



KKU Engineering Journal

<http://www.en.kku.ac.th/enjournal/th/>

การลดความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างและค่าความเป็นกรดต่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษ

Variation reduction of brightness and pH of pulp sent to a paper mill

นภัสสงศ์ โรจนโรวรรณ* และ ณัฐพร สุขป้อม

Napassavong Rojanarowan* and Nattaporn Sookpom

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand.

Received April 2014

Accepted June 2014

บทคัดย่อ

ความแปรปรวนของค่าความขาวสว่างและค่าความเป็นกรดต่างของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อแผ่นแห้งส่งผลต่อการควบคุมสารเคมีปรับแต่งคุณภาพกระดาษที่โรงผลิตกระดาษ งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะหาสูตรการผสมเยื่อที่มีค่าความขาวสว่างและค่าความเป็นกรดต่างเริ่มต้นแตกต่างกันจากขั้นตอน EOP และ D₁ เพื่อรองรับความแปรปรวนที่อาจเกิดขึ้นโดยใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมด้วยวิธีหาพื้นผิวผลตอบแบบประสม ส่วนกลาง ร่วมกับการใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยและเทคนิคการหาสภาวะที่เหมาะสม ในการหาจุดที่เหมาะสมของสูตรการผสมเยื่อในแต่ละช่วงความขาวสว่าง 7 ช่วง โดยในการออกแบบการทดลองมีการกำหนดปัจจัยนำเข้า คือ อัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดซัลฟูริก นำไปกำหนดเป็นสูตรการผสมเยื่อของแต่ละช่วงค่าความขาวสว่าง เพื่อให้เยื่อหลังการผสมมีค่าความขาวสว่างอยู่ที่ 86% และค่า pH อยู่ที่ 5.25 ตามที่โรงกระดาษต้องการ จากผลการทดลอง พบว่าเมื่ออัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP สูงขึ้น ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมลดลงและมีค่า pH สูงขึ้น และเมื่อใช้กรดเพิ่มขึ้นจะทำให้เยื่อหลังผสมมีค่า pH ลดลง และทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อมีค่าลดลงในบางชุดการทดลอง เมื่อนำค่าระดับที่เหมาะสมของอัตราการผสมเยื่อและปริมาณกรดซัลฟูริกที่ได้จากเทคนิคการหาสภาวะที่เหมาะสมไปใช้ในสายการผลิตจริงพบว่าสามารถทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อส่งโรงผลิตกระดาษมีค่าใกล้เคียงเป้าหมายที่กำหนดมากขึ้นและมีความแปรปรวนลดลงกว่าก่อนการปรับปรุง จากเดิมค่าความขาวสว่างมีค่าเฉลี่ย 87.4% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.09 เมื่อปรับปรุงกระบวนการค่าเฉลี่ยค่าความขาวสว่างของเยื่อลดลงเหลือ 86.3% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงเป็น 0.46 โดยการปรับปรุงกระบวนการดังกล่าวไม่กระทบต่อคุณภาพเยื่อแห้งเกรดอื่น

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม พื้นผิวผลตอบ การลดความแปรปรวน เยื่อส่งโรงกระดาษ

Abstract

The variance of the brightness of pulp sent to the paper mill during the changing period of dry pulp grades affects the chemical control in the paper mill. This research aims to determine the mixing formula of pulp with different brightness from the EOP and D₁ stages to handle this variation issue. This research uses response surface design with Central Composite Design type, regression technique and optimization technique to find

* Corresponding author.

Email address: napassavong.o@chula.ac.th* (Rojanarowan, N.), nattaporn.soo@gmail.com (Sookpom, N.)

doi: 10.14456/kkuenj.2015.8

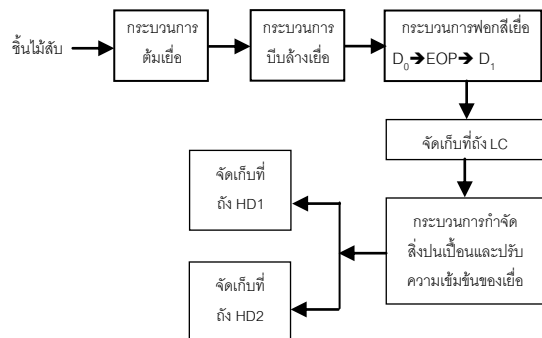
the optimal setting of the mixing formula for each of the seven brightness levels to obtain the target brightness of 86% and the pH of 5.25. The mixing formulas are determined by the pulp mixing percentage and the sulfuric acid consumption. The experimental results reveal that when using higher EOP mixing ratio, the brightness decreases and the pH increases. Regarding the effect of the sulfuric acid, increasing the sulfuric acid makes the brightness and the pH decrease. After implementing the optimal formula in the production line, the mean of pulp brightness is closer to the target compared with the brightness before improvement and the brightness variation decreases without affecting the quality of other pulp grades, average of brightness decreased from 87.4% to 86.3% and standard deviation of brightness decreased from 1.09 to 0.46.

