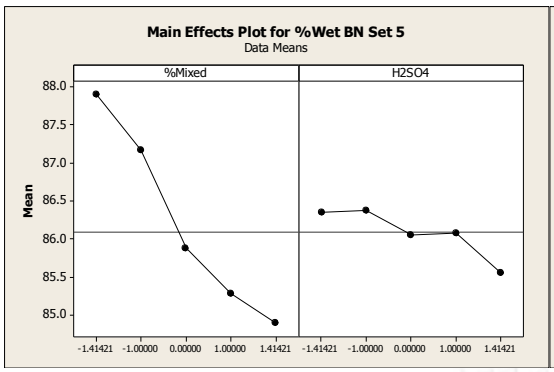
รูปที่ 4.7 (b)



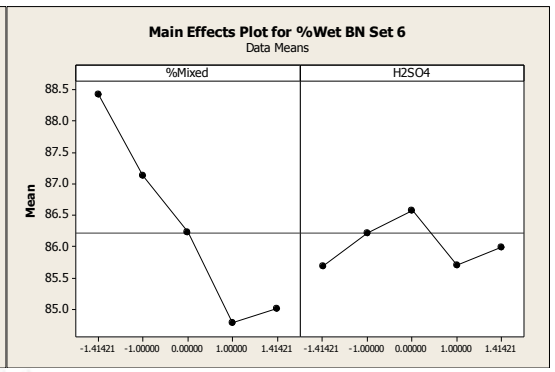
รูปที่ 4.7 (c)



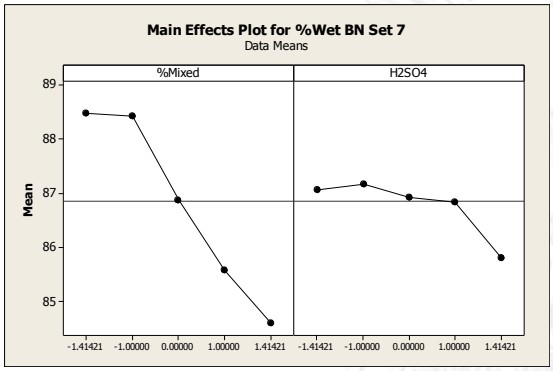
รูปที่ 4.7 (d)



รูปที่ 4.7 (e)



รูปที่ 4.7 (f)



รูปที่ 4.7 (g)

รูปที่ 4. 7 (a-g) กราฟผลหลัก (Main effect plot) ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการทดลองผสมเยื่อชุดที่ 1-7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ 4. 3 สรุปค่า p-value ของปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่า pH ของผลการทดลองทั้ง 7 ชุด พร้อมสมการความสัมพันธ์และค่า R-Sq และ R-Sq(adj)

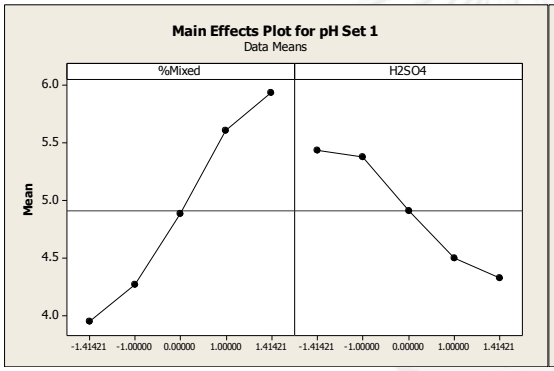
การทดลองชุดที่	constant	%Mixed	H2SO4	%Mixed* %Mixed	H2SO4* H2SO4	%Mixed* H2SO4	สมการความสัมพันธ์ (จากคำสั่ง Stepwise)	R-Sq	R-Sq(adj)
1	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.215	0.847	0.051	$pH = 4.909 + 0.687*X_1 - 0.416*X_2$	99.10	98.88
2	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.450	**0.024**	0.070	$pH = 5.149 + 0.673*X_1 - 0.669*X_2 + 0.094X_2*X_2$	99.36	99.09
3	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.121	0.185	0.157	$pH = 5.069 + 0.648*X_1 - 0.583*X_2$	99.74	99.67
4	**0.000**	**0.002**	**0.006**	0.686	0.889	0.171	$pH = 5.225 + 1.01*X_1 - 0.80*X_2$	87.91	84.89
5	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.142	0.624	0.168	$pH = 4.963 + 0.621*X_1 - 0.647*X_2$	99.24	99.05
6	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.546	0.079	0.775	$pH = 4.950 + 0.669*X_1 - 0.699*X_2$	98.71	98.38
7	**0.000**	**0.000**	**0.000**	0.711	**0.049**	0.171	$pH = 5.019 - 0.756X_1 + 0.631X_2 + 0.082X_2*X_2$	99.49	99.27

เมื่อ X_1 คือ อัตราการผสมเยื่อ (%Mixed)

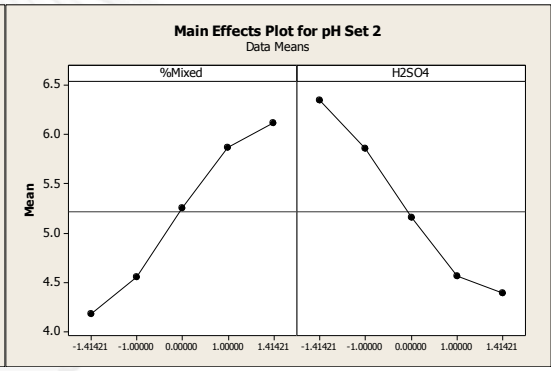
X_2 คือ ปริมาณกรดซัลฟูริค (H_2SO_4)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

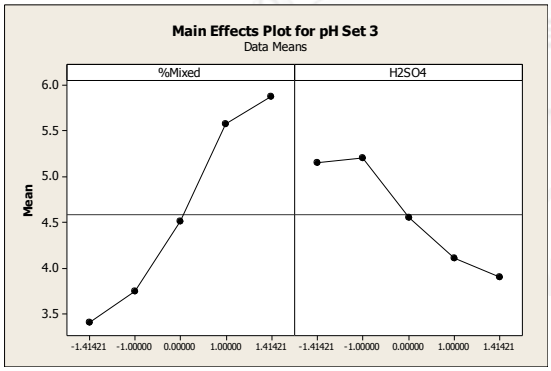
เมื่อพิจารณาจากค่า p-value ของปัจจัยที่มีผลต่อค่า pH พบว่า อัตราการผสม หรือ %Mixed และปริมาณกรดซัลฟูริคที่เติม หรือ H_2SO_4 มีผลต่อค่า pH อย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดการทดลอง คือ เมื่ออัตราการผสมเยื่อ EOP มากขึ้น จะทำให้ค่า pH ของเยื่อหลังการผสมสูงขึ้น และเมื่อมีการเติมกรดซัลฟูริคมากขึ้น จะทำให้ค่า pH ของเยื่อหลังผสมลดลง ค่า R-Square Adjusted มีค่าสูงกว่า 80% ในทุกชุดการทดลอง แสดงว่าสมการความสัมพันธ์สามารถอธิบายความผันแปรในข้อมูลได้ดี นอกจากนี้พบว่าในชุดการทดลองที่ 2 และ 7 พจน์ X_2^2 หรือ ปัจจัย H2SO4*H2SO4 มีผลต่อค่า pH ด้วยเช่นกัน แต่เมื่อพิจารณา main effect plot พบว่า ความสัมพันธ์ยังคงเป็นไปในทิศทางที่เมื่อ X_2 หรือปริมาณกรดซัลฟูริคเพิ่มขึ้นค่า pH ของเยื่อจะลดลง ดังนั้นพจน์กำลังสองของ X_2 ที่มีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 จึงแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่ไม่เป็นเส้นตรง หรือมีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งที่มีค่าความชันไม่คงที่ พิจารณา main effect plot ที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างของแต่ละชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4.8 (a-g) ตามลำดับการทดลองชุดที่ 1 ถึง 7



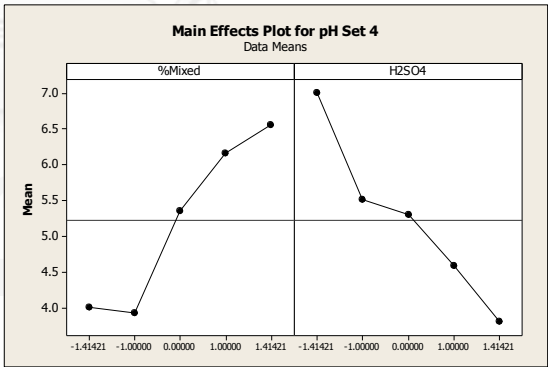
รูปที่ 4.8 (a)



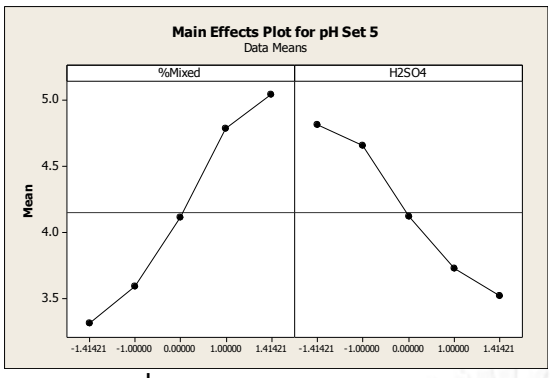
รูปที่ 4.8 (b)



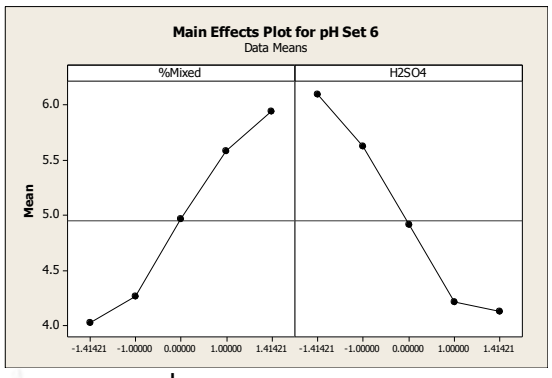
รูปที่ 4.8 (c)



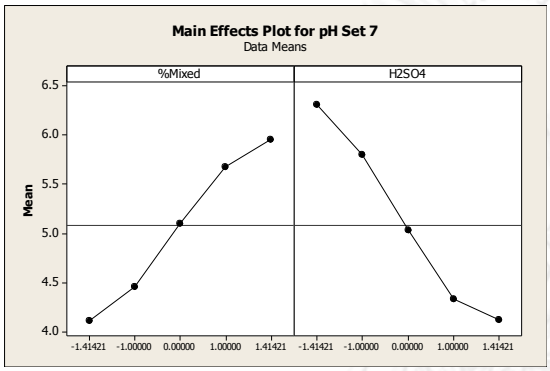
รูปที่ 4.8 (d)



รูปที่ 4.8 (e)



รูปที่ 4.8 (f)



รูปที่ 4.8 (e)

รูปที่ 4. 8 (a-g) กราฟผลหลัก (Main effect plot) ของค่า pH หลังการทดลองผสมเยื่อชุดที่ 1 ถึง 7

4.3 การหาค่าปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามค่าเป้าหมาย

สำหรับการกำหนดค่ารับคำสั่งเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับแต่ละตัวแปร ผู้วิจัยจะทำการกำหนดค่าเป็นช่วงให้สอดคล้องกับเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด และเพื่อรองรับความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อที่อาจเกิดขึ้นในกระบวนการผลิต อันเนื่องมาจากคุณภาพวัตถุดิบตั้งต้น เช่น คุณภาพไม้ คุณภาพสารเคมี หรือแม้กระทั่งความแปรปรวนในกระบวนการผลิตเอง โดยในเทคนิคการหาค่าปัจจัยแบบ Response Optimizer จะมีการกำหนดค่าต่างๆ ดังนี้

