

ผลของการใช้น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกลอกซีไคส์ที่ขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์ในโรงงานผลิต
เยื่อกระดาษ



นายพนพนัย ขจรไพศาล

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.

THE EFFECT OF USING OXIDIZED WHITE LIQUOR IN PEROXIDE BLEACHING STAGE IN
PULP MILL

Mr. Nopdanai Khajornpaisan



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

ผลของการใช้น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์ที่ขั้นตอนการ
พอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์ในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ

โดย

นายนพดนัย ขจรไพศาล

สาขาวิชา

วิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทชัย กานตานันตะ)

นพดนัย ขจรไพศาล : ผลของการใช้น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์ที่ขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์ในโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ. (THE EFFECT OF USING OXIDIZED WHITE LIQUOR IN PEROXIDE BLEACHING STAGE IN PULP MILL) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.นภัสสวงศ์ โจรจนโรวรรณ, 80 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงผลของการใช้น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidized white liquor, OWL) ต่อคุณภาพของเยื่อซึ่งได้แก่ ความขาวสว่าง ความหนืด ค่าแคปป์ปา และสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ ทดแทนการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ในขั้นตอนการฟอกด้วยเปอร์ออกไซด์ ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อ เพื่อลดต้นทุนวัตถุดิบในการผลิต โดยศึกษาร่วมกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการฟอก

การศึกษานี้ใช้แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลางในการทำการทดลองเพื่อให้มีจำนวนการทดลองเท่าที่จำเป็น จากนั้นได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวแปรตอบสนองทั้งสี่และปัจจัยทั้งสี่ข้างต้น จากนั้นหาสภาวะที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสี่ที่จะให้ตัวแปรตอบสนองทุกตัวได้ค่าตามต้องการด้วยวิธีการหาจุดที่เหมาะสม

ผลจากงานวิจัยพบว่า การใช้ OWL แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์มีผลทำให้ความขาวสว่างของเยื่อลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองทั้งสี่ข้างต้นตามต้องการ สัดส่วนของ OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมที่ใช้ได้เท่ากับ 34:66 ซึ่งสัดส่วนนี้ต้องใช้ร่วมกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 6.0 กรัมต่อกิโลกรัม อุณหภูมิในการฟอกเท่ากับ 85.5 องศาเซลเซียส และเวลาในการฟอกเท่ากับ 93 นาที ซึ่งประมาณการว่าจะสามารถประหยัดต้นทุนค่าโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 3,300,000 บาทต่อเดือน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ปีการศึกษา 2556

5570917921 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: OXIDIZED WHITE LIQUOR / PULP QUALITY / PEROXIDE BLEACHING
STAGE / CENTRAL COMPOSITE DESIGN / DESIGN OF EXPERIMENT

NOPDANAI KHAJORNPAISAN: THE EFFECT OF USING OXIDIZED WHITE LIQUOR IN PEROXIDE BLEACHING STAGE IN PULP MILL. ADVISOR: ASST. PROF. NAPASSAVONG ROJANAROWAN, Ph.D., 80 pp.

This paper has the objective to study the effect of using Oxidized White Liquor (OWL) instead of sodium hydroxide in the peroxide bleaching stage in pulp mills on pulp quality, which are brightness, viscosity, kappa no., and dirt in order to save material cost. The proper setting of the concentration of the hydrogen peroxide, the bleaching temperature, and the bleaching time was also studied.

The Central Composite Design (CCD) was proposed to generate necessary experimental runs. Then, the regression technique was used to determine the relationship equation between the above-mentioned responses and factors. Then, the optimization technique helped determine the proper setting.

The results of the study showed that using OWL instead of sodium hydroxide significantly decreases the pulp brightness. To satisfy the four responses, the setting of the ratio between the volume of the OWL and the sodium hydroxide should be at 34:66. This ratio of OWL should be used with the concentration of the hydrogen peroxide at 6.0 g/kg, the bleaching temperature at 85.5 degree Celsius, and the bleaching time at 93 minutes. It is expected that the new setting will save the sodium hydroxide cost of 3,300,000 baht per month.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้ทำงานวิจัยขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสสวงศ์ โรจนโรวรรณ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้อดทนเหน็ดเหนื่อยให้คำปรึกษา และคำแนะนำในทุกๆ เรื่อง ตลอดจนแนวทางการแก้ไขปัญหาและอุปสรรคที่เกิดขึ้น ในระหว่างการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร ประธานกรรมสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิภาวี ธรรมมาภรณ์พิลาศ กรรมการการสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นันทชัย กานตานั้นทะ กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้เกียรติมาทำหน้าที่ พร้อมให้คำแนะนำ และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกต้องและสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ให้โอกาสในการทำงานวิจัย รวมทั้งให้การสนับสนุนในการเก็บรวบรวมข้อมูล การทำการทดลองต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้และให้คำแนะนำจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี รวมถึงพนักงานและเจ้าหน้าที่ภาควิชาทุกท่าน

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัว และเพื่อนนิสิตทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและเป็นที่กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	6
1.4 ผลที่ได้รับ.....	6
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	6
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	9
2.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment).....	13
2.3 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM).....	15
2.4 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของเยื่อ.....	27
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	32
3.1 การออกแบบการทดลอง.....	32
3.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการเคมี.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	39
4.1 ผลการทดลอง.....	39
4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	40
4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับความขาวสว่าง (Brightness).....	40
4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับความหนืด (Viscosity number).....	47
4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าแคปป่า (Kappa no.).....	52

4.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirt).....	57
4.3 การหาจุดที่เหมาะสม (optimization)	63
4.4 การวิเคราะห์การถดถอย.....	67
บทที่ 5 การทดลองเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลหลังการปรับปรุง.....	68
บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	73
6.1 สรุปผลงานวิจัย.....	73
6.2 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำงานวิจัย	74
6.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย.....	74
รายการอ้างอิง	75
ภาคผนวก.....	76
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	80

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1	ค่า Specification ของเยื่อในชั้นตอน EP	7
ตารางที่ 3.1	ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง	34
ตารางที่ 3.2	Design matrix of the experiment.	35
ตารางที่ 3.3	ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ที่ระดับการทดลองต่างๆ ของ OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์	37
ตารางที่ 3.4	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ที่ระดับการทดลองต่างๆ	37
ตารางที่ 3.5	คุณภาพของเยื่อที่ใช้ในการทดลอง	38
ตารางที่ 3.6	คุณภาพของ OWL ที่ใช้ในการทดลอง.....	38
ตารางที่ 4.1	ผลการทดลอง.....	39
ตารางที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความขาวสว่าง	43
ตารางที่ 4.3	ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนืด	49
ตารางที่ 4.4	ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของค่าแคปป่า	54
ตารางที่ 4.5	ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ	59
ตารางที่ 4.6	ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05	61
ตารางที่ 4.7	Response Optimization	64
ตารางที่ 4.8	ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม.....	65
ตารางที่ 5.1	ผลการทดลองใช้การตั้งค่าใหม่สำหรับการฟอกเยื่อ	68
ตารางที่ 5.2	ข้อมูลทางสถิติของค่าความขาวสว่าง ที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง ..	71
ตารางที่ 5.3	ข้อมูลทางสถิติของค่าความหนืด ที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง	71
ตารางที่ 5.4	ข้อมูลทางสถิติของค่าแคปป่าที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง	71
ตารางที่ 5.5	ข้อมูลทางสถิติของค่าสิ่งปนเปื้อน ที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง	72

สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 1.1 ไม้สับ และเยื่อที่ได้จากการต้ม.....	2
รูปที่ 1.2 เยื่อที่ได้จากขั้นตอนการผลิตต่างๆ.....	2
รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตเยื่อและกระบวนการนำสารเคมีกลับคืน	2
รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการพอกเยื่อ.....	3
รูปที่ 1.5 เยื่อแผ่นแห้ง.....	5
รูปที่ 1.6 น้ำยาต้มเยื่อและน้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์	5
รูปที่ 2.1 การผลิตและการนำ OWL ไปใช้งาน	10
รูปที่ 2.2 การผลิต OWL ด้วยวิธี Quantum's pilot plant system.....	11
รูปที่ 2.3 พื้นผิวตอแบบสามมิติ.....	15
รูปที่ 2.4 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอ.....	16
รูปที่ 2.5 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอ	17
รูปที่ 2.6 พื้นผิวตอกำลังหนึ่งและเส้นทางป็นขึ้นด้วยทางขึ้นที่ชั้นที่สุด.....	18
รูปที่ 2.7 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ k=2.....	21
รูปที่ 2.8 แสดงจำนวนการทดลองของ CCD.....	23
รูปที่ 2.9 รูปร่างของ desirability function ที่น้ำหนักต่างๆ	25
รูปที่ 2.10 ลักษณะของ desirability function.....	26
รูปที่ 2.11 Technidyne รุ่น Color Touch PC	28
รูปที่ 2.12 เครื่อง KAPPAMAT.....	29
รูปที่ 2.13 เครื่อง VISCOMAT	30
รูปที่ 2.14 แผ่นมาตรฐานเปรียบเทียบขนาดลึงปนเปื้อนในเยื่อ.....	31
รูปที่ 4.1 Probability Plot ของความขาวสว่าง.....	41
รูปที่ 4.2 Residuals Versus Order Plot ของความขาวสว่าง.....	42
รูปที่ 4.3 Residuals Versus Fitted value Plot ของความขาวสว่าง.....	43
รูปที่ 4.4 Interaction Plot ของความขาวสว่าง.....	45
รูปที่ 4.5 Main Effect Plot ของความขาวสว่าง.....	46
รูปที่ 4.6 Probability Plot ของความหนืด	47
รูปที่ 4.7 Residuals Versus Order ของความหนืด.....	48
รูปที่ 4.8 Residuals Versus Fitted value Plot ของความหนืด.....	48
รูปที่ 4.9 Main Effect Plot ของความหนืด.....	51

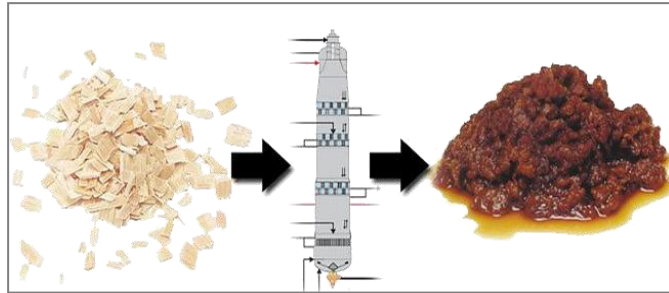
รูปที่ 4.10 Probability Plot ของค่าแคปปี่า	52
รูปที่ 4.11 Residuals Versus Order ของค่าแคปปี่า.....	53
รูปที่ 4.12 Residuals Versus Fitted value Plot ของค่าแคปปี่า.....	53
รูปที่ 4.13 Main Effect Plot ของค่าแคปปี่า.....	56
รูปที่ 4.14 Surface Plots ของค่าแคปปี่า.....	56
รูปที่ 4.15 Probability Plot ของค่าสิ่งปนเปื้อน	57
รูปที่ 4.16 Residuals versus Order ของค่าสิ่งปนเปื้อน	58
รูปที่ 4.17 Residuals Versus Fitted value Plot ของสิ่งปนเปื้อน.....	58
รูปที่ 4.18 Main Effect Plot ของค่าสิ่งปนเปื้อน	61
รูปที่ 4.19 Optimization Plot	65
รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง	70

บทที่ 1

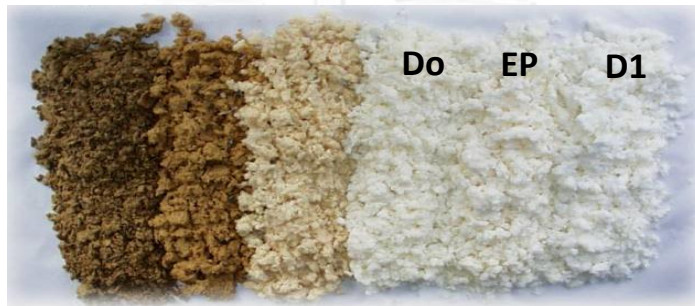
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

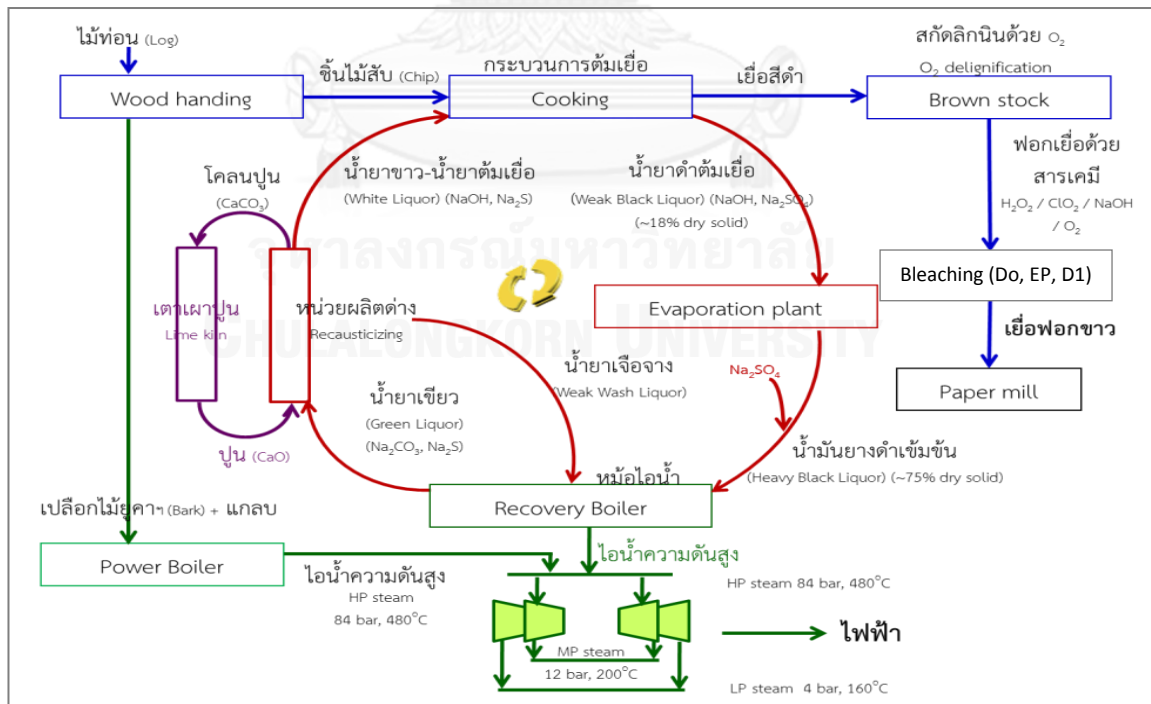
ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ประกอบไปด้วยขั้นตอนในการผลิตเยื่อ (Fiber line process) และขั้นตอนของการนำสารเคมีกลับคืน (Recovery process) ซึ่งขั้นตอนของการผลิตเยื่อ จะเริ่มจากการรับไม้ยูคาลิปตัส เข้ามาปอกเปลือก และสับเป็นชิ้น จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการต้มเยื่อ (Cooking stage) ซึ่งไม้สับจะทำปฏิกิริยากับน้ำยาต้มเยื่อ (White liquor) ได้เป็นเยื่อที่มีสีดำ จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (Brown stock stage) ได้เยื่อสีน้ำตาล จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการฟอกเยื่อ (Bleaching stage) ซึ่งประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย 3 ขั้นตอนได้แก่ 1) D0 คือ การฟอกเยื่อด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (Chlorine dioxide) ในสถานะกรด 2) EP คือการฟอกเยื่อด้วย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogen peroxide) และ 3) D1 คือการฟอกเยื่อด้วย คลอรีนไดออกไซด์ครั้งที่ 2 เมื่อเยื่อผ่านการฟอกแล้วจะได้เยื่อที่มีค่า ความขาวสว่างที่ต้องการ จากนั้นจะนำเยื่อเข้าสู่กระบวนการขึ้นแผ่นและอบให้เป็นแผ่นแห้งเป็นอัน เสร็จสิ้นกระบวนการผลิตเยื่อ ในส่วนของกระบวนการนำสารเคมีกลับคืนนั้น จะเริ่มจากการนำ ของเหลวที่เกิดขึ้นหลังจากขั้นตอนการต้มเยื่อซึ่งจะมีลักษณะเป็นสีดำเรียกว่าน้ำยาดำต้มเยื่อ (Weak Black liquor) เข้าสู่กระบวนการระเหยน้ำออกที่หน่วยงานระเหยน้ำ (Evaporation plant) จนได้ ความเข้มข้นที่ต้องการเรียกว่าน้ำมันยาดำเข้มข้น (Heavy Black liquor) นำไปเป็นเชื้อเพลิงในการ ผลิตไฟฟ้าที่หน่วยงานหม้อไอน้ำนำสารเคมีกลับคืน (Recovery boiler plant) น้ำมันยาดำเข้มข้น ซึ่งถูกเผาเป็นเชื้อเพลิงแล้วจากหน่วยงานผลิตไฟฟ้าจะถูกนำไปรวมกับน้ำในกระบวนการผลิตได้เป็น สารละลายเรียกว่าน้ำยาเขียว (Green liquor) ซึ่งจะนำไปทำปฏิกิริยากับปูนขาว (Brent lime) ที่ หน่วยงานผลิตต่าง (Recausticizing plant) ได้น้ำยาต้มเยื่อ (White liquor) กลับมาใช้ต้มเยื่อใน กระบวนการผลิตเยื่อต่อไป รูป 1.1 แสดงชิ้นไม้สับที่ผ่านกระบวนการต้มจนได้เป็นเยื่อ รูป 1.2 แสดง เยื่อที่มีความสว่างเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการต่างๆ รูปที่ 1.3 แสดงกระบวนการต้มเยื่อและ กระบวนการนำสารเคมีกลับคืน และรูปที่ 1.4 แสดงกระบวนการฟอกเยื่อของหน่วยงานฟอกเยื่อ



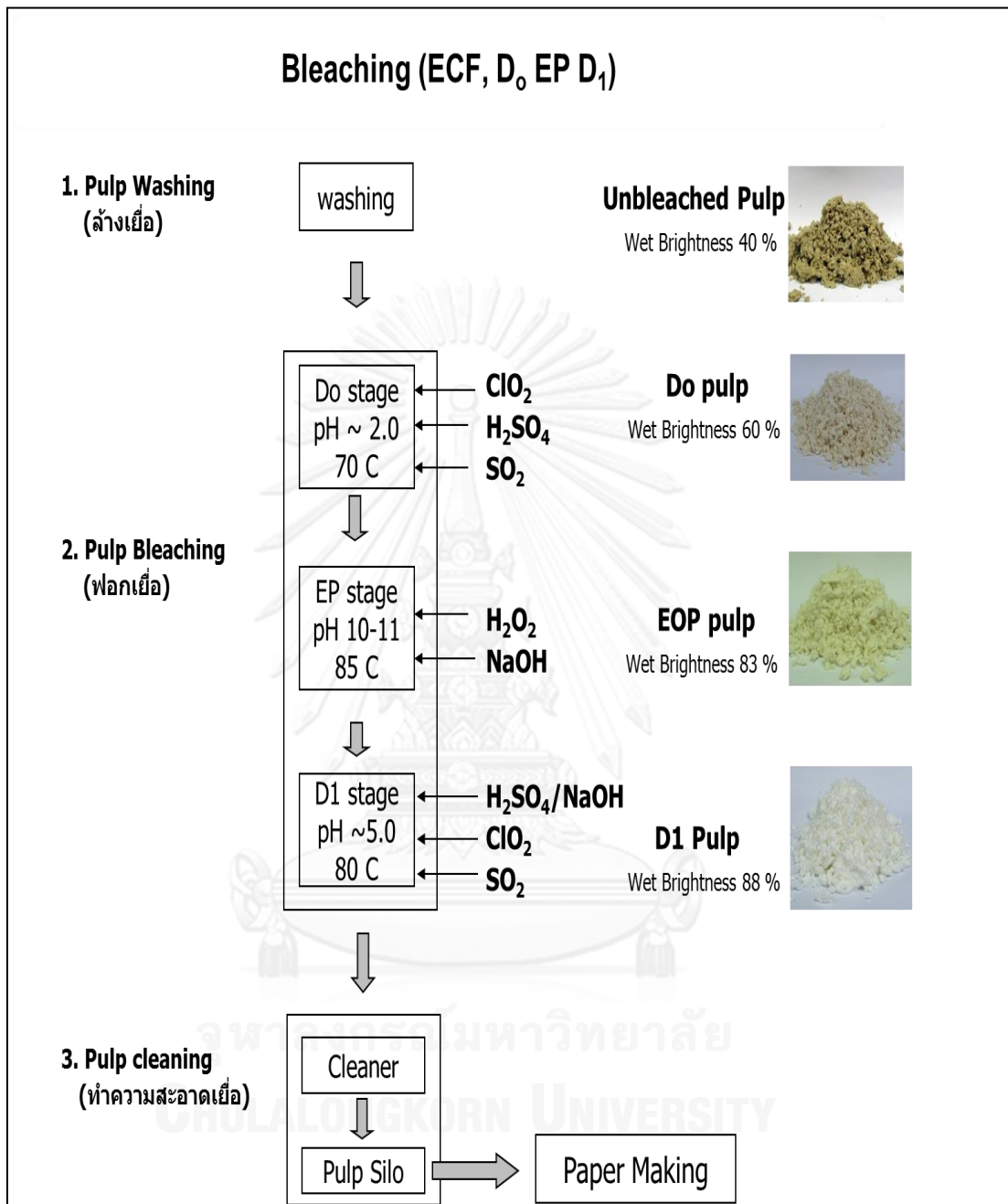
รูปที่ 1.1 ไม้สับ และเยื่อที่ได้จากการต้ม



รูปที่ 1.2 เยื่อที่ได้จากขั้นตอนการผลิตต่างๆ



รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตเยื่อและกระบวนการนำสารเคมีกลับคืน



รูปที่ 1.4 ขั้นตอนการฟอกเยื่อ

ที่มาของรูป 1.1-1.4 : โรงงานกรณีศึกษา

ในการฟอกเยื่อของหน่วยงานฟอกเยื่อนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนย่อย 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกจะเป็นการฟอกเยื่อโดยใช้คลอรีนไดออกไซด์ ในสภาวะกรดเรียกว่า D0 โดยใช้กรดซัลฟูริกเป็นสารเคมีในการปรับพีเอชให้มีค่าประมาณ 2 อุณหภูมิที่ใช้คือ 70 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการฟอก 40 นาที เยื่อที่ผ่านการฟอกในขั้นตอน D0 จะมีค่าความขาวสว่างประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำเยื่อไปฟอกต่อที่ขั้นตอน EP ในขั้นตอนนี้จะเป็นการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาวะต่าง โดยสารเคมีที่ใช้ในการปรับค่าพีเอชคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งค่าพีเอชที่เหมาะสมในการฟอกในขั้นตอนนี้คือ 10-11 อุณหภูมิที่ใช้คือ 85 องศาเซลเซียสใช้เวลาในการฟอก 90 นาที เยื่อที่ผ่านขั้นตอน EP จะมีค่าความขาวสว่างประมาณ 83 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นจะนำเยื่อเข้าสู่ขั้นตอน D1 คือการฟอกด้วยคลอรีนไดออกไซด์ครั้งที่สอง แต่ในครั้งนี้จะฟอกที่พีเอชสูงกว่าคือ 5 ใช้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส และเวลา 150 นาที เมื่อเยื่อผ่านขั้นตอนการฟอกทั้งสามขั้นตอนแล้วจะได้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ พร้อมทั้งจะส่งต่อไปผลิตกระดาษหรือผลิตเป็นเยื่อแผ่นแห้งเพื่อขายให้ลูกค้าต่อไป

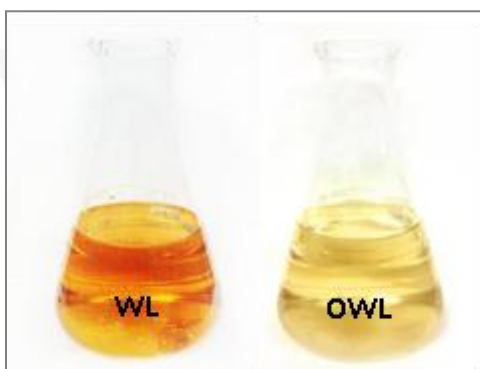
ในน้ำยาต้มเยื่อ (White liquor) ประกอบไปด้วยสารเคมีที่สำคัญสองชนิดคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide) โดยจะมีสารเคมีอื่นๆและโลหะหนักเป็นสิ่งเจือปนเล็กน้อย การนำน้ำยาต้มเยื่อมาผ่านการออกซิไดส์ จะได้เป็นน้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์ (Oxidized white liquor, OWL) ซึ่งโซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide) จะถูกเปลี่ยนเป็นโซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate) ทำให้องค์ประกอบหลักที่เหลืออยู่ใน OWL คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) และโซเดียมซัลเฟต ซึ่งจะถูกนำไปใช้งานที่หน่วยงานสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (Brown stock stage) และยังสามารถนำไปใช้ในหน่วยงานฟอกเยื่อ (Bleaching) ขั้นตอน EP แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) ซึ่งเป็นสารเคมีที่ต้องสั่งซื้อมาใช้ได้อีกด้วย โซเดียมซัลไฟด์ในน้ำยาต้มเยื่อสามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนซึ่งใช้ในการสกัดลิกนินที่หน่วยงาน Brown stock ได้ รวมถึงยังสามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารที่ใช้ฟอกเยื่อที่ขั้นตอน EP ได้ ซึ่งหากนำไปใช้โดยไม่ผ่านการออกซิไดส์จะทำให้สิ้นเปลืองไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต้องใช้เป็นจำนวนมาก

การนำน้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์แล้ว หรือ OWL มาใช้แทนสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยเปอร์ออกไซด์ในสภาวะต่างนั้นจะสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อสารละลาย 50% โซเดียมไฮดรอกไซด์ได้เดือนละประมาณ 480 ตันหรือคิดเป็นมูลค่าประมาณ 3,552,000 บาท (คิดที่กำลัการผลิต 800 ตัน/วัน ในกรณีใช้ OWL แทน 100 %) แต่เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีของ OWL ประกอบไปด้วยสารเคมีหลายชนิดได้แก่โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) โซเดียมซัลเฟต (Sodium sulfate) โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate) โซเดียมซัลไฟด์ (Sodium sulfide) และโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate)

รวมถึงโลหะหนักต่างๆ เช่น เหล็ก (Fe) และแมงกานีส (Mn) สิ่งเจือปนเหล่านี้จะทำให้ความสามารถในการฟอกเยื่อลดลง ซึ่งความสามารถในการฟอกเยื่อนั้นจะเน้นที่ค่าความขาวสว่าง (Brightness) ของเยื่อเป็นหลัก แต่ยังมีพารามิเตอร์อื่นที่ต้องคำนึงถึงได้แก่ ค่าความหนืด (Viscosity number) ที่บอกถึงความแข็งแรงของเยื่อ ค่าแคปป่า (Kappa no.) ที่บอกถึงความสามารถในการกำจัดลิกนินที่ทำให้เยื่อมีสีดำ รวมถึงค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirts) ในการใช้ OWL นี้ อาจทำให้เกิดการสะสมของตระกรัน (Scale) ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนในเยื่อได้ ดังนั้นในการปรับใช้ OWL จึงต้องมีการควบคุมให้พารามิเตอร์เหล่านี้อยู่ในค่าที่ต้องการ รวมถึงผลกระทบที่อาจเกิดกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่ง OWL อาจทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ ทำให้ต้องใช้สารในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวเป็นไปตามต้องการ



รูปที่ 1.5 เยื่อแผ่นแห้ง



รูปที่ 1.6 น้ำยาต้มเยื่อและน้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) หาสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการใช้ OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ขั้นตอน EP เพื่อคงไว้ซึ่งคุณภาพของเยื่อ และไม่ทำให้เกิดตระกรัน (Scale) ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ
- 2) หาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อที่ขั้นตอน EP โดยศึกษาเรื่องปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ เพื่อคงไว้ซึ่งคุณภาพของเยื่อ และไม่ทำให้เกิดตระกรัน (Scale) ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