Keywords : Design of experiment, Response surface design, Variation reduction, Pulp to paper mill

1. บทนำ

กระบวนการผลิตเยื่อและกระดาษจากซังไม้ดิบ [1] มีการใช้สารเคมีหลากหลายประเภทเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของกระดาษให้ได้ตรงความต้องการของลูกค้า ซึ่งการใช้สารเคมีเพื่อปรับสมบัติของกระดาษในขั้นตอนสุดท้ายจะขึ้นอยู่กับคุณภาพเยื่อเริ่มต้นที่นำมาขึ้นรูป ดังนั้นในโรงงานผลิตเยื่อและกระดาษจึงให้ความสำคัญกับการควบคุมคุณภาพเยื่อก่อนเข้าโรงผลิตกระดาษให้เป็นเยื่อที่มีคุณสมบัติตามเกณฑ์ที่กำหนด เพื่อให้การควบคุมกระบวนการผลิตกระดาษเป็นไปโดยง่ายดาย และสามารถลดการสิ้นเปลืองสารเคมีจากการปรับแต่งเยื่อที่ไม่ได้คุณภาพ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีวัตถุดิบ คือ ซังไม้ดิบนำไปผ่านกระบวนการต้ม บีบล้าง และฟอกสีเยื่อ จนได้คุณภาพที่ต้องการ ซึ่งในกระบวนการฟอกเยื่อจะมีขั้นตอนย่อยคือ การฟอกด้วยคลอรีนไดออกไซด์ลำดับที่ 1 (D_0) การฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนในสภาวะต่าง (EOP) และการฟอกด้วยคลอรีนไดออกไซด์ลำดับที่ 2 (D_1) [2] ซึ่งจะมีสภาวะการฟอกที่แตกต่างกันและมีค่าความขาวสว่างของเยื่อเพิ่มขึ้นตามลำดับ โดยแต่ละขั้นตอนย่อยของกระบวนการฟอกเยื่อจะมีค่าความขาวสว่างและค่า pH ดังนี้ ค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วง 68-72% มากกว่า 77% และ มากกว่า 85% ตามลำดับ ส่วนค่า pH ของเยื่อจะมีค่าอยู่ในช่วง 2.8-3.2 10.5-11.5 และ 3.8-5.5 ตามลำดับ จนเสร็จสิ้นกระบวนการฟอกจึงนำไปจัดเก็บแยกถัง เพื่อนำไปขึ้นรูปเป็นเยื่อแผ่นแห้งที่โรงผลิตเยื่อแผ่นแห้งและขึ้นรูปเป็นกระดาษที่โรงผลิตกระดาษ ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการผลิตเยื่อ

ซึ่งในกระบวนการผลิตเยื่อจะมีสายการผลิตเพียงหนึ่งสายการผลิต คือ กระบวนการต้มและฟอกเยื่อที่สามารถปรับแต่งคุณภาพเยื่อก่อนออกจากกระบวนการผลิตเพื่อส่งให้โรงผลิตเยื่อแผ่นแห้งและโรงผลิตกระดาษได้ แต่เนื่องจากในการผลิตเยื่อแผ่นแห้งจะมีการผลิตเยื่อหลายเกรดโดยแยกเกรดตามค่าความขาวสว่างปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อ และคุณสมบัติด้านอื่นๆ ตามที่ลูกค้ากำหนด แต่สำหรับการผลิตกระดาษมีการผลิตกระดาษเพียงเกรดเดียวจึงต้องการเยื่อซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่มีคุณภาพตามเกณฑ์ ทั้งค่าเฉลี่ย (average) และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) โดยมีปัจจัยทั้งหมด 5 ปัจจัยที่โรงกระดาษต้องการ คือ 1) ค่าความขาวสว่าง (brightness) 2) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 3) ปริมาณสิ่งเจือปนในเยื่อ (dirt) 4) ค่าความหนืด (viscosity) และ 5) ค่าการระบายน้ำ (freeness) ซึ่งทุกปัจจัยจะมีการกำหนดเกณฑ์เป็นค่าเฉลี่ย แต่สำหรับค่าความขาวสว่างและค่า pH จะมีการควบคุมค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเป็นเกณฑ์ร่วม โดยเกณฑ์ค่าความขาวสว่างของ

เยื่อจะต้องมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 85-87% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 0.6 และค่า pH ของเยื่อต้องมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4.5-6.0 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานไม่เกิน 0.3 แสดงว่าโรงกระดาษต้องการเยื่อที่มีคุณภาพคงที่ในช่วงเวลาที่มีการรับเยื่อ แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตที่มีสายการผลิตเดียวร่วมกับการผลิตเยื่อแผ่นแห้งที่มีหลายเกรด ดังนั้นจึงเกิดปัญหาขึ้นระหว่างช่วงเวลาที่มีการเปลี่ยนเกรด จากเยื่อขาวสว่างพิเศษมาเป็นเยื่อเกรดมาตรฐานซึ่งเป็นช่วงเวลาที่คุณภาพเยื่อมีความแปรปรวนมาก โดยค่าความขาวสว่างมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 87.4% และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.09 ความแปรปรวนดังกล่าวส่งผลให้เกิดความสั่นเปลี่ยนในการปรับสารเคมีสำหรับการปรับแต่งสีของกระดาษ [3-5]

งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะทำการปรับปรุงคุณภาพเยื่อก่อนส่งให้โรงกระดาษโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงหลังขั้นตอนการฟอกเยื่อเพื่อรองรับความแปรปรวนของคุณภาพเยื่อในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อ โดยไม่เข้าไปเปลี่ยนแปลงกระบวนการฟอกเพราะโรงเยื่อยังคงต้องทำการผลิตเยื่อเกรดขาวสว่างพิเศษส่งโรงผลิตเยื่อแผ่นแห้ง จึงใช้แนวทางการผสมเยื่อ (mixed pulp) จากขั้นตอน EOP และ D_1 โดยจะทำการผสมเยื่อเมื่อคุณภาพเยื่อมีค่าความขาวสว่างสูงกว่าเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนดหรือมากกว่า 87% ให้มีค่าความขาวสว่างและค่า pH อยู่ในช่วงที่โรงกระดาษต้องการ ซึ่งจะใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรม (design of experiment, DOE) [6] ช่วยในการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อหาสูตรการผสมเยื่อของแต่ละช่วงความขาวสว่าง โดยมีตัวแปรที่ต้องการศึกษาคือ อัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP ในเยื่อจากขั้นตอน D_1 และปริมาณกรดซัลฟูริกที่เติมเพื่อปรับ pH ของเยื่อหลังการผสมให้อยู่ในช่วงที่ต้องการ