(1) กำหนด Goal กำหนดเป็นแบบ Target เนื่องจากต้องการให้ค่าตัวแปรตอบสนองออยู่ใกล้เป้าหมาย
   1) ค่าความขาวสว่าง เนื่องจากเกณฑ์ที่กำหนดคือ 85-87% จึงกำหนด Target เท่ากับ 86% Lower และ Upper เท่ากับ 85 และ 87 ตามลำดับ
   2) ค่า pH เนื่องจากเกณฑ์ที่กำหนดคือ 4.5-6.0 จึงกำหนด Target เท่ากับ 5.25 Lower และ Upper เท่ากับ 4.5 และ 6.0 ตามลำดับ

(2) กำหนด Weight ของปัจจัยค่าความขาวสว่างและปัจจัยค่า pH เท่ากับ 10 เนื่องจากต้องการให้ค่าตัวแปรตอบสนองอยู่ใกล้เป้าหมายได้มากกว่าการเข้าไปใกล้ Lower หรือ Upper Limits

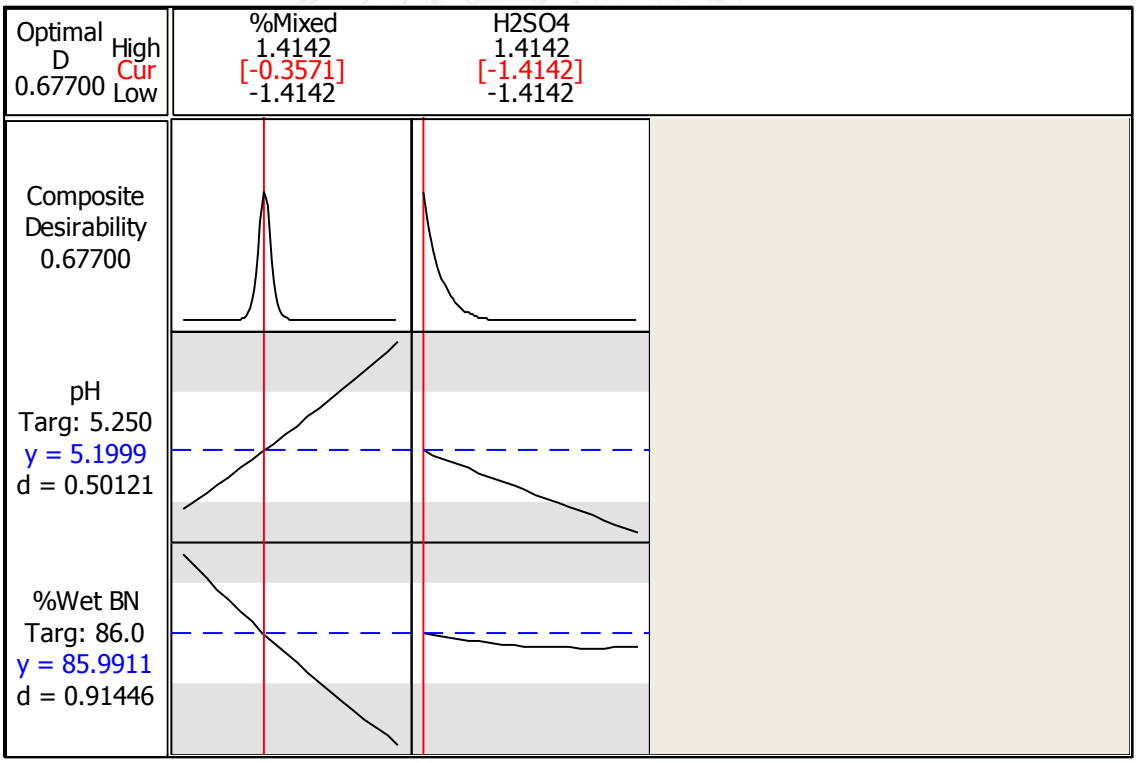
(3) กำหนดค่า Importance ของปัจจัยค่าความขาวสว่างและปัจจัยค่า pH เท่ากับ 10 เท่ากัน เนื่องจากต้องการให้ความสำคัญกับตัวแปรทั้งสองเท่ากัน

กำหนดค่าได้ดังตารางที่ 4.4

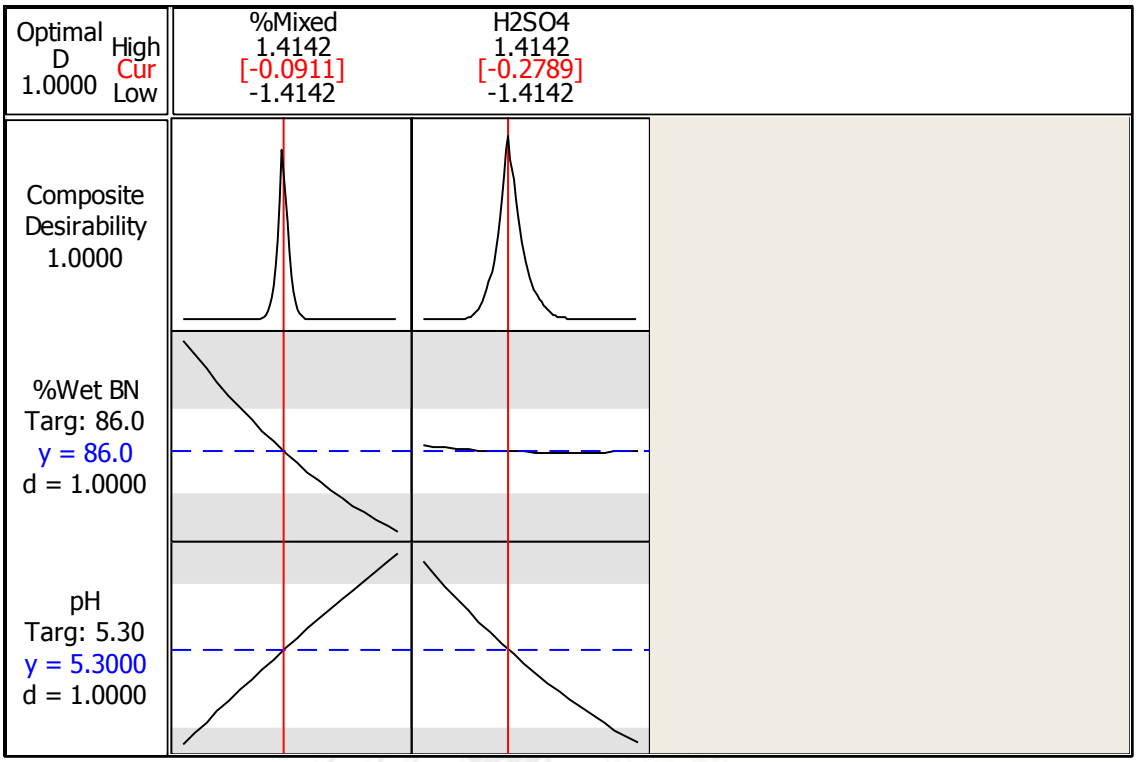
ตารางที่ 4. 4 การกำหนดค่า Weight และ Important เพื่อใช้เทคนิค Response Optimizer ในการหาค่าปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ได้ตัวแปรตอบสนองตามค่าเป้าหมาย

Parameters	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
%Brightness	Target	85	86	87	10	10
pH	Target	4.5	5.25	6.0	10	10

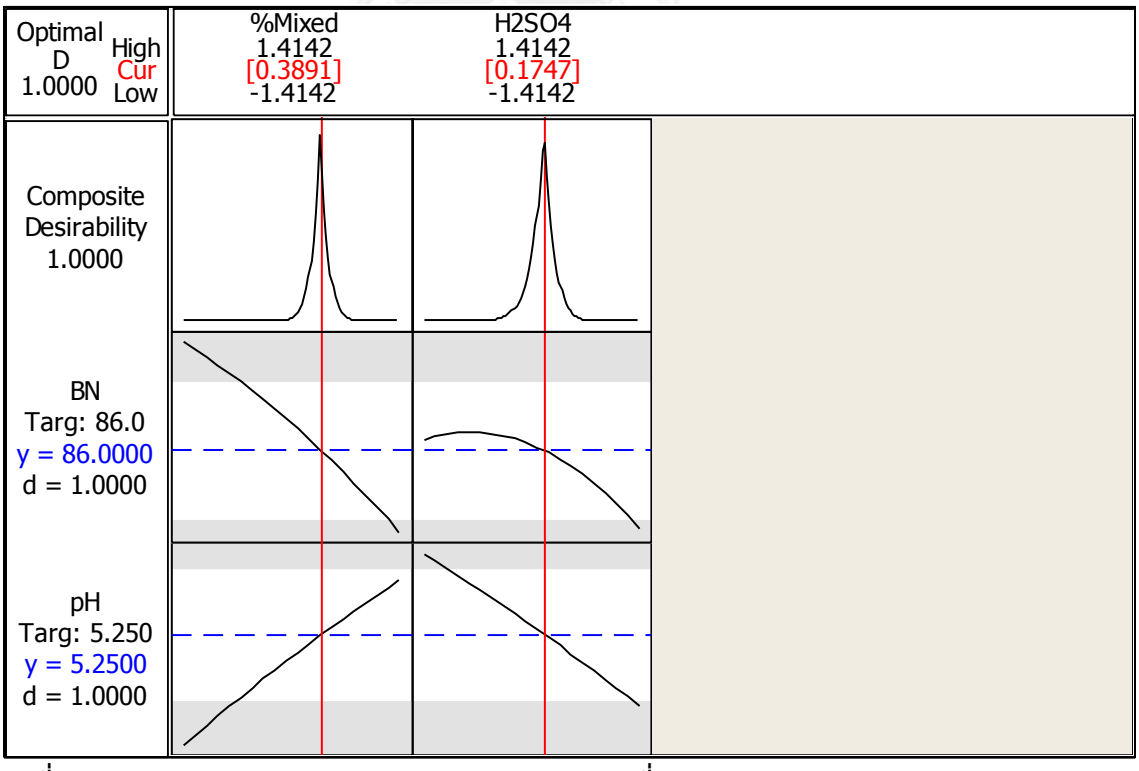
จากการใช้เทคนิค Response Optimizer เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลองทั้ง 7 ชุด แสดงผลเป็น Optimization Plot ปริมาณการผสมเยื่อและปริมาณกรดที่ต้องเติมในการทดลองแต่ละชุด พร้อมทั้งแสดงผลจากการทำนายเมื่อมีการผสมเยื่อตามสภาวะที่ได้ ดังรูปที่ 4.9-4.15



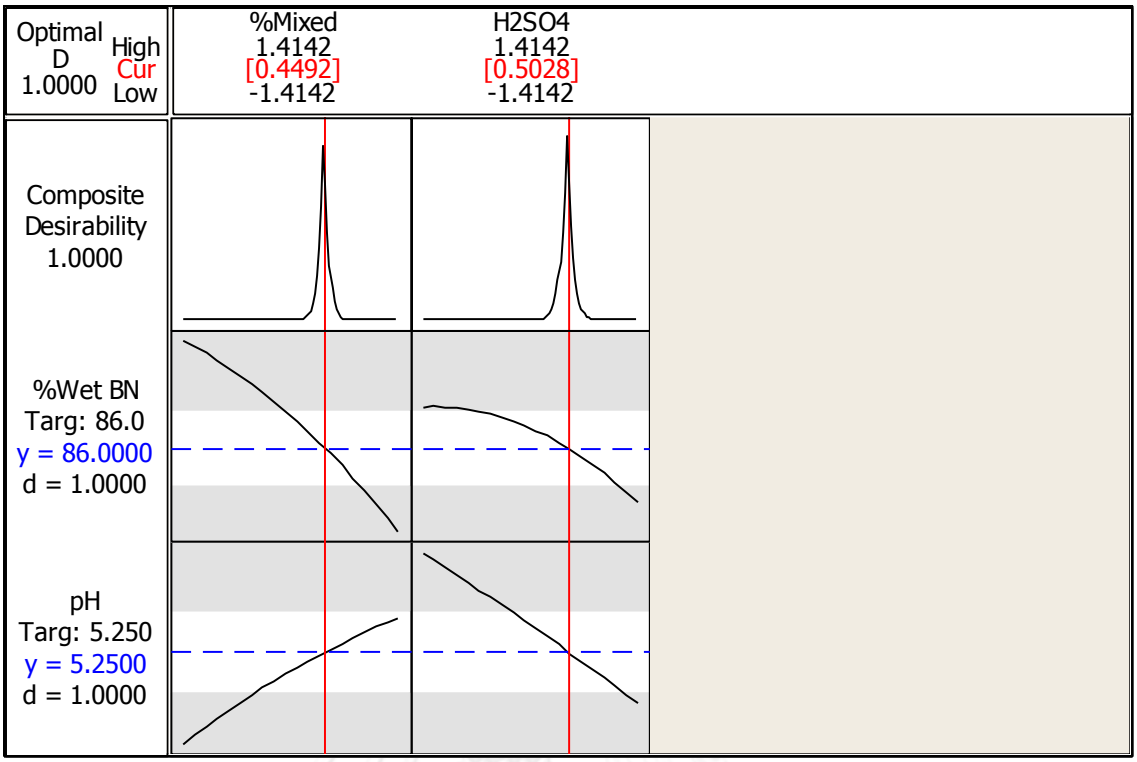
รูปที่ 4. 9 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 1