- 1) งานวิจัยนี้ศึกษาในโรงงานผลิตเยื่อแบบ Kraft process และใช้วิธีการฟอกเยื่อแบบ Elementary chlorine free
- 2) ศึกษาในกระบวนการฟอกเยื่อขั้นตอนการฟอกด้วยเปอร์ออกไซด์ (EP Stage)
- 3) ค่าพารามิเตอร์ที่แสดงถึงคุณภาพของเยื่อที่ศึกษาได้แก่ค่าความขาวสว่าง ค่าความหนืด ค่าแคปป่า และค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ

1.4 ผลที่ได้รับ

- 1) ได้สัดส่วนที่เหมาะสมของการใช้สารเคมีระหว่าง OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ประหยัดต้นทุนการซื้อโซเดียมไฮดรอกไซด์และได้คุณภาพเยื่อตามต้องการ
- 2) ได้สภาวะที่เหมาะสมของการฟอกเยื่อในขั้นตอน EP ซึ่งได้แก่ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้เพื่อให้ได้คุณภาพเยื่อตามต้องการ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถนำ OWL มาใช้ได้ ทำให้ลดต้นทุนการซื้อสารเคมีโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่จะนำมาใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อขั้นตอน EP

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) การศึกษาข้อมูล

- ก. ศึกษากระบวนการฟอกเยื่อในขั้นตอน EP โดยศึกษาเรื่องสารเคมีและปริมาณสารเคมีที่ใช้ น้ำที่ใช้ในระบบ รวมถึงวิธีการผลิต

- ข. ศึกษาวิธีการในการทดสอบ โดยศึกษาจากงานวิจัยที่มีรายงานไว้ และศึกษาจาก Work instruction ในโรงงานที่ศึกษา เพื่อนำมาออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการ
- ค. ศึกษาวิธีการทางสถิติที่ใช้เพื่อนำมาออกแบบการทดลอง ในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนสุดท้าย

2) การออกแบบการทดลอง

ทำการออกแบบการทดลองโดยการกำหนดปัจจัยและตัวแปรตอบสนองที่เหมาะสม รวมถึงการเลือกรูปแบบการทดลองที่จะใช้

3) ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเคมี

4) วิเคราะห์ผลการทดลอง

วิเคราะห์ผลจากการทดลองโดยหาระดับที่เหมาะสมสำหรับการกำหนดปัจจัยทั้ง 4 โดยพิจารณาเลือกปัจจัยที่ทำให้ได้เยื่อที่มีคุณภาพตามค่ากำหนดซึ่งแสดงในตารางที่ 1.1 ตารางที่ 1.1 ค่า Specification ของเยื่อในขั้นตอน EP

พารามิเตอร์	Specification
ความขาวสว่าง(%)	81-85
ความหนืด (ml/g)	มากที่สุด
Kappa no.	1.5-3.0
สิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (mm^2/kg)	น้อยกว่า 5

5) ทำการทดลองในกระบวนการผลิตจริง

ทำการทดลองในกระบวนการผลิตจริงเป็นเวลาอย่างน้อย 15 วัน โดยการทดลองใช้สภาวะการฟอกเยื่อและปริมาณ OWL ในสัดส่วนที่เหมาะสมที่ได้จากข้อ 4 ศึกษาถึงคุณภาพของเยื่อ ได้แก่ ความขาวสว่าง ความหนืด ค่าแคปป่า รวมถึงการเกิดตะกรัน (Scale) ซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนในเยื่อโดยทำการวัดคุณภาพทั้ง 4 พารามิเตอร์ของเยื่อที่ผลิตได้ทุกวันเป็นเวลาอย่างน้อย 15 วันโดยเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์วันละ 4 รอบ วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผล

6) สรุปผลการทดลอง

ทำการสรุปผลว่าสามารถใช้ OWL แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่กระบวนการพอกเยื่อ ขั้นตอนการพอกด้วยเปอร์ออกไซด์ได้หรือไม่ ถ้าได้ สัดส่วนที่เหมาะสมของ OWL ที่จะใช้ ที่ทำให้ได้คุณภาพเยื่อที่ต้องการเป็นเท่าใด และสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการพอกเพื่อให้ประหยัดต้นทุนมากที่สุด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 2

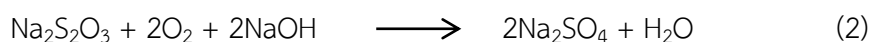
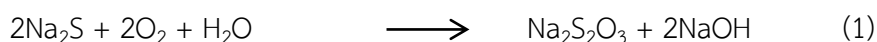
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อกระดาษ ต้องอาศัยกระบวนการหลายขั้นตอนในการผลิต ตั้งแต่รับไม้ท่อนมาสับ ไปจนถึงการฟอกเยื่อให้ได้คุณภาพที่ต้องการ รวมถึงต้องใช้สารเคมีหลายชนิดในการผลิตอีกด้วย ได้มีหลายงานวิจัยที่ศึกษาถึงการหาสารเคมีทดแทนซึ่งสามารถผลิตเองได้มาใช้ทดแทนสารเคมีที่ต้องสั่งซื้อ เพื่อเป็นการลดต้นทุนการซื้อสารเคมีมาใช้ในการผลิต โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาการใช้สารเคมีที่ผลิตเองได้ในกระบวนการคือ Oxidized White Liquor (OWL) ทดแทนการใช้สารเคมีที่ต้องสั่งซื้อและมีราคาแพงกว่าคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในโรงงานผลิตเยื่อ

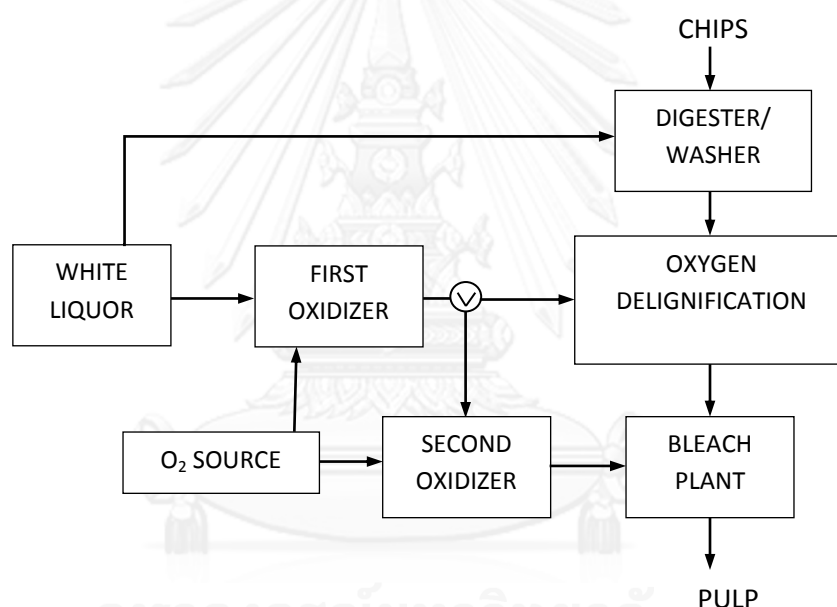
สารเคมีตั้งต้นในการผลิต OWL คือ น้ำยาต้มเยื่อขาว (White liquor, WL) ซึ่งมีส่วนประกอบของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) เป็นหลัก ได้มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงการนำ WL ไปใช้ทดแทน NaOH ที่ขั้นตอนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน โดยในงานวิจัยของ (Colodette et al., 1990) ได้กล่าวไว้ว่า WL สามารถนำไปใช้ทดแทน NaOH ซึ่งใช้ในขั้นตอนการสกัดลิกนิน ด้วยออกซิเจน (Brown stock) ได้โดยไม่มีผลกระทบใดๆ ต่ออัตราการกำจัดลิกนิน และคุณภาพของเยื่อ ซึ่งขัดแย้งกับการวิจัยของ (Leader et al., 1986) และสิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาของ (Hultman and Noreus, 1977) ซึ่งได้กล่าวไว้ว่าโซเดียมซัลไฟด์ใน WL สามารถทำลายเส้นใยของคาร์โบไฮเดรตของเยื่อได้ และอีกปัญหาหนึ่งคือจะทำให้เกิดแก๊สพิษไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) เมื่อ pH ของสารละลายลดลงต่ำกว่า 10 อีกทั้งการนำ WL ไปใช้โดยไม่ผ่านการออกซิไดส์ก่อนจะทำให้ต้องสิ้นเปลืองออกซิเจนในขั้นตอนการสกัดลิกนิน (Brown stock) อีกด้วย เนื่องจาก Na₂S ใน WL สามารถทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้ ทำให้ในปัจจุบันนี้โรงงานผลิตเยื่อส่วนใหญ่ใช้ OWL ในขั้นตอนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน โดยในงานวิจัยของ (Fiskari, 2000) กล่าวว่าโรงงานผลิตเยื่อส่วนใหญ่ในปัจจุบันใช้ OWL ในขั้นตอนการสกัดลิกนินเพื่อการรักษาสมดุลของสารเคมีในโรงงาน และจากการใช้ OWL ให้ผลดีในการกำจัดลิกนินกว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และ WL อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลที่ได้คือ เยื่อที่ผ่านกระบวนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนโดยใช้ OWL จะให้ค่าความขาวสว่างที่มากกว่า

ในการผลิต OWL จาก WL นั้นจะนำ WL ทำปฏิกิริยากับอากาศ หรือออกซิเจนบริสุทธิ์ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ (Ayala et al., 1990)



เมื่อ WL ถูกออกซิไดส์ตามปฏิกิริยาที่ 1 โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ในสารละลายจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจน ได้ผลิตภัณฑ์คือ โซเดียมไฮโอซัลเฟต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) กับโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เรียกว่า partially oxidized white liquor (OWL(T)) เพราะสารประกอบของซัลเฟอร์ไม่ได้ถูกออกซิไดส์จนได้โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) อย่างสมบูรณ์ทั้งหมด แต่ถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นสมบูรณ์ตามสมการที่ 2 ซึ่ง $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ที่ถูกออกซิไดส์ในปฏิกิริยาที่ 1 ได้ทำปฏิกิริยาต่อกับออกซิเจน จนได้ผลิตภัณฑ์คือ Na_2SO_4 ซึ่งในขั้นตอนนี้จะไม่มี Na_2S และ $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ เหลืออยู่เลยเรียก OWL นี้ว่า fully oxidized white liquor (OWL(S))

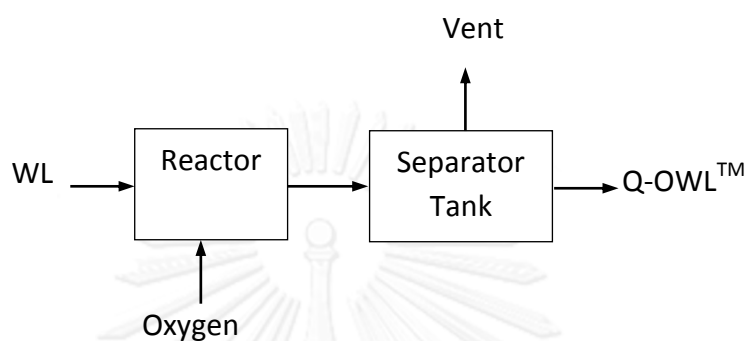
วิธีการในการออกซิไดส์ WL เพื่อให้ได้ OWL นั้นมีหลายวิธีด้วยกันดังจะให้เห็นในสิทธิบัตรสหรัฐอเมริกาของ (Nykanen et al., 1994) ได้เสนอวิธีในการออกซิไดส์ WL ดังนี้



รูปที่ 2.1 การผลิตและการนำ OWL ไปใช้งาน

จากรูปที่ 2.1 White Liquor จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนครั้งที่ 1 (First oxidizer) เพื่อออกซิไดส์สารประกอบของซัลเฟอร์ทุกรูปแบบให้อยู่ในรูปซัลเฟต (SO_4^{2-}) แต่ปฏิกิริยาการออกซิไดส์นี้อาจไม่สมบูรณ์ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีสารที่เรียกว่าไฮโอซัลเฟต ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$) เกิดขึ้น ซึ่ง OWL ที่ออกซิไดส์ไม่สมบูรณ์สามารถนำไปใช้ที่ขั้นตอนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (Oxygen delignification) ได้ แต่ถ้าหากต้องการนำไปใช้ที่กระบวนการฟอกเยื่อจะต้องทำการออกซิไดส์ต่อในขั้นตอนที่ 2 (Second oxidizer) เพื่อให้ไฮโอซัลเฟตที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปเป็นซัลเฟตทั้งหมด ยังมีวิธีการผลิต OWL ด้วยวิธี Quantum's pilot plant system ซึ่งมีรายงานไว้ในงานวิจัยของ (Hurst, 2000) โดย WL จะทำ

ปฏิกิริยากับออกซิเจนใน Reactor ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีมากโดยจะทำให้ไม่มี Na_2S เหลืออยู่เลย และมากกว่า 90 % ของสารประกอบซัลเฟอร์ทั้งหมดจะถูกเปลี่ยนไปเป็น Na_2SO_4 จากนั้นจะถูกส่งไป Separator tank และแยก Q-OWL ไปเก็บไว้ใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.2 การผลิต OWL ด้วยวิธี Quantum's pilot plant system

นอกจากนี้ยังได้มีงานวิจัยของ (Jemma et al., 2003) เสนอวิธีการกำจัดไฮโอซัลเฟตของ partially oxidized white liquor (OWL(T)) เพื่อให้ได้ fully oxidized white liquor (OWL(S)) โดยใช้หลักการของการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange technology) ที่เรียกว่าระบบการกำจัดโซเดียมไฮโอซัลเฟต (The Sodium Thiosulphate Removal (STR) system) ซึ่งผลคือได้ OWL ที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนที่มาก โดยมีสารประกอบของซัลเฟอร์ในปริมาณที่น้อย ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อ

ปัญหาจากการใช้ OWL ในกระบวนการฟอกเยื่อเกิดจากสารสองตัวที่เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ และโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่หลงเหลือจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งการใช้ OWL ในกระบวนการฟอกเยื่อนั้นไม่ใช่วิธีมาตรฐานที่โรงงานผลิตเยื่อส่วนใหญ่ใช้ เพราะสารทั้งสองสามารถทำปฏิกิริยากับสารฟอกเยื่อ ทำให้ประสิทธิภาพในการฟอกเยื่อลดลง และทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีในการฟอกเยื่ออีกด้วย (Fiskari, 2000) ได้มีงานวิจัยของ (Hurst, 2000) ที่ศึกษาการนำ OWL จากการผลิตด้วยวิธี Quantum's pilot plant system ไปใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อขั้นตอนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งการผลิต OWL ด้วยวิธีนี้จะได้ OWL ที่สารประกอบของซัลเฟอร์เปลี่ยนไปเป็นซัลเฟตมากกว่า 90% และไม่มีโซเดียมซัลไฟด์หลงเหลืออยู่เลย จากการศึกษาพบว่า OWL สามารถใช้ทดแทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้โดยที่ไม่ทำให้คุณภาพของเยื่อแยลง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ (Parpala et al., 2001) ที่ศึกษาการนำ OWL ซึ่งผลิตโดยการออกซิไดส์ด้วยออกซิเจน (OWL(O)) และเปอร์ออกไซด์ (OWL(P)) ซึ่งการผลิตด้วยวิธีนี้จะได้ OWL ที่ไม่มีโซเดียมซัลไฟด์หลงเหลืออยู่เลย แต่ยังคงมีโซเดียมไฮโอซัลเฟตอยู่ และเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อ ผลที่ได้คือสำหรับ OWL(O)

ให้ผลเรื่องความขาวสว่าง ค่าแคปป์า และความหนืดของเยื่อ ไม่แตกต่างจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์อย่างมีนัยสำคัญ และสำหรับการใช้ OWL(P) พบว่าให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อสูงกว่าเล็กน้อย แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์หรือ OWL ประเภทอื่นๆ

มีหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาถึงสภาวะในการฟอกเยื่อในขั้นตอนการฟอกด้วยเปอร์ออกไซด์ โดยในงานวิจัยของ (Suess et al., 2000a) ได้กล่าวถึงวิธีในการฟอกเยื่อเพื่อให้ได้ค่าความขาวสว่างที่สูง ซึ่งผู้วิจัยได้กล่าวไว้ว่า ในการฟอกเยื่อในสภาวะที่เป็นด่างด้วยเปอร์ออกไซด์นั้น ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างมาก กล่าวคือหากใช้ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นค่าความขาวสว่างก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในการฟอกควรใช้เวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสมไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป การใช้ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์มากเกินไปจนความจำเป็นจะทำให้เยื่อถูกทำลายมากขึ้นทำให้ค่าความหนืดของเยื่อลดลง รวมถึงปริมาณผลผลิตที่ได้จะต่ำลงด้วย เช่นเดียวกับการใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป ก็จะเป็นการทำลายเยื่อ เช่นเดียวกับอีกงานวิจัยของ (Suess et al., 2000b) กล่าวไว้ว่าในการฟอกเยื่อในขั้นตอนการฟอกด้วยเปอร์ออกไซด์ในสภาวะต่างไม่ควรใช้อุณหภูมิที่สูงกว่า 90 องศาเซลเซียส เพราะอุณหภูมิที่สูงกว่า 90 องศาเซลเซียสไม่มีผลทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มขึ้น หรือค่าแคปป์าลดลง แต่จะทำให้ค่าความหนืดของเยื่อลดต่ำลง ดังนั้นในการฟอกเยื่อที่ขั้นตอนเปอร์ออกไซด์จึงควรใช้อุณหภูมิและเวลาในการฟอกที่เหมาะสม ไม่ควรใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงเกินไป และถ้าหากต้องการค่าความขาวสว่างเพิ่มมากขึ้นการเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นวิธีที่ดีที่สุด

ในงานวิจัยนี้จะใช้ OWL ซึ่งมีกระบวนการผลิตแบบทั่วไปคือ White Liquor จะถูกป้อนเข้าในถังชั้นในหรือชั้นปฐมภูมิ อากาศสำหรับการออกซิเดชันจะถูกป้อนเข้าทางตอนล่างของถัง Reactor ชั้นในและชั้นนอก โดย Air blower แบบ Rotary อากาศจะถูกกระจายไปยังพื้นที่ด้านล่างทั้งหมดผ่านทางรูขนาดเล็ก ซึ่งฟองอากาศขนาดเล็กจะพุ่งออกจากระบบการกระจายผ่าน WL โดยออกซิเจนจะทำปฏิกิริยากับซัลไฟด์ไอออน เกิดเป็นซัลเฟตไอออน ปฏิกิริยาต้องการเวลาประมาณ 10 - 15 ชม. เพื่อให้สมบูรณ์เท่าที่จะทำได้ ปริมาตรในเครื่องทำปฏิกิริยา จะขึ้นอยู่กับเวลาและจะแปรไปตามคุณสมบัติของ WL ซึ่งจากกระบวนการนี้จะได้ OWL ซึ่งยังคงมีส่วนประกอบของโซเดียมซัลไฟด์อยู่แต่ปริมาณจะไม่เกิน 1.5 g/l หากรักษาสภาวะการออกซิเดชันได้ดี ในงานวิจัยนี้จะนำ OWL ที่ผลิตด้วยวิธีข้างต้นมาทดลองใช้ในกระบวนการฟอกเยื่อในขั้นตอนการฟอกด้วยเปอร์ออกไซด์ ก่อนทำการทดลองจะมีการวิเคราะห์หาปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ใน OWL ก่อน จากนั้นจะทำการคำนวณปริมาณของ OWL ต่อปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ต้องใช้ในสัดส่วนต่างๆ โดยในการคำนวณสัดส่วนนั้นจะคำนวณเทียบจากปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นองค์ประกอบใน OWL

2.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

(Montgomery, 2013), (ปารเมศ ชุตินา, 2545)

2.2.1 หลักการพื้นฐาน

การออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Design of Experiment) เป็นวิธีการที่ทำให้การทดลองมีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ผลได้สูงสุด ซึ่งเป็นกระบวนการในการวางแผนการทดลองเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เหมาะสมที่สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ทำให้สามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผลได้

หลักการพื้นฐาน 3 ประการสำหรับการออกแบบการทดลองคือ

- 1) เรพลีเคชัน (Replication) หรือการทดลองซ้ำ ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการคือ ประการแรกเรพลีเคชันทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ ประการที่สองถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยในการทดลอง เรพลีเคชันจะทำให้ผู้ทดลองสามารถหาตัวประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น
- 2) แรนดอมไมเซชัน (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีทั้งวัสดุที่ใช้ในการทดลองและลำดับของการทดลองในแต่ละครั้งเป็นแบบสุ่ม ซึ่งวิธีการทางสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดของข้อมูล จะต้องเป็นตัวแปรแบบสุ่มที่มีการกระจายแบบอิสระ ซึ่งแรนดอมไมเซชันนี้จะทำให้สมมติฐานนี้เป็นจริง การที่เราทำแรนดอมไมเซชันนี้จะทำให้สามารถลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจจะปรากฏในการทดลองได้
- 3) บล็อกกิง (Blocking) เป็นวิธีที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรงให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งจะหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ การเปรียบเทียบเงื่อนไขที่น่าสนใจต่างๆ ภายในแต่ละบล็อกจะเกิดขึ้นได้จากการทำบล็อกกิง

2.2.2 แนวทางในการออกแบบการทดลอง

แนวทางในการออกแบบการทดลองอาจจะทำได้ดังต่อไปนี้

- 1) ทำความเข้าใจถึงปัญหาที่เกิดขึ้นอย่างละเอียด
ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ยาก โดยจะต้องพยายามพัฒนาแนวความคิดเกี่ยวกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง และบ่อยครั้งที่จะต้องหาข้อมูลต่างๆ จากบุคคลหรือหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในเรื่องนั้นๆ โดยตรง รวมถึงต้องมีความชัดเจนถึงต้นเหตุและคำตอบสุดท้ายของปัญหานั้นๆ ซึ่งในการออกแบบการทดลองทุกครั้งควรมีการทำให้เป็นทีม

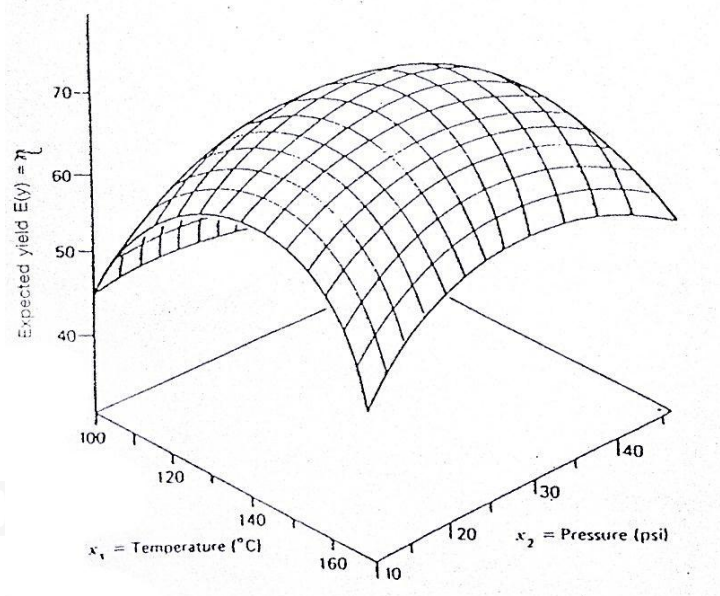
- 2) เลือกปัจจัย ระดับของปัจจัย และขอบเขตของการทดลอง
 ผู้ทดลองต้องเลือกปัจจัยที่จะใช้ในการทำการทดลอง กำหนดขอบเขตของปัจจัยเหล่านี้ให้ชัดเจน และกำหนดระดับ (Level) ที่จะเกิดขึ้นในการทดลอง รวมถึงกำหนดผลตอบ และวิธีการวัดผลตอบจากปัจจัยเหล่านี้ ผู้ทดลองต้องมีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการอย่างมาก ซึ่งอาจได้จากประสบการณ์และความรู้ทางทฤษฎี จากนั้นต้องตรวจสอบข้อมูลดูว่า ปัจจัยที่กำหนดขึ้นมาทั้งหมดมีความสำคัญหรือไม่ ถ้าวัตถุประสงค์ของการทดลองคือการกรองปัจจัย (Screening) ควรจะกำหนดให้ระดับต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองมีจำนวนน้อยๆ เลือกขอบเขตของการทดลองให้มีความกว้างมากๆ และเมื่อเราทราบแล้วว่าตัวแปรใดมีความสำคัญและระดับใดที่ทำให้เกิดผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เราอาจจะลดขอบเขตให้แคบลงได้
- 3) เลือกตัวแปรผลตอบ ในการเลือกตัวแปรผลตอบ ผู้ทดลองควรแน่ใจว่า ตัวแปรจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่กำลังศึกษาอยู่ มีความจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำหนดให้ได้ว่า อะไรคือตัวแปรผลตอบ และจะวัดตัวแปรเหล่านี้ได้อย่างไร ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลองจริง
- 4) เลือกการออกแบบการทดลอง
 การเลือกแบบการทดลองต้องพิจารณาขนาดของตัวอย่าง (จำนวนเรปลิเคต) การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูล โดยต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองอยู่ตลอดเวลา
- 5) ทำการทดลอง
 เมื่อทำการทดลองเราจะต้องติดตามดูกระบวนการทำงานอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกิดขึ้นจะทำให้ทราบว่าผลการทดลองนั้นใช้ได้หรือไม่ได้ ดังนั้นการวางแผนในตอนแรกจะมีความสำคัญอย่างมากต่อความสำเร็จที่จะเกิดขึ้น
- 6) วิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ
 เมื่อทำการทดลองเสร็จแล้ว ผลจากการทดลองควรจะนำมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ เพื่อว่าผลลัพธ์และข้อสรุปที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ถ้าการทดลองได้ถูกออกแบบไว้อย่างเหมาะสม รวมถึงได้ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ จะทำให้มีเครื่องมือช่วยที่มีประสิทธิภาพในการตัดสินใจ และถ้านำวิธีทางสถิติมาผนวกกับความรู้ทางวิศวกรรม และสามัญสำนึก จะทำให้สามารถสรุปผลได้อย่างน่าเชื่อถือ
- 7) ข้อสรุปและข้อเสนอแนะ
 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลเรียบร้อยแล้ว ผู้ทดลองจะต้องหาข้อสรุปในทางปฏิบัติและแนะนำแนวทางของกิจกรรมที่เกิดขึ้น ซึ่งอาจนำเอาวิธีการทางกราฟเข้ามาช่วย โดยเฉพาะอย่าง

ยิ่งเมื่อเราต้องการนำเสนอผลงานนี้ให้ผู้อื่นฟัง นอกจากนี้แล้วควรทำการทดลองเพื่อยืนยันผล เพื่อที่จะตรวจสอบความถูกต้องของข้อสรุปที่เกิดขึ้นด้วย

2.3 การออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Methodology, RSM)

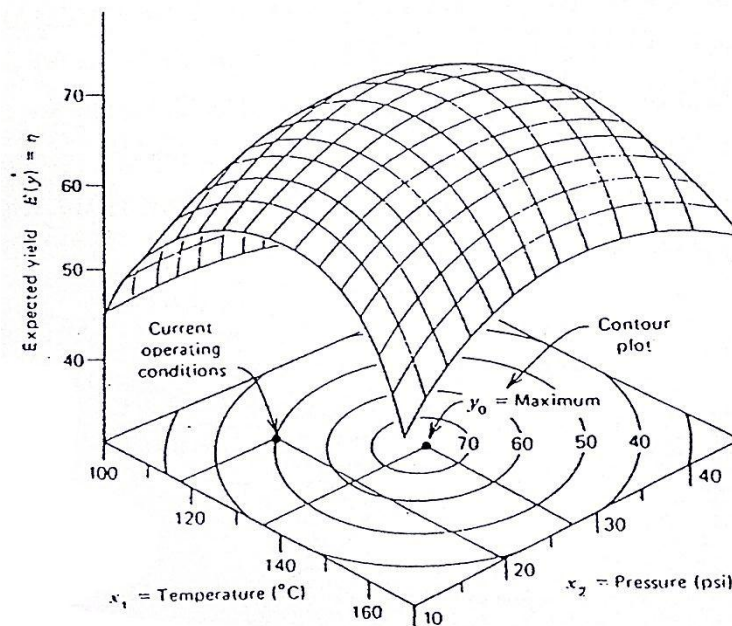
วิธีการพื้นผิวผลตอบเป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลองและการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบที่เราสนใจขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร และเรามีวัตถุประสงค์ที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลตอบนี้