2. เครื่องมือและวิธีการทดลอง

การทดลองนี้ผู้วิจัยเลือกวิธีการหาพื้นผิวผลตอบ (response surface design) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Y_1 คือ ค่าความขาวสว่าง Y_2 คือ ค่า pH และค่า X_1 คือ อัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP และ X_2 คือ ปริมาณกรดซัลฟูริกที่เติม โดยจะทำการแบ่งค่าความขาวสว่างของเยื่อทั้งจากขั้นตอน EOP และ D_1 เป็นช่วงจัดทำ

เป็นชุดการทดลอง และจะหาค่าระดับของ X_1 และ X_2 ที่เหมาะสมกับค่าความขาวสว่างของเยื่อดั้งเดิมในแต่ละช่วงเนื่องจากในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดการผลิตเยื่อ ค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D_1 จะมีความผันแปรมาก การหาสภาวะที่เหมาะสมเพียงสูตรเดียวอาจไม่ครอบคลุมช่วงคุณภาพเยื่อทั้งหมด และเพื่อให้ง่ายต่อการนำไปปฏิบัติจริงในสายการผลิต จากนั้นทำการออกแบบการทดลองของแต่ละชุดการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของอัตราการผสมและปริมาณกรดซัลฟูริก ที่จะให้ได้ค่าความขาวสว่างและค่า pH ตามต้องการ

2.1. การแบ่งช่วงค่าความขาวสว่างของเยื่อ

ผู้วิจัยได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และเยื่อจากขั้นตอน D_1 เพื่อหาแนวทางการแบ่งระดับช่วงที่ต้องการศึกษา พบว่าค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP มีความสัมพันธ์กับค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน D_1 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.75 และมีค่า p-value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่า ค่าความขาวสว่างของเยื่อจากทั้งสองขั้นตอนมีความสัมพันธ์กันในระดับสูงอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการแบ่งช่วงค่าความขาวสว่างเพื่อหาสูตรการผสมเยื่อจะพิจารณาตามระดับค่าความขาวสว่างของเยื่อ D_1 นั่นคือหากพิจารณาทดลองในช่วงที่ค่า D_1 สูงขึ้น ก็จะทดลองตามระดับของค่าความขาวสว่างเยื่อจากขั้นตอน EOP ที่สูงขึ้นและมีความเป็นไปได้ตามความสัมพันธ์ โดยทำการแบ่งระดับค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน D_1 อย่างละเอียดช่วงระดับละ 1% เพราะเป็นขั้นตอนสุดท้ายในการปรับสภาวะเยื่อก่อนส่งให้โรงกระดาษ แต่สำหรับเยื่อจากขั้นตอน EOP จะแบ่งช่วงระดับละ 2% เพื่อลดจำนวนการทดลอง และไม่พิจารณาผสมเยื่อเมื่อค่าความขาวสว่างของเยื่อ EOP มีค่ามากกว่า 85% เนื่องจากสามารถส่งเยื่อให้โรงกระดาษได้เลยโดยไม่ต้องทำการผสมเยื่อ ดังนั้นการแบ่งช่วงค่าความขาวสว่างสำหรับจัดชุดการผสมเยื่อจึงเป็นดังตารางที่ 1 และสามารถแสดงแผนผังของชุดการทดลองตามระดับความสัมพันธ์ของค่าความขาวสว่างได้ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 1 การแบ่งชุดการทดลองและแยกระดับค่าความขาวสว่างเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D1

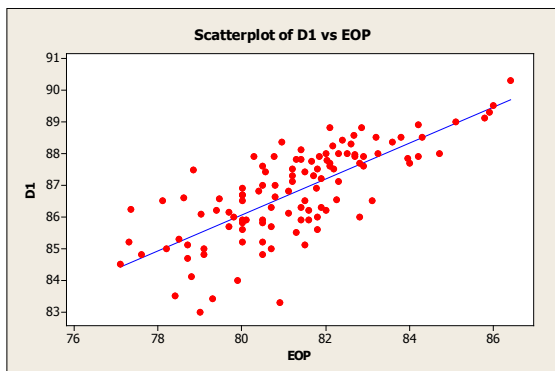
การทดลองชุดที่	เยื่อจากขั้นตอน EOP		เยื่อจากขั้นตอน D1	
	ระดับ	ช่วงความขาวสว่าง	ระดับ	ช่วงความขาวสว่าง
1	1	79.0-80.9	1	87.0-87.9
2	1	79.0-80.9	2	88.0-88.9
3	2	81.0-82.9	1	87.0-87.9
4	2	81.0-82.9	2	88.0-88.9
5	3	83.0-84.9	1	87.0-87.9
6	3	83.0-84.9	2	88.0-88.9
7	3	83.0-84.9	3	89.0-89.9

Correlations: EOP, D1

Pearson correlation of EOP and

D1 = 0.747

P-Value = 0.000



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และเยื่อจากขั้นตอน D₁

2.2. การกำหนดแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้การทดลองวิธีการหาพื้นผิวผลตอบ แบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design, CCD) รูปทรงกลม [7] เนื่องจากสามารถทดสอบและหาความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งได้ นอกจากนี้ยังลดจำนวนการทดลองให้มีจำนวนที่เหมาะสมกำหนดตัวแปรที่ต้องการศึกษาทั้งหมด 2 ตัวแปร X_1 คือ อัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP ต่อเยื่อจากขั้นตอน D₁ และ X_2 คือ ปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้ในการปรับ pH เยื่อหลังผสมในการทดลองทำการทดลองซ้ำที่จุดกึ่งกลางของการทดลอง