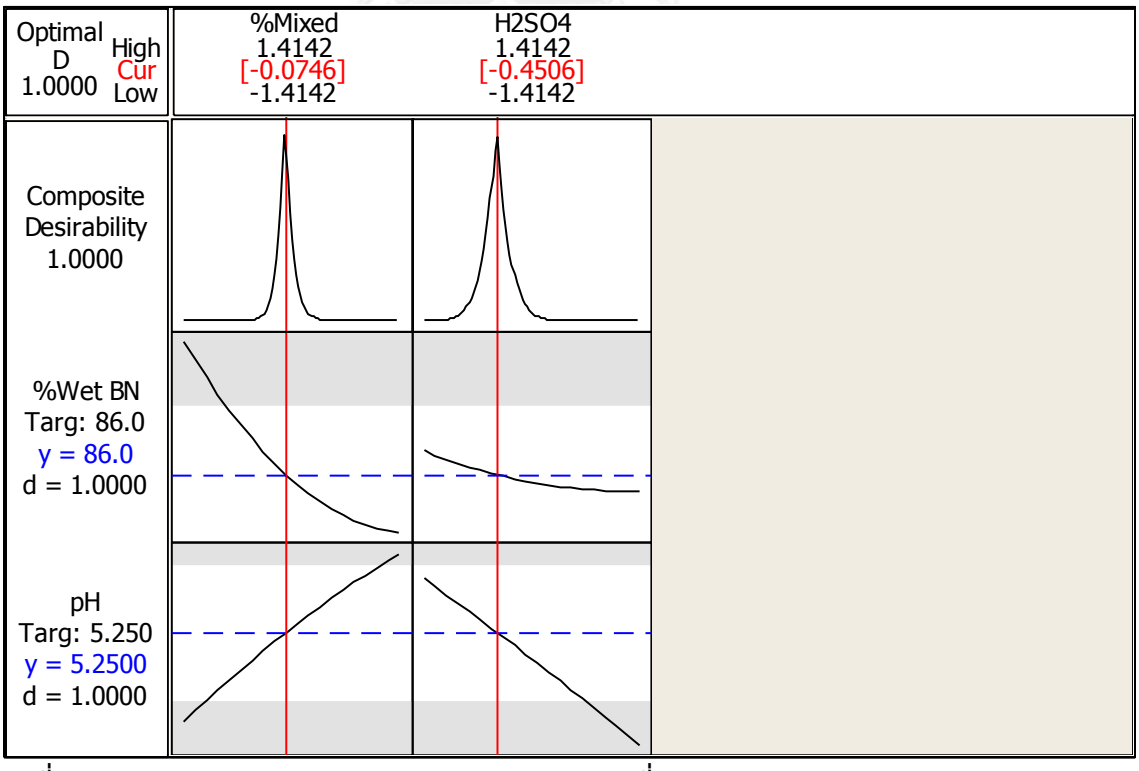
รูปที่ 4. 10 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 2



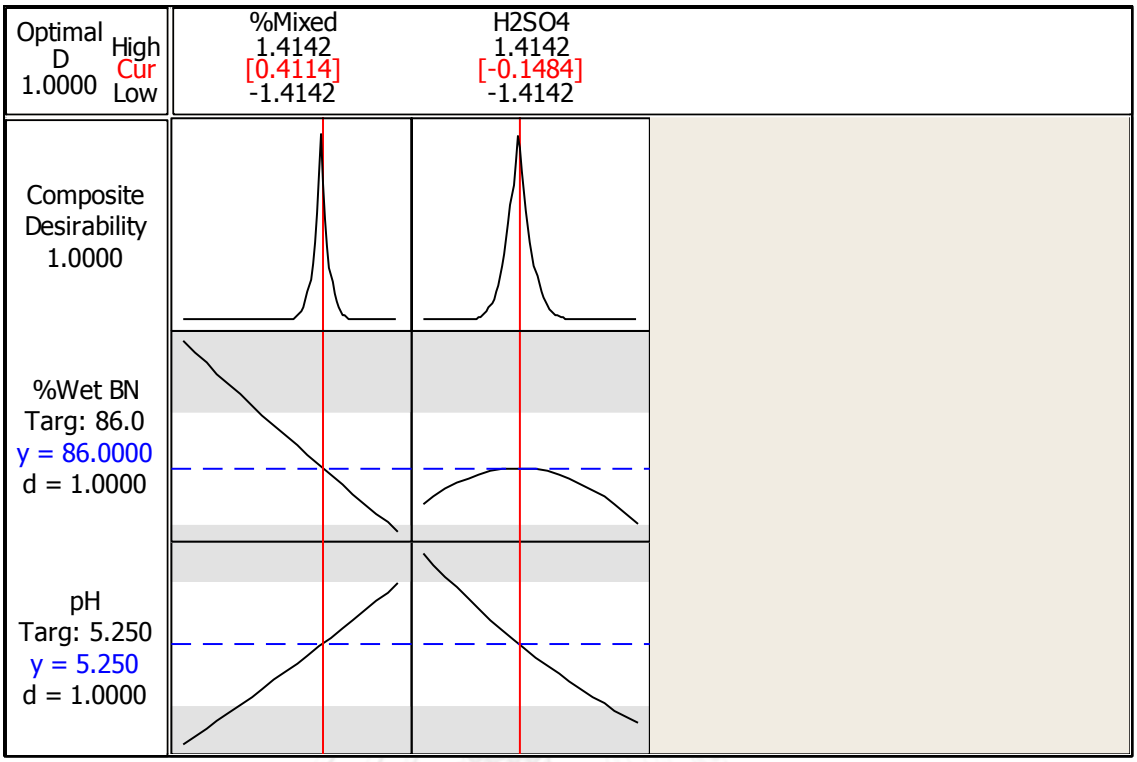
รูปที่ 4. 11 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 3



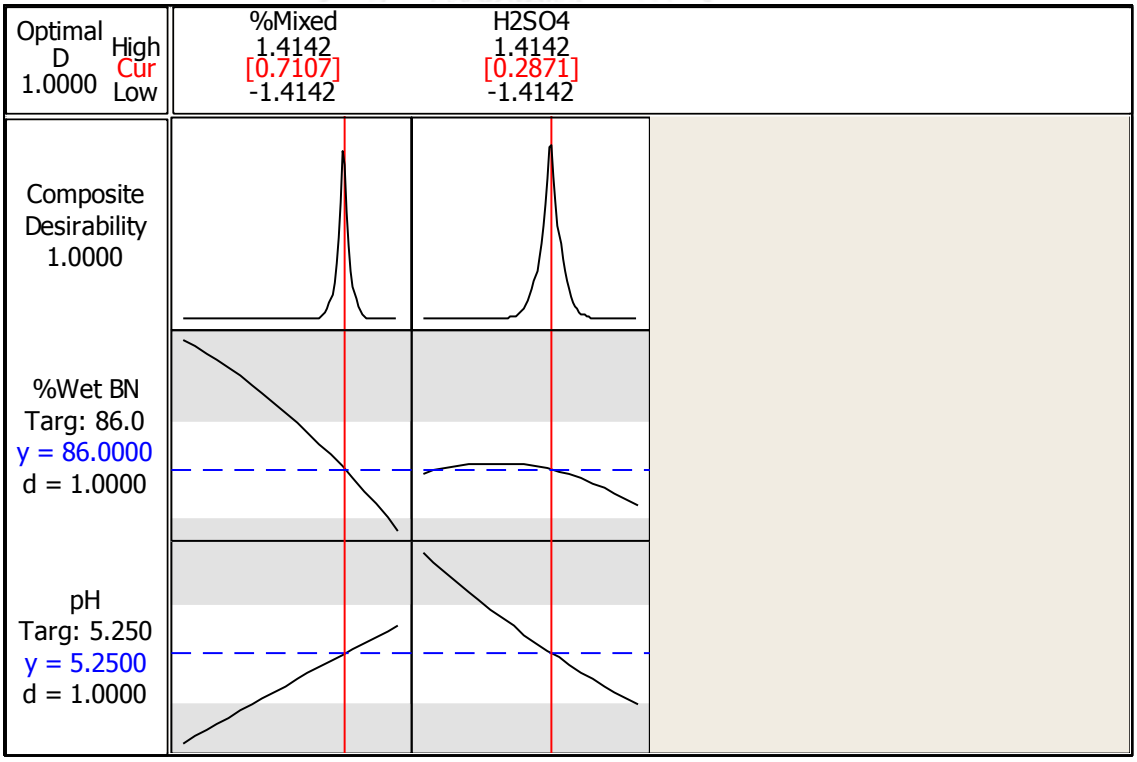
รูปที่ 4. 12 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 4



รูปที่ 4. 13 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 5



รูปที่ 4. 14 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 6



รูปที่ 4. 15 Optimization Plot ของผลการทดลองชุดที่ 7

จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Response Optimization และ Optimization Plot สามารถทำการสรุปผลการหาสภาวะนำเข้าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าของแต่ละชุดการทดลองได้ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4. 5 สภาวะนำเข้าที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์ของการทดลองทั้ง 7 ชุด

ชุดการทดลอง	Code Unit		Uncode Unit		Predicted Responses		Composite Desirability
	%Mixed	H_2SO_4	%Mixed (%)	H_2SO_4 (ml)	%Wet BN	pH	
1	-0.357	-1.414	22.9	0.0	86.0	5.20	0.6770
2	-0.091	-0.279	28.2	3.8	86.00	5.30	1.0000
3	0.389	0.332	37.8	5.3	86.00	5.25	1.0000
4	0.449	0.503	39.0	5.7	86.00	5.25	1.0000
5	-0.075	-0.451	28.5	3.4	86.00	5.25	1.0000
6	0.411	-0.148	38.2	4.1	86.00	5.25	1.0000
7	0.711	0.287	44.2	5.2	86.00	5.25	1.0000

จากตารางที่ 4.5 เมื่อพิจารณาจากค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบ (Composite Desirability) ของการทดลองทั้ง 7 ชุด พบว่าการทดลองชุดที่ 2 3 4 5 และ 6 ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ มีค่าเท่ากับ 1.00 นั่นคือหมายถึงสูตรการผสมดังกล่าวจะให้ผลตามเป้าหมายที่กำหนด คือ ค่าความขาวสว่างเท่ากับ 86% และค่า pH เท่ากับ 5.25 ซึ่งเป็นค่ากลางของเกณฑ์ที่โรงกระดาษตั้งไว้ แต่สำหรับการทดลองในชุดที่ 1 ซึ่งมีค่า Composite Desirability น้อยกว่าการทดลองชุดอื่น มีค่าเท่ากับ 0.6770 แต่จากการทำนายผลตอบ (Predicted Response) พบว่าผลของค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังการผสมยังมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษยอมรับได้ นั่นคือ ค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วง 85-87% และค่า pH อยู่ในช่วง 4.5-6.0 ซึ่งจะทำการยืนยันสูตรการผสมอีกครั้งในลำดับต่อไป