โดยมากแล้วจะแสดงพื้นผิวตอบในรูปของกราฟิก ดังตัวอย่างรูปที่ 2.3 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ X_1 และ X_2 เพื่อให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบได้ดียิ่งขึ้น โดยมากแล้วจะพล็อตเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวผลตอบดังแสดงในรูปที่ 2.4 ในการสร้างเส้นโครงร่างเช่นนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ X_1 และ X_2 เส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบที่เท่ากันค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.3 พื้นผิวตอบแบบสามมิติ

ที่มา: ปารเมศ (2545)



รูปที่ 2.4 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบ

ที่มา: ปารเมศ (2545)

ในปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบแทนส่วนมาก เราจะไม่ทราบความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบแทนและตัวแปรอิสระ ดังนั้น ขั้นตอนแรก เราจะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และเซตของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบแทนมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้ก็คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

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

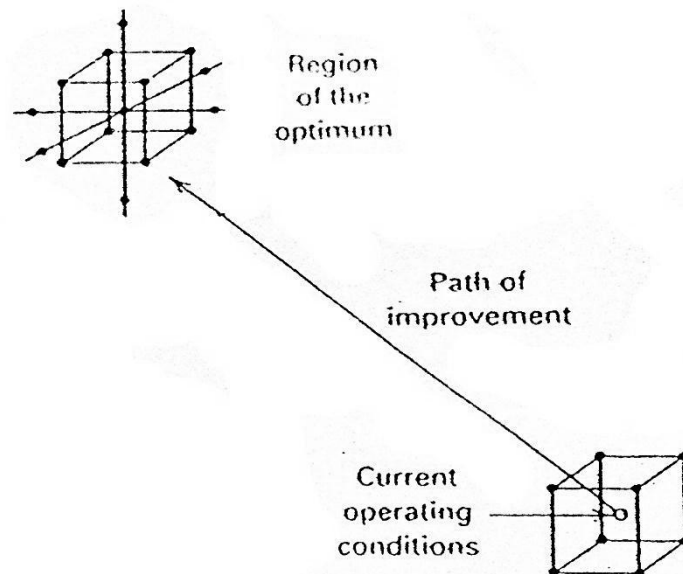
แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ เราจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

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

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวผลตอบแทนส่วนมากจะใช้แบบจำลองหนึ่งในสองแบบที่กล่าวมานี้ ซึ่งแบบจำลองพหุนามที่กล่าวมานี้จะไม่สามารถใช้ประมาณความสัมพันธ์ตลอดพื้นผิวทั้งหมดของตัวแปรอิสระ แต่ถ้าพื้นผิวที่เราสนใจอยู่มีขนาดเล็ก แบบจำลองเหล่านี้จะใช้งานได้ดี

วิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Square Method) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแบบจำลองพหุนาม การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นนี้ ถ้าพื้นผิวที่สร้างขึ้นสามารถใช้ประมาณฟังก์ชันผลตอบได้อย่างดีเพียงพอ ก็จะทำให้การวิเคราะห์พื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมานี้ประมาณค่าได้เหมือนกับการวิเคราะห์ระบบจริง

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่เราอยู่ที่จุดบนพื้นผิวผลตอบที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด วัตถุประสงค์คือการนำการทดลองไปตามแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุดอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะไปถึงจุดที่ดีที่สุดอย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อเราพบอาณาเขตของค่าที่ดีที่สุดแล้ว เราจะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะให้เราสามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากรูปที่ 2.5 เราพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเปรียบเสมือนกับการปีนภูเขา ซึ่งบนยอดจะเป็นจุดที่มีผลตอบสูงที่สุด จุดประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองคือ การหาสภาวะในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจ



รูปที่ 2.5 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

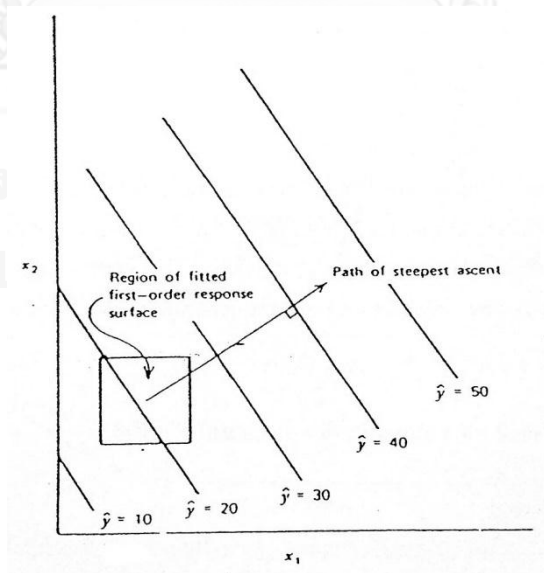
ที่มา: ปารเมศ (2545)

การป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด

หลายครั้งที่การประมาณค่าเงื่อนไขการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบที่กำลังศึกษาอยู่ห่างไกลจากจุดที่ดีที่สุดตัวจริง ในกรณีนี้วัตถุประสงค์ของผู้ทดลองคือ การเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วจากจุดตั้งต้นไปสู่บริเวณที่ใกล้กับจุดที่ดีที่สุด วิธีการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Ascent) เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างเป็นอันดับบนเส้นทางที่มีความชันมากที่สุด กล่าวคือ ในทิศทางที่มีการเพิ่มขึ้นของผลตอบสูงที่สุด หากเราต้องการหาค่าที่ต่ำที่สุดแทน เราจะเรียกวิธีการดังกล่าวว่า วิธีการป็นลงด้วยทางที่ชันที่สุด (Steepest Descent) แบบจำลองกำลังกำลังหนึ่งที่ถูกสร้างขึ้นมาก็คือ

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i$$

และพื้นผิวตอบกำลังหนึ่ง (First-Order Response Surface) จะเป็นเส้นโครงร่างของ \hat{y} ซึ่งจะเป็นอันดับของเส้นขนานดังแสดงในรูปที่ 2.6 ทิศทางของการป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุดคือทิศทางที่ค่า \hat{y} มีค่าเพิ่มขึ้นรวดเร็วที่สุด ทิศทางนี้คือเส้นที่ขนานกับเส้นตั้งฉากกับพื้นผิวที่ถูกสร้างขึ้นมา เราจะใช้เส้นทางเส้นที่ผ่านจุดศูนย์กลางของอาณาเขตที่กำลังสนใจและตั้งฉากกับพื้นผิวที่สร้างขึ้นมานี้เป็นเส้นทางในการป็นขึ้นที่มีความชันสูงสุด ดังนั้นการก้าวอย่าง (Step) บนเส้นทางเดินนี้จะเป็นสัดส่วนกับสัมประสิทธิ์การถดถอย $\{\beta_i\}$ ขนาดที่แท้จริงของก้าวอย่างจะหาได้จากประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการของผู้ทำการทดลองหรือข้อพิจารณาทางปฏิบัติอื่นๆ



รูปที่ 2.6 พื้นผิวตอบกำลังหนึ่งและเส้นทางป็นขึ้นด้วยทางที่ชันที่สุด

ที่มา: ปารเมศ (2545)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การแยกเอาความแปรผันในค่าสังเกตออกจากการวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นความสัมพันธ์ทางพีชคณิตอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม การใช้การแบ่งเพื่อทำการทดสอบอย่างเป็นทางการสำหรับกรณีนี้ไม่มีความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของระดับต้องอิงกับสมมติฐานบางประการ โดยเฉพาะสมมติฐานที่ว่า ค่าสังเกตจะต้องอธิบายได้โดยแบบจำลองดังนี้

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

และความผิดพลาดจะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริง กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มีความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติสมมติฐานที่กล่าวถึงมักจะไม่เป็นเช่นนี้ ซึ่งหากจะเชื่อในผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ ก็ต่อเมื่อเราสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยง่ายจากการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

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

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

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

จากสมการบอกให้เราทราบว่า ค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่ i คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ

การทดสอบส่วนตกค้างควรทำทุกครั้งในการวิเคราะห์ความแปรปรวน หากแบบจำลองถูกต้อง ส่วนตกค้างจะต้องไม่มีรูปแบบที่แน่นอน โดยการศึกษาส่วนตกค้าง เราจะพบความไม่พอเพียงของสมมติฐานที่ใช้ในแบบจำลองได้หลายรูปแบบ ต่อไปจะแสดงการวินิจฉัยแบบง่ายๆ ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์ด้วยกราฟของส่วนตกค้าง และการจัดการกับสิ่งผิดปกติอีกหลายอย่าง

สมมติฐานของความเป็นปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานของความเป็นปกติสามารถทำได้โดยการพล็อตฮิสโทแกรมของส่วนตกค้าง หากสมมติฐานที่ว่า ความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบ NID ($0, \sigma^2$) เป็นจริงแล้ว รูปแบบของส่วนตกค้างที่พล็อตออกมาควรมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ได้จากการแจกแจงปกติซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 ขั้นตอนที่สำคัญในการตรวจสอบสมมติฐานคือ การสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าหากการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นปกติ เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง

การพล็อตส่วนตกค้างตามลำดับเวลา

การพล็อตส่วนตกค้างตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล สามารถใช้ตรวจหาความเกี่ยวพันระหว่างส่วนตกค้าง แนวโน้มที่จะพบวาร์ริ่งของส่วนตกค้างที่เป็นบวกและลบบ่งชี้ว่าสมมติฐานของความเป็นอิสระถูกละเมิดแล้ว ซึ่งถือเป็นปัญหาที่สำคัญและยากที่จะทำการแก้ไข ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะป้องกันปัญหา ถ้าเป็นไปได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในขณะเก็บรวบรวมข้อมูล การทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสมถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เป็นอิสระ การตรวจสอบทำได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีรูปแบบที่แน่นอน

การพล็อตส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

ถ้าหากแบบจำลองถูกต้องและสมมติฐานมีความเหมาะสมแล้ว ส่วนตกค้างที่เกิดขึ้นไม่ควรจะมีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่ควรจะมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด รวมถึงค่าของผลตอบที่ถูกทำนายอีกด้วย สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรจะมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด

ประโยชน์ของวิธีพื้นผิวผลตอบมีดังนี้

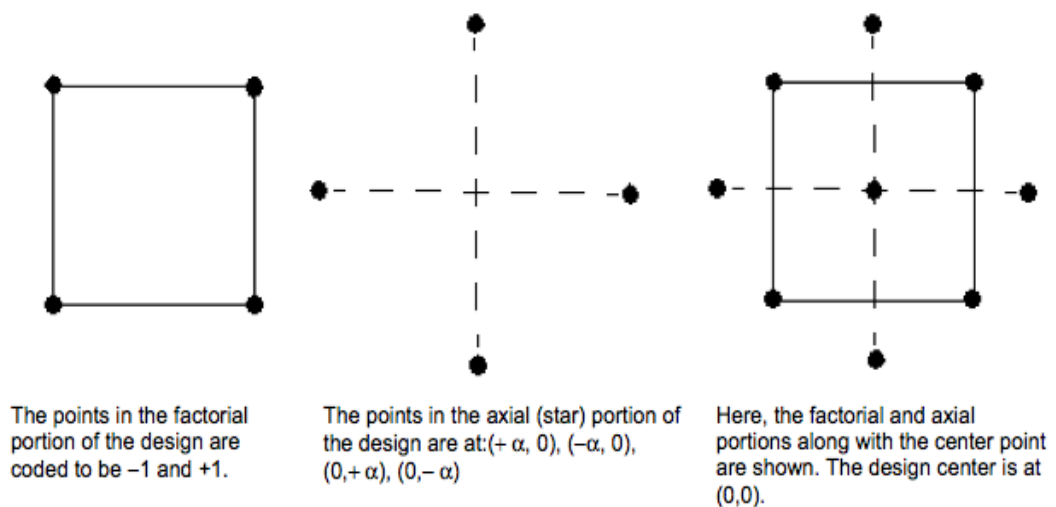
1. หาค่าที่เหมาะสมสำหรับการตั้งค่าปัจจัยเพื่อให้เกิดผลตอบที่ดีที่สุด
2. หาค่าที่เหมาะสมสำหรับการตั้งค่าปัจจัยเพื่อให้ได้ผลตอบตามค่ากำหนด (Specification) ของกระบวนการ
3. เพื่อการพัฒนาวิธีการหรือเงื่อนไขในกระบวนการทำงานเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพที่ดีขึ้นกว่ากระบวนการในปัจจุบัน
4. เพื่อสร้างแบบจำลองแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆกับผลตอบ

การออกแบบส่วนประสมกลาง (Central composite design, CCD)

การออกแบบ CCD นี้ เป็นประเภทหนึ่งของการออกแบบที่นิยมกันมากสำหรับการพิตแบบจำลองอันดับที่สอง โดยทั่วไป CCD จะมีลักษณะดังนี้

1. จำนวนการทดลอง ; $N = 2^k + 2k + C_p$ โดยที่ k คือจำนวนของปัจจัย(factor) C_p คือจำนวนของจุดศูนย์กลาง
2. ค่า α ขึ้นอยู่กับจำนวนของปัจจัย สามารถคำนวณได้จาก $\alpha = (2^k)^{1/4}$ สำหรับสอง สาม และสี่ตัวแปร มีค่าเท่ากับ 1.41, 1.68 และ 2.00 ตามลำดับ
3. ทุกปัจจัยจะมีทั้งหมด 5 ระดับคือ $-\alpha, -1, 0, +1$ และ $+\alpha$

สำหรับการออกแบบที่มีปัจจัย 2 ปัจจัย แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยที่จุดสีดำแสดงจำนวนการทดลอง(run)



รูปที่ 2.7 การออกแบบส่วนประสมกลางสำหรับ $k=2$

ที่มา: Minitab Inc. Manual

ความสามารถในการหมุน

เป็นความสำคัญอย่างหนึ่งของแบบจำลองอันดับที่สอง ที่จะต้องมีความสามารถในการพยากรณ์ได้ตลอดบริเวณที่สนใจอยู่ ความสามารถในการหมุนเป็นพื้นฐานเบื้องต้นสำหรับการเลือกการออกแบบพื้นผิวตอบเพราะว่า วัตถุประสงค์ของการออกแบบพื้นผิวตอบคือ การหาค่าที่ดีที่สุด และเราไม่ถือว่าตำแหน่งใดเป็นตำแหน่งที่ดีที่สุดก่อนที่จะรันการทดลอง ดังนั้นจะมีเหตุผลดีกว่า ที่จะใช้การออกแบบที่ทำให้เกิดตัวประมาณที่มีความเที่ยงตรงเท่ากันในทุกทิศทาง (เราสามารถแสดงได้ว่าการออกแบบเชิงตั้งฉากอันดับที่หนึ่งจะเป็นแบบที่สามารถหมุนได้)

การออกแบบส่วนประสมกลาง สามารถทำให้หมุนได้โดยการเลือกค่าของ α ค่าของ α สำหรับความสามารถหมุนได้จะขึ้นอยู่กับจำนวนของจุดในส่วนของแฟกทอเรียลของการออกแบบความจริงแล้ว $\alpha = (n_f)^{1/4}$ จะทำให้เกิดการออกแบบส่วนประสมกลางที่สามารถหมุนได้ โดยที่ n_f คือจำนวนของจุดที่ถูกใช้ในแฟกทอเรียลของการออกแบบ

CCD รูปทรงกลม

ความสามารถในการหมุนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของรูปทรงกลม (Sphere) นั่นคือ จะเป็นการดีมากถ้าจะใช้เกณฑ์ในการออกแบบเช่นนี้เมื่อบริเวณที่เรากำลังสนใจอยู่มีรูปทรงกลม อย่างไรก็ตามการออกแบบที่ดีที่สุดไม่จำเป็นว่าจะต้องทำให้เกิดความสามารถในการหมุนได้อย่างถูกต้องร้อยเปอร์เซ็นต์ ในความเป็นจริงแล้ว สำหรับบริเวณของทรงกลมที่เรากำลังสนใจนั้น ทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับ α หาได้จากการพยากรณ์ความแปรปรวนสำหรับ CCD ซึ่งกำหนดให้ $\alpha = \sqrt{k}$ การออกแบบเช่นนี้เรียกว่า CCD รูปทรงกลม (Spherical CCD) ซึ่งจะกำหนดให้ทุกจุดที่อยู่ในการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล และการออกแบบในแนวแกนให้อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงกลมซึ่งมีรัศมี \sqrt{k}

จุดศูนย์กลางของการรันใน CCD

การเลือก α ใน CCD จะถูกกำหนดโดยบริเวณที่เราสนใจ เมื่อบริเวณที่เป็นรูปทรงกลม การออกแบบจะต้องรวมเอาจุดศูนย์กลางของการรันเข้าไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้ค่าความแปรปรวนของผลตอบที่พยากรณ์ได้มีเสถียรภาพอย่างเต็มที่ยอมรับได้ จำนวนจุดศูนย์กลางที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่

factors	design	total runs	total blocks	cube blocks	cube runs	total center points	cube center points	axial center points	default alpha	orthogonal blocks	rotatable
2	Full	13	1	---	4	5	---	0	1.414	---	y
2	Full	14	2	1	4	6	3	3	1.414	y	y
3	Full	14	1	---	8	6	---	0	1.682	---	y
3	Full	20	2	1	8	6	4	2	1.633	y	n
3	Full	20	3	2	8	6	4	2	1.633	y	n
4	Full	31	1	---	16	7	---	0	2.000	---	y
4	Full	30	2	1	16	6	4	2	2.000	y	y
4	Full	30	3	2	16	6	4	2	2.000	y	y
5	Full	52	1	---	32	10	---	0	2.378	---	y
5	Full	54	2	1	32	12	8	4	2.366	y	n
5	Full	54	3	2	32	12	8	4	2.366	y	n
5	Half	32	1	---	16	6	---	0	2.000	---	y
5	Half	33	2	1	16	7	6	1	2.000	y	y
6	Full	90	1	---	64	14	---	0	2.828	---	y
6	Full	90	2	1	64	14	8	6	2.828	y	y
6	Full	90	3	2	64	14	8	6	2.828	y	y
6	Full	90	5	4	64	14	8	6	2.828	y	y
6	Half	53	1	---	32	9	---	0	2.378	---	y
6	Half	54	2	1	32	10	8	2	2.366	y	n
6	Half	54	3	2	32	10	8	2	2.366	y	n
7	Full	152	1	---	128	10	---	0	3.364	---	y
7	Full	160	2	1	128	18	8	10	3.364	y	y
7	Full	160	3	2	128	18	8	10	3.364	y	y
7	Full	160	5	4	128	18	8	10	3.364	y	y
7	Half	88	1	---	64	10	---	0	2.828	---	y
7	Half	90	2	1	64	12	8	4	2.828	y	y
7	Half	90	3	2	64	12	8	4	2.828	y	y
7	Half	90	5	4	64	12	8	4	2.828	y	y
8	Half	154	1	---	128	10	---	0	3.364	---	y
8	Half	160	2	1	128	16	8	8	3.364	y	y
8	Half	160	3	2	128	16	8	8	3.364	y	y
8	Half	160	5	4	128	16	8	8	3.364	y	y
8	Quarter	90	1	---	64	10	---	0	2.828	---	y
8	Quarter	90	2	1	64	10	8	2	2.828	y	y
8	Quarter	90	3	2	64	10	8	2	2.828	y	y
8	Quarter	90	5	4	64	10	8	2	2.828	y	y
9	Quarter	156	1	---	128	10	---	0	3.364	---	y
9	Quarter	160	2	1	128	14	8	6	3.364	y	y
9	Quarter	160	3	2	128	14	8	6	3.364	y	y
9	Quarter	160	5	4	128	14	8	6	3.364	y	y

รูปที่ 2.8 แสดงจำนวนการทดลองของ CCD

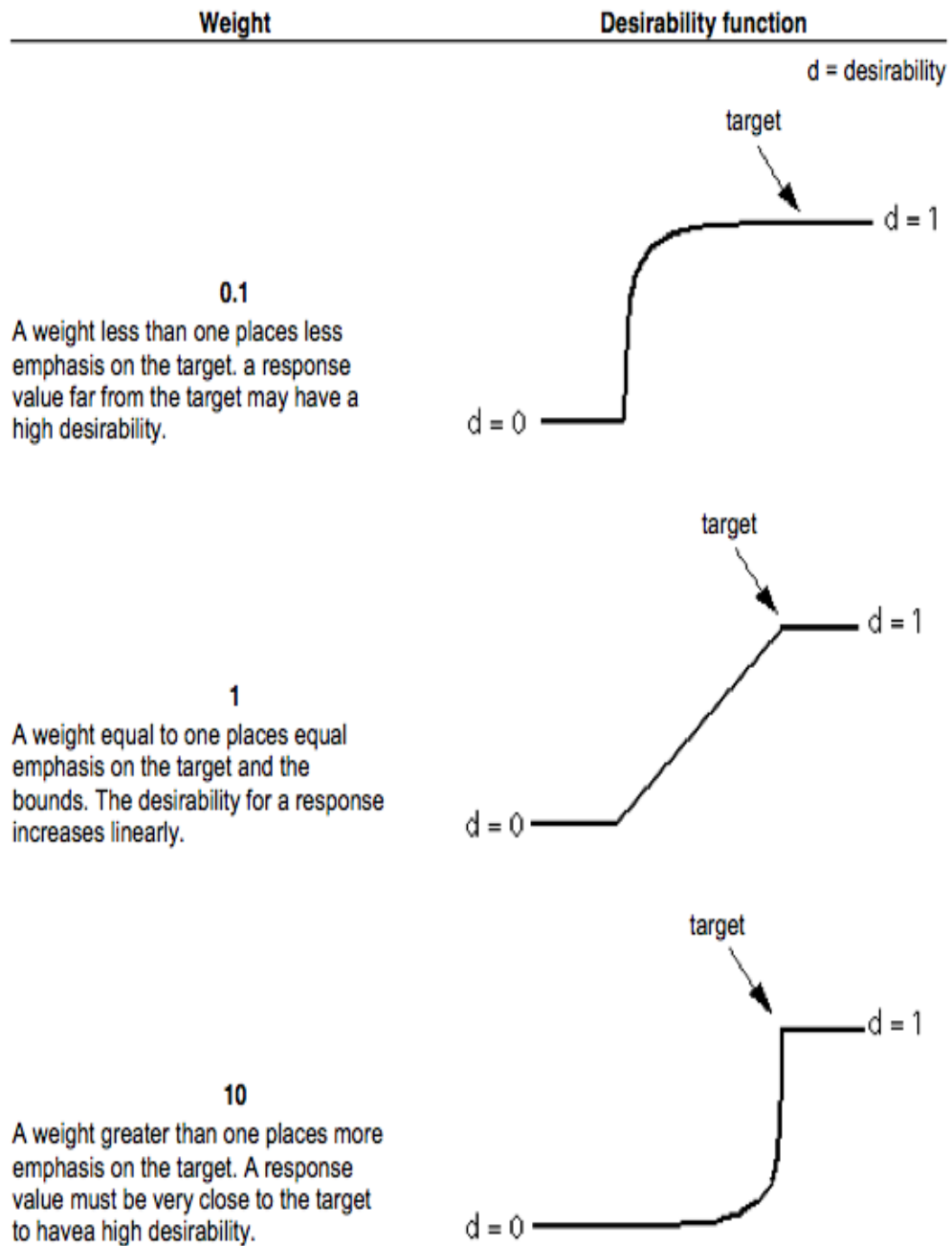
ที่มา: Minitab Inc. Manual

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบที่มีผลตอบหลายตัว (Multiple responses)

ในที่นี้จะกล่าวถึงวิธีการวิเคราะห์โดยใช้คำสั่ง Response Optimizer โดยที่การหาค่าที่เหมาะสม สามารถทำได้โดยการกำหนดน้ำหนัก (weight) ให้แก่ผลตอบแต่ละตัว ซึ่งค่าของผลตอบจะถูกแปลงโดยใช้ Desirability function น้ำหนักที่กำหนดให้แต่ละผลตอบจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของ Desirability function โดยแต่ละผลตอบ เราสามารถกำหนดน้ำหนัก ได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 เพื่อที่จะลดหรือเพิ่มความสำคัญต่อเป้าหมาย

1. การกำหนดน้ำหนักน้อยกว่า 1 (ต่ำสุด 0.1) คือการให้ความสำคัญของเป้าหมาย(target) น้อยกว่าขอบเขต (bounds)
2. การกำหนดน้ำหนักเท่ากับ 1 คือการให้ความสำคัญของเป้าหมายเท่ากับขอบเขต
3. การกำหนดน้ำหนักมากกว่า 1 (สูงสุด 10) คือการให้ความสำคัญของเป้าหมายมากกว่าขอบเขต

รูปที่ 2.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างของ desirability function เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก ซึ่งจะเห็นว่า เมื่อกำหนด น้ำหนักเท่ากับ 0.1 ค่าผลตอบอาจมีระยะห่างจากเป้าหมาย ที่น้ำหนักเท่ากับ 10 ผลตอบจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกับเป้าหมายมาก รูปที่ 2.10 สรุปลักษณะของ desirability function เมื่อผลตอบเป็นค่าต่ำสุด ค่าเป้าหมาย และค่าสูงสุด

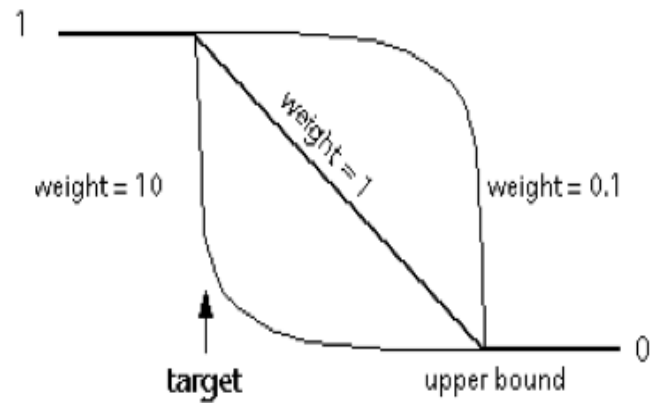


รูปที่ 2.9 รูปร่างของ desirability function ที่น้ำหนักต่างๆ

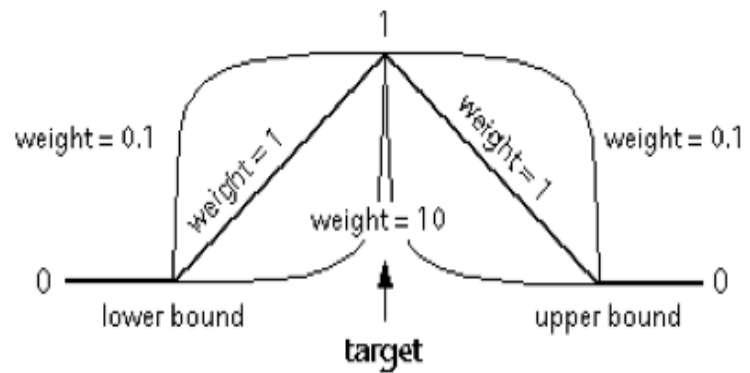
ที่มา: Minitab Inc. Manual

minimize the response

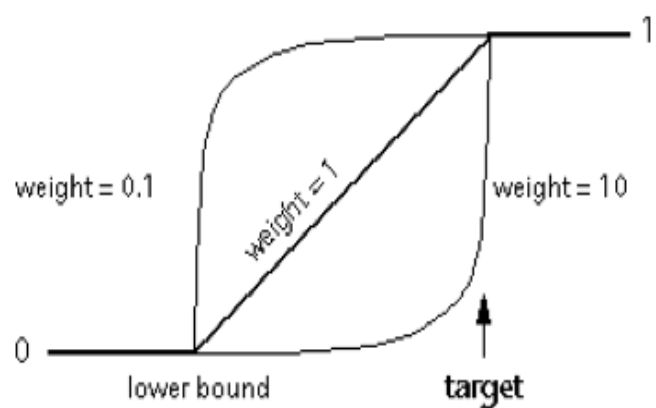
Below the target the response desirability is one; above the upper bound it is zero.