จำนวน 3 ครั้ง เพื่อให้สามารถประมาณค่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (random error) และสามารถทดสอบความสัมพันธ์เชิงเส้นโค้งได้ โดยสามารถออกแบบการทดลองได้ดังนี้

ตารางที่ 2 ตารางออกแบบการทดลอง

StdOrder	PtType	Blocks	X_1	X_2
1	1	1	-1.000	-1.000
2	1	1	1.000	-1.000
3	1	1	-1.000	1.000
4	1	1	1.000	1.000
5	-1	1	-1.414	1.000
6	-1	1	1.414	0.000
7	-1	1	0.000	0.000
8	-1	1	0.000	-1.414
9	0	1	0.000	1.414
10	0	1	0.000	0.000
11	0	1	0.000	0.000

จากตารางที่ 2 การออกแบบการทดลองดังกล่าวเป็นต้นแบบของการทดลองแต่ละชุด ซึ่งในการทดลองจริงของจะมีการสุ่มลำดับการทดลองเพื่อลดความผิดพลาดจากลำดับการวิเคราะห์สำหรับการทดลองทั้ง 7 ชุดซึ่งแยกตามระดับค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D₁

ในการกำหนดระดับของปัจจัยเพื่อทำการทดลอง อัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP คือ ร้อยละโดยน้ำหนักของปริมาณเยื่อจากขั้นตอน EOP ที่นำมาผสมเยื่อในเยื่อจากขั้นตอน D₁ เช่น อัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP 30% หมายถึง การนำเยื่อจากขั้นตอน EOP ร้อยละ 30 มาผสมกับเยื่อจากขั้นตอน D₁ ร้อยละ 70 ที่ความเข้มข้นของเยื่อทั้งสองมีค่าเท่ากัน และมีการปรับความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ใช้เติมในการทดลองมีความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 โมลต่อลิตรเพื่อให้เหมาะสมกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยระดับของการเติมกรดซัลฟิวริกในการทดลองชุดที่ 1 แตกต่างจากการทดลองชุดอื่นๆ เนื่องจากในการทดลองชุดที่ 1 เยื่อจากขั้นตอน D₁ ช่วงค่าความขาวสว่างเท่ากับ 87.0-87.9 ที่นำมาทำการผสมเป็นเยื่อที่มีค่า pH ต่ำกว่าเยื่อช่วงความขาวสว่างที่สูงกว่า เนื่องมาจากสภาวะการฟอกเยื่อที่ค่าความขาวสว่างสูงจะมีการฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในปริมาณมาก ซึ่งใน

สภาวะดังกล่าวต้องมีการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เพื่อปรับค่า pH ให้มีความเป็นด่างเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาจึงทำให้เยื่อที่มีค่าความขาวสว่างสูงกว่าหรือมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกมากกว่า จะมีค่า pH สูงกว่าเยื่อที่ไม่ได้ใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ดังนั้นจึงมีการปรับระดับของปัจจัยให้สอดคล้องกับค่า pH ของเยื่อที่นำมาผสมดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การระบุค่าของปัจจัยนำเข้าตามระดับการทดลอง

ระดับของ ปัจจัย	ร้อยละของเยื่อจากชั้น ตอน EOP ที่ใช้ผสม (%)	ปริมาณกรด H ₂ SO ₄ 0.05M (ml)	
		ชุดที่ 1 ชุดที่ 2-7	
		ชุดที่ 1	ชุดที่ 2-7
-1.414	1.7	0.0	1.0
-1	10	1.0	2.0
0	30	3.5	4.5
1	50	6.0	7.0
1.414	58.3	7.0	8.0

2.3. ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง

ทำการผสมเยื่อให้มีปริมาณรวม 500 กรัมและเติมกรดตามระดับที่กำหนดในแต่ละวัน จากนั้นนำเยื่อหลังการผสมไปวิเคราะห์ค่าความขาวสว่าง เป็นตัวแปรตอบสนองที่ 1 (Y_1) และค่า pH เป็นตัวแปรตอบสนองที่ 2 (Y_2) ตัวอย่างผลการทดลองจากชุดการทดลองที่ 2 แสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดลองของชุดการทดลองที่ 2

ลำดับ ที่	Coded unit		Uncoded unit		ผลการทดลอง	
	X_1	X_2	X_1	X_2	Y_1	Y_2
1	-1	-1	10	2	87.65	5.12
2	1	-1	50	2	84.74	6.59
3	-1	1	10	7	87.39	3.98
4	1	1	50	7	84.42	5.15
5	-1.414	0	1.7	4.5	88.79	4.18
6	1.414	0	58.3	4.5	84.05	6.12
7	0	-1.414	30	1	85.92	6.35
8	0	1.414	30	8	86.08	4.39
9	0	0	30	4.5	85.76	5.15
10	0	0	30	4.5	85.78	5.11
11	0	0	30	4.5	85.98	5.25

3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

3.1 ผลการทดลองและการทดสอบสมมติฐาน

ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งเป็นการทดสอบทางสถิติในการวิเคราะห์ว่าปัจจัยใดมีนัยสำคัญกับตัวแปรตอบสนอง ขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์ผลการทดลองจะทำการทดสอบสมมติฐานว่า ส่วนตกค้าง (Residual) เป็นไปตามคุณสมบัติ หรือไม่ คือ สมมติฐานส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ (normality assumption) สมมติฐานของความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง (independence assumption) และสมมติฐานของความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (variance stability) โดยทำการวิเคราะห์ทั้งตัวแปรตอบสนองค่าความขาวสว่างและค่า pH ของทุกชุดการทดลอง ซึ่งพบว่าส่วนตกค้างสำหรับตัวแปรตอบสนองทั้งสองมีการกระจายตัวแบบปกติ มีความเป็นอิสระไม่มีความสัมพันธ์ใดๆ ไม่เกิดเป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่ชัดเจนเมื่อพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับของเวลาของการเก็บข้อมูลและค่าที่ถูกฟิต แสดงว่าข้อมูลทั้งหมดเป็นอิสระต่อกันและมีเสถียรภาพของความแปรปรวนสามารถนำข้อมูลจากการทดลองไปวิเคราะห์ต่อด้วยเทคนิควิเคราะห์ความแปรปรวนได้อย่างถูกต้อง