จากสูตรการผสมที่ได้ผู้วิจัยทำการวิเคราะห์เพิ่มเติม เพื่อหาแนวโน้มความสัมพันธ์ของปัจจัยตอบสนองที่มีต่อปัจจัยนำเข้าด้วยเทคนิคการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ พบว่าอัตราการผสมเยื่อมีความสัมพันธ์กับค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้น โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) เท่ากับ 0.626 มีค่า p-value เท่ากับ 0.132 แสดงว่าปริมาณการผสมเยื่อ EOP ยังไม่มีความสัมพันธ์กับค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่าอัตราการผสมเยื่อ EOP ในสูตรและค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้น มีความสัมพันธ์กันในระดับสูง นั่นคืออัตราการผสมเยื่อจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น ผู้วิจัยจึงทำการพล็อตกราฟระหว่างช่วงของค่าความขาวสว่างเยื่อ EOP ที่

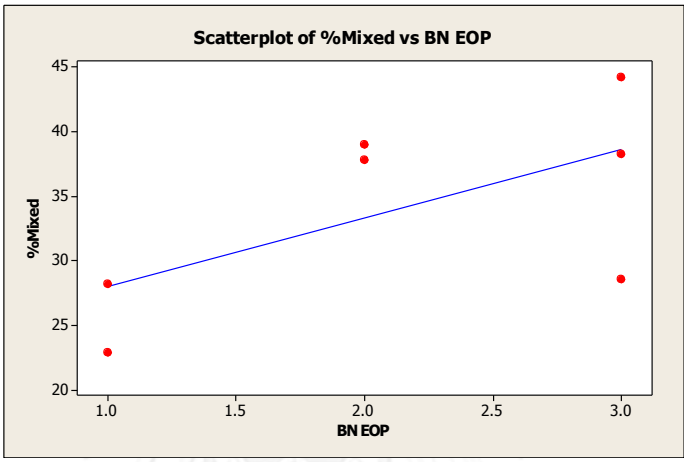
นำมาผสมกับอัตราการผสมที่ได้จากการ Optimization แสดงดังรูปที่ 4.16 ซึ่งสามารถเห็นแนวโน้มของอัตราการผสมเยื่อที่สูงขึ้นเมื่อค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP เริ่มต้นมีค่าสูงขึ้น

เมื่อช่วงของค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP ที่แสดงในรูปที่ 4.16 แต่ละช่วง คือ

ช่วงที่ 1 คือ ช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP ที่มีค่า 79.0-80.9%

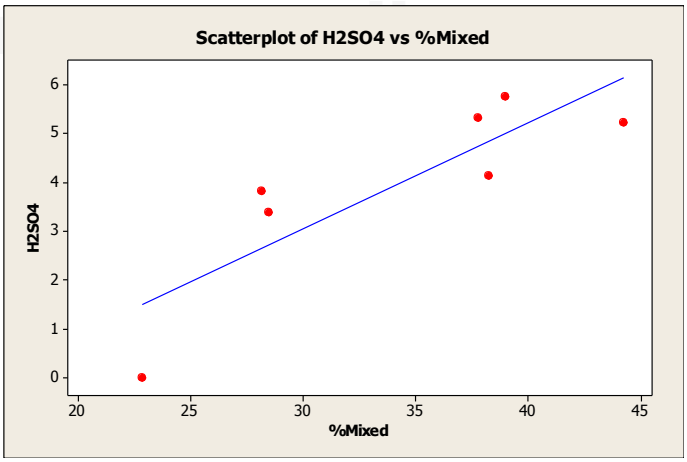
ช่วงที่ 2 คือ ช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP ที่มีค่า 81.0-82.9%

ช่วงที่ 3 คือ ช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP ที่มีค่า 83.0-84.9%



รูปที่ 4. 16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP และอัตราการผสมเยื่อที่ได้ตามสูตร

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติม พบว่าปริมาณกรดที่เติมเพื่อปรับค่า pH ของเยื่อหลังผสมมีแนวโน้มที่จะมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการผสม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.851 และมีค่า p-value เท่ากับ 0.015 แสดงว่าปริมาณกรดที่เติมมีความสัมพันธ์กับอัตราการผสมเยื่อ EOP อย่างมีนัยสำคัญ เมื่ออัตราการผสมเยื่อมีค่าสูงขึ้นจะต้องใช้ปริมาณกรดในการปรับ pH เพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน นำข้อมูลมาสร้างกราฟความสัมพันธ์เพื่อดูแนวโน้มแสดงดังรูปที่ 4.17



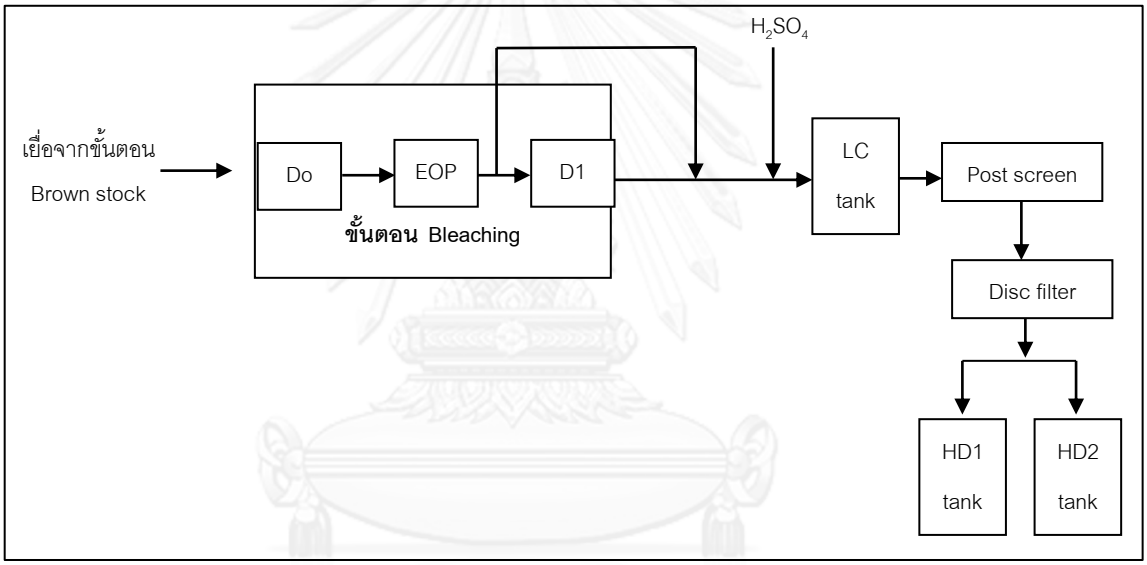
รูปที่ 4. 17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดที่เติม

จากรูปที่ 4.17 เมื่ออัตราการผสมเยื่อ EOP เพิ่มขึ้นแนวโน้มของปริมาณกรดที่เติมเพื่อใช้ปรับค่า pH ของเยื่อให้อยู่ในเกณฑ์มีค่าเพิ่มขึ้นเช่นกัน เนื่องมาจากเยื่อจากขั้นตอน EOP เป็นเยื่อที่มีค่า pH สูง เพราะสภาวะที่ใช้ในการฟอกเยื่อในขั้นตอน EOP มีความเป็นด่าง ค่า pH ของเยื่อมีค่าประมาณ 10.5-11.5 เพื่อให้เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นเมื่ออัตราการผสมเยื่อเพิ่มขึ้นจึงทำให้ค่า pH หลังผสมก่อนปรับ pH มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้ปริมาณกรดซัลฟูริคในการปรับค่า pH เพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่า pH อยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 5
การทดลองและการควบคุมในระดับโรงงาน

จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการได้นำระดับของอัตราการผสมเยื่อ EOP และปริมาณกรดซัลฟูริคที่เหมาะสมที่ทำให้ค่าความขาวสว่างมีค่าอยู่ในช่วง 85-87% และค่า pH มีค่าอยู่ในช่วง 4.5-6.0 มาจัดทำเป็นสูตรการผสมใช้ในกระบวนการผลิต โดยจะทำการเพิ่มสายการส่งเยื่อจากขั้นตอนการฟอก EOP ข้ามขั้นตอน D1 (Bypass D1 stage) และเพิ่มท่อสำหรับเติมกรดซัลฟูริคก่อนเข้าสู่เข้าถัง LC เพื่อทำการผสมในถัง ก่อนจะส่งเยื่อไปยัง Post screen เพื่อกรองสิ่งสกปรกออกจากเยื่อและปรับความเข้มข้นของเยื่อที่ Disc filter ก่อนส่งไปที่ถัง High Density 1 และ 2 แยกตามคุณภาพเยื่อตามที่โรงกระดาษหรือโรงผลิตเยื่อแผ่นแห้งต้องการ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5. 1 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตเยื่อและสายการปรับปรุงเพื่อผสมเยื่อจากขั้นตอนEOP

สามารถแสดงภาพของท่อส่งเยื่อนำออกจากขั้นตอน EOP และนำเยื่อเข้าสู่ขั้นตอน D1 ที่มีการปรับปรุงในกระบวนการผลิตได้ดังรูปที่ 5.2 และ 5.3

รูปที่ 5. 2ท่อส่งเยื่อ EOP หลังการปรับปรุงเพื่อส่งเยื่อไปยังถัง LC โดยตรง

รูปที่ 5. 3 จุดที่ส่งเยื่อออกจากขั้นตอน EOP และจุดที่ต่อนำเยื่อเข้าสู่ขั้นตอน D1

สิ่งที่จะต้องควบคุมตามสูตรการผสม คือ อัตราการผสมเยื่อ EOP และ D1 และปริมาณการใช้กรดซัลฟูริค โดยมีแนวทางการควบคุมการดำเนินงานในระดับโรงงานเพื่อให้ผลการผสมเยื่อทั้งสองปัจจัยเป็นไปตามสูตรการผสมที่ได้ ดังนี้

ตารางที่ 5. 1 สูตรการผสมเยื่อแบ่งตามช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP และ D1

สูตรที่	ช่วงความขาวสว่าง		อัตราการผสมเยื่อ EOP (%)	ปริมาณกรดซัลฟูริค ความเข้มข้น 0.05M (ml)	ค่าจากการทำนาย		Composite Desirability
	เยื่อ EOP	เยื่อ D1			ความขาวสว่าง (%)	pH	
1	79.0-80.9	87.0-87.9	22.9	0.0	85.99	5.20	0.6770
2	79.0-80.9	88.0-88.9	28.2	3.8	86.00	5.30	1.0000
3	81.0-82.9	87.0-87.9	37.8	5.3	86.00	5.25	1.0000
4	81.0-82.9	88.0-88.9	39.0	5.7	86.00	5.25	1.0000
5	83.0-84.9	87.0-87.9	28.5	3.4	86.00	5.25	1.0000
6	83.0-84.9	88.0-88.9	38.2	4.1	86.00	5.25	1.0000
7	83.0-84.9	89.0-89.9	44.2	5.2	86.00	5.25	1.0000

5.1 การควบคุมการดำเนินงานในระดับโรงงาน

5.1.1 อัตราการผสมเยื่อ สามารถควบคุมได้จากการควบคุมอัตราการไหลของเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D1 ก่อนเข้าถัง LC โดยคำนวณจากอัตราการผลิตเยื่อ (Production) ประจำวัน ดังนี้

$$\text{Production (ADT/day)} = \frac{\text{Flow(L/sec)} \times 1/1000(\text{m3/L}) \times 3600\text{sec/h} \times 24\text{h/day} \times \%\text{Consistency}(\%)}{0.9\ (\text{Ton/ADT})}$$