**target the response**

Below the lower bound the response desirability is zero; at the target it is one; above the upper bound it is zero.

**maximize the response**

Below the lower bound the response desirability is zero; above the target it is one.



รูปที่ 2.10 ลักษณะของ desirability function เมื่อผลตอบเป็นค่าต่ำสุด ค่าเป้าหมาย และค่าสูงสุด

ที่มา: Minitab Inc. Manual

การกำหนดความสำคัญ (Importance) สำหรับ Composite desirability

ควรมีการกำหนดระดับความสำคัญของแต่ละผลตอบ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยที่ระดับของแต่ละผลตอบจะต้องกำหนดให้อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ถ้าผลตอบทุกตัวมีความสำคัญเท่ากัน ใช้ค่ากำหนดคือ 1 สำหรับผลตอบแต่ละตัว หากมีผลตอบตัวใดที่มีความสำคัญมากกว่าตัวอื่น เราสามารถกำหนดให้แต่ละตัวมีค่าที่แตกต่างกันได้ โดยค่าที่มากขึ้นหมายถึงมีความสำคัญมาก ค่าที่น้อยลงหมายถึงมีความสำคัญน้อย

2.4 วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณภาพของเยื่อ

1) ความขาวสว่าง (Brightness)

วิธีนี้เป็นวิธีการหาค่าความขาวสว่างของเยื่อ อ้างอิงจาก SCAN C11:75 ซึ่งเป็นวิธีของ Scandinavian pulp, paper and board testing committee ใช้เครื่องมือยี่ห้อ Technidyne รุ่น Color Touch PC มีการสอบเทียบเครื่องมือ (Calibration) ด้วยแผ่นเซรามิกมาตรฐานในตัวเครื่อง ทุกครั้งก่อนการวัด และสอบเทียบด้วยกระดาษมาตรฐานเดือนละ 1 ครั้ง รายงานค่าความขาวสว่างที่วัดได้ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

วิธีการวิเคราะห์หาค่าความขาวสว่างของเยื่อ

- 1) ชั่งตัวอย่างเยื่อให้ได้ 6 กรัมแห้ง
- 2) เติมน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตรจากนั้นทำให้เยื่อกระจายตัวโดยใช้เครื่องปั่น ปั่นประมาณ 1-3 นาที
- 3) ล้างเยื่อด้วยน้ำสะอาดปริมาณ 2 ลิตร
- 4) กรองเยื่อทั้งหมดผ่านชุดกรองสุญญากาศ โดยใช้กระดาษกรองเบอร์ 3 ปิดด้านบนของแผ่นเยื่อด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 และนำแผ่นเยื่อออกไปกดทับที่ความดัน 300 kPa เป็นเวลา 1 นาที
- 5) วัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Technidyne 4 ค่า เฉพาะจากด้านบนของแผ่นเยื่อ โดยค่าที่วัดได้แต่ละครั้งไม่ควรแตกต่างกันมากกว่า 0.1 %
- 6) รายงานผลค่าเฉลี่ยเป็น %



รูปที่ 2.11 Technidyne รุ่น Color Touch PC

ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

2) ค่าแคปป่า (Kappa number)

เป็นวิธีการหาค่าแคปป่า ซึ่งใช้อธิบายถึงอัตราการกำจัดลิกนิน (lignin) ในกระบวนการผลิตเยื่อ อ้างอิงจาก SCAN C1:77 ใช้เครื่องมือ KAPPAMAT ในการวัด

ลิกนิน คือสารประกอบเชิงซ้อนของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ ซับซ้อน โดยโครงสร้างมีหน่วยของ Phenyl-propane (วงอะโรมาติกที่มีสายโซ่ตรงของคาร์บอนสามอะตอม) ประกอบกันเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่ไม่แน่นอน ลิกนินดูดกลืนแสงในช่วงสีน้ำเงิน ดังนั้นเราจึงเห็นสีลิกนินเป็นสีเหลือง

ค่าแคปป่า เป็นค่าที่ไม่มีหน่วย เป็นค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทางเคมี เพื่อคาดการณ์ปริมาณ ลิกนินในเยื่อ ซึ่งเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) กับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (KMnO_4) ที่ใช้ในการวิเคราะห์

วิธีการวิเคราะห์หาค่าแคปป่า

- 1) ชั่งเยื่อตัวอย่างประมาณ 6 กรัมแห้ง เกล่งในตะแกรงแบบละเอียด
- 2) ล้างเยื่อด้วยน้ำ จนกระทั่งน้ำล้างใส
- 3) นำเยื่อที่ได้เติมน้ำ 1000 มิลลิลิตร กวนให้เยื่อกระจายตัวและนำไปขึ้นแผ่นด้วยชุด กรองสุญญากาศ โดยดวงที่ละ 120 มิลลิลิตรสำหรับ 1 แผ่น ทำทั้งหมด 3 แผ่น
- 4) นำแผ่นเยื่อที่ได้ไปอบใน rapid dryer จนกระทั่งเยื่อแห้งสนิท (ประมาณ 7-10 นาที)
- 5) ทำให้เย็นใน desiccator 5 นาที และชั่งน้ำหนักที่แน่นอน
- 6) นำไปทดสอบด้วยเครื่อง Kappamat โดยการใส่เยื่อที่ชั่งน้ำหนักแน่นอนแล้วลงใน โถแก้ว เลือกโปรแกรมการไตเตรทผ่านหน้าจอกอมพิวเตอร์
- 7) เมื่อไตเตรทเสร็จแล้วจะรายงานผลที่หน้าจอกอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.12 เครื่อง KAPPAMAT

ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

3) ตัวเลขความหนืด (Viscosity number) ของเยื่อ

วิธีนี้อธิบายถึงการหาค่าความหนืดของเยื่อในสารละลาย Cupri Ethylenediamine (CED) ซึ่งสามารถนำไปประเมินการถูกทำลายของเซลลูโลสเนื่องจากการต้มหรือพอกเยื่อได้ อ้างอิงจาก SCAN CM 15:88 ใช้เครื่อง VISCOMAT ในการวัด ค่าที่ได้จากเครื่องวัดจะรายงานในหน่วยมิลลิลิตรต่อกรัม Viscosity number $[\eta]$ หาได้จากสมการ

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \left(\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 C} \right)$$

เมื่อ

η คือ ความหนืดของสารละลายตัวอย่าง

η_0 คือ ความหนืดของตัวทำละลาย

C คือ ความเข้มข้นของเยื่อ

วิธีการวิเคราะห์หาค่าความหนืด

- 1) ชั่งตัวอย่างเยื่อให้ได้ประมาณ 5 กรัมแห้ง
- 2) เติมน้ำ 1500 มิลลิลิตรและทำให้เยื่อกระจายตัวด้วยเครื่องปั่น
- 3) ตวงตัวอย่างมา 100 มิลลิลิตร นำมาขึ้นแผ่นโดยการกรองด้วยชุดกรองสุญญากาศ
- 4) อบเยื่อให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- 5) หลังจาก 10 นาที ให้ตัดเยื่อออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ
- 6) อบต่อจนกระทั่งปราศจากความชื้น (ประมาณ 20 นาที) จากนั้นนำมาทิ้งไว้ให้เย็นใน Desiccator
- 7) ชั่งน้ำหนักแน่นอน 0.08 กรัม และใส่ในขวด PE
- 8) เติมน้ำกลั่น 12.5 มิลลิลิตร เติมขึ้นทองแดงประมาณ 10 ชั้น เขย่าเป็นเวลา 5 นาที ด้วยเครื่องเขย่าจนเยื่อกระจายตัวอย่างสมบูรณ์
- 7) เติม 1M CED solution 12.5 มิลลิลิตรแล้วเติมขึ้นทองแดงจนเต็มขวด หลังจากนั้นปิดขวดให้แน่น
- 8) เขย่าด้วยเครื่องเขย่าเป็นเวลา 15 นาที และทำให้เย็นโดยการแช่ใน cooling bath ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
- 9) นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Viscomat ซึ่งต่อกับคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมการวัด อ่านค่าความหนืดจากหน้าจอคอมพิวเตอร์เมื่อวิเคราะห์เสร็จ

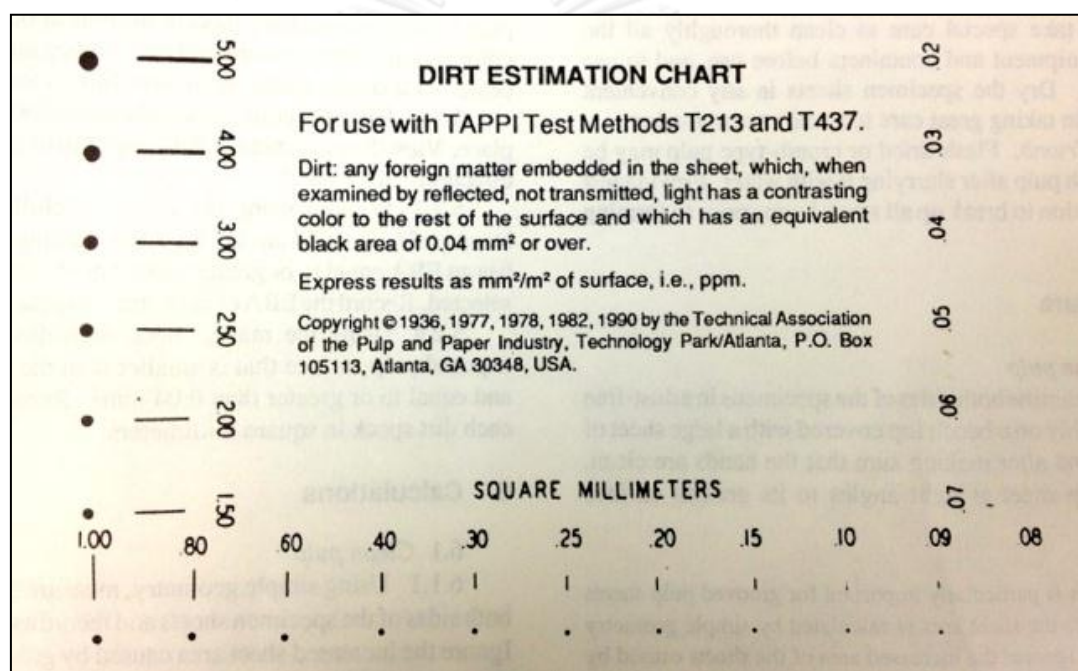


รูปที่ 2.13 เครื่อง VISCOMAT

ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

4) สิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirt)

วิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์หาสิ่งปนเปื้อนที่อยู่ในเยื่อ อ้างอิงจาก Tappi Test Method T213 om-89 โดยในการวิเคราะห์จะนำเยื่อมาผสมน้ำและขึ้นรูปให้เป็นแผ่นที่มีขนาดกว้าง 7 นิ้ว ยาว 7 นิ้ว จำนวน 5 แผ่น โดยใช้เยื่อแผ่นละ 10 กรัมแห้ง จากนั้นจะนำมาวางบนกล่องส่องสว่าง (Lighting box) เพื่อให้เห็นสิ่งปนเปื้อนได้ชัดเจน ใช้แผ่นมาตรฐานเปรียบเทียบขนาดของสิ่งปนเปื้อน ดังแสดงตามรูปที่ 2.14 มาเปรียบเทียบขนาดของสิ่งปนเปื้อนแต่ละจุดที่พบ และคำนวณค่าที่ได้ ผลการจากวิเคราะห์รายงานในหน่วย ตารางมิลลิเมตรต่อกิโลกรัม



รูปที่ 2.14 แผ่นมาตรฐานเปรียบเทียบขนาดสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ

ที่มา: โรงงานกรณีศึกษา

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) มีตัวแปรตอบสนอง ตัวแปรอิสระ และระดับของตัวแปรอิสระ ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และมีแบบการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3.2

ในการกำหนดตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 ตัวได้แก่ Y1 คือค่าความขาวสว่างของเยื่อ (ISO Brightness) Y2 คือค่าความหนืดของเยื่อ (Viscosity number) Y3 คือค่าแคปป่า (Kappa no.) และ Y4 คือค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirt) ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองจะให้น้ำหนักของตัวแปรตอบสนองตัวที่ 1 ค่าความขาวสว่างของเยื่อมากที่สุด เพราะเป็นตัวแปรหลักที่ใช้ในการตัดเกรดเยื่อเพื่อส่งขายให้แก่ลูกค้า โดยตัวแปรตอบสนองตัวอื่นๆ จะพิจารณาไปด้วยกันแต่จะให้น้ำหนักที่น้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากทั้งค่าความหนืดและค่าแคปป่า เป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความขาวสว่าง โดยทั่วไปถ้าเยื่อมีค่าความขาวสว่างสูงจะทำให้มีความหนืดต่ำ และค่าแคปป่าต่ำเช่นกัน ส่วนเรื่องสิ่งปนเปื้อนในเยื่อนั้นหลังจากที่ส่งต่อเยื่อไปฟอกในขั้นตอนสุดท้ายคือ D1 ซึ่งมีสถานะเป็นกรดจะทำให้ตระกรันแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นสิ่งปนเปื้อนในเยื่อที่อาจเกิดขึ้นในขั้นตอน EP ละลายได้ ดังนั้นในการพิจารณาจึงให้น้ำหนักของค่าความขาวสว่างเป็นหลัก โดยปกติแล้วในช่วงความขาวสว่างตามค่ากำหนดที่ 81 -85 เปอร์เซนต์ จะให้เยื่อที่มีค่าแคปป่าอยู่ในช่วง 1.5 – 3.0 และค่าความหนืดโดยทั่วไปมักจะได้สูงกว่า 500 มิลลิลิตรต่อกรัมซึ่งเป็นค่าที่ดีแล้วสภาวะปกติของการฟอกเยื่อในขั้นตอน EP

อุณหภูมิที่ใช้ : 85 องศาเซลเซียส

เวลาที่ใช้ : 90 นาที

สารเคมีที่ใช้ : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 10 g/kg

โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 g/kg

3.1.1 การกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัย

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำ OWL ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ที่ต้องสั่งซื้อมาใช้เพื่อปรับ pH ในขั้นตอนการฟอกเยื่อ EP นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสัมพันธ์ของการนำ OWL มาใช้ในสภาวะต่างๆกัน คือที่ปริมาณที่แตกต่างกันของ

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ฟอกเยื่อ ที่อุณหภูมิ และเวลาที่แตกต่างกัน โดยในการกำหนดระดับปัจจัยมีหลักการดังนี้

1) %OWL ที่ใช้ในการทดลองจะกำหนดให้ปริมาณรวมของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นไปตามสภาวะปกติของการฟอกเยื่อคือ 10 กรัมต่อเยื่อ 1 กิโลกรัม กำหนดระดับของ OWL ที่ใช้ได้แก่ 0% จนถึง 100 % หมายความว่าที่ 0% OWL จะไม่ใช้ OWL เลย โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 10 g/kg ที่ใช้จะมาจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์เท่านั้น ที่ 100 % OWL โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 10 g/kg ที่ใช้ทั้งหมดจะมาจากสารละลาย OWL เท่านั้น

2) ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (g/kg) กำหนดให้มีระดับตั้งแต่ 6-14 g/kg โดยปกติแล้วในการฟอกเยื่อขั้นตอน EP จะใช้ปริมาณ 10 g/kg ซึ่งในการกำหนดระดับนั้นจะมีวัตถุประสงค์คือต้องการทราบว่าเมื่อมีการใช้ OWL แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีผลอย่างไรหากใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณน้อยกว่าเดิม หรืออาจทำให้ต้องมีการเพิ่มปริมาณขึ้นเพื่อให้เยื่อได้คุณภาพตามต้องการ โดยสุดท้ายแล้วจะนำต้นทุนเข้ามาพิจารณาด้วย ซึ่งหากสามารถใช้ OWL ในสัดส่วนที่สูงขึ้นและต้องใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มากขึ้น แต่ต้นทุนการผลิตลดลงกล่าวคือ สามารถลดค่าใช้จ่ายในการซื้อโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้มากกว่าการเสียเงินซื้อไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มาใช้เพิ่ม ก็เป็นเรื่องที่น่าสนใจที่จะนำมาพิจารณาใช้ในกระบวนการผลิตจริง

3) อุณหภูมิที่ใช้ กำหนดให้มีระดับในการทดลองตั้งแต่ 70 – 90 องศาเซลเซียส โดยปกติแล้วในการฟอกเยื่อขั้นตอน EP จะใช้อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ในการกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อศึกษาว่าเมื่อมีการใช้ OWL ที่อุณหภูมิต่ำกว่ามาตรฐานที่ใช้จะยังคงให้คุณภาพเยื่อตามต้องการหรือไม่ เพราะการลดอุณหภูมิที่ใช้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ หรือหากต้องใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้น ต้นทุนในการผลิตจะเป็นอย่างไรคุ้มหรือไม่ ถ้านำ OWL มาใช้

4) เวลาที่ใช้ กำหนดให้มีระดับในการทดลองตั้งแต่ 75 – 95 นาที โดยปกติแล้วในการฟอกเยื่อขั้นตอน EP จะใช้เวลา 90 นาที ในการกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อศึกษาว่าเมื่อมีการใช้ OWL และใช้เวลาในการฟอกเยื่อต่ำกว่ามาตรฐานที่ใช้ จะยังคงให้คุณภาพเยื่อตามต้องการหรือไม่ เพราะการลดเวลาที่ใช้จะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ หรือหากต้องใช้เวลาในการฟอกมากขึ้น ต้นทุนในการผลิตจะเป็นอย่างไรคุ้มหรือไม่ ถ้านำ OWL มาใช้

สรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.1

ตัวแปรตอบสนอง;	Y1 คือค่าความขาวสว่างของเยื่อ (Brightness)
	Y2 คือค่าความหนืดของเยื่อ (Viscosity number)
	Y3 คือค่าแคปป่า (Kappa no.)
	Y4 คือค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirt)

ตารางที่ 3.1 ปัจจัยและระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย				
		$-\alpha(-2)$	Low(-1)	Center(0)	High(+1)	$+\alpha(+2)$
สัดส่วน OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)	A	0	25	50	75	100
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ ออกไซด์ (g/kg)	B	6	8	10	12	14
อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	C	70	75	80	85	90
เวลา (นาที)	D	75	80	85	90	95

การออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design

Central Composite Design

Factors: 4 Replicates: 1

Base runs: 31 Total runs: 31

Base blocks: 1 Total blocks: 1

Two-level factorial: Full factorial

Cube points: 16

Center points in cube: 7

Axial points: 8

Center points in axial: 0

Alpha: 2

ตารางที่ 3.2 Design matrix of the experiment.

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C	D
3	1	1	1	-1	1	-1	-1
7	2	1	1	-1	1	1	-1
19	3	-1	1	0	-2	0	0
30	4	0	1	0	0	0	0
16	5	1	1	1	1	1	1
6	6	1	1	1	-1	1	-1
8	7	1	1	1	1	1	-1
17	8	-1	1	-2	0	0	0
18	9	-1	1	2	0	0	0
22	10	-1	1	0	0	2	0
24	11	-1	1	0	0	0	2
10	12	1	1	1	-1	-1	1
12	13	1	1	1	1	-1	1
1	14	1	1	-1	-1	-1	-1
20	15	-1	1	0	2	0	0
29	16	0	1	0	0	0	0
4	17	1	1	1	1	-1	-1
28	18	0	1	0	0	0	0
31	19	0	1	0	0	0	0
23	20	-1	1	0	0	0	-2
14	21	1	1	1	-1	1	1
26	22	0	1	0	0	0	0
25	23	0	1	0	0	0	0
21	24	-1	1	0	0	-2	0
9	25	1	1	-1	-1	-1	1
2	26	1	1	1	-1	-1	-1
15	27	1	1	-1	1	1	1
13	28	1	1	-1	-1	1	1
11	29	1	1	-1	1	-1	1
27	30	0	1	0	0	0	0
5	31	1	1	-1	-1	1	-1

3.2 การทดลองในห้องปฏิบัติการเคมี

การทดลองการฟอกเยื่อในขั้นตอน EP ที่จะใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี โดยในการทดลองมีสถานะการฟอกเยื่อดังต่อไปนี้

ปริมาณตัวอย่าง : เยื่อแห้ง 100 กรัม

อุณหภูมิที่ใช้ : ตามระดับการทดลองที่ออกแบบไว้

เวลาที่ใช้ : ตามระดับการทดลองที่ออกแบบไว้

ปริมาณน้ำกลั่นที่ใช้ : 900 มิลลิลิตร

สารเคมีที่ใช้ : ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณตามระดับการทดลองที่ออกแบบไว้ และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 g/kg โดยนำมาจาก OWL ตามระดับการทดลองที่ออกแบบไว้ ส่วนที่เหลือ นำมาจากโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ โดยความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้มีค่าดังนี้

- 1) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 130.0 g/l
- 2) น้ำยาดมเยื่อที่ถูกออกซิไดส์ที่มีความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 129.6 g/l
ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาปริมาณที่ต้องใช้ ที่สัดส่วน OWL 25%
หมายถึง ต้องใช้ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มาจาก OWL 2.5 g/kg ที่เหลือนำมาจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 7.5 g/kg (ปริมาณรวมที่ต้องใช้ 10 g/kg)
เพราะฉะนั้นปริมาณ OWL ที่ต้องใช้คำนวณดังนี้
 - เยื่อ 1000 g ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 2.5 g
เยื่อ 100 g ต้องใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ $(100 \times 2.5) / 1000 = 0.25$ g
 - โซเดียมไฮดรอกไซด์ 129.6 g ตวงมาจาก OWL 1000 ml
ต้องการ 0.25 กรัม ดังนั้นต้องตวงมาจาก OWL เท่ากับ $(0.25 \times 1000) / 129.6 = 1.9$ ml
ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์คำนวณดังนี้
 - เยื่อ 1000 g ใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์ 7.5 g
เยื่อ 100 g ต้องใช้ โซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ $(100 \times 7.5) / 1000 = 0.75$ g
 - โซเดียมไฮดรอกไซด์ 130 g ตวงมาจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1000 ml
ต้องการ 0.75 กรัม ดังนั้นต้องตวงมาจาก OWL เท่ากับ $(0.75 \times 1000) / 130 = 5.8$ ml
ดังนั้นที่สัดส่วน OWL 25% ต้องใช้ OWL 1.9 ml และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5.8 ml

- 3) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ความเข้มข้น 100.0 g/l
ตัวอย่างการคำนวณเพื่อหาปริมาณที่ต้องใช้ที่ระดับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 g/kg
- เยื่อ 1000 g ใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 g
 - เยื่อ 100 g ต้องใช้ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ $(100 \times 6) / 1000 = 0.6$ g
 - ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 100 g ตวงมาจากสารละลาย 1000 ml
 - ต้องการ 0.6 กรัม ดังนั้นต้องตวงมาจากสารละลายเท่ากับ $(0.6 \times 1000) / 100 = 6$ ml

ตารางที่ 3.3 และ 3.4 แสดงปริมาณสารตั้งต้นที่ต้องใช้ที่ระดับต่างๆ ของปัจจัย

ตารางที่ 3.3 ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้ที่ระดับการทดลองต่างๆ ของ OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์

ร้อยละของ OWL สารละลายที่ใช้	ร้อยละของ OWL				
	0	25	50	75	100
ปริมาณ OWL (ml)	0	1.9	3.9	5.8	7.7
ปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ml)	7.7	5.8	3.8	1.9	0

ตารางที่ 3.4 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ที่ระดับการทดลองต่างๆ

รายการ	หน่วย	ปริมาณที่ใช้				
		6	8	10	12	14
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (โดยน้ำหนัก)	g/kg	6	8	10	12	14
ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	ml	6	8	10	12	14

3.2.1 ขั้นตอนในการทดลอง

- 1) เตรียมเยื่อแห้ง 100 กรัมใส่ถุงพลาสติกซิปล็อก เติมน้ำกลั่นปริมาณ 500 มิลลิลิตร ปิดปากถุงให้สนิท นวดผสมให้เข้ากันด้วยมือ
- 2) แบ่งน้ำกลั่นที่เหลือออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณที่คำนวณไว้ ผสมให้เข้ากันแล้วเติมลงไปเยื่อ ปิดปากถุงให้สนิท นวดผสมให้เข้ากันด้วยมือ น้ำกลั่นส่วนที่สองเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ตามปริมาณที่คำนวณไว้ผสมให้เข้ากันแล้วเติมลงไปเยื่อแล้วนวดให้เข้ากันด้วยมือ
- 3) นำถุงตัวอย่างใส่ถุงซิปล็อกอีกชั้นหนึ่ง ปิดปากถุงให้สนิท นำไปแช่ในอ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิที่ระดับการทดลองที่ออกแบบไว้ เริ่มจับเวลา

- 4) นำเยื่อออกมาขนาดผสมให้เข้ากันด้วยมือที่เวลา 5 10 และ 15 นาที จากนั้นแช่ทิ้งไว้จนครบเวลาที่ออกแบบการทดลองไว้
- 5) นำเยื่อออกมาจากอ่างน้ำร้อน จากนั้นทำการล้างด้วยน้ำสะอาด 8 ลิตร นำไปกรองน้ำออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ (Vacuum pump) โดยใช้ชุดกรองสุญญากาศ (Buchner funnel and Suction flask) ซึ่งจะทำให้ได้เยื่อที่มีความเข้มข้น 25-30 เปอร์เซ็นต์
- 6) นำเยื่อที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าความขาวสว่าง ความหนืด ค่าแคปป์ และค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ

3.2.2 คุณภาพของเยื่อและ Oxidized white liquor ที่ใช้ในการทดลอง

สารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการทดลองได้แก่เยื่อที่ผ่านกระบวนการฟอกที่ขั้นตอน D0 มีคุณภาพตามตารางที่ 3.5 และ OWL ที่ใช้ในการทดลองมีคุณภาพตามตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.5 คุณภาพของเยื่อที่ใช้ในการทดลอง

คุณภาพของเยื่อ ขั้นตอน D0	ความขาวสว่าง (%)	ความหนืด (ml/g)	แคปป์	สิ่งปนเปื้อน (mm ² /kg)
	74.50	610	4.60	3.90

ตารางที่ 3.6 คุณภาพของ OWL ที่ใช้ในการทดลอง

คุณภาพของ	NaOH(g/l)	Na ₂ S(g/l)	Na ₂ S ₂ O ₃ (g/l)	Na ₂ CO ₃ (g/l)
OWL	129.6	1.18	1.22	25.6

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการออกแบบการทดลองแล้ว ผู้วิจัยจึงดำเนินการทดลองตามวิธีที่ได้กล่าวถึง
ในบทที่ 3 ซึ่งผลการทดลองจะวัดค่าของตัวแปรตอบสนองทั้ง 4 ตัว ได้ผลดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง

การทดลอง	ปัจจัย (Coded Unit)				ปัจจัย (Uncoded Unit)				ตัวแปรตอบสนอง			
	A	B	C	D	%OWL	H ₂ O ₂	Temp	Time	Brightness	Viscosity	Kappa no.	Dirt
1	-1	1	-1	-1	25	12	75	80	83.80	508	2.34	3.2
2	-1	1	1	-1	25	12	85	80	83.95	507	2.42	2.9
3	0	-2	0	0	50	6	80	85	82.65	544	2.38	2.3
4	0	0	0	0	50	10	80	85	83.48	521	2.19	4.0
5	1	1	1	1	75	12	85	90	83.66	516	2.33	2.7
6	1	-1	1	-1	75	8	85	80	83.32	534	2.41	3.1
7	1	1	1	-1	75	12	85	80	84.15	523	2.15	2.1
8	-2	0	0	0	0	10	80	85	84.13	519	2.25	2.5
9	2	0	0	0	100	10	80	85	83.2	532	2.57	3.3
10	0	0	2	0	50	10	90	85	83.74	527	2.24	3.5
11	0	0	0	2	50	10	80	95	83.67	512	2.08	3.1
12	1	-1	-1	1	75	8	75	90	82.69	528	2.38	3.7
13	1	1	-1	1	75	12	75	90	83.46	519	2.30	2.2
14	-1	-1	-1	-1	25	8	75	80	83.50	518	2.27	3.1
15	0	2	0	0	50	14	80	85	83.99	514	2.14	3.1
16	0	0	0	0	50	10	80	85	83.57	521	2.20	3.2
17	1	1	-1	-1	75	12	75	80	83.87	527	2.29	3.4
18	0	0	0	0	50	10	80	85	83.6	520	2.25	2.0
19	0	0	0	0	50	10	80	85	83.49	519	2.20	3.0