3.2 การวิเคราะห์ผลของปัจจัยนำเข้าต่อปัจจัยตอบสนอง

นำข้อมูลไปวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรนำเข้าที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างและค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ โดยทำการวิเคราะห์แบบฟังก์ชันกำลังสองที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน ปัจจัยที่ปรากฏในสมการที่ได้เป็นปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนองทั้งหมด ดังแสดงได้ในตารางที่ 5 และ 6

ตารางที่ 5 สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขาวสว่าง (Y_1)

ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	R-Sq	R-Sq (adj)
1	$Y_1 = 85.37 - 1.319X_1$	98.1	97.9
2	$Y_1 = 86.05 - 1.572X_1 + 0.237X_1^2$	98.7	98.3
3	$Y_1 = 86.73 - 0.666X_1 - 0.165X_1X_2 - 0.11X_2$	98.7	98.1
4	$Y_1 = 86.82 - 1.53X_1 - 0.69X_2$	91.5	89.3
5	$Y_1 = 86.09 - 1.00X_1$	88.8	87.6
6	$Y_1 = 86.21 - 1.19X_1$	83.4	81.6
7	$Y_1 = 86.86 - 1.4X_1$	89.1	87.9

X_1 หมายถึง ปัจจัยอัตราการผสมเยื่อ

X_2 หมายถึง ปัจจัยปริมาณกรดซัลฟูริก

ตารางที่ 5 แสดงว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดผล (effect) ต่อค่าความขาวสว่าง (Y_1) ในทุกชุดการทดลอง คือ ผลหลักของอัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP (X_1) นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างนั้นคือ ผลหลักของปริมาณกรดซัลฟูริกที่เติม (X_2) ในชุดการทดลองที่ 3 และ 4 ผลกำลังสองของอัตราผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP (X_1^2) ในชุดการทดลองที่ 2 และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (X_1X_2) ในชุดการทดลองที่ 3

ตารางที่ 6 สมการความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อค่า pH (Y_2)

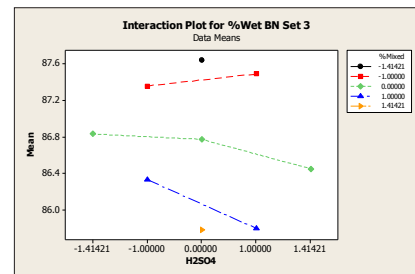
ชุดการทดลอง	สมการความสัมพันธ์	R-Sq	R-Sq (adj)
1	$Y_2 = 4.909 + 0.687X_1 - 0.416X_2$	99.1	98.9
2	$Y_2 = 5.217 + 0.673X_1 - 0.669X_2 + 0.094X_2^2$	99.4	99.1
3	$Y_2 = 4.592 + 0.895X_1 - 0.496X_2 - 0.203X_1X_2$	99.0	98.6
4	$Y_2 = 5.225 + 1.01X_1 - 0.80X_2$	87.9	84.9
5	$Y_2 = 4.153 + 0.603X_1 - 0.461X_2 - 0.090X_1X_2$	99.3	98.9
6	$Y_2 = 4.950 + 0.669X_1 - 0.699X_2$	98.7	98.4
7	$Y_2 = 5.019 + 0.756X_1 - 0.631X_2 + 0.082X_2^2$	99.5	99.3

X_1 หมายถึง ปัจจัยอัตราการผสมเยื่อ

X_2 หมายถึง ปัจจัยปริมาณกรดซัลฟูริก

ตารางที่ 6 แสดงว่าสำหรับปัจจัยที่ทำให้เกิดผล (effect) ที่มีผลต่อค่า pH (Y_2) ในทุกชุดการทดลอง คือ ผลหลักของอัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP (X_1) และปริมาณกรดซัลฟูริกที่เติม (X_2) สำหรับปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดผล คือ กำลังสองของปริมาณกรดซัลฟูริก (X_2^2) ในชุดการทดลองที่ 2 และ 7 และอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย (X_1X_2) ในชุดการทดลองที่ 3 และ 5

วิเคราะห์อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนองทั้งสอง ด้วยกราฟอันตรกิริยา