5.1.2 ปริมาณกรดซัลฟูริค (Sulfuric acid, H_2SO_4 เนื่องจากในการทดลองใช้กรดซัลฟูริค ความเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตร ปรับ pH ของเยื่อปริมาณ 500 กรัม โดยจะทำการคำนวณเทียบกับอัตราการผลิตเยื่อ หรือปริมาณเยื่อหลังผสมก่อนเข้าถัง LC และคำนวณเป็นปริมาณของกรดซัลฟูริค ความเข้มข้น 98% ตามความเข้มข้นที่หน่วยงานฟอกเยื่อใช้

5.2 การวางแผนการเก็บข้อมูลคุณภาพเยื่อขณะทำการทดลอง

ขณะทำการทดลองจะมีการเก็บข้อมูลขณะทำการผสมเยื่อ เพิ่มเติมเพื่อควบคุมคุณภาพเยื่อ และสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

1. ความขาวสว่างเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D1 เพื่อพิจารณาเลือกสูตรทั้งอัตราการผสม และปริมาณกรดที่ใช้ และทำการปรับอัตราการไหลของเยื่อ EOP และ D1 ทุก 1 ชั่วโมงตามค่าความขาวสว่างเริ่มต้น
2. เก็บตัวอย่างเยื่อหลังผสมเพื่อวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างและค่า pH ทุก 1 ชั่วโมง โดยเพิ่มความถี่การวิเคราะห์ตัวอย่างจากเดิมทุก 4 ชั่วโมง เพื่อติดตามผลการผสมเยื่อตามช่วงเวลาการปรับอัตราการไหลของเยื่อในท่อ

5.3 ทำการทดลอง

การทดลองระดับโรงงานหลังจากเตรียมความพร้อมด้านเครื่องจักรในระบบการผลิตแล้ว จะทำการเตรียมความพร้อมของพนักงานควบคุมการผลิตและพนักงานควบคุมคุณภาพ ชี้แจงวัตถุประสงค์ วิธีการการทดลอง การเก็บข้อมูล และการทดสอบคุณภาพที่เพิ่มเติมจากการเก็บตัวอย่างในรอบปกติ เพื่อให้พนักงานทุกคนมีความเข้าใจที่ตรงกันและป้องกันความผิดพลาดขณะทดลอง การทดลองผสมเยื่อจะเริ่มหลังจากเดินเยื่อเพื่อส่งโรงผลิตเยื่อแผ่นแห้งเกรดขาวสว่างพิเศษได้ครบตามแผนการผลิต และเริ่มผลิตเยื่อเกรดมาตรฐาน (Standard grade) เพื่อส่งเยื่อให้โรงกระดาษในช่วงที่มีการลดค่าความขาวสว่างเพื่อลดเกรดเยื่อจะเริ่มทำการผสมเยื่อตามสูตร โดยมีแนวทางการดำเนินงานดังนี้

1. ฝ่ายผลิตแจ้งหน่วยงานควบคุมคุณภาพเพื่อขอเพิ่มรอบการส่งตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างและค่า pH จากเดิม ทุก 4 ชั่วโมง เป็น ทุก 1 ชั่วโมง จนกว่าจะเลิกผสมเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษ
2. ฝ่ายผลิตเก็บตัวอย่างส่งหน่วยงานควบคุมคุณภาพ วิเคราะห์ค่าความขาวสว่างเริ่มต้นของเยื่อจากขั้นตอน EOP และเยื่อ D1 แจ้งผลการวิเคราะห์ต่อฝ่ายผลิต
3. ฝ่ายผลิตพิจารณาค่าความขาวสว่างตั้งต้นเพื่อเลือกใช้สูตรการผสม
4. ฝ่ายผลิตปรับวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลของเยื่อจากขั้นตอน EOP ในสายท่อ By pass และเยื่อ D1 จนค่าหน้าจอควบคุมแสดงอัตราการไหลที่ต้องการ
5. ฝ่ายผลิตปรับวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลของกรดซัลฟูริคจนค่าหน้าจอควบคุมแสดงอัตราการไหลที่ต้องการ
6. ในรายชั่วโมงถัดมาฝ่ายผลิตทำการเก็บตัวอย่างเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D1 ก่อนการผสมเพื่อเลือกใช้สูตรตามขั้นตอนที่ 3 ถึง 5 และเก็บตัวอย่างเยื่อหลังผสมจากถัง LC เพื่อนำมาวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างและค่า pH ดูแนวโน้มการปรับปริมาณของเยื่อและกรดเพื่อทำการผสม
7. ฝ่ายผลิตและหน่วยงานควบคุมคุณภาพเก็บตัวอย่างและติดตามผลการผสมเยื่อรายชั่วโมงจนกว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อ D1 จะมีค่าต่ำกว่า 87% และสามารถส่งเยื่อให้โรงกระดาษได้โดยไม่ต้องทำการผสมกับเยื่อจากขั้นตอน EOP

ซึ่งได้ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง แบบไม่ต่อเนื่องเนื่องจากการทดลองต้องขึ้นอยู่กับแผนการผลิตเยื่อเกรดขาวสว่างพิเศษด้วย ผลการผสมเยื่อดังตารางที่ 5.2 พบว่าผลการทดลองในช่วงที่มีการผสมเยื่อทั้งค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังผสมมีค่าอยู่ในช่วงที่ต้องการ คือ ค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วง 85.0-87.0% มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 86.3% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.46 และค่า pH อยู่ในช่วง 4.5-6.0 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.1 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.21

ตารางที่ 5. 2 ผลการทดลองผสมเยื่อในระดับโรงงาน

	ชั่วโมงที่	ค่าความขาวสว่างเริ่มต้น		สูตรการผสม			Result Mixed pulp	
		EOP	D_1	สูตรที่	%Mixed (%)	0.05M H_2SO_4 (ml)	Brightness (%)	pH
การทดลองครั้งที่ 1	1	82.9	88.9	4	39.0	5.7	86.5	4.8
	2	81.9	88.8	4	39.0	5.7	86.7	4.7
	3	82.1	88.7	4	39.0	5.7	86.6	4.7
	4	82.3	87.7	3	37.8	5.3	86.0	5.1
	5	81.8	87.8	3	37.8	5.3	86.6	5.3
	6	80.0	87.3	1	22.9	0	86.1	5.2
การทดลองครั้งที่ 2	1	80.4	88.9	2	28.2	3.8	86.2	5.3
	2	80.7	88.3	2	28.2	3.8	85.7	4.8
	3	81.0	87.8	3	37.8	5.3	85.7	4.9
	4	82.3	87.6	3	37.8	5.3	85.8	4.9
	5	82.9	88.7	4	39.0	5.7	86.1	5.3
	6	81.9	88.9	4	39.0	5.7	86.8	5.1
	7	81.5	88.6	4	39.0	5.7	86.9	5.0
	8	80.5	87.4	1	22.9	0	86.5	5.1
การทดลองครั้งที่ 3	1	83.2	88.6	6	38.2	4.1	86.3	4.9
	2	82.2	87.9	3	37.8	5.3	86.2	5.2
	3	82.0	88.5	4	39.0	5.7	86.4	5.3
	4	81.7	87.6	3	49.8	5.3	86.2	5.1
	5	82.6	87.7	3	49.8	5.3	86.2	5.2

5.4 สรุปผลการผสมเยื่อในระดับโรงงาน

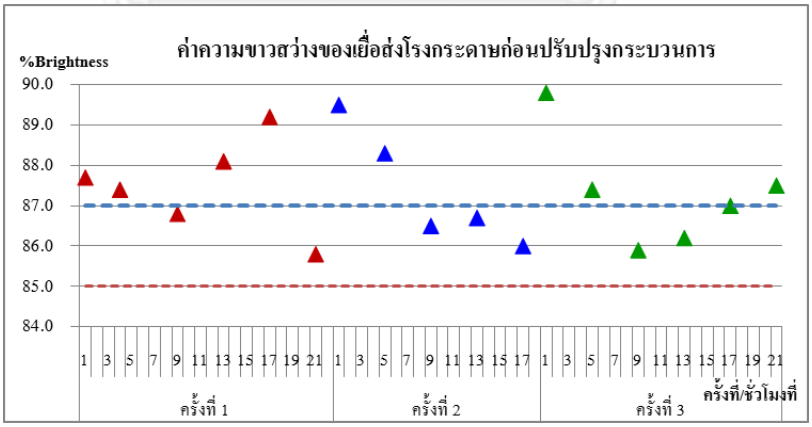
จากการทดลองสรุปผลเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อส่งโรงกระดาษ โดยเปรียบเทียบช่วงที่ทำการศึกษาก่อนทำการทดลอง ช่วงเวลาขณะที่มีการผสมเยื่อ และช่วงเดือนที่มีการทดลองผสมเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษ ได้ผลดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5. 3 สรุปผลการผสมเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดลอง

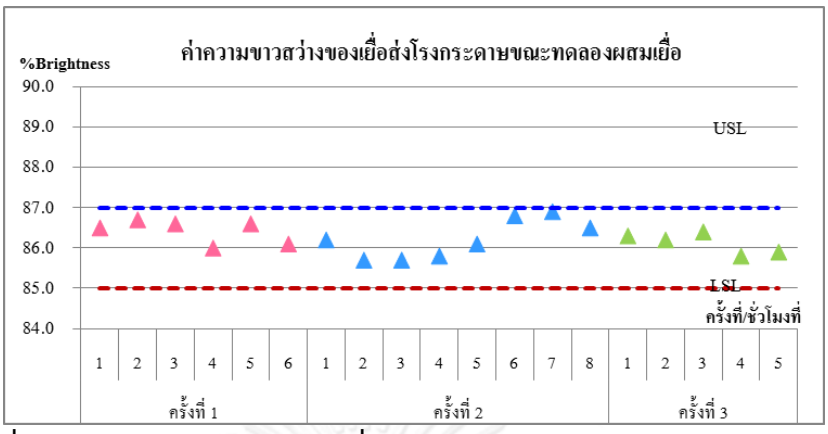
ปัจจัย		เกณฑ์ที่กำหนด	คุณภาพเยื่อก่อนการปรับปรุง	คุณภาพเยื่อหลังการผสม
ค่าความขาวสว่าง (%)	ค่าเฉลี่ย	85.0-87.0	87.40	86.27
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	≤ 0.6	1.33	0.36
ค่า pH	ค่าเฉลี่ย	4.5-6.0	5.06	5.05
	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	≤ 0.6	0.26	0.20

จากตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบคุณภาพเยื่อที่ส่งโรงกระดาษในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อในช่วงที่ไม่มีการปรับปรุงเทียบกับคุณภาพเยื่อช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อและทดลองผสมเยื่อตามสูตรการผลิตที่ได้ พบว่าคุณภาพเยื่อในช่วงที่ทำการผสมเยื่อมีค่าความขาวสว่างและค่า pH เป็นไปตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด มีค่าความขาวสว่างเฉลี่ย 86.27 และมีค่า pH เฉลี่ย 5.05 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นไปตามเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนด คือ ไม่เกิน 0.6 ซึ่งจากการทดลอง ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างเท่ากับ 0.36 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า pH เท่ากับ 0.20 แสดงว่าสูตรการผสมเยื่อที่ได้จากห้องทดลอง สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้จริง ทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อและค่า pH เข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น และมีความแปรปรวนลดลง