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลอง (ต่อ)

การทดลอง	ปัจจัย (Coded Unit)				ปัจจัย (Uncoded Unit)				ตัวแปรตอบสนอง			
	A	B	C	D	%OWL	H ₂ O ₂	Temp	Time	Brightness	Viscosity	Kappa no.	Dirt
20	0	0	0	-2	50	10	80	75	83.46	519	2.07	3.7
21	1	-1	1	1	75	8	85	90	83.04	528	2.19	3.2
22	0	0	0	0	50	10	80	85	83.49	518	2.24	3.2
23	0	0	0	0	50	10	80	85	83.6	515	2.18	2.3
24	0	0	-2	0	50	10	70	85	83.66	518	2.39	2.5
25	-1	-1	-1	1	25	8	75	90	83.48	521	2.31	2.6
26	1	-1	-1	-1	75	8	75	80	83.00	510	2.24	3.4
27	-1	1	1	1	25	12	85	90	84.48	510	2.17	2.8
28	-1	-1	1	1	25	8	85	90	83.52	523	2.31	1.6
29	-1	1	-1	1	25	12	75	90	84.13	510	2.21	2.5
30	0	0	0	0	50	10	80	85	83.53	519	2.21	2.4
31	-1	-1	1	-1	25	8	85	80	83.17	521	2.27	3.0

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.2.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับความขาวสว่าง (Brightness)

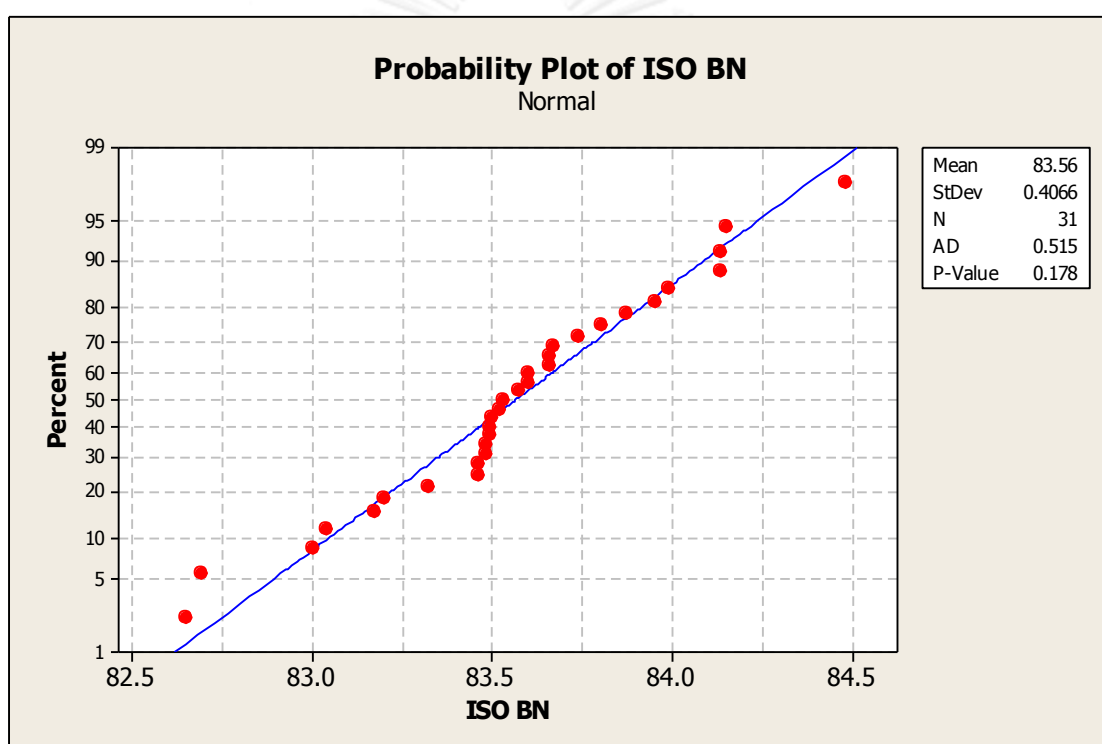
4.2.1.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูลก่อนที่จะนำมาวิเคราะห์ โดยทำการตรวจสอบว่าข้อมูลมีรูปแบบของความผิดพลาดเป็นไปตามหลักการ $\epsilon_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ซึ่งหมายถึงความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันหรือไม่ (Normal independent distribution) โดยการทดสอบข้อกำหนดเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองตามสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ สมมติฐานของการแจกแจงปกติ สมมติฐานของความเป็นอิสระ และสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจาก Normal Probability Plot ว่าข้อมูลมีการแจกแจงเป็นแบบปกติหรือไม่ และถ้าหากผลการทดสอบพบว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติจะมีค่า P-Value มากกว่า 0.05

รูป 4.1 เป็นการทดสอบความเป็นปกติของความขาวสว่างของเยื่อ ซึ่งจากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

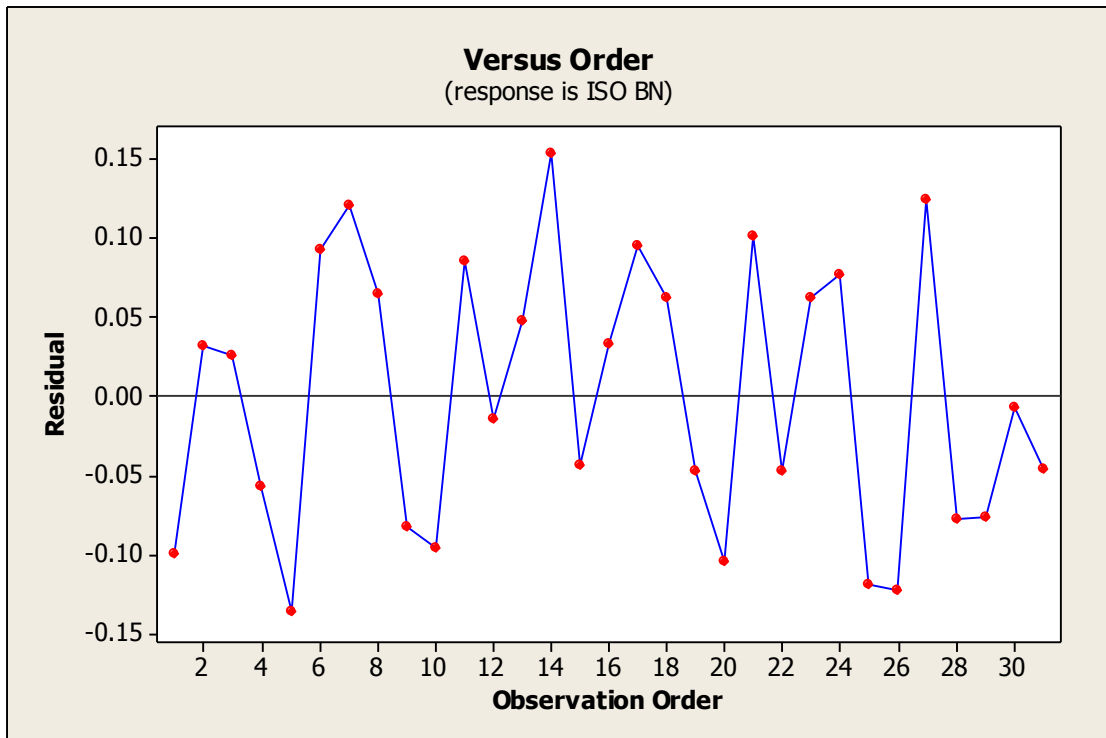


รูปที่ 4.1 Probability Plot ของความขาวสว่าง

2) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (Independence of Residual) สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าส่วนตกค้าง(Residual) กับลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) โดยการกระจายตัวของส่วนตกค้างควรมีรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน ไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้มหรือมีรูปแบบที่แน่นอน

รูปที่ 4.2 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าความขาวสว่าง จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

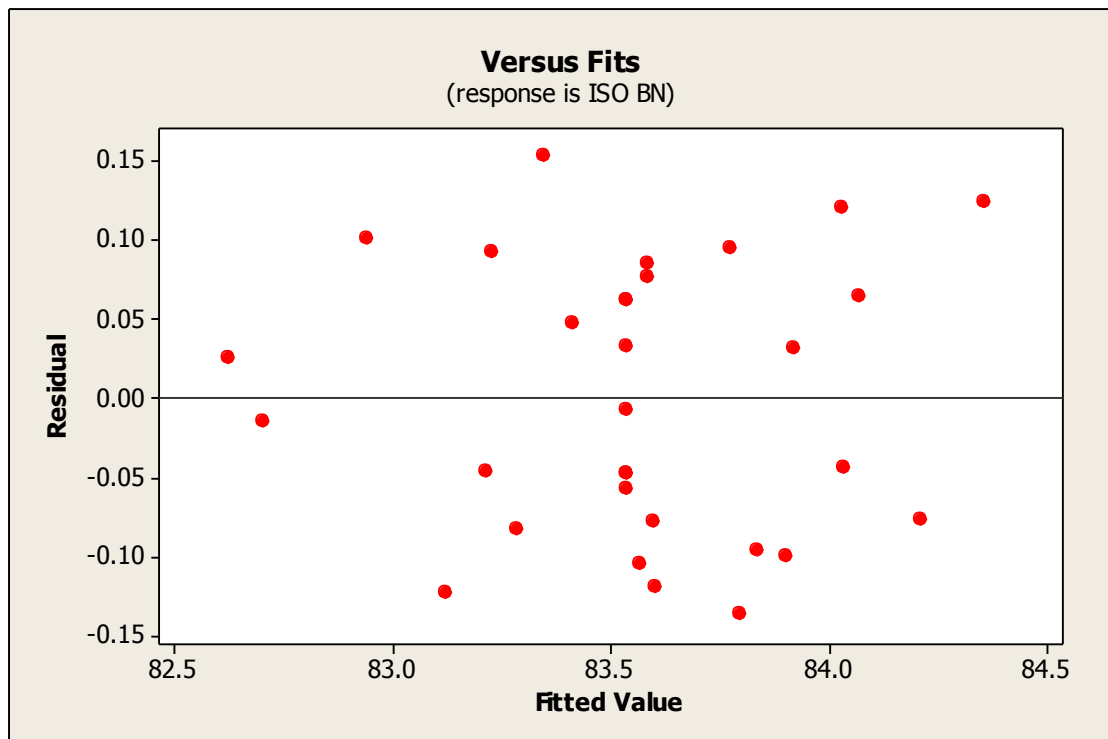


รูปที่ 4.2 Residuals Versus Order Plot ของความขาวสว่าง

3) การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน สามารถตรวจสอบได้โดยการพิจารณาจากแผนภาพการกระจายที่แสดงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (Fitted value) ซึ่งแผนภาพการกระจายไม่ควรมีลักษณะของข้อมูลที่เป็นแนวโน้ม หรือมีการกระจายตัวที่มีรูปแบบกรวยปากเปิด

รูป 4.3 เป็นการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของความขาวสว่าง ซึ่งพบว่าข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือเป็นรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4.3 Residuals Versus Fitted value Plot ของความขาวสว่าง

4.2.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์การทดลอง ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความขาวสว่าง

Response Surface Regression: ISO Brightness versus A, B, C, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for ISO BN

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	83.5371	0.04436	1882.958	0.000
A	-0.1958	0.02396	-8.173	0.000
B	0.3525	0.02396	14.712	0.000
C	0.0633	0.02396	2.643	0.018
D	0.0050	0.02396	0.209	0.837
A*A	0.0343	0.02195	1.561	0.138
B*B	-0.0520	0.02195	-2.369	0.031
C*C	0.0430	0.02195	1.959	0.068
D*D	0.0093	0.02195	0.422	0.679
A*B	0.0250	0.02934	0.852	0.407
A*C	0.0587	0.02934	2.002	0.063
A*D	-0.1675	0.02934	-5.708	0.000
B*C	0.0375	0.02934	1.278	0.220
B*D	0.0137	0.02934	0.469	0.646
C*D	0.0325	0.02934	1.108	0.284

S = 0.117378 PRESS = 1.19610
 R-Sq = 95.55% R-Sq(pred) = 75.88% R-Sq(adj) = 91.67%

Analysis of Variance for ISO BN

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	4.73889	4.73889	0.33849	24.57	0.000
Linear	4	3.99943	3.99943	0.99986	72.57	0.000
A	1	0.92042	0.92042	0.92042	66.80	0.000
B	1	2.98215	2.98215	2.98215	216.45	0.000
C	1	0.09627	0.09627	0.09627	6.99	0.018
D	1	0.00060	0.00060	0.00060	0.04	0.837
Square	4	0.18291	0.18291	0.04573	3.32	0.037
A*A	1	0.03448	0.03356	0.03356	2.44	0.138
B*B	1	0.09491	0.07731	0.07731	5.61	0.031
C*C	1	0.05107	0.05289	0.05289	3.84	0.068
D*D	1	0.00245	0.00245	0.00245	0.18	0.679
Interaction	6	0.55655	0.55655	0.09276	6.73	0.001
A*B	1	0.01000	0.01000	0.01000	0.73	0.407
A*C	1	0.05522	0.05522	0.05522	4.01	0.063
A*D	1	0.44890	0.44890	0.44890	32.58	0.000
B*C	1	0.02250	0.02250	0.02250	1.63	0.220
B*D	1	0.00302	0.00302	0.00302	0.22	0.646
C*D	1	0.01690	0.01690	0.01690	1.23	0.284
Residual Error	16	0.22044	0.22044	0.01378		
Lack-of-Fit	10	0.20370	0.20370	0.02037	7.30	0.012
Pure Error	6	0.01674	0.01674	0.00279		
Total	30	4.95934				

Unusual Observations for ISO BN

Obs	StdOrder	ISO BN	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
14	1	83.500	83.347	0.090	0.153	2.02 R

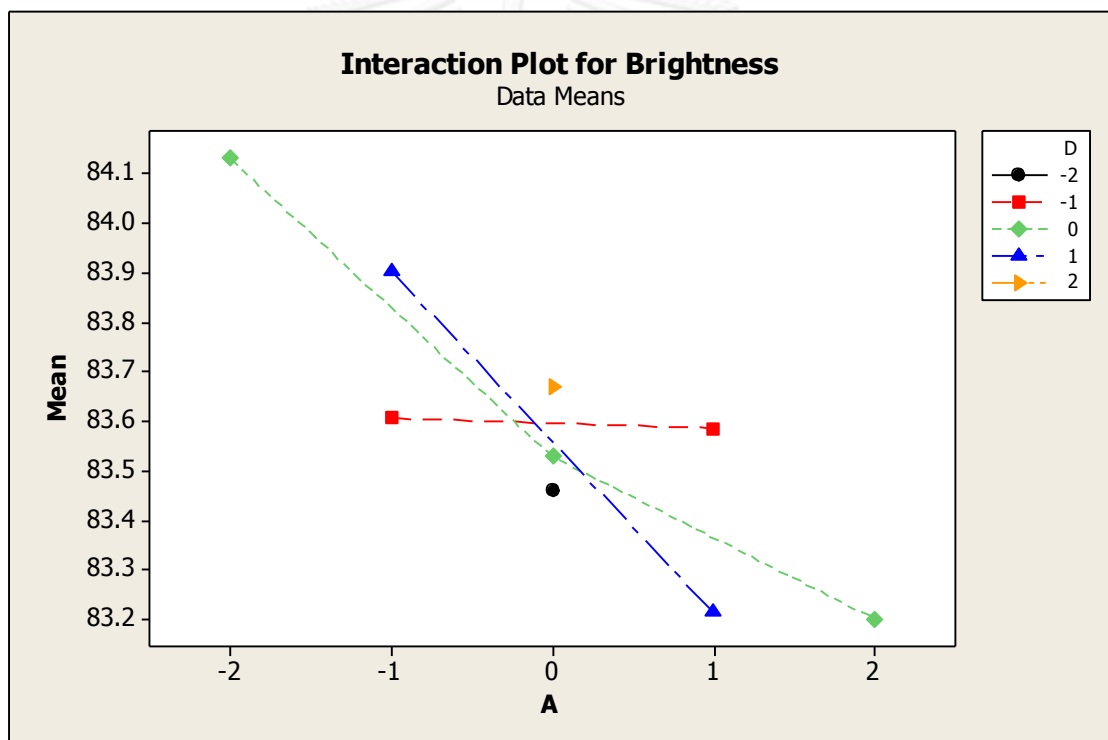
R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for ISO BN using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	83.5371
A	-0.195833
B	0.352500
C	0.0633333
D	0.00500000
A*A	0.0342560
B*B	-0.0519940
C*C	0.0430060
D*D	0.00925595
A*B	0.0250000
A*C	0.0587500
A*D	-0.167500
B*C	0.0375000
B*D	0.0137500
C*D	0.0325000

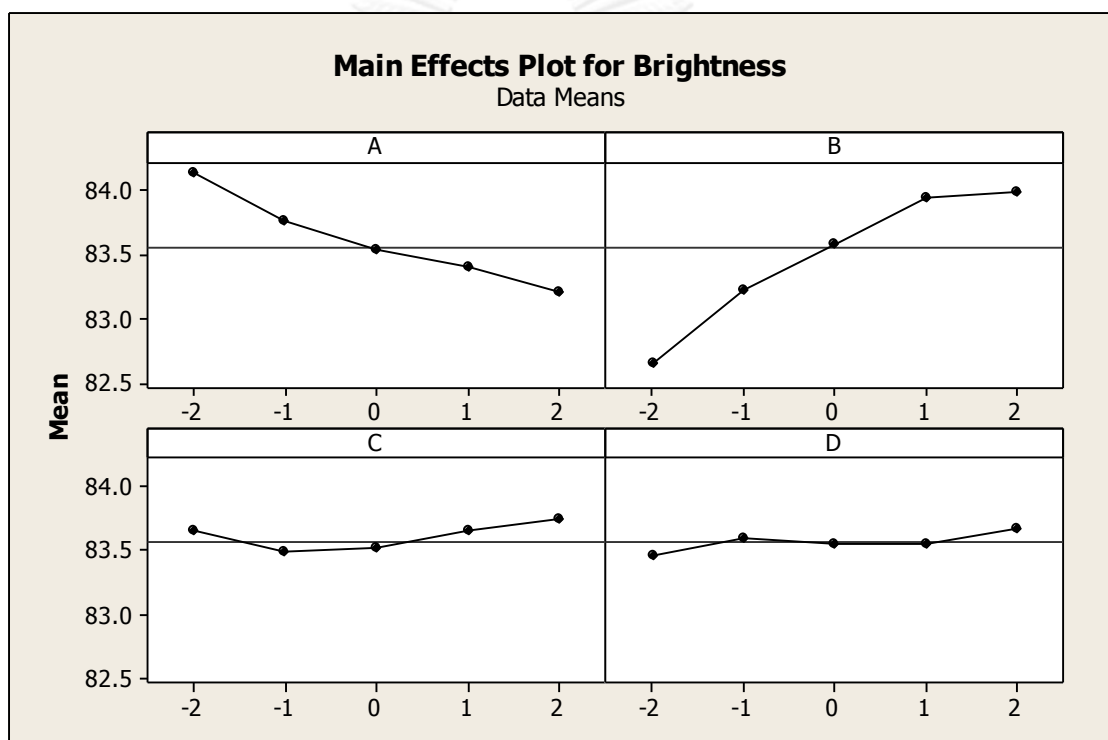
ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลอง เพื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความขาวสว่าง พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อความขาวสว่างคือปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ ปัจจัยหลัก (Main effect) จำนวน 3 ตัวได้แก่ สัดส่วน OWL (A), ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) และ อุณหภูมิ (C) ปัจจัยหลักกำลังสอง มีผล 1 ตัวคือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B*B) และอันตรกิริยา (Interaction) มีผล 1 ตัวคือ สัดส่วน OWL กับเวลา (A*D)

ผู้วิจัยนำข้อมูลมาทำ Interaction Plot เพื่อดูผลของอันตรกิริยาระหว่างสัดส่วนของ OWL(A) ต่อเวลา(D) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณากราฟ พบว่าเมื่อใช้เวลาในการฟอกเยื่อน้อย (ที่ระดับ D เท่ากับ -1) การใช้ปริมาณที่แตกต่างกันของ OWL จะไม่มีผลต่อความขาวสว่าง แต่ถ้าหากใช้เวลาในการฟอกเยื่อนานขึ้น (ที่ระดับ D เท่ากับ 0 และ +1) การใช้ OWL เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างลดลง



รูปที่ 4.4 Interaction Plot ของความขาวสว่าง

นำข้อมูลมาทำ Main effects Plot เพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัว พบว่าปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) เมื่อมีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น โดยความสัมพันธ์จะเป็นเส้นโค้ง ซึ่งสัมพันธ์กับการที่ ปัจจัยหลักกำลังสองของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B*B) มีนัยสำคัญ สำหรับปัจจัยอุณหภูมิ (C) พบว่าลักษณะกราฟมีการเปลี่ยนแปลงไม่เด่นชัดนัก แต่มีแนวโน้มคือเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างสัดส่วน OWL (A) และเวลาในการฟอกเยื่อ (D) มีนัยสำคัญ ดังนั้นจึงไม่ควรอธิบายผลของปัจจัยทั้งสองนี้ด้วยผลหลัก ผลของปัจจัยทั้งสองนี้ได้ถูกอธิบายไปด้วยการอธิบายอันตรกิริยาแล้วข้างต้น



รูปที่ 4.5 Main Effect Plot ของความขาวสว่าง

4.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับความหนืด (Viscosity number)

4.2.2.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

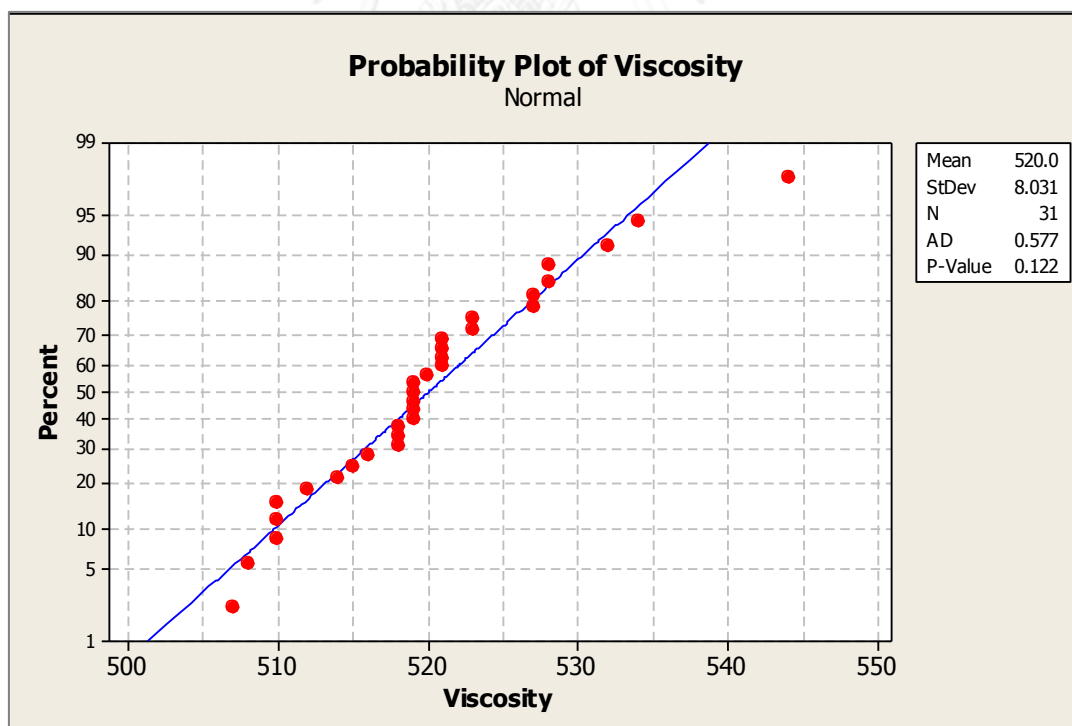
รูปที่ 4.6 เป็นการทดสอบความเป็นปกติของความหนืดของเยื่อ ซึ่งจากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

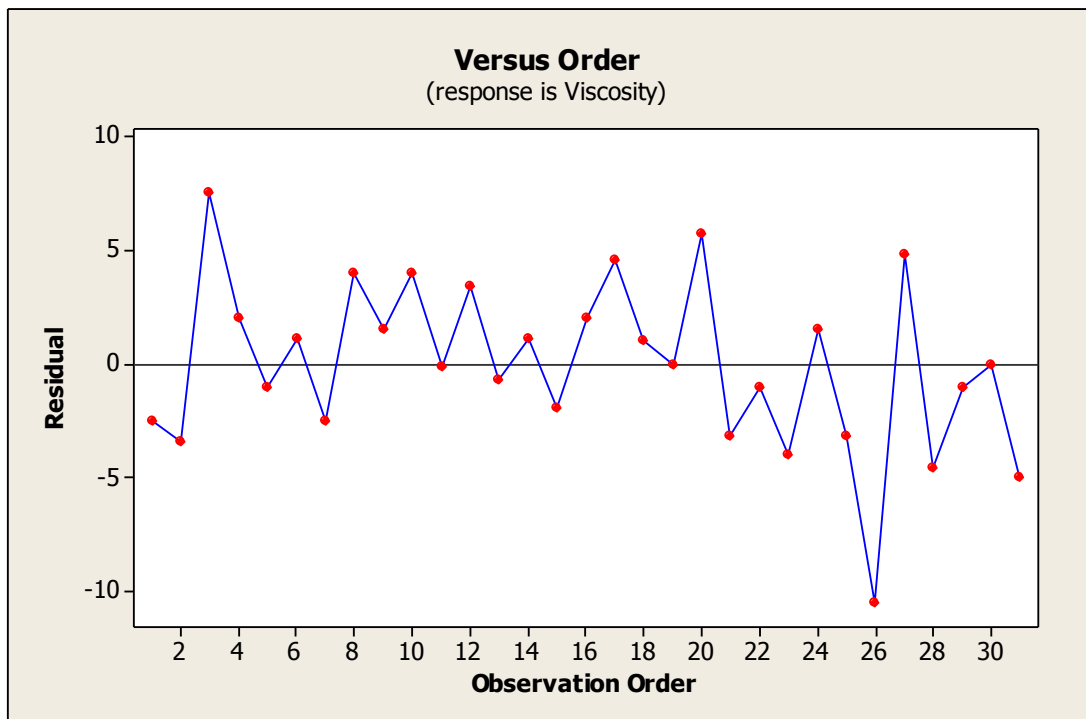
รูปที่ 4.7 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าความหนืด จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3) การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

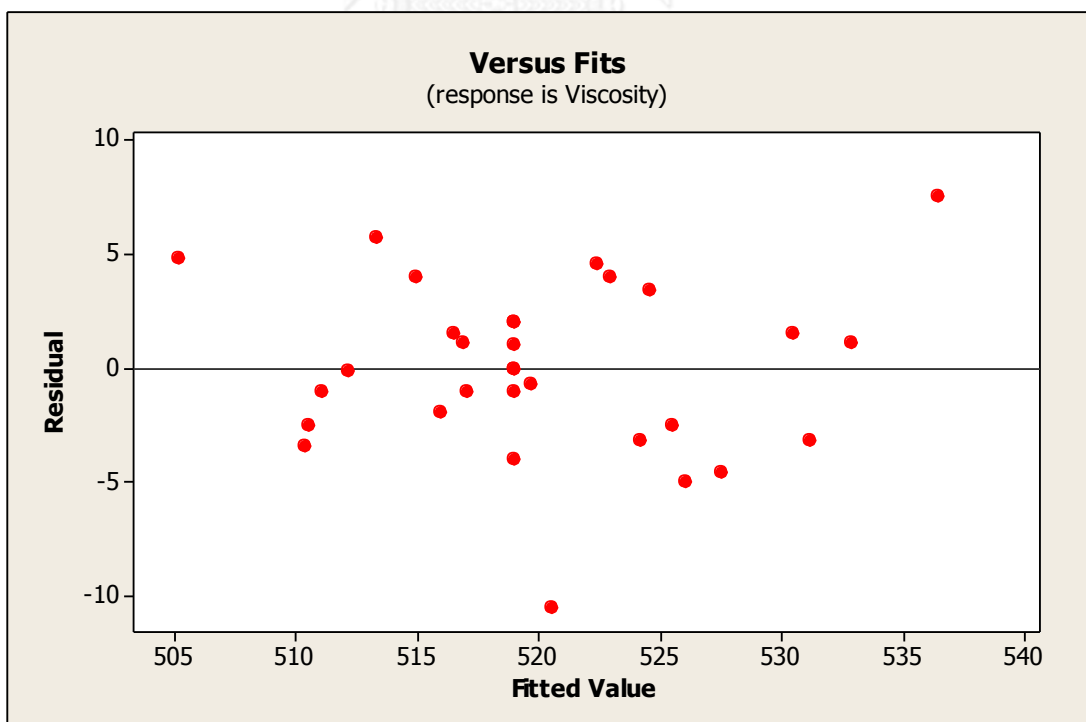
รูปที่ 4.8 เป็นการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของความหนืด ซึ่งพบว่าข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือเป็นรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4.6 Probability Plot ของความหนืด