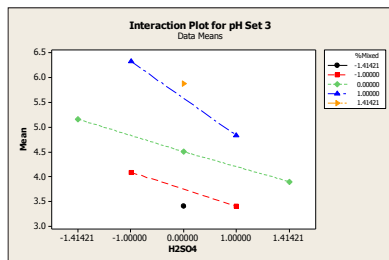


รูปที่ 3 กราฟอันตรกิริยาของค่าความขาวสว่างจากการทดลองชุดที่ 3

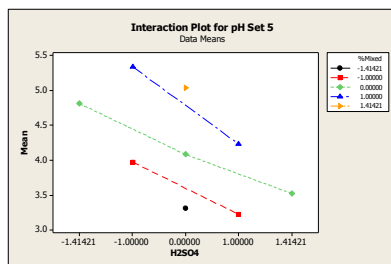
รูปที่ 3 กราฟแสดงอันตรกิริยา (interaction plot) ของผลการทดลองชุดที่ 3 แสดงให้เห็นว่าที่ระดับอัตราผสมเยื่อต่ำ เช่น ระดับ -1 หรืออัตราส่วน 10% เมื่อมีการใช้ปริมาณกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างเพิ่มขึ้น แต่ที่ระดับอัตราการผสมเยื่อสูงขึ้น เช่น ระดับ 0 หรือ 30% และระดับ 1 หรือ 50% เมื่อมีการใช้ปริมาณกรดซัลฟูริกเพิ่มขึ้นค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังผสมกลับลดลง อาจเนื่องมาจากสถานะของการทดลองในชุดที่ 3 อาจมีความเหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาของสารเคมี [8] ที่เหลืออยู่ในเยื่อที่อัตราการผสมเยื่อในอัตราส่วนเยื่อจากขั้นตอน EOP 10% จะมีปริมาณเยื่อจากขั้นตอน D₁ อยู่มาก โดยสารคลอรีนไดออกไซด์ (ClO₂) ที่เหลืออยู่ในเยื่อจากขั้นตอน D₁ ซึ่งทำปฏิกิริยาการฟอกได้ดีในสภาวะกรด เมื่อมีการใช้กรดในปริมาณที่มากขึ้นและมีสถานะของอุณหภูมิที่เหมาะสมคลอรีนไดออกไซด์ที่อยู่ในเยื่อจากขั้นตอน D₁ อาจทำปฏิกิริยาฟอกสีลิกนินเพิ่มขึ้น ค่าความขาวสว่างจึงสูงขึ้น ในขณะที่เดียวกันที่อัตราการผสมเยื่อ 50% ซึ่งมี

ปริมาณเยื่อจากชั้นตอน EOP อยู่มาก ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ที่เหลืออยู่ในเยื่อ ซึ่งทำการฟอกได้ดีในสภาวะต่าง เมื่อมีการใช้กรดในปริมาณที่มากขึ้นทำให้ค่า pH ลดลง ทำให้ประสิทธิภาพการการเกิดปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลดลง ค่าความขาวสว่างของเยื่อจึงลดลงด้วย

จากนั้นผู้วิจัยได้พิจารณาอันตรกิริยาที่ส่งผลต่อผลตอบ pH ในการทดลองชุดที่ 3 และ 5 ดังรูปที่ 4 และ 5



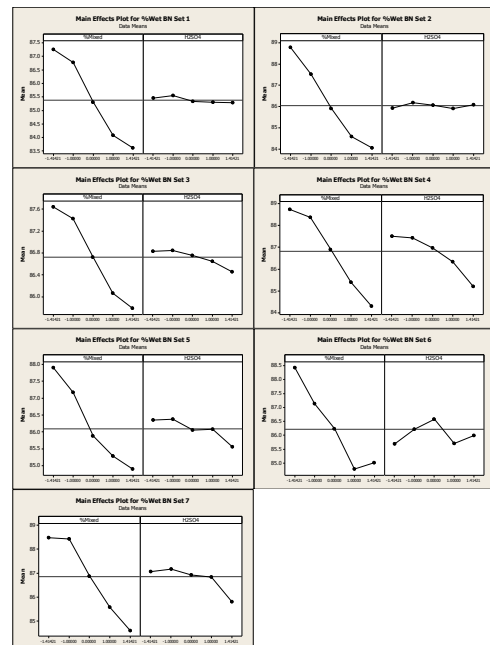
รูปที่ 4 กราฟอันตรกิริยาของค่า pH จากการทดลองชุดที่ 3



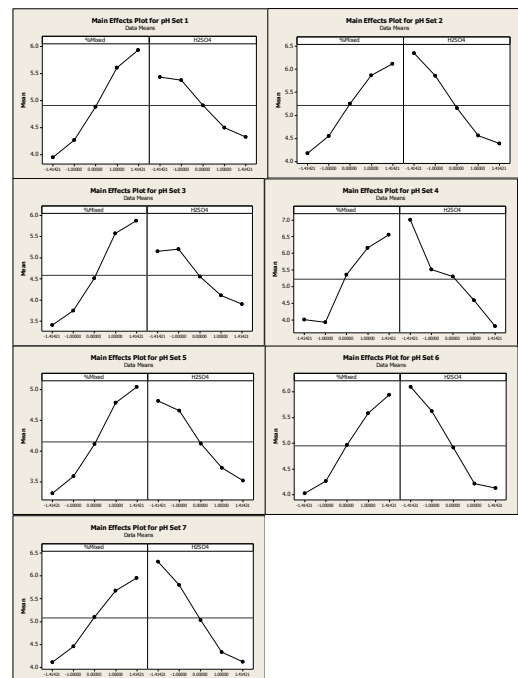
รูปที่ 5 กราฟอันตรกิริยาของค่า pH จากการทดลองชุดที่ 5

จากรูปที่ 4 และ 5 อันตรกิริยาของทั้งสองชุดการทดลองมีแนวโน้มที่เหมือนกันคือ เมื่ออัตราการผสมอยู่ในระดับสูง เช่น ระดับ 1 และมีการใช้กรดซัลฟูริกในปริมาณมากจะเห็นว่าค่า pH ของเยื่อหลังผสมมีค่าลดลงมากกว่าที่อัตราการผสมเยื่อในระดับต่ำ เช่น ระดับ 0 และ -1 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่อัตราการผสมเยื่อในระดับสูงนั้นมีการผสมเยื่อจากชั้นตอน EOP ซึ่งมีค่า pH สูงอยู่มาก ค่า pH ของเยื่อหลังผสมก่อนการเติมกรดซัลฟูริกจึงมีค่าสูงกว่า การเติมกรดซัลฟูริกในปริมาณเท่ากันค่า pH จึงลดลงอย่างเห็นได้ชัดกว่า ซึ่งในการผสมเยื่อระดับต่ำที่มีการใช้ปริมาณเยื่อจากชั้นตอน EOP น้อยกว่า มีค่า pH เริ่มต้นก่อนการผสมต่ำอยู่แล้วการเติมกรดซัลฟูริกจึงทำให้ค่า pH ลดลงน้อยกว่า

รูปที่ 6 และ 7 แสดงกราฟผลหลัก (main effect plots) เพื่อแสดงให้เห็นทิศทางของผลปัจจัยนำเข้าที่มีต่อตัวแปรตอบสนอง



รูปที่ 6 กราฟผลหลักของค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังผสมจากการทดลองชุดที่ 1 ถึง 7 ตามลำดับ



รูปที่ 7 กราฟผลหลักของค่า pH ของเยื่อหลังผสมจากการทดลองชุดที่ 1 ถึง 7 ตามลำดับ

จากกราฟผลหลักพบว่าจากการทดลองทั้ง 7 ชุด สำหรับปัจจัยนำเข้าที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อที่พบในทุกชุดการทดลอง คือ อัตราการผสมเยื่อ โดยพบว่าเมื่อมีอัตราส่วนการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP ที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังการผสมลดลง แต่ปัจจัยของปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เติมแสดงผลต่อค่าความขาวสว่างในบางชุดการทดลองเท่านั้น นั่นคือชุดการทดลองที่ 3 และ 4 เมื่อเติมกรดในปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างลดลง สำหรับค่า pH ของเยื่อหลังการผสม ปัจจัยนำเข้าทั้งสอง คือ อัตราส่วนการผสมเยื่อ และปริมาณกรดซัลฟิวริกที่เติม มีผลต่อค่า pH ของเยื่อหลังผสมทั้งหมด และเป็นแนวโน้มเดียวกันทุกชุดการทดลอง คือ เมื่ออัตราการผสมเยื่อจากขั้นตอน EOP มากขึ้นจะทำให้ค่า pH ของเยื่อหลังผสมสูงขึ้น และเมื่อมีการเติมกรดซัลฟิวริกมากขึ้น จะทำให้ค่า pH ของเยื่อหลังผสมลดลง

3.3 การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

จากสมการความสัมพันธ์ที่ได้ ผู้วิจัยได้หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของปัจจัยนำเข้าสำหรับแต่ละช่วงความขาวสว่างด้วยเทคนิคการหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) โดยกำหนดค่าเป้าหมายของ ค่าความขาวสว่างเป็น 86% เนื่องจากโรงกระดาษกำหนดเกณฑ์ค่าความขาวสว่างที่ต้องการคือ 85-87% และกำหนดค่าเป้าหมายของค่า pH เป็น 5.25 เนื่องจากโรงกระดาษกำหนดเกณฑ์ค่า pH ที่ต้องการคือ 4.5-6.0 ผลการหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าของการทดลองทั้ง 7 ชุด เป็นดังนี้

ตารางที่ 7 ระดับของปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมของการทดลองทั้ง 7 ชุด

การทดลอง	Unicode		Predicted Responses		ค่าความพึงพอใจโดยรวม
ชุดที่	%Mixed (%)	H ₂ SO ₄ (ml)	%BN (%)	pH	ของตัวแปรตอบสนอง
1	22.9	0.0	86.0	5.20	0.6770
2	28.2	3.8	86.0	5.30	1.0000
3	49.8	5.3	86.0	5.25	1.0000
4	39.0	5.7	86.0	5.25	1.0000
5	41.2	1.0	85.9	5.25	0.6083
6	38.2	4.1	86.0	5.25	1.0000
7	44.2	5.2	86.0	5.25	1.0000

จากตารางที่ 7 เมื่อพิจารณาจากค่าความพึงพอใจโดยรวมของตัวแปรตอบสนอง (Composite Desirability) ของการทดลองทั้ง 7 ชุด พบว่าผลของค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อหลังการผสมมีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษยอมรับได้ นั่นคือ ค่าความขาวสว่างอยู่ในช่วง 85-87% และค่า pH อยู่ในช่วง 4.5-6.0

3.4 การทดลองยืนยันผลในสายการผลิต

ผู้ทดลองได้นำค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมตามตารางที่ 7 ไปใช้ในสายการผลิตจริงโดยทำการผสมเยื่อก่อนส่งโรงกระดาษในช่วงที่มีการเปลี่ยนเกรดเยื่อ โดยพิจารณาเลือกสูตรการผสมจากค่าความขาวสว่างเริ่มต้นของเยื่อจากขั้นตอน EOP และ D₁ ซึ่งทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้ง ยกตัวอย่างผลการทดลองครั้งที่ 1 ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ผลการทดลองผสมเยื่อในระดับโรงงานครั้งที่ 1

ชั่วโมง ที่	ค่าความขาวสว่าง ของเยื่อ (%) จาก ขั้นตอน		สูตรที่ เลือกใช้	ผลการทดลอง	
	EOP	D ₁		ค่าความ ขาวสว่าง (%)	pH
1	82.9	88.9	4	86.5	4.8
2	82.1	88.7	4	86.2	4.7
3	82.3	87.7	3	86.0	5.1
4	81.8	87.8	3	86.1	5.3
5	80.0	87.3	1	86.0	5.2

พบว่าผลการทดลองระดับโรงงานทั้ง 3 ครั้ง ค่าความขาวสว่างเฉลี่ยของเยื่อหลังการผสมลดลงจากเดิม 87.4% เป็น 86.3% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลงจากเดิม 1.09 เป็น 0.46 และค่า pH ของเยื่อยังอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ จากเดิมมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.06 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.26 ผลการทดลองค่า pH มีค่าเฉลี่ย 5.05 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.20 ซึ่งถือว่าค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองปัจจัยอยู่ในเกณฑ์ที่โรงกระดาษกำหนดและมีค่าเฉลี่ยใกล้เคียงเป้าหมายมากขึ้นและมีความแปรปรวนลดลงมากกว่าเมื่อไม่ได้ทำการผสมเยื่อ ช่วยให้คุณภาพเยื่อหลังการเปลี่ยนเกรดสามารถเข้าสู่สภาวะที่ต้องการได้เร็วขึ้น ไม่สิ้นเปลืองสารเคมีในกระบวนการฟอกเยื่อ และสามารถลดต้นทุนด้านสารเคมีที่โรงกระดาษได้เฉลี่ย 3,700 บาทต่อครั้งที่มีการเปลี่ยนเกรด หรือเฉลี่ย 133,200 บาทต่อปี

4. สรุปผล

การปรับค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อเพื่อให้มีค่าอยู่ในเกณฑ์ที่ต้องการ คือ ค่าความขาวสว่าง 85.0-87.0% และค่า pH 4.5-6.0 สามารถทำได้โดยใช้การผสมเยื่อจากขั้นตอน D₁ ในช่วงที่มีค่าความขาวสว่างสูงกว่าช่วงที่โรงกระดาษต้องการผสมกับเยื่อจากขั้นตอน EOP โดยแบ่งเป็น 7 ชุดการทดลองตามช่วงของค่า

ความขาวสว่าง ทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดและจัดทำเป็นสูตรในการผสมเยื่อ พบว่า สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความขาวสว่างทุกชุดการทดลองคืออัตราการผลิตเยื่อจากขั้นตอน EOP เมื่อปริมาณเยื่อจากขั้นตอน EOP ที่ผสมมากขึ้นจะทำให้ค่าความขาวสว่างของเยื่อหลังผสมต่ำลง สำหรับปัจจัยอื่นที่ทำให้เกิดผลเช่น ปริมาณกรดจะส่งผลต่อค่าความขาวสว่างในบางชุดการทดลองเท่านั้น คือ ชุดการทดลองที่ 3 และ 4 และอันตรกิริยามีผลต่อค่าความขาวสว่างในชุดการทดลองที่ 3 เพียงชุดเดียว และสำหรับปัจจัยค่า pH ของเยื่อหลังการผสม ปัจจัยนำเข้าทั้งสองคืออัตราการผลิตและปริมาณกรดที่เติมล้วนมีผลต่อค่า pH ของเยื่อหลังผสม โดยทุกชุดการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกัน นั่นคือ เมื่ออัตราการผลิตเยื่อจากขั้นตอน EOP มีปริมาณสูงขึ้น จะทำให้ค่า pH สูงขึ้น และหากมีการเติมกรดซัลฟิวริกในปริมาณมากขึ้น จะทำให้เยื่อหลังผสมมีค่า pH ต่ำลง โดยอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยมีผลต่อค่า pH ในชุดการทดลองที่ 3 และ 5

สูตรที่ได้จากงานวิจัยสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระดับโรงงานได้ในช่วงที่มีการปรับเกรดเยื่อ โดยจะทำการปรับอัตราส่วนการผลิตด้วยการควบคุมอัตราการไหลของเยื่อภายในท่อและการเติมปริมาณกรดตามสูตรก่อนเข้าสู่ LC ซึ่งวิธีการเลือกสูตรในการผสมเยื่อนั้นก็จะขึ้นอยู่กับค่าความขาวสว่างของเยื่อจากขั้นตอน D₁ และ EOP ตั้งต้น ซึ่งวิธีการที่นำเสนอนี้จะทำให้ค่าเฉลี่ยของค่าความขาวสว่างและค่า pH ของเยื่อที่ส่งโรงกระดาษตรงตามเป้าหมาย และมีความแปรปรวนลดลง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายณพนธ์ ขจรไพศาล บุคลากรหน่วยงานควบคุมคุณภาพ หน่วยงานผลิตเยื่อ และหน่วยงานผลิตกระดาษของโรงงานกระดาษที่ร่วมดำเนินการงานวิจัยนี้สำเร็จ รวมถึงขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภัสวงศ์ โรจนไววรรณ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษางานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Chemical reactions in kraft pulping [Internet]. 2008. Available from: <http://www.h2obyki.com/images/Reactions%20in%20Kraft%20Pulping.pdf>.
- [2] Sevastyanova O, Forsström A, Wackerberg E, Lindström ME. Bleaching of eucalyptus kraft pulps with chlorine dioxide: factors affecting the efficiency of the final D stage. *Tappi journal* 2012;11(3):43-53.
- [3] Anthony BJ. ISO brightness : A more complete definition. *Tappi journal* 1999;82(10):54-6.
- [4] The eucalyptus fibers and the kraft pulp quality requirement for paper manufacturing [Internet]. 2007. Available from: http://www.eucalyptus.com.br/capitulos/ENG03_fibers.pdf.
- [5] Zhang H, He Z, Ni Y, Zhou Y, Hu H. Using optical brightening agents (OBA) for improving the optical properties of HYP-containing paper sheets. *Pulp and paper Canada*. 2009. p. 20-4
- [6] Chutima P. Design of Experiment. 1 ed. Bangkok Chulalongkorn university press; 2002. (in thai).
- [7] Central Composite Design [Internet]. 2013. Available from: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pri/section3/pri3361.htm>.
- [8] Suess HU, Filho CL, Schmidt K. Bleaching of eucalyptus kraft pulp to very high brightness. *Pulp and Paper International Congress*; 2000 Oct 23-26; Sao Paulo, Brazil. 2000. p. 1-11