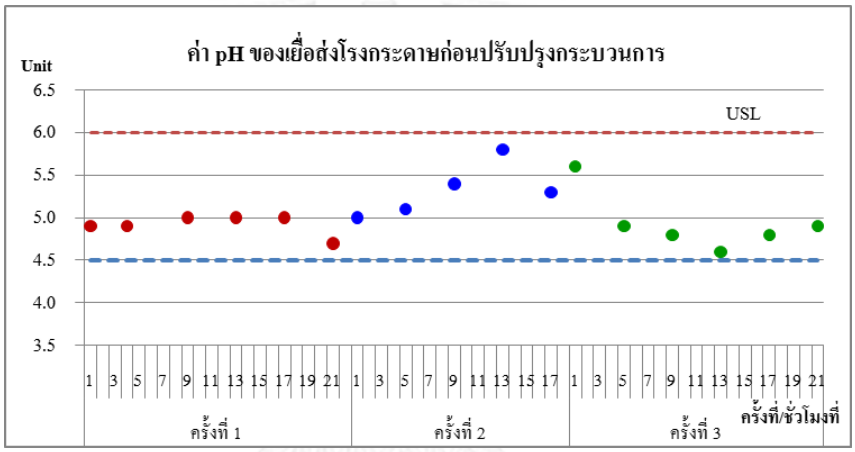
พิจารณาเพิ่มเติมคุณภาพเยื่อส่งโรงกระดาษ เปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงหรือในกรณีที่ไม่มีการผสมเยื่อเทียบกับขณะที่มีการทดลองผสมเยื่อเพื่อส่งโรงกระดาษ โดยทำการเปรียบเทียบคุณภาพเยื่อทั้งหมด 3 ครั้งในช่วงที่มีการปรับเกรดเยื่อ แสดงดังรูปที่ 5.4-5.7



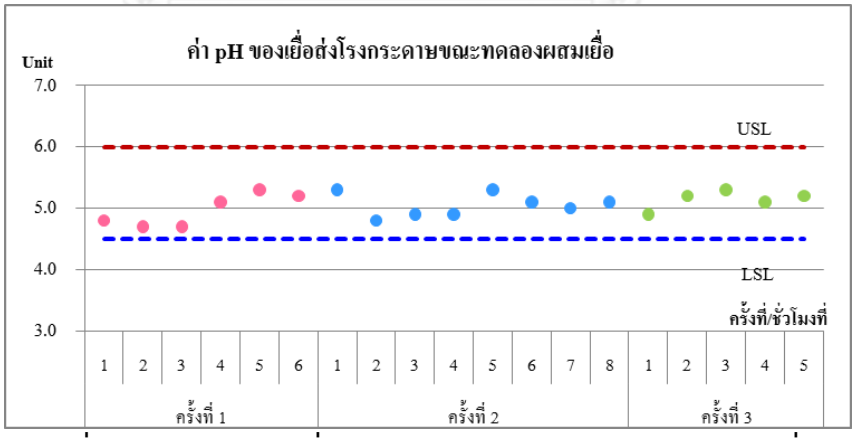
รูปที่ 5. 4 ค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษก่อนปรับปรุงกระบวนการ



รูปที่ 5. 5 ค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงกระดาษขณะทำการทดลองผสมเยื่อ



รูปที่ 5. 6 ค่า pH ของเยื่อส่งโรงกระดาษก่อนการปรับปรุงกระบวนการ



รูปที่ 5. 7 ค่า pH ของเยื่อส่งโรงกระดาษขณะทำการทดลองผสมเยื่อ

จะเห็นได้ว่าปัจจัยค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อส่งโรงกระดาษในขณะที่ทดลองผสมเยื่อมีค่าอยู่ในขอบเขตกำหนดบน (USL) และขอบเขตกำหนดล่าง (LSL) เกือบทั้งหมด แต่ค่า pH มีแนวโน้มเข้าใกล้ขอบเขตกำหนดล่างอาจเนื่องมาจากกรดซัลฟูริคที่ใช้ในการปรับ pH ของเยื่อที่หน้างานจริงมีปริมาณการใช้ที่น้อยมาก การควบคุมอัตราการไหลวัดหน่วยเป็นลิตรต่อชั่วโมง ทำให้การวัด

อัตราการไหลของกรดและการควบคุมวาล์วเป็นไปได้ยากจึงเป็นไปได้ว่าอาจเกิดความคลาดเคลื่อนในการควบคุมปริมาณกรดจากสูตรที่กำหนดให้

จากการทดลองระดับโรงงานทั้งหมด 3 ช่วงการทดลอง พบว่ามีการทดลองใช้สูตรในการผสมเยื่อทั้งหมด 5 สูตร คือ สูตรที่ 1 2 3 4 และ 6 ซึ่งมีจำนวนครั้งของการใช้สูตรที่แตกต่างขึ้นอยู่กับค่าความขาวสว่างเริ่มต้นและในสูตรที่ 6 มีการทดลองผสมเพียง 1 ครั้ง เนื่องจากเป็นช่วงที่ค่าความขาวสว่างของเยื่อสูงซึ่งโดยส่วนใหญ่โรงเยื่อจะทำการผลิตเยื่อแผ่นแห้งเกรดที่มีค่าความขาวสว่างสูงอยู่และได้ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังผสมแยกตามสูตรการทดลอง ดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5. 4 ผลการทดลองแยกตามสูตรการผสมเยื่อที่มีการทดลองในระดับโรงงาน

สูตร	%Mixed	0.05 M H2SO4	ค่าทำนายจากการ Optimization		ค่าจากการทดลอง			
			ค่าความขาวสว่าง	ค่า pH	ค่าความขาวสว่าง		ค่า pH	
					Average	SD	Average	SD
1	22.9	0	86.0	5.20	86.3	0.28	5.2	0.07
2	28.2	3.8	86.0	5.30	86.2	0.78	5.0	0.35
3	49.8	5.3	86.0	5.25	86.0	0.31	5.1	0.15
4	39.0	5.7	86.0	5.25	86.6	0.27	5.0	0.26
6	38.2	4.1	86.0	5.25	86.3	-	4.9	-

จากตารางที่ 5.3 พบว่าการในการทดลองระดับโรงงานเมื่อเปรียบเทียบผลค่าเฉลี่ยของค่าความขาวสว่างและค่า pH ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าจากการทำนายด้วยเทคนิค Optimization พบว่าผลของค่าความขาวสว่างจากการทดลองใกล้เคียงกับค่าจากการทำนายแต่จะมีแนวโน้มที่สูงกว่าในชุดการทดลองที่ค่าความขาวสว่างของเยื่ออยู่ในระดับสูง เห็นได้จากผลการใช้สูตรการผสมที่ 4 ซึ่งเป็นช่วงเริ่มต้นของการผสมเยื่อ อาจเนื่องมาจากในช่วงเริ่มต้นของการผสมเยื่อยังคงมีเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงกว่าเยื่อที่เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ค้างอยู่ในระบบท่อก่อนการทำการผสม เมื่อตัวอย่างเยื่อที่ทำการผสมแล้วเข้าไปผสมกับเยื่อค่าความขาวสว่างสูงในระบบท่อทำให้เยื่อหลังการผสมมีค่าสูงกว่าค่าจากการทำนายแต่ยังคงอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคือ 85-87% จึงถือว่ายอมรับได้ และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าความขาวสว่างของเยื่อจากทุกสูตรการผสม มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดคือ น้อยกว่า 0.6 และสำหรับผลของค่า pH ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบจากผลของการทำนาย จากการใช้สูตรผสมที่ 1 ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานน้อยกว่าชุดอื่นๆและมีค่า pH ใกล้เคียงกับผลจากการทำนายมากที่สุด อาจเนื่องมาจากไม่มีการเติมกรดเพิ่มในการผสม แต่สำหรับสูตรการผสมอื่นๆที่มีการใช้กรดเพื่อปรับค่า pH เพิ่มจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ย pH มีแนวโน้มที่ต่ำกว่าค่าจากการทำนายทั้งหมดอาจเนื่องมาจากในระดับโรงงานมีการใช้กรดซัลฟูริคเข้มข้น 98% แทนกรดซัลฟูริคเข้มข้น 0.05 โมลต่อลิตรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเมื่อคำนวณจากสูตรการผสมจะมีการใช้กรดในปริมาณที่น้อย

มาก ทำให้การควบคุมอัตราการไหลของกรดซัลฟูริคในการปรับ pH ของเยื่อหลังผสมมีความยากมากขึ้นจึงอาจมีการใช้กรดมากกว่าสูตรในการคำนวณ แต่เมื่อพิจารณาจากค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า pH หลังผสมพบว่าค่าที่ได้ยังอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนดจึงถือว่าสูตรการผสมเยื่อที่ได้สามารถนำมาใช้ในระดับโรงงานได้จริง

การคำนวณต้นทุนสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวสว่างของโรงกระดาษเปรียบเทียบในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อก่อนการปรับปรุงกระบวนการและช่วงที่มีมีการเปลี่ยนเกรดเยื่อและทดลองผสมเยื่อ สรุปปริมาณการใช้สารเคมีแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5. 5 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการปรับแต่งค่าความขาวสว่างที่โรงกระดาษเปรียบเทียบก่อนและหลังการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ไม่มีการผสมเยื่อ	มีการผสมเยื่อ
การใช้ OBA	กรัม/ตัน	2.9	2.5
การใช้ DYE	กรัม/ตัน	108.6	90.8

คำนวณเฉลี่ยรายชั่วโมงเปรียบเทียบต้นทุนด้านสารเคมี

เมื่อ สาร OBA ราคา 35.0 บาท/กิโลกรัม

สาร DYE ราคา 590 บาท/กิโลกรัม

คิดอัตราการผลิตเยื่อเฉลี่ย 35 ตัน/ชั่วโมง

ก่อนการปรับปรุง

ต้นทุนการใช้สาร OBA = 2.9 (กรัม/ตัน) x (1/1000 กรัม/กิโลกรัม) x 35.0 (บาท/กิโลกรัม)

= 0.1 บาท/ตัน

= 3.5 บาท/ชั่วโมง

ต้นทุนการใช้สาร DYE = 108.6 (กรัม/ตัน) x (1/1000 กรัม/กิโลกรัม) x 590 (บาท/กิโลกรัม)

= 64 บาท/ตัน

= 2,242.6 บาท/ชั่วโมง

คิดเป็นต้นทุนสารเคมีด้านค่าความขาวสว่างทั้งหมด เท่ากับ 2,246.1 บาท ต่อชั่วโมง

ขณะทดลองผสมเยื่อ

ต้นทุนการใช้สาร OBA = 2.5 (กรัม/ตัน) x (1/1000 กรัม/กิโลกรัม) x 35.0 (บาท/กิโลกรัม)

= 0.1 บาท/ตัน

= 3.1 บาท/ชั่วโมง

Chulalongkorn University

ต้นทุนการใช้สาร DYE = 90.8 (กรัม/ตัน) x (1/1000 กรัม/กิโลกรัม) x 590 (บาท/กิโลกรัม)

= 53.6 บาท/ตัน

= 1,876.0 บาท/ชั่วโมง

คิดเป็นต้นทุนสารเคมีด้านค่าความขาวสว่างทั้งหมด เท่ากับ 1,879.1 บาท ต่อชั่วโมง คิดเป็นต้นทุนสารเคมีด้านค่าความขาวสว่างของโรงกระดาษที่สามารถลดการใช้งานได้ เท่ากับ 370 บาท ต่อชั่วโมง และช่วงเวลาการปรับเกรดแต่ละครั้งอาจใช้เวลาประมาณ 5-20 ชั่วโมง ดังนั้นจะสามารถลดต้นทุนด้านสารเคมีได้ประมาณ 1,850-7,400 บาท หรือคิดเป็นค่าเฉลี่ยคือ 3,700 บาทต่อครั้งที่มีการเปลี่ยนเกรด ซึ่งในแต่ละเดือนมีแผนการผลิตเยื่อเกรดค่าความขาวสว่างสูงพิเศษ หรือ High brightness grade เดือนละ 1 ครั้ง และมีแผลการผลิตเยื่อเกรดค่าความขาวสว่างสูง หรือ Prime grade เดือนละ 2 ครั้ง ซึ่งหากทำการผสมเยื่อตามสูตรที่ได้จากงานวิจัยจะสามารถลดต้นทุนสารเคมีที่โรงกระดาษในช่วงที่คุณภาพเยื่อมีความผันแปรระหว่างการเปลี่ยนเกรดเฉลี่ยเดือนละ 3 ครั้ง หรือปีละ 36 ครั้ง คิดเป็นต้นทุนด้านสารเคมีที่ต้องใช้ในการปรับแต่งคุณภาพกระดาษที่สามารถลดได้เฉลี่ยปีละ 133,200 บาทต่อปี นอกจากนี้การผสมเยื่อในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อจะช่วยทำให้เยื่อมีคุณภาพเข้าสู่เกณฑ์ที่ต้องการได้เร็วขึ้น เนื่องจากในระหว่างการผสมเยื่อทางหน่วยงานฟอกเยื่อจะสามารถลดปริมาณการเติมสารเคมีเพื่อปรับลดค่าความขาวสว่างของเยื่อได้อย่างคงที่ เพราะในบางครั้งที่โรงกระดาษจำเป็นต้องใช้เยื่ออย่างเร่งด่วนทำให้หน่วยงานฟอกเยื่อลดปริมาณการเติมสารเคมีเร็วเกินไป ซึ่งจะทำให้ค่าความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อมีค่าสูงและในบางครั้งอาจทำให้ได้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างต่ำกว่าเกณฑ์ที่ต้องการ ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้คุณภาพเยื่อหลังการเดินเยื่อเกรดขาวสว่างพิเศษมีความแปรปรวนสูงและเข้าสู่สภาวะที่ต้องการได้ช้า เห็นได้จากระยะเวลาก่อนทำการทดลองผสมเยื่อค่าเฉลี่ยของจำนวนชั่วโมงที่คุณภาพเยื่อมีความแปรปรวนสูงเท่ากับ 10 ชั่วโมง แต่ในช่วงเวลาที่ทดลองผสมเยื่อจะเห็นได้ว่าระยะเวลาที่คุณภาพเยื่อมีความแปรปรวนสูงมีค่าเฉลี่ยลดลงอยู่ที่ 7 ชั่วโมง นั่นแสดงว่าการควบคุมคุณภาพเยื่อสามารถเข้าสู่สภาวะที่ต้องการได้เร็วขึ้น ดังนั้นการผสมเยื่อจึงสามารถทำให้เดินเยื่อเกรดขาวสว่างพิเศษสูงได้โดยส่งผลกรทบต่อคุณภาพเยื่อที่ส่งโรงกระดาษน้อยลง และไม่เกิดการเสียโอกาสในการผลิตเยื่อเกรดขาวสว่างพิเศษซึ่งมีมูลค่า 24,300 บาทต่อตัน

Chulalongkorn University

บทที่ 6
บทสรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเพื่อปรับปรุงคุณภาพเยื่อน้ำจากหน่วยงานฟอกเยื่อเพื่อส่งให้โรงกระดาษ โดยเฉพาะในช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มีความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงคิดแนวทางการผสมเยื่อจากสองขั้นตอนที่มีค่าความขาวสว่างและค่า pH แตกต่างกันคือเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D1 ซึ่งในการผสมเยื่อจะต้องหาจุดที่เหมาะสมของปริมาณเยื่อจากทั้งสองขั้นตอน และปริมาณกรดซัลฟูริคที่เติมเพื่อปรับ pH ของเยื่อ ให้เยื่อหลังการผสมมีค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วง 85-87% และค่า pH อยู่ในช่วง 4.5-6.0 ตรงกับคุณภาพของเยื่อที่โรงกระดาษต้องการ ซึ่งจะอาศัยหลักการออกแบบทางวิศวกรรมในการออกแบบการทดลอง แบ่งช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อเพื่อจัดกลุ่มเป็นชุดการทดลอง ทำการทดลองและสรุปผลการทดลองเพื่อหาจุดที่เหมาะสมของปริมาณการผสมเยื่อและปริมาณกรดซัลฟูริค และในลำดับสุดท้ายจะนำสภาวะเหมาะสมที่ได้นั้นมาจัดทำเป็นสูตรในการผสมเยื่อเพื่อประยุกต์ใช้ในระดับโรงงาน โดยในแต่ละขั้นตอนการดำเนินงานมีข้อสรุปดังนี้

6.1 ขั้นตอนการนิยามปัญหา

ในขั้นตอนการนิยามปัญหาได้ทำการศึกษาสภาพปัญหาและผลกระทบของปัญหาที่มีต่อโรงกระดาษเพื่อทำการกำหนดแนวทางการปรับปรุง พบว่าความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างของเยื่อจากโรงผลิตเยื่อทำให้เกิดการสิ้นเปลืองสารเคมีเพื่อปรับแต่งคุณภาพที่โรงผลิตกระดาษ งานวิจัยจึงมุ่งเน้นไปที่การลดความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อส่งโรงกระดาษในขณะที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อโดยไม่ทำการเปลี่ยนแปลงกระบวนการผลิตเนื่องจากไม่ต้องการให้กระทบต่อคุณภาพเยื่อเกรดอื่น มีการจัดตั้งคณะทำงานทั้งจากหน่วยงานฟอกเยื่อ หน่วยงานควบคุมคุณภาพ และผู้เกี่ยวข้องในแผนกอื่นๆ เพื่อระดมสมองและหาแนวทางการแก้ไขปัญหาร่วมกัน

6.2 ขั้นตอนการศึกษาตัวแปรเบื้องต้นก่อนทำการทดลอง

กำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษาดังนี้ ปัจจัยนำเข้า จำนวน 2 ปัจจัย คือ อัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดซัลฟูริค และกำหนดตัวแปรตอบสนองจำนวน 2 ปัจจัย คือ ค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังผสม จากนั้นได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และเยื่อจากขั้นตอน D_1 พบว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP มีความสัมพันธ์กับค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน D_1 มีค่า Correlation เท่ากับ 0.747 ผู้วิจัยจึงได้นำความสัมพันธ์ของค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP และ D_1 มาเป็นแนวทางในการกำหนดขอบเขตช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ต้องการศึกษาเพื่อไม่ให้ทำการทดลองจำนวนมากเกินไป และให้ช่วงที่ต้องการศึกษาครอบคลุมช่วงค่าความขาวสว่างที่เป็นไปได้เพื่อให้สามารถนำไปปรับใช้งานในกระบวนการผลิตจริงได้โดยง่าย จากนั้นกำหนดเป็นช่วงระดับค่าความขาวสว่างโดยสามารถแบ่งได้เป็น 7 ช่วง หรือกำหนดเป็น 7 ชุดการทดลอง

6.3 ขั้นตอนการวางแผนและทำการทดลอง

ในขั้นตอนการทดลองใช้แนวทางการหาพื้นผิวผลตอบ (Response surface design) เพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการผสมของแต่ละชุดการทดลอง โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (Design of experiment) รูปแบบ Central Composite Design (CCD) เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้มีความครอบคลุมช่วงที่ต้องการศึกษาและมีจำนวนการทดลองที่เหมาะสม โดยกำหนดให้การทดลองซ้ำที่ Center point เท่ากับ 3 เพื่อลดจำนวนการทดลอง Design matrix ที่ได้จึงมีจำนวนการทดลองเท่ากับ 11 รันต่อหนึ่งชุดการทดลอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 77 การทดลอง

หลังจากนั้นจึงทำการทดลองในห้องปฏิบัติการตาม Design matrix แบบสุ่มลำดับการทดลอง บันทึกค่าตัวแปรตอบสนองทั้งสองที่ได้จากการทดลอง เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนต่อไป

6.4 ขั้นตอนการสรุปผลและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ตัวแปรตอบสนองทั้งสองปัจจัย จากนั้นทดสอบสมมติฐานว่าส่วนตกค้างของข้อมูลเป็นไปตาม $\varepsilon_{ij} \approx NID(0, \sigma^2)$ หรือไม่จำนวน 3 สมมติฐาน คือ สมมติฐานการกระจายตัวแบบปกติ สมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล และสมมติฐานความมีเสถียรภาพของข้อมูล พบว่าตัวแปรตอบสนองค่าความขาวสว่างและค่า pH เป็นไปตามสมมติฐานทั้งหมด

จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยวิเคราะห์แบบ Full quadratic ใช้เทคนิค Stepwise regression พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างในทุกชุดการทดลอง คือ ผลหลักของอัตราการผสมเยื่อ EOP โดยมีผลคือหากอัตราการผสมเยื่อ EOP เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังผสมมีค่าลดลง นอกจากนี้ในบางชุดการทดลองปัจจัยของผลหลักปริมาณกรดซัลฟูริค ผลกำลังสองของอัตราการผสมเยื่อ และอันตรกริยาระหว่างปัจจัย ยังมีผลต่อค่าความขาวสว่างในบางชุดการทดลอง สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อค่า pH ในทุกชุดการทดลอง คือ ผลหลักอัตราผสมเยื่อ EOP และผลหลักปริมาณกรดซัลฟูริค โดยมีผลคือ หากอัตราการผสมเยื่อ EOP มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ค่า pH ของเยื่อหลังผสมสูงขึ้น และหากปริมาณการใช้กรดซัลฟูริคเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่า pH ของเยื่อหลังผสมลดลง นอกจากนี้ในบางชุดการทดลองยังมีผลกำลังสองของปริมาณกรด และอันตรกริยาระหว่างปัจจัย ที่มีผลต่อค่า pH ของเยื่อหลังผสมเช่นกัน

จากนั้นทำการหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าสำหรับแต่ละช่วงความขาวสว่างด้วยเทคนิค Optimization โดยกำหนดค่าเป้าหมายของค่าความขาวสว่างเป็น 86% เนื่องจากโรงกระดาษกำหนดเกณฑ์ที่ต้องการคือ 85-87% และกำหนดค่าเป้าหมายของค่า pH เป็น 5.25 เนื่องจากโรงกระดาษกำหนดเกณฑ์ที่ต้องการคือ 4.5-6.0 เมื่อทำการ Optimize ได้สภาวะที่เหมาะสมของการทดลองทั้ง 7 ชุด จึงนำผลที่ได้มาจัดทำเป็นสูตรการผสมสำหรับแต่ละช่วงระดับค่าความขาวสว่าง เพื่อสามารถนำไปใช้ในระดับโรงงาน

6.5 ขั้นตอนการทดลองในระดับโรงงาน

การทดลองระดับโรงงานปัจจัยที่ต้องควบคุมตามสูตรการผสมเยื่อที่ได้ คือ อัตราการผสมและปริมาณกรดซัลฟูริค ซึ่งในกระบวนการผลิตสามารถควบคุมโดยการปรับวาล์วเพื่อควบคุมอัตราการไหลของเยื่อและกรดซัลฟูริค โดยทำการผสมเยื่อในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อ และระหว่างการทดลองมีการควบคุมคุณภาพอย่างใกล้ชิดโดยเพิ่มความถี่การวิเคราะห์ตัวอย่าง พบว่าผลการผสมเยื่อเป็นไปตามการทำนายผลจากสูตร ค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังผสมอยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อมีค่าลดลง

6.6 ปัญหาและอุปสรรคที่พบในงานวิจัย

1) การทดลองในระดับโรงงานช่วงที่มีการเก็บตัวอย่างและเก็บข้อมูลถี่ขึ้น เป็นการเพิ่มภาระงานให้แก่พนักงานทั้งในสายผลิตและในแผนกควบคุมคุณภาพ ก่อนการทดลองจึงต้องชี้แจงถึงวัตถุประสงค์และความสำคัญของงานวิจัยให้แก่พนักงานทุกฝ่ายทราบอย่างละเอียดเพื่อให้พนักงานเล็งเห็นถึงความสำคัญ และให้เกิดความผิดพลาดจากคนให้น้อยที่สุด

2) สายการผลิตเยื่อในโรงงานกรณีศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous Process) ทำให้การเก็บตัวอย่างเพื่อทำการทดลอง หรือการบันทึกข้อมูลจากทางฝ่ายผลิตไม่สามารถทำซ้ำได้ หากเกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์ การบันทึกข้อมูล หรือการควบคุมที่ฝ่ายการผลิต ต้องแก้ไขและดำเนินการใหม่อีกครั้งทันที

3) กรดซัลฟูริคความเข้มข้น 98% ที่ใช้เติมเพื่อปรับค่า pH ในกระบวนการผลิต เมื่อต้องเติมตามสูตรที่ได้จากการทดลองจะมีการใช้ในปริมาณน้อยมาก อาจเกิดความผิดพลาดในการปรับวาล์วหรือเกิดความคลาดเคลื่อนของการวัดอัตราการไหลในระบบ

6.7 ข้อเสนอแนะ

1) สามารถประยุกต์ใช้งานวิจัยเพื่อขยายการศึกษาการผสมเยื่อในช่วงค่าความขาวสว่างระดับอื่นๆ เพื่อรองรับการเดินเยื่อที่หลากหลายเกรด เช่น อาจเพิ่มเติมช่วงที่ศึกษาเป็นช่วงที่ค่าความขาวสว่างต่ำกว่า 85% รองรับการเดินเยื่อเกรดค่าความขาวสว่างต่ำ (Low brightness)

2) หากในระดับโรงงานมีงบประมาณเพียงพอสำหรับการทดลองเพิ่มเติม สามารถเพิ่มจำนวนการทดลอง และแบ่งช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP ให้มีความละเอียดมากขึ้น เช่น จากเดิมในการทดลองชุดที่ 1 ทำการศึกษาเยื่อ EOP ที่มีค่าความขาวสว่างช่วง 79.0-80.9 อาจแบ่งช่วงระดับค่าความขาวสว่างสำหรับการทดลองเพิ่มเติมเป็น 79.0-79.9 และ 80.0-80.9 เพื่อให้สูตรการผสมเยื่อที่ได้มีความละเอียดมากขึ้น

3) สามารถนำแนวทางการออกแบบการทดลองแบบ CCD รวมถึงขั้นตอนการ Optimize ไปประยุกต์ใช้ในการทดลองอื่นๆของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อให้การทดลองและสรุปผลมีความถูกต้องเชื่อถือได้

4) ในการออกแบบการทดลองตามหลักการออกแบบทางวิศวกรรม บุคลากรในระดับโรงงานต้องมีทักษะความรู้ความเข้าใจในหลักการและแนวทางการดำเนินงานเพื่อให้การทดลองถูกต้องและ

เป็นไปตามหลักการ และเพื่อให้สามารถแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างการทดลองได้ รวมถึงการนำหลักการออกแบบทางวิศวกรรมไปประยุกต์ใช้ในการทดลองอื่นๆของโรงงาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รายการอ้างอิง

ANTHONY, B. J. 1999. ISO brightness : A more complete definition. *Tappi journal,* 82**,** 54-56.

BEZERRA, M. A., SANTELLI, R. E., OLIVEIRA, E. P., VILLA, L. S. & ESCALERIA, L. A. L. 2008. Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta,* 76**,** 965-977.

FOELKEL, C. 2007. The eucalyptus fibers and the kraft pulp quality requirment for paper manufacturing. *Eucalyptus Online Book & Newsletter.*

GOLDMAN, J. Minimizing final brightness variability while reducing ClO2 Usage.

HANS U. SUESS, CESAR LEPORINI FILHO & KURT SCHMIDT 2000. Bleaching of eucalyptus kraft pulp to very high brightness. *Pulp and Paper International Congress.* Sao Paulo - Brazil.

LINDEDAHL, A. K. 2008. Chemical reactions in kraft pulping.

LOUREIRO, P. E. G., SANTOS, A. S. M., EVTUGUIN, D. V. & CARVALHO, M. G. V. S. 2010. Performance of a final hydrogenperoxide stage in different ECF bleaching sequences. *XXI TECNICELPA Conference and Exhibition/VI CIADICYP Lisbon.* Portugal.

SCOTT, W. E., ABBOTT, J. C. & TROSSET, S. 1989. *Properties of Paper,* United States, Tappi Press.

SEVASTYANOVA, O., FORSSTRöM, A., WACKERBERG, E. & LINDSTRöM, M. E. 2012. Bleaching of eucalyptus kraft pulps with chlorine dioxide: factors affecting the efficiency of the final D stage. *Tappi journal,* 11**,** 43-53.

WILLIAMSON, M. 1999. Reducing brightness variability is an added benefit of Skowhegan mill's environmental project. Pulp & Paper Magazine.

ZHANG, H., HE, Z., NI, Y., ZHOU, Y. & HU, H. 2009. Using optical brightening agents (OBA) for improving the optical properties of HYP-containing paper sheets. *Pulp and paper Canada.*

บริษัท สยามคราฟท์ จำกัด, การฟอกเยื่อ เล่มที่ 1, (กรุงเทพฯ: 2525).

ปารเมศ ชุติมา, การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, พิมพ์ครั้งที่ 1(กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545).

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

การสอบเทียบเครื่องมือวัดที่ใช้ในงานวิจัย

1. การสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหลของเยื่อและกรดที่หน่วยงาน Bleaching

การสอบเทียบเครื่องวัดอัตราการไหลของเยื่อและกรดที่หน่วยงาน Bleaching ดำเนินการโดยบริษัท Promeco Service Co., Ltd. ซึ่งจะทำการสอบเทียบเดือนละ 1 ครั้ง เพื่อความแม่นยำในการวัด โดยเฉพาะเครื่องวัดอัตราการไหลของเยื่อจะต้องมีความถูกต้องเพราะมีความสำคัญต่อการคำนวณอัตราการผลิต (Production) ของเยื่อ

2. การสอบเทียบเครื่องมือวัดในหน่วยงานควบคุมคุณภาพ

การสอบเทียบเครื่องมือในหน่วยงานควบคุมคุณภาพเพื่อการวิเคราะห์คุณภาพเยื่อ สามารถแบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ การสอบเทียบเครื่องมือจากหน่วยงานภายนอก หรือสอบเทียบภายใน ซึ่งการสอบเทียบภายในเป็นการติดตามประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดและสามารถปรับตั้งค่าได้เพียงบางส่วนเท่านั้น หากต้องการให้การสอบเทียบมีการปรับตั้งค่า (Adjust) และมีการแก้ไขข้อผิดพลาดในการตรวจวิเคราะห์ต้องอ้างอิงผลจากการสอบเทียบเครื่องมือจากหน่วยงานภายนอก ซึ่งอาจเป็นบริษัทที่ขายเครื่องมือนั้นให้แก่หน่วยงาน หรือเป็นหน่วยงานที่ผ่านการรับรอง ซึ่งแต่ละเครื่องมือจะมีความถี่ในการสอบเทียบแต่ละวิธีที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความถี่ของการใช้งานเครื่องมือ งบประมาณ และความสำคัญของเครื่องมือนั้นที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ โดยมีรายละเอียดการสอบเทียบของเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยดังนี้

1) การสอบเทียบเครื่อง pH meter

การวัดค่า pH ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง pH meter ยี่ห้อ Metler Toledo รุ่น seven easy ซึ่งทำการสอบเทียบทั้งสองวิธีการ คือ มีการสอบเทียบภายในและสอบเทียบจากภายนอก โดยการสอบเทียบภายในจะทำการสอบเทียบวันละ 1 ครั้ง โดยเทียบกับสารบัฟเฟอร์หรือมาตรฐานที่มีค่า pH ที่แน่นอน (Buffer) ให้ครอบคลุมทุกช่วงค่า pH ที่มีการใช้งานซึ่งจะมีการสอบเทียบที่ค่า pH 4 7 และ 10 โดยทำการวัดหน่วยของแรงดันประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็นมิลลิโวลต์ (milli volt หรือ mV) ซึ่งค่าที่อ่านได้จะต้องอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับ และการสอบเทียบจากภายนอกดำเนินการโดยบริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด บริษัทผู้ดูแลเครื่อง pH meter ดังกล่าว ซึ่งจะทำการสอบเทียบและปรับตั้งค่าปีละ 1 ครั้ง

2) การสอบเทียบเครื่องวัดค่าความขาวสว่าง

การวิเคราะห์ค่าความขาวสว่างในงานวิจัยหลังการเตรียมตัวอย่างและขึ้นแผ่นแบบเปียก จะทำการวัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Technidyne รุ่น color touch PC ซึ่งถูกออกแบบมาให้สอดคล้องกับมาตรฐาน ISO หมายเลข 2469 และ 2470 เป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของเยื่อกระดาษด้านค่าความขาวสว่าง และด้านอื่นๆ เช่น ค่าสี (color) ค่าความทึบแสง (opacity) เป็นต้น และสำหรับในหน่วยงานวิเคราะห์คุณภาพเครื่อง Technidyne มีการสอบเทียบทั้งสองวิธีการ คือ มีการ

สอบเทียบภายในและสอบเทียบจากภายนอก โดยการสอบเทียบภายในจะทำการสอบเทียบเดือนละ 1 ครั้ง โดยทำการสอบเทียบกับชุดกระดาษมาตรฐานในช่วงค่าความขาวสว่าง 70 และ 90 ที่มีการออกใบรับรองจากบริษัท Certified Lab Consulting Co., Ltd. ซึ่งต้องทำการสั่งซื้อใหม่ทุกเดือน สำหรับการสอบเทียบภายในเพื่อป้องกันความเพี้ยนของสีที่อาจเกิดขึ้นจากการจัดเก็บ โดยทำการวัดค่าความขาวสว่างของชุดกระดาษมาตรฐานซึ่งค่าที่อ่านได้เมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่กำหนดมาต้องมีความแตกต่างไม่เกิน $\pm$0.3 และการสอบเทียบจากภายนอกดำเนินการโดยบริษัท Certified Lab Consulting Co., Ltd. ซึ่งจะทำการสอบเทียบและปรับตั้งค่าปีละ 1 ครั้ง

3) การสอบเทียบเครื่อง Rapid dryer

ทำการสอบเทียบจากบริษัทภายนอกผู้ผ่านการรับรองด้านการสอบเทียบ โดยบริษัท Lorentzen & Wettre (S) Pte Ltd. โดยจะทำการสอบเทียบปีละ 1 ครั้ง

4) การสอบเทียบเครื่องชั่ง

ทำการสอบเทียบจากบริษัท Metler-Toledo (Thailand) Co., Ltd. ซึ่งเป็นบริษัทผู้ขายและดูแลเครื่องชั่งโดยตรง โดยจะทำการสอบเทียบและปรับตั้งค่าปีละ 2 ครั้ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ข

ตัวย่อและชื่อเฉพาะที่ใช้ในงานวิจัย

	คำอธิบาย
D0	การฟอกเยื่อด้วยคลอรีนไดออกไซด์ครั้งที่ 1
D1	การฟอกเยื่อด้วยคลอรีนไดออกไซด์ครั้งที่ 2
EOP	การฟอกเยื่อด้วยคลอรีนไดออกไซด์ ออกซิเจน และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์
ClO_2	คลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide)
H_2O_2	ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide)
O_2	ออกซิเจน (Oxygen)
NaOH	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)
OBA	สารเพิ่มความขาวสว่าง (Optical brightening agent)
DYE	สารสีย้อม
HB grade	เยื่อแผ่นแห้งเกรดขาวสว่างพิเศษ (High brightness grade)
Prime grade	เยื่อแผ่นแห้งเกรดพิเศษ (Premium grade)
SPM grade	เยื่อแผ่นแห้งเกรดสำหรับส่งโรงกระดาษ (Standard to paper mill grade)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐพร สุขป้อม เกิดเมื่อวันที่ 16 มกราคม พ.ศ. 2529 สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี จากคณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปี พ.ศ.2550 เริ่มทำงานในบริษัท ดั๊บเบิ้ลเอ 1991 จำกัด (มหาชน) เมื่อปี พ.ศ.2551 ในแผนกควบคุมคุณภาพ ตำแหน่งนักวิจัย และได้เข้าศึกษาต่อในระดับบัณฑิตศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2554

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University