รูปที่ 4.7 Residuals Versus Order ของความหนืด



รูปที่ 4.8 Residuals Versus Fitted value Plot ของความหนืด

4.2.2.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของความหนืด

Response Surface Regression: Viscosity versus A, B, C, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Viscosity

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	519.000	1.9328	268.517	0.000
A	3.875	1.0439	3.712	0.002
B	-5.125	1.0439	-4.910	0.000
C	1.625	1.0439	1.557	0.139
D	-0.292	1.0439	-0.279	0.784
A*A	0.927	0.9563	0.969	0.347
B*B	1.802	0.9563	1.884	0.078
C*C	0.177	0.9563	-0.185	0.855
D*D	-1.573	0.9563	-1.645	0.120
A*B	2.063	1.2785	1.613	0.126
A*C	0.813	1.2785	0.636	0.534
A*D	-0.812	1.2785	-0.636	0.534
B*C	-2.312	1.2785	-1.809	0.089
B*D	-1.687	1.2785	-1.320	0.205
C*D	-1.438	1.2785	-1.124	0.277

S = 5.11381 PRESS = 2295.71

R-Sq = 78.38% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 59.46%

Analysis of Variance for Viscosity

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	1516.55	1516.55	108.325	4.14	0.004
Linear	4	1056.17	1056.17	264.042	10.10	0.000
A	1	360.37	360.37	360.375	13.78	0.002
B	1	630.37	630.37	630.375	24.11	0.000
C	1	63.37	63.37	63.375	2.42	0.139
D	1	2.04	2.04	2.042	0.08	0.784
Square	4	207.01	207.01	51.752	1.98	0.146
A*A	1	23.38	24.58	24.578	0.94	0.347
B*B	1	109.45	92.86	92.865	3.55	0.078
C*C	1	3.43	0.90	0.897	0.03	0.855
D*D	1	70.75	70.75	70.748	2.71	0.120
Interaction	6	253.38	253.38	42.229	1.61	0.207
A*B	1	68.06	68.06	68.063	2.60	0.126
A*C	1	10.56	10.56	10.563	0.40	0.534
A*D	1	10.56	10.56	10.562	0.40	0.534
B*C	1	85.56	85.56	85.562	3.27	0.089
B*D	1	45.56	45.56	45.563	1.74	0.205
C*D	1	33.06	33.06	33.063	1.26	0.277
Residual Error	16	418.42	418.42	26.151		
Lack-of-Fit	10	392.42	392.42	39.242	9.06	0.007
Pure Error	6	26.00	26.00	4.333		
Total	30	1934.97				

Unusual Observations for Viscosity

Obs	StdOrder	Viscosity	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
3	19	544.000	536.458	3.906	7.542	2.28 R
26	2	510.000	520.500	3.906	-10.500	-3.18 R

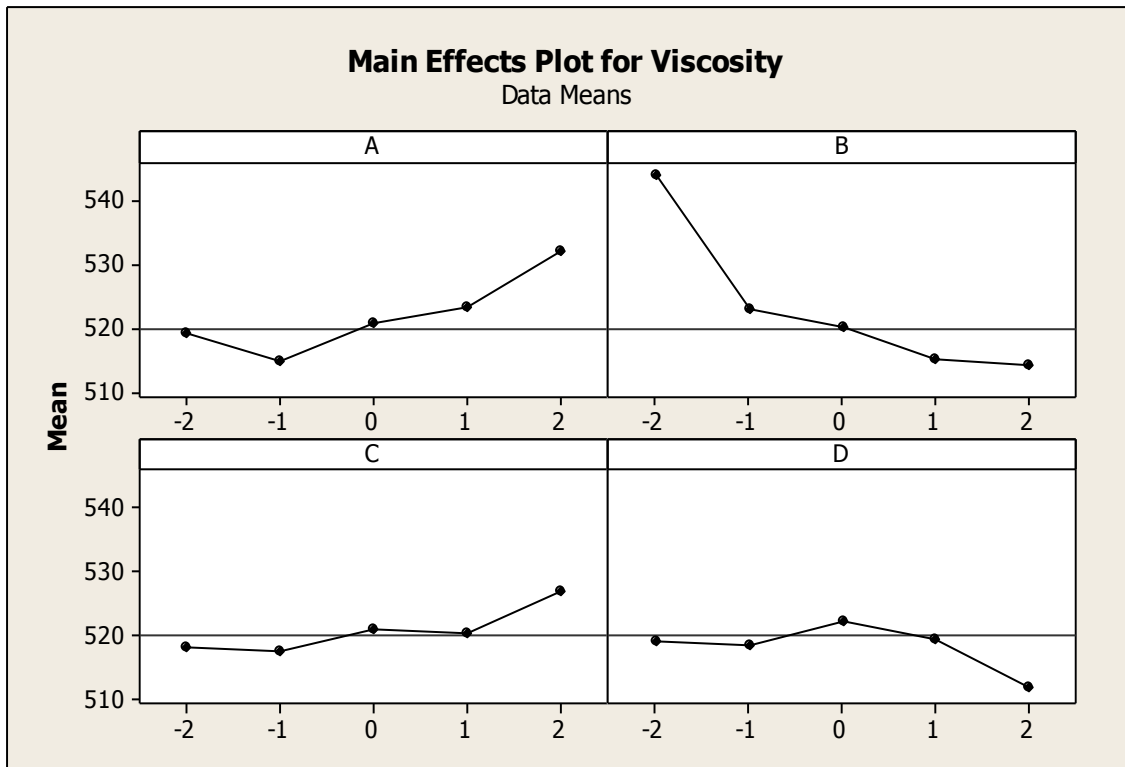
R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for Viscosity using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	519.000
A	3.87500
B	-5.12500
C	1.62500
D	-0.291667
A*A	0.927083
B*B	1.80208
C*C	0.177083
D*D	-1.57292
A*B	2.06250
A*C	0.812500
A*D	-0.812500
B*C	-2.31250
B*D	-1.68750
C*D	-1.43750

ผลการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อความหนืด พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดคือปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ ปัจจัยหลัก (Main effect) จำนวน 2 ตัวได้แก่ สัดส่วน OWL (A) และ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) ไม่มีอันตรกิริยา (Interaction) คู่ใดเลยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญ

ผู้วิจัยนำข้อมูลมาทำ Main effects Plot เพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัว พบว่าสัดส่วน OWL (A) เมื่อมีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น สำหรับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) พบว่าเมื่อมีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความหนืดลดลง สำหรับอุณหภูมิ (C) และเวลา (D) พบว่าลักษณะกราฟไม่แสดงถึงการมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 Main Effect Plot ของความหนืด

4.2.3 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าแคปป่า (Kappa no.)

4.2.3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

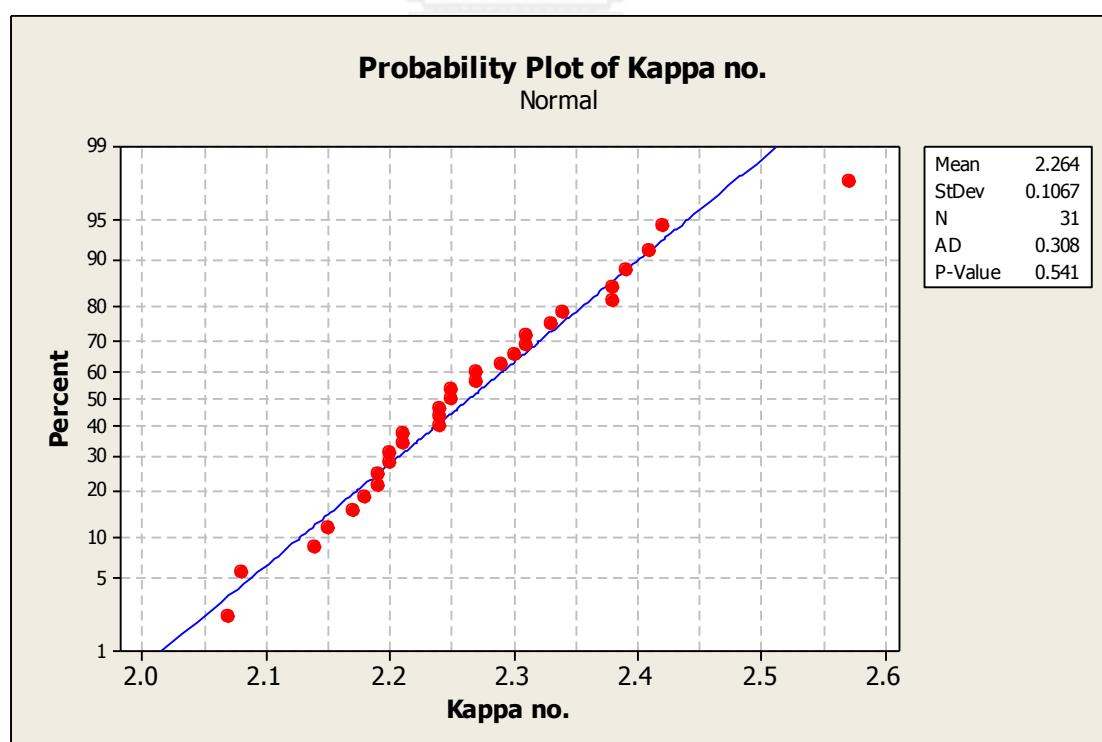
รูปที่ 4.10 เป็นการทดสอบความเป็นปกติของค่าแคปป่าของเยื่อ ซึ่งจากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

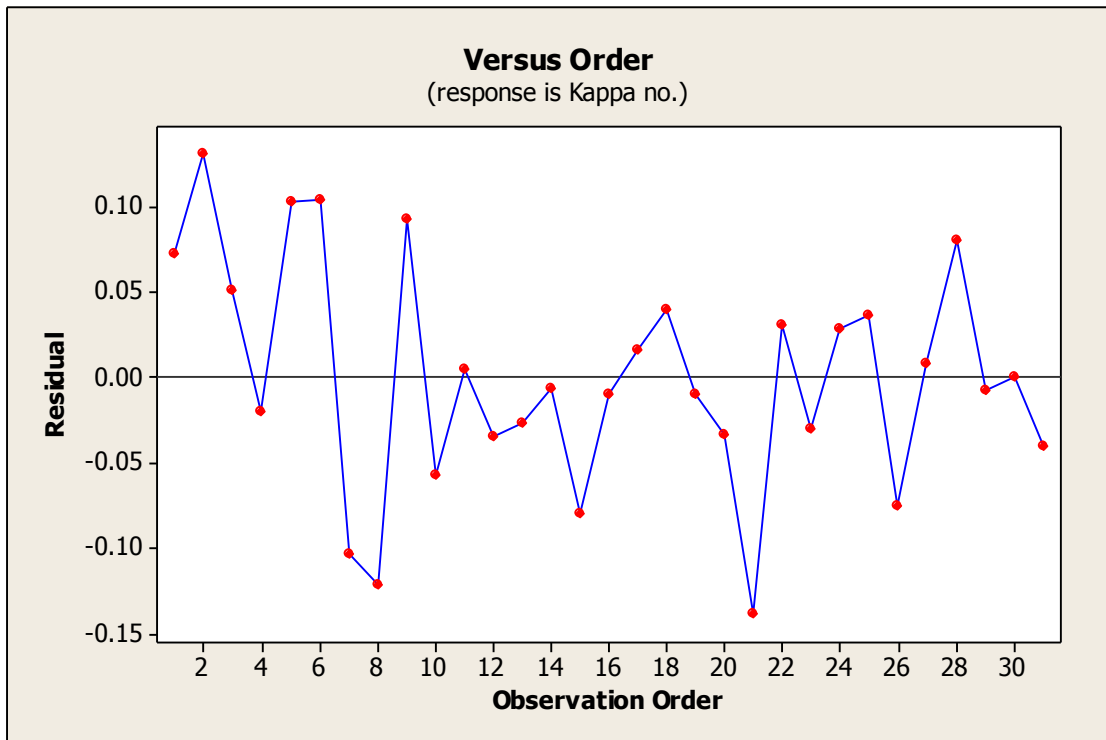
รูปที่ 4.11 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าแคปป่า จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3) การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

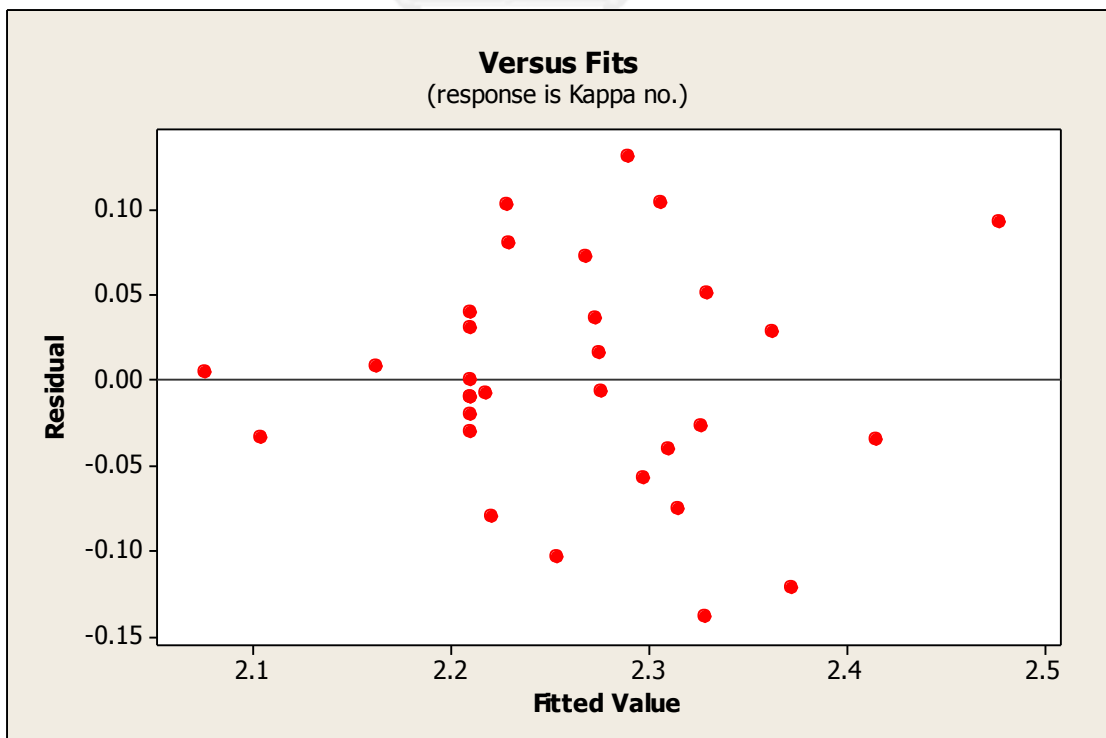
รูปที่ 4.12 เป็นการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของค่าแคปป่า ซึ่งพบว่าข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือเป็นรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน



รูปที่ 4.10 Probability Plot ของค่าแคปป่า



รูปที่ 4.11 Residuals Versus Order ของค่าแคปป์



รูปที่ 4.12 Residuals Versus Fitted value Plot ของค่าแคปป์

4.2.3.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของค่าแคปป่า

Response Surface Regression: Kappa no. versus A, B, C, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Kappa no.

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.21000	0.03437	64.295	0.000
A	0.02625	0.01856	1.414	0.177
B	-0.02708	0.01856	-1.459	0.164
C	-0.01625	0.01856	-0.875	0.394
D	-0.00708	0.01856	-0.382	0.708
A*A	0.05365	0.01701	3.154	0.006
B*B	0.01615	0.01701	0.949	0.357
C*C	0.02990	0.01701	1.758	0.098
D*D	-0.03010	0.01701	-1.770	0.096
A*B	-0.00813	0.02274	-0.357	0.725
A*C	-0.01063	0.02274	-0.467	0.647
A*D	0.02562	0.02274	1.127	0.276
B*C	-0.00312	0.02274	-0.137	0.892
B*D	-0.01187	0.02274	-0.522	0.609
C*D	-0.01937	0.02274	-0.852	0.407

S = 0.0909413 PRESS = 0.744596
R-Sq = 61.23% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 27.31%

Analysis of Variance for Kappa no.

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	0.209010	0.209010	0.014929	1.81	0.129
Linear	4	0.041683	0.041683	0.010421	1.26	0.326
A	1	0.016537	0.016537	0.016537	2.00	0.177
B	1	0.017604	0.017604	0.017604	2.13	0.164
C	1	0.006337	0.006337	0.006337	0.77	0.394
D	1	0.001204	0.001204	0.001204	0.15	0.708
Square	4	0.145540	0.145540	0.036385	4.40	0.014
A*A	1	0.080310	0.082295	0.082295	9.95	0.006
B*B	1	0.007629	0.007455	0.007455	0.90	0.357
C*C	1	0.031685	0.025558	0.025558	3.09	0.098
D*D	1	0.025915	0.025915	0.025915	3.13	0.096
Interaction	6	0.021787	0.021787	0.003631	0.44	0.842
A*B	1	0.001056	0.001056	0.001056	0.13	0.725
A*C	1	0.001806	0.001806	0.001806	0.22	0.647
A*D	1	0.010506	0.010506	0.010506	1.27	0.276
B*C	1	0.000156	0.000156	0.000156	0.02	0.892

B*D	1	0.002256	0.002256	0.002256	0.27	0.609
C*D	1	0.006006	0.006006	0.006006	0.73	0.407
Residual Error	16	0.132325	0.132325	0.008270		
Lack-of-Fit	10	0.128325	0.128325	0.012832	19.25	0.001
Pure Error	6	0.004000	0.004000	0.000667		
Total	30	0.341335				

Unusual Observations for Kappa no.

Obs	StdOrder	Kappa no.	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
2	7	2.420	2.290	0.069	0.130	2.22 R
8	17	2.250	2.372	0.069	-0.122	-2.08 R
21	14	2.190	2.328	0.069	-0.138	-2.36 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

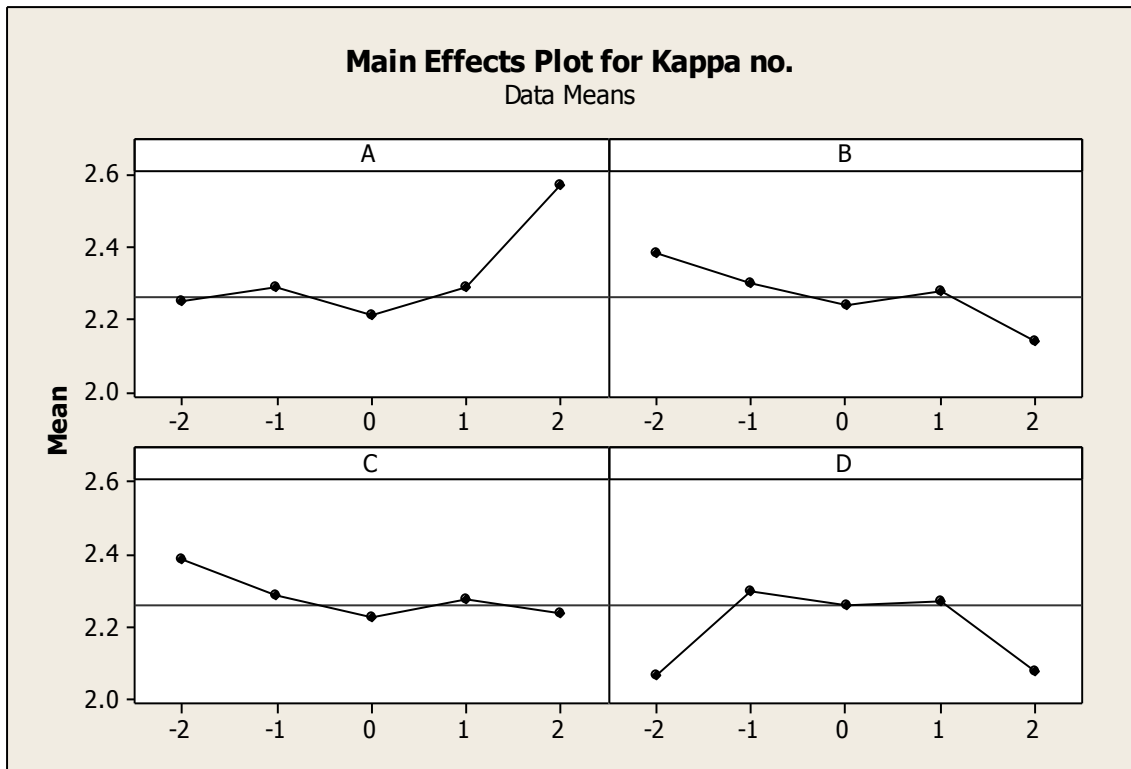
Estimated Regression Coefficients for Kappa no. using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	2.21000
A	0.0262500
B	-0.0270833
C	-0.0162500
D	-0.00708333
A*A	0.0536458
B*B	0.0161458
C*C	0.0298958
D*D	-0.0301042
A*B	-0.00812500
A*C	-0.0106250
A*D	0.0256250
B*C	-0.00312500
B*D	-0.0118750
C*D	-0.0193750

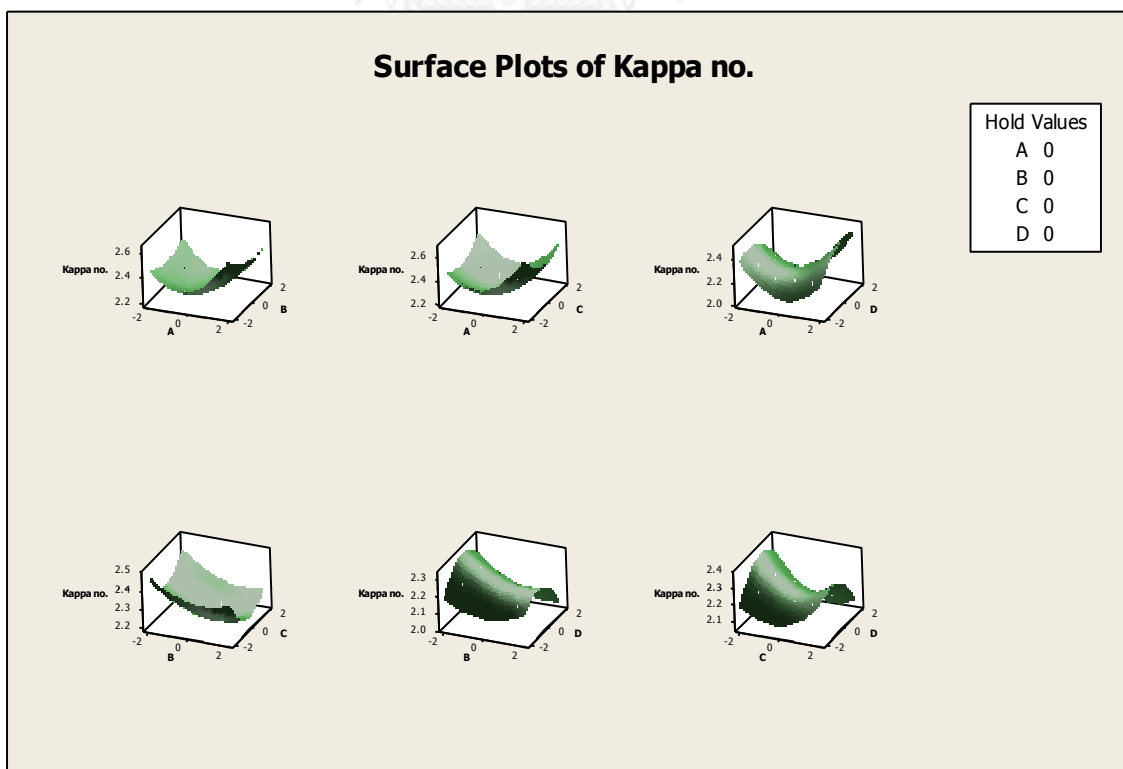
ผลการวิเคราะห์การออกแบบ เพื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่าแคปป์ พบว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าแคปป์คือปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ ปัจจัยหลักกำลังสองจำนวน 1 ตัวคือสัดส่วน OWL (A*A) ไม่มีปัจจัยหลักและอันตรกิริยา (Interaction) ตัวใดที่มีผลเลย

เมื่อนำข้อมูลมาทำ Main effects Plot เพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัว พบว่ากราฟของปริมาณ OWL (A) มีลักษณะที่เพิ่มขึ้นเมื่อแต่ไม่ได้เพิ่มแบบเส้นตรง ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) อุณหภูมิ (C) และเวลา (D) มีลักษณะกราฟที่ไม่แสดงถึงการมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.13

รูปที่ 4.14 แสดง Surface Plots ของค่าแคปป์ ลักษณะกราฟของ OWL (A) มีลักษณะที่บิดโค้งคล้ายพาราโบลา มีจุดวกกลับ แสดงให้เห็นว่าสัดส่วน OWL (A) มีความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งกับค่าแคปป์ โดยที่สัดส่วน OWL ต่ำ ค่าแคปป์จะสูง เมื่อเพิ่มสัดส่วน OWL ค่าแคปป์จะลดลง จนเมื่อถึงจุดหนึ่ง เมื่อเพิ่มสัดส่วน OWL ค่าแคปป์จะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.13 Main Effect Plot ของค่าแคปซ้า



รูปที่ 4.14 Surface Plots ของค่าแคปซ้า

4.2.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirt)

4.2.4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1) การทดสอบสมมติฐานของการแจกแจงปกติ (Normality Assumption)

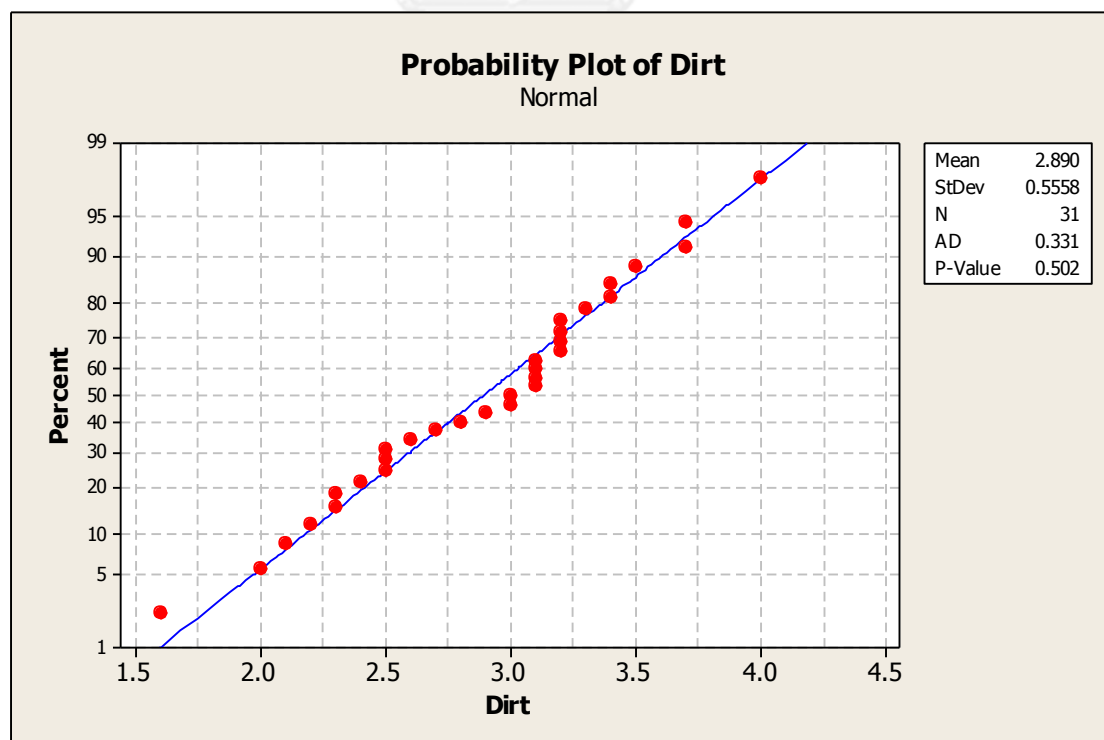
รูปที่ 4.15 เป็นการทดสอบความเป็นปกติของค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ ซึ่งจากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง และมีค่า P-Value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลเป็นไปตามสมมติฐานของการแจกแจงปกติ

2) การทดสอบสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Independence)

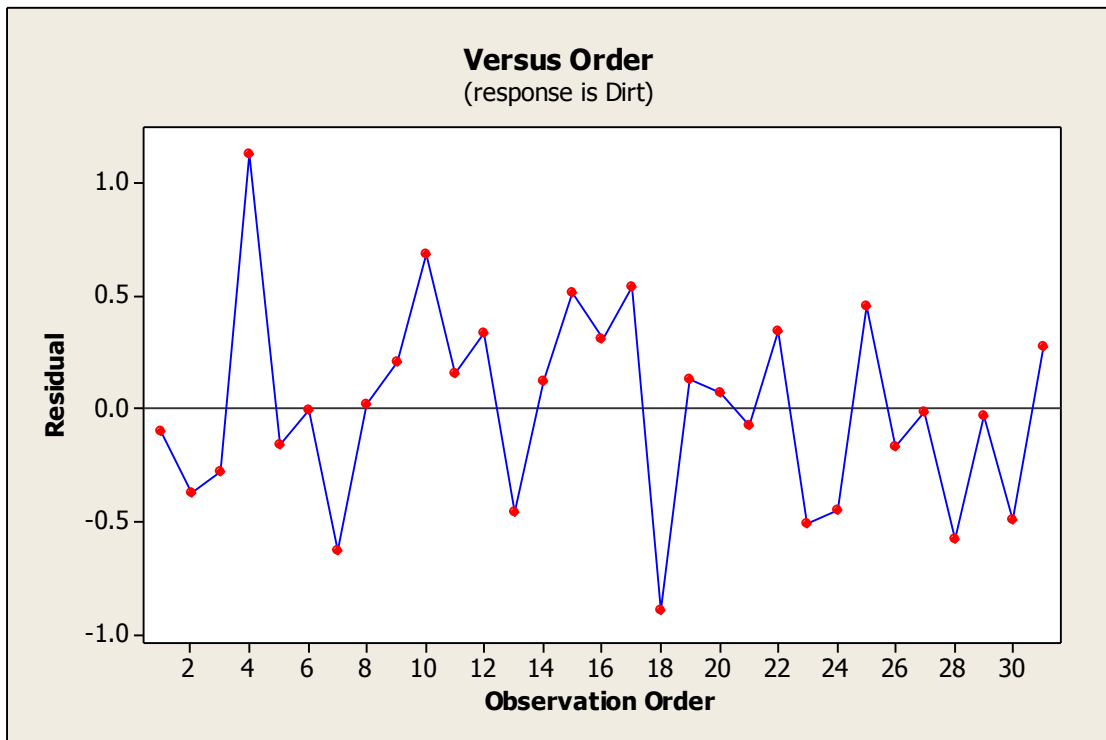
รูปที่ 4.16 เป็นการทดสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ จากกราฟพบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวที่เป็นอิสระไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังนั้นสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน

3) การทดสอบสมมติฐานความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

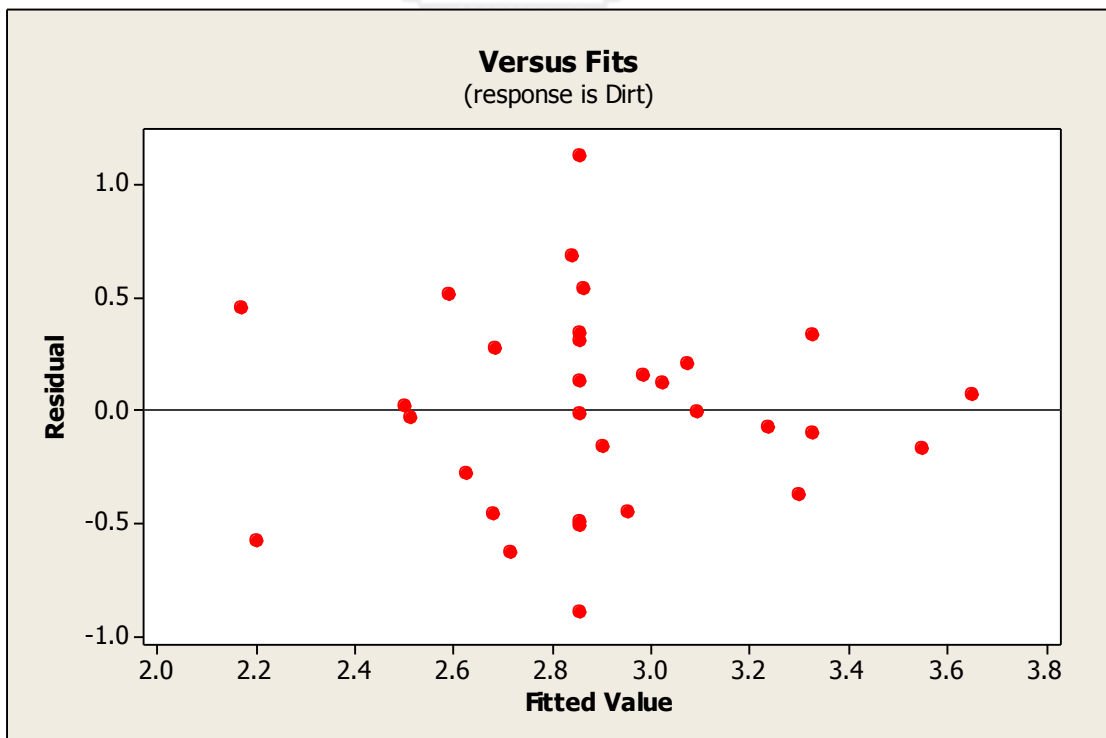
รูปที่ 4.17 เป็นการทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ ซึ่งพบว่าข้อมูลไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม หรือเป็นรูปแบบกรวยปากเปิด จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน



รูปที่ 4.15 Probability Plot ของค่าสิ่งปนเปื้อน



รูปที่ 4.16 Residuals versus Order ของค่าสิ่งปนเปื้อน



รูปที่ 4.17 Residuals Versus Fitted value Plot ของสิ่งปนเปื้อน

4.2.4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองผ่านแล้ว จึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งได้ผลการวิเคราะห์ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองของสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ

Response Surface Regression: Dirt versus A, B, C, D

The analysis was done using coded units.

Estimated Regression Coefficients for Dirt

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2.87143	0.2278	12.607	0.000
A	0.15417	0.1230	1.253	0.228
B	-0.01250	0.1230	-0.102	0.920
C	-0.02917	0.1230	-0.237	0.816
D	-0.17083	0.1230	-1.389	0.184
A*A	-0.01890	0.1127	-0.168	0.869
B*B	-0.06890	0.1127	-0.611	0.550
C*C	0.00610	0.1127	0.054	0.957
D*D	0.10610	0.1127	0.942	0.360
A*B	-0.25625	0.1507	-1.701	0.108
A*C	-0.03125	0.1507	-0.207	0.838
A*D	0.15625	0.1507	1.037	0.315
B*C	0.06875	0.1507	0.456	0.654
B*D	0.00625	0.1507	0.041	0.967
C*D	0.08125	0.1507	0.539	0.597

S = 0.602605 PRESS = 21.0866

R-Sq = 37.30% R-Sq(pred) = 0.00% R-Sq(adj) = 0.00%

Analysis of Variance for Dirt

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	14	3.45698	3.45698	0.24693	0.68	0.763
Linear	4	1.29500	1.29500	0.32375	0.89	0.491
A	1	0.57042	0.57042	0.57042	1.57	0.228
B	1	0.00375	0.00375	0.00375	0.01	0.920
C	1	0.02042	0.02042	0.02042	0.06	0.816
D	1	0.70042	0.70042	0.70042	1.93	0.184
Square	4	0.52323	0.52323	0.13081	0.36	0.833
A*A	1	0.01516	0.01021	0.01021	0.03	0.869
B*B	1	0.18538	0.13575	0.13575	0.37	0.550
C*C	1	0.00078	0.00106	0.00106	0.00	0.957
D*D	1	0.32192	0.32192	0.32192	0.89	0.360
Interaction	6	1.63875	1.63875	0.27313	0.75	0.617
A*B	1	1.05062	1.05062	1.05062	2.89	0.108
A*C	1	0.01563	0.01563	0.01563	0.04	0.838
A*D	1	0.39063	0.39063	0.39063	1.08	0.315
B*C	1	0.07562	0.07562	0.07562	0.21	0.654
B*D	1	0.00062	0.00062	0.00062	0.00	0.967
C*D	1	0.10563	0.10563	0.10563	0.29	0.597

Residual Error	16	5.81012	5.81012	0.36313		
Lack-of-Fit	10	2.99583	2.99583	0.29958	0.64	0.747
Pure Error	6	2.81429	2.81429	0.46905		
Total	30	9.26710				

Unusual Observations for Dirt

Obs	StdOrder	Dirt	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	30	4.000	2.871	0.228	1.129	2.02 R

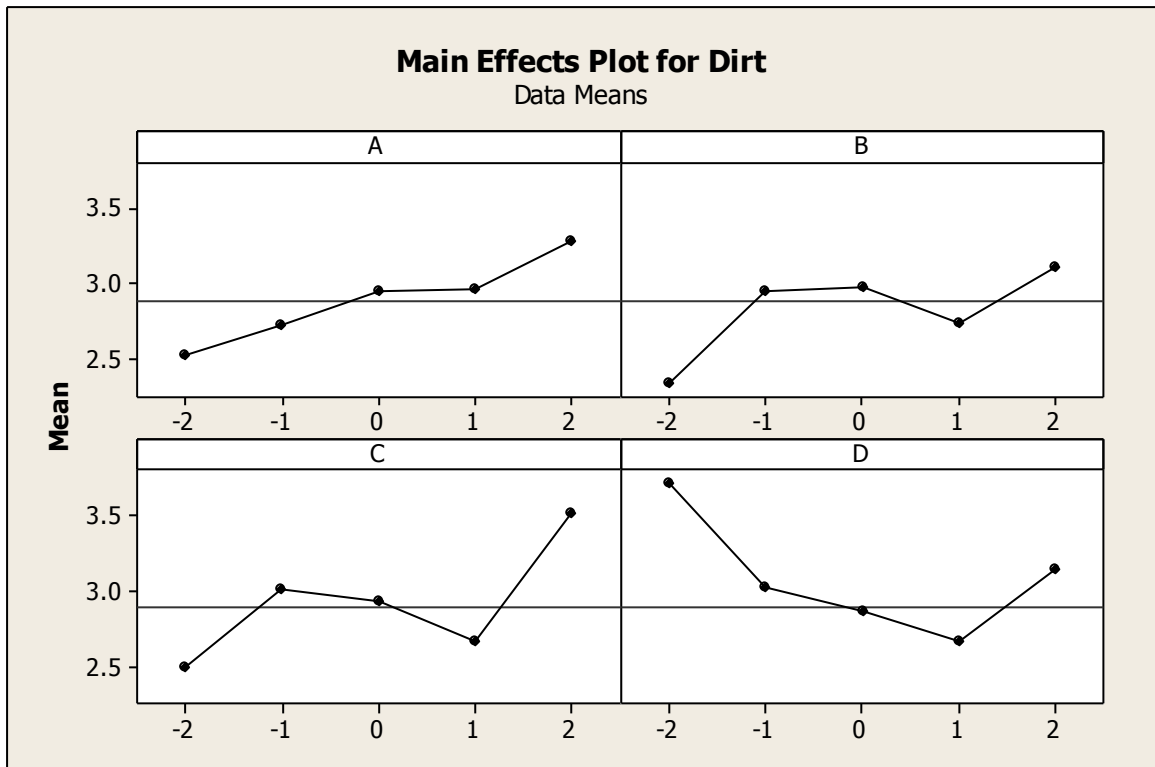
R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for Dirt using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	2.87143
A	0.154167
B	-0.0125000
C	-0.0291667
D	-0.170833
A*A	-0.0188988
B*B	-0.0688988
C*C	0.00610119
D*D	0.106101
A*B	-0.256250
A*C	-0.0312500
A*D	0.156250
B*C	0.0687500
B*D	0.00625000
C*D	0.0812500

ผลการวิเคราะห์การออกแบบ เพื่อพิจารณาปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ พบว่าไม่มีปัจจัยใดมีผลต่อค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

เมื่อนำข้อมูลมาทำ Main effects Plot เพื่อดูผลของปัจจัยหลักแต่ละตัว พบว่ากราฟของปริมาณ OWL (A) มีลักษณะที่เป็นแนวโน้ม เมื่อปริมาณ OWL เพิ่มขึ้นจะทำให้มีสิ่งปนเปื้อนเพิ่มขึ้นด้วย แต่จากข้อมูลการวิเคราะห์ได้ค่า P-Value เท่ากับ 0.228 จึงสรุปว่าปริมาณของ OWL ไม่มีผลต่อสิ่งปนเปื้อนในเยื่ออย่างมีนัยสำคัญ สำหรับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (B) อุณหภูมิ (C) และเวลา (D) มีลักษณะกราฟที่ไม่แสดงถึงการมีผลอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 Main Effect Plot ของค่าสิ่งปนเปื้อน

จากผลการทดลองสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตัวแปรตอบสนอง	ปัจจัยที่มีผล
ความขาวสว่างของเยื่อ (Brightness)	A, B, C, B*B, A*D
ความหนืดของเยื่อ (Viscosity number)	A, B
แคปป่า (Kappa no.)	A*A
สิ่งปนเปื้อนในเยื่อ (Dirt)	-

โดยที่

A คือ สัดส่วน OWL (%)

B คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (g/kg)

C คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

D คือ เวลา (นาที)

จากผลการทดลองพบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อค่าความความสว่างของเยื่อ แต่ไม่มีปัจจัยใดเลยที่มีผลต่อสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ โดยปริมาณของ OWL มีผลต่อตัวแปรตอบสนองมากที่สุด ทั้งความขาวสว่าง ความหนืด และแคปป่า ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง 2 ตัวคือความขาวสว่างของเยื่อ และความหนืดของเยื่อ อุณหภูมิมีผลต่อตัวแปรตอบสนองเพียงตัวเดียวคือความขาวสว่างของเยื่อ และเวลามีผลต่อตัวแปรตอบสนองเพียงตัวเดียวเช่นกันคือ ความขาวสว่างของเยื่อซึ่งมีผลในรูปของอันตรกิริยากับปริมาณของ OWL สำหรับตัวแปรตอบสนองเรื่องสิ่งปนเปื้อนนั้นไม่พบว่ามีปัจจัยทั้ง 4 มีผล เนื่องจากสิ่งปนเปื้อนส่วนใหญ่แล้วจะเกิดจากวัตถุดิบเช่นไม้ที่ใช้ในการผลิต ความสกปรกของเครื่องจักรเช่นความเสื่อมสภาพของตัวกรองสิ่งปนเปื้อน (Filter) การสะสมของคราบสกปรกของเครื่องจักรที่ไม่มีการล้างทำความสะอาดเป็นเวลานาน หรือแม้กระทั่งการทำสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ปะปนเข้าไปในกระบวนการผลิต ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อมีการใช้ OWL ในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้ทำให้เกิดสิ่งปนเปื้อนในระบบมากขึ้นหรือลดลงกว่าปกติ ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยทั้ง 4 ไม่มีผลต่อสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ

ในการผลิตเยื่อเพื่อส่งขายให้แก่ลูกค้าต้องพิจารณาคุณภาพของเยื่อทั้ง 4 ตัวแปร นั้นหมายถึงในการตั้งค่าปัจจัยนำเข้าในกระบวนการผลิตต้องคำนึงถึงทั้ง 4 ปัจจัย ซึ่งจากการทดลองพบความสัมพันธ์ของปัจจัยดังนี้คือ

1) ปริมาณของ OWL มีผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อโดยเป็นอันตรกิริยากับเวลาพบว่าเมื่อใช้เวลาในการฟอกเยื่อน้อย การใช้ปริมาณที่แตกต่างกันของ OWL จะไม่มีผลต่อความขาวสว่าง แต่ถ้าหากใช้เวลาในการฟอกเยื่อนานขึ้นเมื่อมีการใช้ OWL เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างลดลง ถ้ามีการใช้ OWL เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความหนืดของเยื่อเพิ่มมากขึ้น สำหรับผลของปริมาณ OWL ต่อค่าแคปป่านั้นพบว่ามีผลในรูปของกำลังสอง (A^2) กล่าวคือเมื่อมีการใช้ OWL ในปริมาณน้อยจะได้ค่าแคปป่าสูง และเมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นจะทำให้ค่าแคปป่าค่อยๆ ลดต่ำลงจนถึงจุดจุดหนึ่ง (ประมาณที่ระดับ 50 %) และจะเปลี่ยนเป็นสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ OWL มากขึ้น แต่การใช้ OWL 100% ก็ไม่ทำให้ความสว่างของเยื่อต่ำกว่าค่ากำหนดที่ 81-85 % รวมถึงค่าความหนืดและค่าแคปป่าก็อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเช่นกัน

ซึ่ง OWL นั้นมีสารที่เคมีเจือปนที่สามารถทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ ดังที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 1 ทำให้ความสามารถในการฟอกเยื่อลดลง หากใช้เวลาในการฟอกมาก จะมีโอกาสที่สารเจือปนเหล่านั้นจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้มาก เยื่อก็จะมีแสงสว่างที่น้อยลง และความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่น้อยลง ทำให้อัตราการทำลายเส้นใยน้อยลงด้วย

2) ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อใช้เพิ่มขึ้นจะทำให้เยื่อมีความขาวสว่างมากขึ้น ความหนืดของเยื่อจะลดลง เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความสามารถในการฟอกสีที่ดี แต่

มีความรุนแรงด้วยเช่นกันซึ่งเมื่อใช้ในปริมาณที่มากก็จะไปทำลายเส้นใยของเซลลูโลสได้มาก จึงทำให้เยื่อมีความหนืดลดลง ซึ่งการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ 2 ทำให้ค่าความสว่างเพิ่มขึ้นสูงเกือบเท่าขอบเขตบนของค่ากำหนด และทำให้ความหนืดลดต่ำลงจนเกือบถึงขอบเขตล่างของค่ากำหนด

3) การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มมากขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4) เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อไม่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเยื่อทั้ง 4 พารามิเตอร์แต่จะมีผลในรูปของอันตรกิริยากับปริมาณ OWL ต่อความขาวสว่างของเยื่อ ดังที่ได้กล่าวในข้อที่ 1

ดังนั้นในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อในขั้นตอน EP นี้ ต้องทำการพิจารณาทั้ง 4 ปัจจัยให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองตามต้องการ เนื่องจากการเพิ่มหรือลดปัจจัยบางตัวจะมีผลทำให้ตัวแปรตอบสนองแต่ละตัวได้ผลที่ขัดแย้งกัน เช่น ต้องการค่ากำหนดของปัจจัย A เพื่อให้ได้ค่าความขาวสว่างที่สูงๆ แต่ในขณะเดียวกันก็จะทำให้ได้ค่าความหนืดที่ลดลง ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ ดังนั้นจึงต้องหาสภาวะที่เหมาะสมที่จะให้ตัวแปรตอบสนองทุกตัวได้ค่าตามต้องการ ซึ่งในการหาสภาวะที่เหมาะสมนี้จะใช้เทคนิค การหาจุดที่เหมาะสม (optimization)

4.3 การหาจุดที่เหมาะสม (optimization)

เนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงมีความแปรปรวนค่อนข้างสูง อันเนื่องมาจากความแปรปรวนของวัตถุดิบ เช่นชนิดของไม้ที่ใช้ คุณภาพของสารเคมีที่ใช้ รวมถึงประสิทธิภาพต่างๆของเครื่องจักร อีกทั้งการผลิตของโรงงานกรณีศึกษาเป็นการผลิตที่มีกำลังการผลิตสูง การควบคุมคุณภาพจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก ทำให้ค่ากำหนดของคุณภาพของเยื่อจึงมีการกำหนดเป็นช่วง เพื่อรองรับความแปรปรวนที่จะเกิดขึ้นด้วยสาเหตุต่างๆ ข้างต้น ดังนั้นในการกำหนดค่าวัตถุประสงค์ ค่าน้ำหนัก และค่าความสำคัญของแต่ละตัวแปรตอบสนอง จะมีข้อพิจารณาในการกำหนดโดยแต่ละผลตอบ เราสามารถกำหนดน้ำหนัก ได้ตั้งแต่ 0.1 ถึง 10 เพื่อที่จะลดหรือเพิ่มความสำคัญต่อเป้าหมาย

1. การกำหนดน้ำหนักน้อยกว่า 1 (ต่ำสุด 0.1) คือการให้ความสำคัญของเป้าหมาย (target) น้อยกว่าขอบเขต (bounds)
2. การกำหนดน้ำหนักเท่ากับ 1 คือการให้ความสำคัญของเป้าหมายเท่ากับขอบเขต
3. การกำหนดน้ำหนักมากกว่า 1 (สูงสุด 10) คือการให้ความสำคัญของเป้าหมายมากกว่าขอบเขต

การกำหนดระดับความสำคัญของแต่ละผลตอบ เพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม โดยที่ระดับของแต่ละผลตอบจะต้องกำหนดให้อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 ถ้าผลตอบทุกตัวมีความสำคัญเท่ากัน ใช้ค่า

กำหนดคือ 1 สำหรับผลตอบแต่ละตัว หากมีผลตอบตัวใดที่มีความสำคัญมากกว่าตัวอื่น เราสามารถกำหนดให้แต่ละตัวมีค่าที่แตกต่างกันได้ โดยค่าที่มากขึ้นหมายถึงมีความสำคัญมาก ค่าที่น้อยลงหมายถึงมีความสำคัญน้อย

ดังนั้นสามารถกำหนดค่าได้ดังนี้

1. ค่าความขาวสว่าง กำหนด Goal แบบ Target โดยกำหนด Lower ที่ 81.0 กำหนด Target ที่ 83.0 กำหนด Upper ที่ 85.0 และกำหนด Weight ที่ 10 Important ที่ 10
2. ค่าความหนืด กำหนด Goal แบบ Maximize โดยกำหนด Lower ที่ 500 กำหนด Target ที่ 540 และกำหนด Weight ที่ 1 Important ที่ 1
3. ค่าแคปป่า กำหนด Goal แบบ Target โดยกำหนด Lower ที่ 1.5 กำหนด Target ที่ 2.25 กำหนด Upper ที่ 3.0 และกำหนด Weight ที่ 10 Important ที่ 1
4. ค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ กำหนด Goal แบบ Minimize โดย Target ที่ 0 กำหนด Upper ที่ 5.0 และกำหนด Weight ที่ 1 Important ที่ 1

เมื่อกำหนดเป้าหมายแต่ละแบบให้แก่ผลตอบแต่ละตัว รวมถึงกำหนดน้ำหนักและความสำคัญครบแล้ว จะใช้คำสั่ง Response Optimizer ด้วยโปรแกรม Minitab เพื่อหาจุดที่เหมาะสมในการตั้งค่าตัวแปรแต่ละตัว ซึ่งผลการวิเคราะห์ได้ค่าที่เหมาะสมของสัดส่วน OWL ต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์ (A) ที่ระดับ -0.63 ค่าที่เหมาะสมของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ -2.00 ค่าที่เหมาะสมของอุณหภูมิที่ระดับ 1.10 และค่าที่เหมาะสมของเวลาที่ระดับ 1.56 ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 Response Optimization

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Brightness	Target	81.0	83.00	85	10	10
Viscosity	Maximum	500.0	540.00		1	1
Kappa no.	Target	1.5	2.25	3	10	1
Dirt	Minimum		0.00	5	1	1

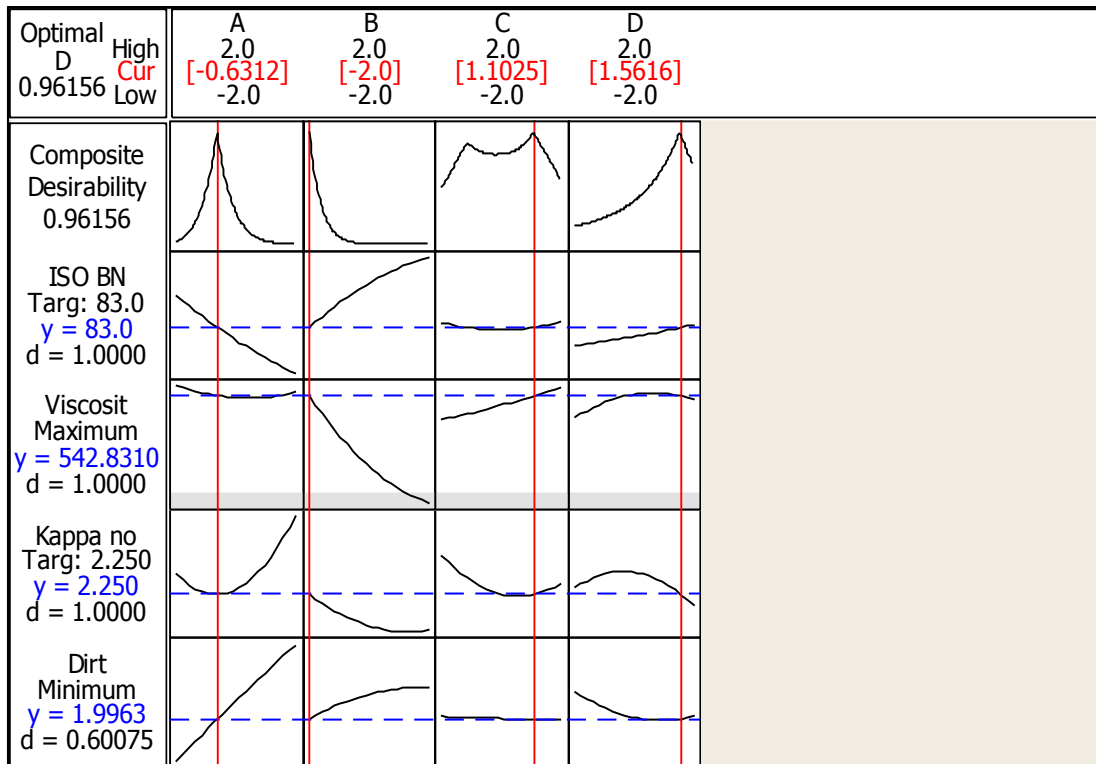
Global Solution

A = -0.631182
 B = -2
 C = 1.10250
 D = 1.56164

Predicted Responses

ISO BN = 83.000 , desirability = 1.000000
 Viscosity = 542.831 , desirability = 1.000000
 Kappa no. = 2.250 , desirability = 1.000000
 Dirt = 1.996 , desirability = 0.600749

Composite Desirability = 0.961560



รูปที่ 4.19 Optimization Plot

จากการวิเคราะห์ด้วยคำสั่ง Response Optimizer สามารถสรุปการตั้งค่าปัจจัยที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม

สัญลักษณ์ ของปัจจัย	ชื่อปัจจัย	ระดับที่ เหมาะสม (Coded Units)	ระดับที่เหมาะสม	หน่วย
A	สัดส่วน OWL	-0.63	34	%
B	ปริมาณไฮโดรเจน เปอร์ออกไซด์	-2.00	6	g/kg
C	อุณหภูมิ	1.10	85.5	°C
D	เวลา	1.56	93	min

จากตารางที่ 4.8 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. สามารถใช้ OWL แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์บริสุทธิ์ได้ถึง 34 % นั้นหมายความว่า จะประหยัดค่าใช้จ่ายในการซื้อโซเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณวันละ 40,256 บาท (คิดที่ กำลังการผลิต 800 ตันต่อวัน)
แสดงการคำนวณ
ที่กำลังการผลิตประมาณ 800 ตันแห้ง/วัน ใช้ OWL 34% แสดงว่าประหยัด โซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 34% หรือ 3.4 g/kg ดังนั้นลดค่าใช้จ่ายในการซื้อวันละประมาณ 2.72 ตัน ราคา NaOH 14.8 บาท/กิโลกรัม ประหยัดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 40,256 บาท/วัน
2. จากสถานะปกติจะใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เท่ากับ 10 กรัมต่อกิโลกรัม ดังนั้น จะสามารถประหยัดการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้ 4 g ต่อการฟอกเยื่อ 1 กิโลกรัม นั้นหมายถึงสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณวันละ 70,400 บาท (คิดที่กำลังการผลิต 800 ตันต่อวัน)
แสดงการคำนวณ
กำลังการผลิตประมาณ 800 ตันแห้ง/วัน ประหยัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์วันละ 4 g/kg ดังนั้นลดค่าใช้จ่ายในการซื้อวันละประมาณ 3.2 ตัน ราคาไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 22 บาท/กิโลกรัม จะประหยัดค่าใช้จ่ายประมาณ 70,400 บาท/วัน
3. อุณหภูมิและเวลาที่เหมาะสม ไม่มีความแตกต่างจากกระบวนการฟอกเยื่อที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งค่าที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์หมีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับค่าที่ใช้ในกระบวนการ ปัจจุบัน แสดงว่าอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิตในปัจจุบันมีความเหมาะสม แล้ว อุณหภูมิที่ใช้ในการฟอกเยื่อในกระบวนการปัจจุบันเท่ากับ 85 ± 5 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อ ในกระบวนการปัจจุบันเท่ากับ 90 ± 5 นาที

4.4 การวิเคราะห์การถดถอย

หลังจากที่วิเคราะห์หาจุดที่เหมาะสมแล้ว เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าต่อผลตอบแต่ละตัว ผู้วิจัยจึงได้วิเคราะห์สมการถดถอย ได้ผลดังนี้

- 1) แบบจำลองการถดถอยจากวิธี stepwise regression เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างกับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงตามสมการ

$$Y_1 = 83.61 - 0.196A + 0.352B + 0.063C - 0.168A*D - 0.060B^2$$

- 2) แบบจำลองการถดถอยจากวิธี stepwise regression เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนืดกับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงตามสมการ

$$Y_2 = 520 + 3.9A - 5.1B$$

- 3) แบบจำลองการถดถอยจากวิธี stepwise regression เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแคปป์กับปัจจัยที่มีนัยสำคัญ ได้ความสัมพันธ์ดังแสดงตามสมการ

$$Y_3 = 2.223 + 0.052A*A$$

เมื่อ

Y_1 คือ ความขาวสว่างของเยื่อ (%)

Y_2 คือ ความหนืดของเยื่อ (mL/g)

Y_3 คือ ค่าแคปป์ของเยื่อ

A คือ สัดส่วน OWL ต่อ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (%)

B คือ ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (กรัมต่อกิโลกรัม)

C คือ อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

D คือ เวลา (นาที)

บทที่ 5

การทดลองเพื่อยืนยันผลและวิเคราะห์ผลหลังการปรับปรุง

ผู้วิจัยได้นำผลที่วิเคราะห์ได้จาก การหาจุดที่เหมาะสม (optimization) ไปทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงเป็นเวลา 45 วัน โดยใช้การตั้งค่าของทั้ง 4 ปัจจัยนำเข้าตามตารางที่ 4.8 ผลการทดลองยืนยันผลแสดงดังตารางที่ 5.1

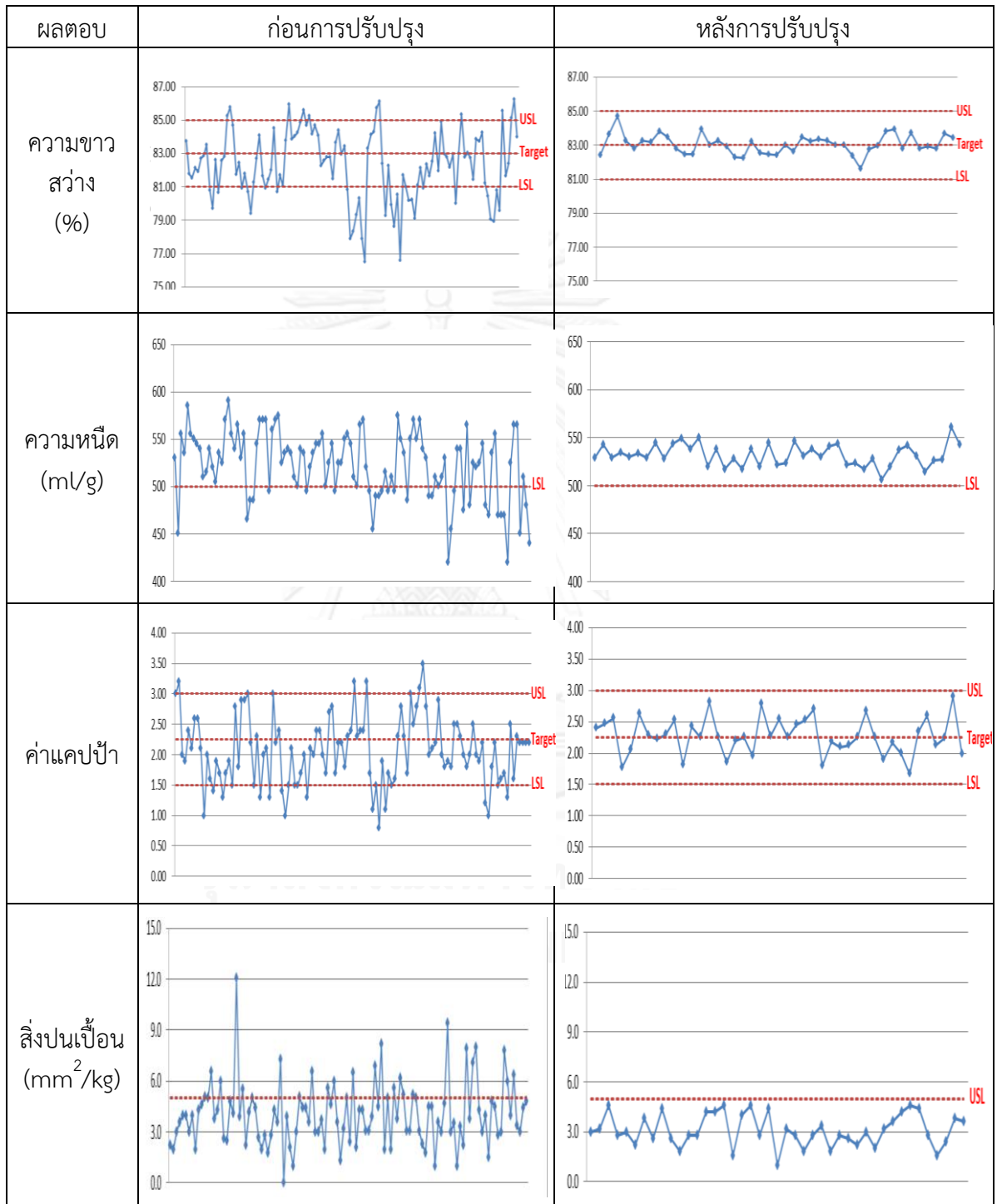
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองใช้การตั้งค่าใหม่สำหรับการพอกเยื่อ

Date	Brightness	Viscosity	Kappa no.	Dirt
1-Dec-13	82.44	529	2.40	3.0
2-Dec-13	83.66	543	2.46	3.2
3-Dec-13	84.69	529	2.55	4.6
4-Dec-13	83.27	535	1.76	2.8
5-Dec-13	82.80	530	2.05	3.0
6-Dec-13	83.29	534	2.63	2.2
7-Dec-13	83.17	529	2.28	3.8
8-Dec-13	83.82	545	2.22	2.6
9-Dec-13	83.47	528	2.30	4.4
10-Dec-13	82.81	544	2.52	2.6
11-Dec-13	82.48	549	1.81	1.8
12-Dec-13	82.47	538	2.42	2.8
13-Dec-13	83.93	550	2.25	2.8
14-Dec-13	83.01	520	2.81	4.2
15-Dec-13	83.26	538	2.25	4.2
16-Dec-13	82.93	517	1.85	4.6
17-Dec-13	82.28	528	2.20	1.6
18-Dec-13	82.24	517	2.25	4.0
19-Dec-13	83.24	538	1.95	4.6

ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองใช้การตั้งค่าใหม่สำหรับการฟอกเยื่อ (ต่อ)

Date	Brightness	Viscosity	Kappa no.	Dirt
20-Dec-13	82.54	520	2.78	2.8
21-Dec-13	82.45	545	2.27	4.4
22-Dec-13	82.44	522	2.54	1.0
23-Dec-13	83.00	524	2.25	3.2
24-Dec-13	82.63	546	2.45	2.8
25-Dec-13	83.47	531	2.52	1.8
26-Dec-13	83.23	538	2.70	2.8
27-Dec-13	83.35	530	1.80	3.4
28-Dec-13	83.26	541	2.18	1.8
29-Dec-13	83.02	544	2.09	2.8
30-Dec-13	83.01	522	2.12	2.6
31-Dec-13	82.37	524	2.25	2.2
1-Jan-14	81.64	517	2.67	3.0
2-Jan-14	82.77	528	2.25	2.0
3-Jan-14	82.96	506	1.89	3.2
4-Jan-14	83.83	520	2.16	3.6
5-Jan-14	83.96	537	2.00	4.2
6-Jan-14	82.79	542	1.66	4.6
7-Jan-14	83.75	531	2.34	4.4
8-Jan-14	82.79	514	2.60	2.8
9-Jan-14	82.94	526	2.12	1.6
10-Jan-14	82.82	527	2.24	2.4
11-Jan-14	83.69	561	2.89	3.8
12-Jan-14	83.44	543	1.98	3.6

จากผลการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า คุณภาพของเยื่อหลังการทดลองทุกตัวมีค่าอยู่ในเป้าหมาย หรือตรงตามค่ากำหนด (Specification) ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 5.1 พบว่าค่าความขาวสว่างเมื่อใช้การตั้งค่าปัจจัยใหม่ ได้ค่าที่อยู่ในช่วงค่ากำหนด เป็นอย่างดี ค่ามีการแกว่งเล็กน้อยแต่ก็ไม่ออกนอกขอบเขตที่ต้องการ ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการผลิตจริงนั้นมีปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หลายตัว เช่น คุณภาพของไม้ คุณภาพสารเคมีต่างๆ และประสิทธิภาพของกระบวนการก่อนหน้า เป็นต้น ซึ่งสิ่งเหล่านี้ทำให้ผลที่ได้มีการแกว่งขึ้นลง แต่จากการทดลองใช้จริงพบว่าผลที่ได้จากการทดลองสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงได้ ข้อมูลทางสถิติของค่าความขาวสว่างที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลทางสถิติของค่าความขาวสว่าง (%) ที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง

Specification		Mean	SD	Min	Max
81-85	Before	80.28	2.08	74.50	84.25
	After	83.06	0.58	81.64	84.69

ค่าความหนืดจากการนำผลการทดลองมาใช้ในกระบวนการผลิตจริงมีแนวโน้มที่ดี ซึ่งโดยปกติแล้วไม่มีขอบเขตกำหนดของค่าความหนืด แต่โดยทั่วไปหากมีค่าความหนืดที่มากกว่า 500 ml/g ก็ถือว่าดี ซึ่งจากการทดลองพบว่าไม่มีผลที่ได้ค่าต่ำกว่า 500 ml/g เลย ข้อมูลทางสถิติของค่าความหนืดที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลทางสถิติของค่าความหนืด (ml/g) ที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง

Specification		Mean	SD	Min	Max
≥ 500	Before	502	36.00	400	570
	After	532	11.40	506	561

ค่าแคปป่าที่ได้มีค่าอยู่ในขอบเขตที่กำหนด ข้อมูลทางสถิติของค่าความแคปป่าที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ข้อมูลทางสถิติของค่าแคปป่าที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง

Specification		Mean	SD	Min	Max
1.5-3.0	Before	2.06	0.56	0.80	3.50
	After	2.27	0.30	1.66	2.89

ค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อมีค่าไม่เกินค่ากำหนดที่ $5 \text{ mm}^2/\text{kg}$ ทั้งนี้พบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้มีค่าค่อนข้างสูงกว่าค่าที่ได้จากการทำ Optimization เนื่องมาจากสิ่งปนเปื้อนในเยื่อนั้นจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของไม้ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งในแต่ละวันก็จะมีความแปรปรวนของคุณภาพไม้ค่อนข้างมาก และถึงแม้ว่าค่าสิ่งปนเปื้อนในขั้นตอนการฟอกด้วยเปอร์ออกไซด์นี้จะมีค่ามาก ก็ไม่กระทบถึงคุณภาพของเยื่อที่ได้ เพราะหลังจากขั้นตอนนี้ เยื่อที่ผลิตได้จะต้องทำการกรองผ่านเครื่องกรองสิ่งปนเปื้อน (Filter) อีก 2 ครั้ง ทำให้ค่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อที่ผลิตเสร็จแล้วมีค่าน้อย ไม่เกินค่าขอบเขตที่กำหนด ข้อมูลทางสถิติของค่าความสิ่งปนเปื้อนที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.5

จากการวิเคราะห์ผลด้วยวิธี ANOVA ในบทที่ 4 พบว่าไม่มีปัจจัยใดเลยที่มีผลต่อสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ จากผลการทดลองหลังจากนำการตั้งค่าของปัจจัยแบบใหม่ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง พบว่าสิ่งปนเปื้อนในเยื่อนั้นลดลง แต่ไม่สามารถสรุปได้ว่าเป็นผลมาจากการตั้งค่าใหม่ของปัจจัยทั้ง 4 เนื่องจากปัจจัยทั้ง 4 ไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสิ่งปนเปื้อนในเยื่อซึ่งได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้อแล้ว เหตุผลที่สิ่งปนเปื้อนมีแนวโน้มที่ลดลงอาจจะเกิดจากช่วงการทดลองที่ใช้เวลาไม่นานนัก และเป็นช่วงที่คุณภาพของไม้ที่ใช้ผลิตเยื่อมีคุณภาพที่ดี ไม่มีความแปรปรวน

ตารางที่ 5.5 ข้อมูลทางสถิติของค่าสิ่งปนเปื้อน (mm^2/kg) ที่ได้จากการทดลองใช้ในกระบวนการผลิตจริง

Specification		Mean	SD	Min	Max
< 5.0	Before	4.34	2.93	1.30	26.00
	After	3.11	0.96	1.00	4.60

เราสามารถหาสถานะที่เหมาะสมได้อีกหนึ่งวิธี โดยไม่นำค่าสิ่งปนเปื้อนมาพิจารณา ประกอบการหาจุดที่เหมาะสม ผลที่ได้จากการหาจุดที่เหมาะสมวิธีใหม่นี้ ได้ระดับที่เหมาะสมคือ สัดส่วนของ OWL (A) ที่ระดับ 0.14 ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ -1.33 ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมเท่ากับ 0.62 และระดับของเวลาที่เหมาะสมเท่ากับ -1.0 ซึ่งเมื่อนำจุดที่เหมาะสมใหม่นี้ไปแทนค่าในสมการถดถอยตามผลการวิเคราะห์ในหัวข้อ 4.4 พบว่าให้ค่าผลตอบแต่ละตัวที่ไม่แตกต่างกันจาก ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีเดิม

บทที่ 6

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาที่กระบวนการพอกเยื่อชั้นตอนการพอกด้วยเปอร์ออกไซด์ ในอุตสาหกรรมการผลิตเยื่อ ซึ่งในขั้นตอนนี้ใช้สารเคมีสองชนิดได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำยาต้มเยื่อที่ถูกรอกออกซิไดส์ (OWL) มาใช้แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่ง OWL นั้นเป็นสารเคมีที่สามารถผลิตเองได้ในกระบวนการผลิตเยื่อ และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่าต้นทุนในการซื้อโซเดียมไฮดรอกไซด์มาใช้มาก ขั้นตอนการทดลองใช้แบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) จากนั้นวิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และหาสมการด้วย เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย (regression) จากนั้นวิเคราะห์หาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองตามต้องการด้วย วิธีการหาจุดที่เหมาะสม (optimization) และนำผลไปใช้ในการตั้งค่าตัวแปรในกระบวนการผลิตจริงเป็นเวลา 45 วันเพื่อทดสอบยืนยันผลการทดลอง

ซึ่งผลจากการทดลองพบความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยที่มีต่อผลตอบทั้ง 4 ดังนี้คือ

1. ปริมาณของ OWL มีผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อโดยเป็นอันตรกิริยากับเวลา พบว่าเมื่อใช้เวลาในการพอกเยื่อน้อย การใช้ปริมาณที่แตกต่างกันของ OWL จะไม่มีผลต่อความขาวสว่าง แต่ถ้าหากใช้เวลาในการพอกเยื่อนานขึ้นเมื่อมีการใช้ OWL เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างลดลง ถ้ามีการใช้ OWL เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความหนืดของเยื่อเพิ่มมากขึ้น สำหรับผลของปริมาณ OWL ต่อค่าแคปป่านั้นพบว่าเมื่อมีการใช้ OWL เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ค่าแคปป่าสูงขึ้น กล่าวคือเมื่อมีการใช้ OWL ในปริมาณน้อยจะได้ค่าแคปป่าสูง และเมื่อเพิ่มปริมาณขึ้นจะทำให้ค่าแคปป่าค่อยๆ ลดต่ำลงจนถึงจุดจุดหนึ่ง (ประมาณที่ระดับ 50 %) และจะเปลี่ยนเป็นสูงขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณ OWL มากขึ้น แต่การใช้ OWL 100% ก็ไม่ทำให้ความขาวสว่างของเยื่อต่ำกว่าค่ากำหนดที่ 81-85 % รวมถึงค่าความหนืดและค่าแคปป่าก็อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดเช่นกัน
2. ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เมื่อใช้เพิ่มขึ้นจะทำให้เยื่อมีความขาวสว่างมากขึ้น ความหนืดของเยื่อจะลดลง ซึ่งการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ระดับ 2 ทำให้ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้นสูงเกือบเท่าขอบเขตบนของค่ากำหนด และทำให้ความหนืดลดต่ำลงจนเกือบถึงขอบเขตล่างของค่ากำหนด

3. การใช้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มมากขึ้น แต่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น
4. เวลาที่ใช้ในการฟอกเยื่อไม่มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของเยื่อทั้ง 4 พารามิเตอร์แต่จะมีผลในรูปของอันตรกิริยากับปริมาณ OWL ต่อความขาวสว่างของเยื่อ ดังที่ได้กล่าวในข้อที่ 1

จากผลการหาจุดที่เหมาะสมพบว่าสามารถใช้ OWL แทนโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ 34% โดยยังได้ค่าความขาวสว่างตามค่าเป้าหมาย โดยใช้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 6 กิโลกรัมต่อเยื่อ 1 ตัน (6 kg/ton) อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 85 องศาเซลเซียส เวลาที่ใช้ 93 นาที ประหยัดค่าใช้จ่ายในการฟอกเยื่อจากวิธีเดิมได้วันละ 110,656 บาท (คิดที่กำลังการผลิต 800 ตันต่อวัน) ผลการทดลองใช้จริงในกระบวนการผลิตเป็นเวลา 45 วัน พบว่าคุณภาพของเยื่อได้ตามเป้าหมายที่กำหนดของโรงงาน นั่นคือได้ค่าความขาวสว่างเฉลี่ยเท่ากับ 83.06% ความหนืดเฉลี่ยเท่ากับ 532 ml/g ค่าแคปปาเฉลี่ยเท่ากับ 2.27 และค่าสิ่งปนเปื้อนเฉลี่ยเท่ากับ 3.11 mm²/kg

6.2 ข้อจำกัดและอุปสรรคในการทำงานวิจัย

- 1) ในงานวิจัยนี้ใช้ Oxidized white liquor ซึ่งผลิตในโรงงานที่ศึกษา โดยคุณภาพของ OWL ที่ใช้อาจมีความแตกต่างจากคุณภาพของโรงงานอื่นๆ ดังนั้นสัดส่วนที่เหมาะสมในการใช้งานหากคุณภาพของ OWL เปลี่ยนไป ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย ซึ่งสามารถศึกษาหาแนวโน้มได้จากข้อมูลในงานวิจัยนี้
- 2) ในงานวิจัยนี้ใช้วัตถุดิบหลัก ได้แก่ เยื่อในขั้นตอน D0 ซึ่งผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส โดยคุณภาพของเยื่อในขั้นตอน D0 แสดงดังตารางที่ 3.3 สัดส่วนที่เหมาะสมอาจมีการเปลี่ยนแปลงหากคุณภาพของเยื่อ D0 มีความแตกต่างจากคุณภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้

6.3 ข้อเสนอแนะในงานวิจัย

- 1) ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลกระทบโดยรวมของสารเคมีชนิดต่างๆที่อยู่ใน OWL ซึ่งหากมีการศึกษาถึงผลกระทบของสารแต่ละตัวที่ส่งผลต่อการฟอกเยื่อ ว่ามีสารตัวใดบ้าง ปริมาณเท่าใดที่จะส่งผลกระทบ จะเป็นประโยชน์มาก
- 2) ในงานวิจัยนี้ศึกษาคุณภาพของเยื่อ 4 พารามิเตอร์ได้แก่ ความขาวสว่าง ความหนืด ค่าแคปปา และสิ่งปนเปื้อนในเยื่อ ซึ่งหากมีการศึกษาถึงพารามิเตอร์อื่นเพิ่มเติมจะทำให้ได้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์มากขึ้น เช่น พีเอช ความยาวของเส้นใย ความแข็งแรงของเส้นใย ความสามารถในการอุ้มน้ำ เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- AYALA, V., MAGNOTTA, V., O'CZERNY, A., ZIERDT, J. R. & ZANCHIN, R. 1990. Evaluation of oxidized white liquor as an alkali source. *Oxygen Delignification Symposium*. Atlanta: Tappi Press.
- COLODETTE, J. L., CAMPOS, A. S. & GOMIDE, J. L. 1990. Attempts to use white liquor as the source of alkali in the oxygen delignification of Eucalypt kraft pulp. *Tappi Oxygen Delignification Symposium Notes*. Atlanta: Tappi press.
- FISKARI, J. P. T. 2000. Oxidized white liquor use in EOP stage. *Tappi journal* 83.
- HULTMAN, B. G. & NOREUS, S. E. O. 1977. *Method for producing oxidized white liquor*. U.S. patent application.
- HURST, M. M. 2000. The use of oxidized white liquor as a caustic replacement in O, Eo, Eop and E2 bleaching stage of kraft hardwood and softwood pulp. *Tappi journal* 83.
- JEMMA, N., DUHAMEL, M., VAN LIEROP, B., PALEOLOGOU, M., THOMPSON, R., BERRY, R., C., B. & M., S. 2003. Removal of sodium thiosulphate from partially oxidized white liquor and use of the thiosulphate-lean solution in bleaching. *Pulp and paper Canada* 104, 293-303.
- LEADER, J. P., LIM, H. H. K. & BYROM, G. B. 1986. Medium consistency oxygen delignification in an O (CD) (EO) D bleaching process for radiata pine kraft pulp. *Appita*, 39, 451.
- MONTGOMERY, D. C. 2013. *Design and Analysis of Experiments*, U.S, John Wiley & Sons, Inc.
- NYKANEN, T., PHILLIPS, J. R. & RICHARDSEN, J. 1994. *White liquor oxidation for bleach plant use*. New York patent application.
- PARPALA, H., DAHL, O., POHJANVESI, S., NYMAN, J., MUSTONEN, E., JAKARA, J. & NIINIMAKI, J. 2001. Use of fully oxidized white liquor as alkali source in oxygen based delignification and bleaching stages. *Tappi pulping conference*.
- SUESS, H. U., LEPORINI, C. & SCHMIDT, K. 2000a. Bleaching of Eucalyptus Kraft Pulp to Very High Brightness. *Pulp and Paper International Congress*. São Paulo.
- SUESS, H. U., SCHMIDT, K., DEL GROSSO, M. & MAHAGAONKAR, M. 2000b. Peroxide application in ECF sequences- a description of the state-of-art. *Appita*, 53, 116-121.
- ปารเมศ ชูติมา. 2545. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, กรุงเทพฯ, ด้านสุทธาการพิมพ์.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตัวย่อและชื่อเฉพาะที่ใช้ในงานวิจัยนี้

คำอธิบาย

WL	White liquor (น้ำยาต้มเยื่อ/น้ำยาขาว)
OWL	Oxidized white liquor (น้ำยาต้มเยื่อที่ถูกออกซิไดส์)
D0	การฟอกเยื่อด้วย Chlorine dioxide ครั้งที่ 1
D1	การฟอกเยื่อด้วย Chlorine dioxide ครั้งที่ 2
EP	การฟอกเยื่อด้วย Sodium hydroxide และ Hydrogen peroxide
H ₂ O ₂	Hydrogen peroxide (ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์)
NaOH	Sodium hydroxide (โซเดียมไฮดรอกไซด์)
Na ₂ S	Sodium Sulfide (โซเดียมซัลไฟด์)
Na ₂ S ₂ O ₃	Sodium thiosulfate (โซเดียมไธโอซัลเฟต)
Na ₂ CO ₃	Sodium carbonate (โซเดียมคาร์บอเนต)
ClO ₂	Chlorine dioxide (คลอรีนไดออกไซด์)

ภาคผนวก ข

ผลการวิเคราะห์ความถดถอยด้วยวิธี Stepwise regression

1. Stepwise regression of Brightness

Stepwise Regression: Brightness versus A, B, C, D, B*B, A*D

Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05

Response is Brightness on 6 predictors, with N = 31

Step	1	2	3	4	5
Constant	83.56	83.56	83.56	83.61	83.61
B	0.352	0.352	0.352	0.352	0.352
T-Value	6.61	8.89	11.51	12.41	13.53
P-Value	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A		-0.196	-0.196	-0.196	-0.196
T-Value		-4.94	-6.39	-6.89	-7.52
P-Value		0.000	0.000	0.000	0.000
A*D			-0.168	-0.168	-0.168
T-Value			-4.47	-4.81	-5.25
P-Value			0.000	0.000	0.000
B*B				-0.060	-0.060
T-Value				-2.32	-2.53
P-Value				0.028	0.018
C					0.063
T-Value					2.43
P-Value					0.023
S	0.261	0.194	0.150	0.139	0.128
R-Sq	60.13	78.69	87.74	89.85	91.79
R-Sq(adj)	58.76	77.17	86.38	88.29	90.15
Mallows Cp	89.7	37.4	12.9	8.7	5.0

สมการความสัมพันธ์

$$Y = 83.61 - 0.196A + 0.352B + 0.063C - 0.168A*D - 0.060B^2$$

2. Stepwise regression of Viscosity

Stepwise Regression: Viscosity versus A, B, C, D

Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05

Response is Viscosity on 4 predictors, with N = 31

Step	1	2
Constant	520.0	520.0
B	-5.1	-5.1
T-Value	-3.74	-4.32
P-Value	0.001	0.000
A		3.9
T-Value		3.27
P-Value		0.003
S	6.71	5.81
R-Sq	32.58	51.20
R-Sq(adj)	30.25	47.72
Mallows Cp	11.6	2.9

สมการความสัมพันธ์

$$Y = 520 + 3.9A - 5.1B$$

3. Stepwise regression of Kappa no.

Stepwise Regression: Kappa no. versus A, B, C, D, A*A

Alpha-to-Enter: 0.05 Alpha-to-Remove: 0.05

Response is Kappa no. on 5 predictors, with N = 31

Step	1
Constant	2.223
A*A	0.052
T-Value	2.99
P-Value	0.006
S	0.0949
R-Sq	23.53
R-Sq(adj)	20.89
Mallows Cp	2.8

สมการความสัมพันธ์

$$Y = 2.223 + 0.052A^2$$

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพนพนัย ขจรไพศาล เกิดวันที่ 16 พฤศจิกายน 2529 ที่จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2551 หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานในตำแหน่งนักวิจัยในบริษัทแห่งหนึ่ง และในปี 2555 ได้เข้าศึกษาปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY