

วารสารวิศวกรรมศาสตร์

การลดต้นทุนกระดาษทำผิวกล่องโดยการปรับปรุง คุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

ปณิธาน อินทร์ติยะ^๑ และ วิภาวี ธรรมาภรณ์พิลาศ^๒

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ ประเทศไทย 10330

อีเมล: panithai@scg.co.th^๑, wipawee.t@eng.chula.ac.th^๒

บทคัดย่อ จากการศึกษากระบวนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวของโรงงานกระดาษที่ศึกษาพบว่าปัญหาต้นทุนการผลิตสูงจากการใช้เยื่อบริสุทธิ์ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีราคาสูงในปริมาณมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์โดยยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าให้ได้คุณภาพตามมาตรฐาน ในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อพบว่า การเพิ่มความขาวเยื่อเศษกระดาษพิมพ์ด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์สามารถลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ได้ โดยพบปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความขาวเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน 3 ปัจจัย คือ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ อุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ดีที่สุดของการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ คือ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ ตั้งค่าอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ 110 องศาเซลเซียส และ 25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษทำการศึกษาหาสัดส่วนของปริมาณเยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ทำให้คุณภาพด้านความขาวและความแข็งแรงของกระดาษได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด พบว่าสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณเยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 45 และ 40 กรัมต่อตารางเมตร ตามลำดับ และที่สภาวะดังกล่าวนี้สามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 324 บาทต่อตันกระดาษ หรือคิดเป็น 9.89 ล้านบาทต่อปี

คำสืบค้น: การออกแบบการทดลอง, เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน, ความขาว, กระดาษทำผิวกล่อง, กระบวนการผลิตกระดาษ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ (ISSN: 1906-3636) ปีที่ 4 ฉบับที่ 3

วันที่ส่ง 11 กันยายน 2555

วันที่ตอบรับ 12 มีนาคม 2556

วันที่ตีพิมพ์ 31 พฤษภาคม 2556

Online at <http://www.ej.eng.chula.ac.th/>

DOI:10.4186/ejth.2012.4.3.1



Kraft Liner Board Cost Reduction by Improving Deinking Pulp Quality

Panithan Intiya^a and Wipawee Thammaphornphilas^b

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

E-mail: panithai@scg.co.th^a, wipawee.t@eng.chula.ac.th^b

Abstract. A study of a kraft liner board production process found that the production cost is high due to high consumption of virgin pulp, which is a high value raw material. The objective of this paper is to reduce an amount of virgin pulp used while maintaining the paper quality standard. In a raw material preparation process, we found that increasing the brightness of deinking pulp by applying Sodium Hydrosulphite could help reduce using virgin pulp. There are 3 main factors involving in the brightness process improvement: Sodium Hydrosulphite content, temperature, and concentration of deinking pulp at a hot dispersion machine. The best condition for improving the brightness of deinking pulp is using 1.35 kilograms of Sodium Hydrosulphite per ton pulp, setting temperature of a hot dispersion machine at 110 degree Celsius and using 25% deinking pulp concentration. In a paper production process, we determine the proportion of virgin pulp and deinking pulp to satisfy paper brightness and strength standard with the lowest cost. The most appropriate level is adjusting virgin pulp dosage to 45 g/m² and deinking pulp dosage to 40 g/m². With this condition, manufacturing cost can be reduced 324 Bath per ton paper or 9.89 million Bath per year.

Keywords: Design of experiment, deinking pulp, brightness, kraft liner board, paper production process.

Engineering Journal (ISSN: 1906-3636) Volume 4 Issue 3

Received 11 September 2012

Accepted 12 March 2013

Published 31 May 2013

Online at <http://www.ej.eng.chula.ac.th/>

DOI:10.4186/ejth.2012.4.3.1

1. บทนำ

ปัจจุบันอุตสาหกรรมกระดาษทำผิวกล่อง (Kraft Liner Board) มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วทั้งในประเทศและต่างประเทศ ซึ่งจากสภาวะดังกล่าวนี้ ผู้ผลิตมีความจำเป็นต้องพัฒนากระบวนการผลิตสินค้าโดยยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าเพื่อลดต้นทุนและเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขัน วัตถุดิบหลัก 4 ชนิดในการผลิตกระดาษทำผิวกล่อง คือ กล่องกระดาษลูกฟูกเก่าที่ใช้แล้วทั้งภายในและต่างประเทศ (OCC: Old Corrugated Container) เยื่อบริสุทธิ์ (Virgin Pulp) ซึ่งเป็นเยื่อสีขาวใสและใยยาวที่ยังไม่ผ่านการใช้งาน กระดาษพิมพ์เขียนหรือกระดาษ A4 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Deinking Pulp or Mixed Office Wasted) สารเคมีชนิดต่างๆ (Chemical Additive) ซึ่งมีหน้าที่ในการเพิ่มคุณสมบัติของกระดาษให้ได้คุณภาพตามมาตรฐานที่กำหนด รูปที่ 1 แสดงวัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษทำผิวกล่อง



รูปที่ 1 วัตถุดิบหลักในการผลิตกระดาษ

ขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ มีขั้นตอนหลักอยู่ 2 ขั้นตอน คือ

1.1 ขั้นตอนการเตรียมเยื่อ เป็นขั้นตอนของการนำเยื่อหรือเศษกระดาษมาผสมกับน้ำและใส่สารเคมีชนิดต่างๆตามอัตราส่วนที่กำหนดแตกต่างกันไปตามเกรดของกระดาษที่จะผลิต เพื่อที่จะนำส่งน้ำเยื่อที่ได้จากการเตรียมไปยังขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษต่อไป

1.2 ขั้นตอนการผลิตกระดาษ เป็นขั้นตอนของการนำน้ำเยื่อที่ผ่านการเตรียม ไปถายนํ้าออกบนตะแกรงลวดของกระบวนการเดินแผ่น (Wire Part) และส่งต่อไปยังชุดกด (Press Part) เพื่อรีดน้ำออก ตามด้วยชุดอบแห้ง (Pre Dryer) เพื่อระเหยนํ้าออกจากกระดาษ หลังจากนั้นกระดาษจะถูกส่งไปเคลือบแป้ง (Size Press) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวหน้าของกระดาษ เมื่อผ่านกระบวนการนี้กระดาษจะกลับมาเปียกอีกครั้ง กระดาษจึงต้องผ่านการอบแห้งอีกครั้ง (After Dryer) เพื่อระเหยความชื้นออกจากกระดาษ และเข้าสู่ชุดขัดผิว (Calender) เพื่อให้ผิวกระดาษมันและเรียบ จากนั้นจึงนำกระดาษเข้าสู่ชุดม้วนเก็บ (Pope Reel) และกรอแบ่ง (Rewinder) เป็นม้วนกระดาษให้ได้ขนาดหน้ากว้าง ความยาว และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตามความต้องการของลูกค้า

2. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

จากข้อมูลของโรงงานกระดาษที่ศึกษาพบว่า กระดาษทำผิวกล่องสีขาวมีปริมาณการผลิตและกำไรต่อตันกระดาษสูงสุด คุณสมบัติที่ต้องการของกระดาษทำผิวกล่องสีขาว ได้แก่ ความขาว (Brightness) และความแข็งแรง (Strength) ของกระดาษ การผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวใช้เทคโนโลยีผลิตกระดาษ 4 ขั้นตอน ซึ่งวัตถุดิบของการผลิตในแต่ละขั้นจะแตกต่างกันออกไป กระดาษชั้นที่ 1 หรือชั้นบนสุดของกระดาษ (Top Ply) ใช้เยื่อบริสุทธิ์เป็นวัตถุดิบในการผลิต กระดาษชั้นที่ 2 (Undertop Ply) ใช้เศษกระดาษพิมพ์เขียน หรือกระดาษ A4 ที่ผ่านการใช้งานแล้ว (Deinking Pulp) เป็นวัตถุดิบ กระดาษ

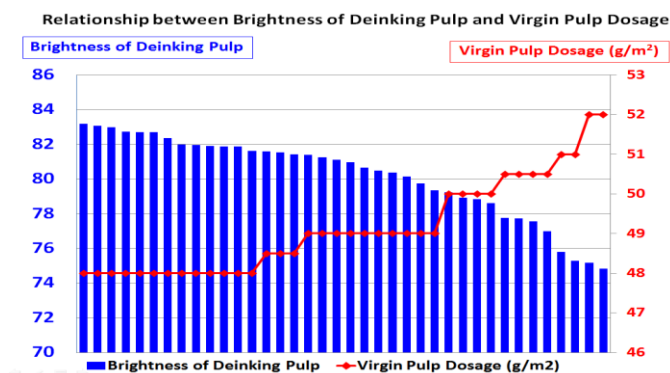
ชั้นที่ 3 และ 4 ใช้กล่องกระดาษลูกฟูกเก่าสีน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ซึ่งกระดาษ 2 ชั้นล่างสุดนี้จะถูกปูทับด้วยกระดาษชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 โครงสร้างกระดาษทำผิวกล่องสีขาว 4 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2

<u>สีวัตถุดิบ</u>	<u>ชนิดของวัตถุดิบ</u>	<u>ชั้นของกระดาษ</u>
	เยื่อรีสุทธ์	กระดาษชั้นที่ 1 (Top Ply)
	เศษกระดาษพิมพ์เขียน	กระดาษชั้นที่ 2 (Undertop Ply)
	กล่องลูกฟูกสีน้ำตาล	กระดาษชั้นที่ 3 (Filler Ply)
	กล่องลูกฟูกสีน้ำตาล	กระดาษชั้นที่ 4 (Back Ply)

รูปที่ 2 โครงสร้างกระดาดทำผิวกล่องสี่ขา 4 ชั้น

ปัจจัยหลักที่ส่งต่อผลคุณภาพด้านความแข็งแรงของกระดาษ คือ ปริมาณการใช้เยื่อในแต่ละชั้นในการผลิตกระดาษ โดยนิยมนิยามวัดค่าปริมาณการใช้เยื่อในแต่ละชั้นเป็นน้ำหนักของกระดาษชั้นนั้นๆต่อพื้นที่กระดาษ 1 ตารางเมตร มีหน่วยวัดเป็น กรัมต่อตารางเมตร หรือที่นิยมเรียกว่า แกรมของกระดาษ และปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพด้านความขาวของกระดาษมาจากคุณภาพความขาวของเยื่อ 2 ชั้นด้านบน ชั้นบนสุดของกระดาษเป็นเยื่อบริสุทธิ์ยังไม่ผ่านการใช้งาน มีการตรวจวัดและกำหนดคุณภาพความขาวและสิ่งเจือปนทุกครั้งก่อนนำไปใช้งาน คุณภาพด้านความขาวของเยื่อชั้นบนสุดจากการผลิตจริงมีค่าเฉลี่ยระหว่าง 100-105 (มาตรฐานการผลิตกำหนดคุณภาพด้านความขาวต้องไม่น้อยกว่า 95 ก่อนส่งเยื่อที่ผ่านการเตรียมไปยังขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ) ส่วนชั้นที่ 2 นับจากด้านบนของกระดาษจะนำกระดาษ A4 หรือกระดาษพิมพ์เขียนจากสำนักงานที่ผ่านการใช้งานแล้วมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต เนื่องจากวัตถุดิบเป็นกระดาษหมื่นเวียนนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle Paper) จึงมีคุณสมบัติไม่คงที่ ควบคุมคุณภาพได้ยาก อีกทั้งในการผลิตปัจจุบันไม่มีการกำหนดค่ามาตรฐานของความขาวของเยื่อชั้นนี้ก่อนส่งไปยังขั้นตอนของกระบวนการผลิตกระดาษ

จากการนำข้อมูลการผลิตจริงมาวิเคราะห์พบว่า คุณภาพด้านความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนของกระดาษชั้นที่ 2 มีค่าเฉลี่ยระหว่าง 78-82 กรณีที่คุณภาพด้านความขาวของเยื่อชั้นที่ 2 มีแนวโน้มลดลง ส่งผลให้ค่าความขาวของกระดาษที่ได้จากการผลิตต่ำกว่าคุณภาพที่ควบคุมไว้ ในปัจจุบันแก้ปัญหาโดยเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ชั้นที่ 1 เพื่อปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวให้ได้คุณสมบัติตามที่กำหนดไว้ แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวของเยื่อหุ้มกระดากพืชมัส (กระดากชั้นที่ 2) กับปริมาณการใช้เยื่อชั้นบนสุด

เนื่องจากราคาต่อหน่วยของเยื่อบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับราคาต่อหน่วยของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน การแก้ปัญหาคือการเพิ่มความยาวด้วยการเพิ่มเยื่อบริสุทธิ์จึงทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตโดยการปรับปรุงคุณภาพความยาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของกระบวนการเตรียมเยื่อด้วยสารเคมี และเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเพื่อทดแทนการใช้เยื่อบริสุทธิ์ในขั้นตอนการผลิตกระดาษโดยยังคงรักษามาตรฐานคุณภาพกระดาษไว้

3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่ทำการศึกษานี้แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ เทคโนโลยีในการปรับปรุงคุณภาพความยาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและการออกแบบการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับปรุงคุณภาพกระดาษ จากการศึกษาของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ซึ่ง Päivi และคณะ [1] ได้ทำการศึกษาการเพิ่มความยาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในห้องทดลอง โดยใช้สารเคมี 3 ชนิดที่แตกต่างกัน คือ ออกซิเจนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ และฟอร์มาลดีไฮด์ฟีนิกเซต ซึ่งจากการทดลองพบว่า การใช้สารเคมีเพิ่มความยาวทั้ง 3 ชนิด สามารถเพิ่มความยาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจาก 70 เป็น 85 ตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง ซึ่งสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์มีต้นทุนในการเพิ่มความยาวให้กับเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนต่ำที่สุด ส่วนงานวิจัยของ Wasshausen และคณะ [2] เป็นกรณีศึกษาของโรงงานเยื่อ ซึ่งพบว่าการเตรียมสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ จากการนำสารเคมีโซเดียมโบรไมด์และโซเดียมโบโรไฮไดรด์ มาผสมกันมีต้นทุนถูกกว่าการซื้อสารละลายโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์มาใช้งานโดยตรง

ส่วนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบการทดลอง ได้ทำการศึกษาโดยแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ การออกแบบการทดลองโดยวิธีของทาคุชิ (Taguchi Method) และการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) การออกแบบการทดลองโดยวิธีของทาคุชิสามารถนำไปประยุกต์ใช้ออกแบบกระบวนการผลิตให้มีความไวกับปัจจัยรบกวนน้อยที่สุด หรือที่เรียกว่า การออกแบบอย่างแข็งแกร่ง (Robust Design) การออกแบบการทดลองของทาคุชิจะอาศัยเทคนิค Orthogonal array และ Linear Graph ข้อดีของวิธีนี้ คือ ลดจำนวนครั้งและเวลาของการทดลอง เหมาะกับงานวิจัยที่มีข้อจำกัดด้านเวลาและต้นทุน โดย Ross [3] ได้เสนอให้ใช้ค่า S/N Ratio (signal to noise ratio) ในการวิเคราะห์ผลการทดลองว่าปัจจัยใดมีผลต่อค่าตอบสนองและความผันแปรต่อกระบวนการผลิต ในอดีตที่ผ่านมา มีผู้ที่ทำการศึกษากับการออกแบบการทดลองโดยวิธีของทาคุชิ เช่น Toraj และคณะ [4] ได้ออกแบบการทดลองหาสภาวะที่ดีที่สุดของเครื่อง Electro dialysis ในห้องทดลอง ส่วน Jian และคณะ [5] ศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของน้ำในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษในประเทศจีน เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการบำบัด โดยวิเคราะห์ผลด้วยวิธีของ Uniform และ Surface Method ส่วน Nirdosha และคณะ [6] นำหลักการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในห้องทดลองเพื่อหาอัตราส่วนผสมของเศษชี้เลี้ยงที่นำไปใช้ในการผลิต Particle board ซึ่งผลลัพธ์จากการนำวิธีออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ทำให้สามารถลดจำนวนการทดลอง เวลา และคน ส่วนการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลมีข้อดีคือสามารถวิเคราะห์การทดลองที่มีหลายปัจจัย โดยสามารถวิเคราะห์ได้ทั้งอิทธิพลหลัก (Main Effect) และอิทธิพลร่วม (Interaction) งานวิจัยของ Mevra และคณะ [7] ได้ออกแบบการทดลองแบบ 2^3 เพื่อใช้ในการหาสภาวะที่ดีที่สุดในการแยกปริมาณฟอสเฟตในน้ำโดยใช้ Fly Ash งานวิจัยของ Margarita และคณะ [8] ได้ประยุกต์การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล โดยนำมาใช้ในการสกัดโลหะโครเมียม 3+ และโครเมียม 6+

4. การทดลองในห้องทดลองเพื่อเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

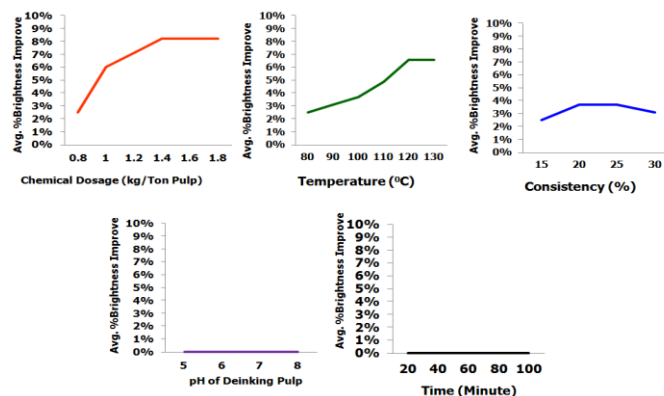
จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า การหาสภาวะที่เหมาะสมของการนำสารเคมีมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพด้านความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อสามารถจำลองสภาวะการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในห้องทดลองได้ ส่วนผลด้านความแข็งแรงและความขาวของกระดาษ จากการเพิ่มการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและลดการใช้เยื่อบริสุทธิ์ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ มีความจำเป็นที่จะต้องทดลองในการผลิตจริง เนื่องจากการทดลองในห้องทดลองไม่สามารถอ้างอิงผลการทดลองและจำลองสภาวะของการผลิตกระดาษจริงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำหลักของการออกแบบการทดลองไปประยุกต์ใช้ในการผลิตจริง เพื่อพัฒนาระบบการผลิตสินค้าโดยยังคงรักษาระดับคุณภาพของสินค้าและลดต้นทุนการผลิต

จากข้อมูลปัจจุบันพบว่าความขาวจากขั้นตอนของการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมีค่าอยู่ระหว่าง 78-82 ความขาวของกระดาษวัดจากค่า Brightness จากเครื่อง Spectrophotometer ซึ่งมีการ Calibrate เพื่อให้อุปกรณ์การวัดมีความถูกต้องและแม่นยำทุก ๆ 3 เดือน โดยความขาวของกระดาษจะต้องมีค่าไม่น้อยกว่า 83.5 ฉะนั้นงานวิจัยนี้จะทำการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนโดยใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์ในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ ซึ่งต้องหาปริมาณสารเคมีที่เหมาะสมต่อไป จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟต์เพื่อปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษมีต้นทุนที่ต่ำที่สุด อีกทั้งสารเคมีชนิดนี้เหมาะสมกับสภาวะของการเตรียมเยื่อ เศษกระดาษพิมพ์เขียนของโรงงานกระดาษมากที่สุด ซึ่งดูได้จากสภาวะของเครื่องจักรเปรียบเทียบกับสภาวะที่เหมาะสมต่อการใส่สารเคมีดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบคุณสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน อ้างอิงข้อมูลจากโรงงานกระดาษ

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

เพื่อเป็นการลดเวลาและต้นทุนจากการทดลองในระดับการผลิตจริง จึงได้จำลองการทดลองในห้องทดลอง เพื่อคัดกรองหาว่าปัจจัยตัวใดมีผลต่อการเพิ่มความขาวบ้าง รูปที่ 4 แสดงผลลัพธ์ของการทดลองเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆกับความขาวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในห้องทดลอง

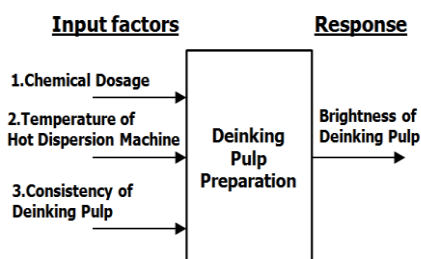


รูปที่ 4 แสดงผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงปัจจัยต่างๆกับความขาวเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นในห้องทดลอง

จากผลจากการทดลองในห้องทดลอง สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน (ความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน เป็นอัตราส่วนร้อยละระหว่างน้ำหนักเยื่อแห้งต่อน้ำหนักเยื่อเปียก) ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ 1.2 ถึง 1.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ผลของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ดีที่สุด การเพิ่มปริมาณสารเคมีที่มากกว่า 1.5 กิโลกรัมต่อตันเยื่อไม่ส่งผลให้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนเพิ่มขึ้นแต่ทำให้ต้นทุนสารเคมีเพิ่มขึ้น อุณหภูมิที่ 105-115°C และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 20-30% เป็นสภาวะที่เหมาะสมที่ให้ผลของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ดีที่สุดและเป็นข้อจำกัดของการตั้งค่าที่เครื่องจักร (Machine Setting) ดังนั้นจึงเลือกสภาวะดังกล่าวไปกำหนดเป็นขอบเขตของการทดลองในระดับการผลิตจริง

5. การทดลองในระดับการผลิตจริง

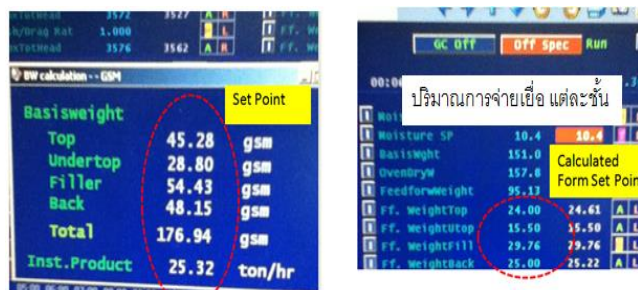
จากผลจากการทดลองในห้องทดลองทำให้สามารถสรุปเลือกศึกษาตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน โดยกำหนดขอบเขตของตัวแปรต่างๆมาจากการทดลองในห้องทดลอง ส่วนตัวแปรตอบสนองจากการทดลองที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ถังพักเยื่อเพื่อรอใช้งาน (Mixing Tank) ก่อนส่งเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปเดินเป็นแผ่นกระดาษ รูปที่ 5 แสดงตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน



รูปที่ 5 ตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

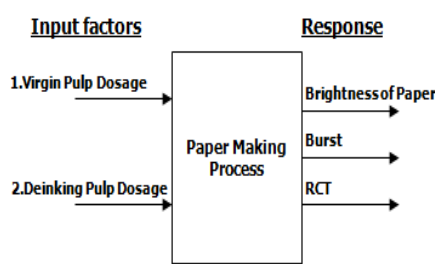
ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษจะหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนหลังจากทำการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนแล้ว โดยในขั้นตอนของการผลิตกระดาษจะ

ทดลองเพิ่มปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและปรับลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ ซึ่งการปรับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์จะปรับตั้งค่าจากระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ (DCS Control) ปริมาณการใช้เยื่อในแต่ละชั้น แสดงผลเป็นน้ำหนักของเยื่อชั้นนั้นหน่วยเป็นกรัมต่อพื้นที่กระดาษ 1 ตารางเมตร ซึ่งปริมาณแกรมของกระดาษที่ถูกตั้งค่าจะส่งค่าไปควบคุมปริมาณการจ่ายเยื่อของปั๊มจ่ายเยื่อโดยอัตโนมัติ ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 การกำหนดการใช้เยื่อหรือเศษกระดาษแต่ละชั้นด้วยการตั้งค่าที่ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์

ตัวแปรตอบสนองจากการทดลองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ คุณภาพความขาวและความแข็งแรงของกระดาษ มาตรฐานคุณภาพความขาวของกระดาษที่สุ่ม้วนเก็บต้องไม่น้อยกว่า 83.5 มาตรฐานคุณภาพด้านความแข็งแรง กำหนดจากค่าแรงดั่งทะลุ (Burst) และค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT) ต้องไม่น้อยกว่า 530 กิโลปาสคาลและ 250 นิวตัน ตามลำดับ ความขาวของกระดาษ ค่าแรงดั่งทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวน วัดค่าจากเครื่อง Spectrophotometer เครื่อง L&W Bursting Strength Tester และเครื่อง L&W Crush Tester ตามลำดับ ซึ่งมีการ Calibrate เพื่อให้อุปกรณ์การวัดมีความถูกต้องและแม่นยำทุกๆ 3 เดือน รูปที่ 7 แสดงตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ



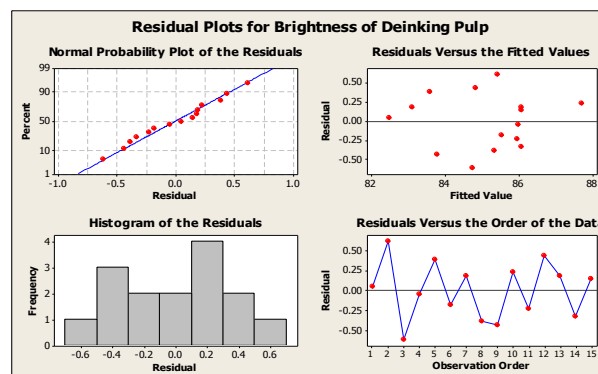
รูปที่ 7 แสดงตัวแปรอิสระและตัวแปรตอบสนองของการทดลองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ

ในการทดลองได้กำหนดขอบเขตของการปรับปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ที่ปริมาณ 45-50 กรัมต่อตารางเมตร โดยแผนกควบคุมคุณภาพของโรงงานได้กำหนดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ต้องไม่น้อยกว่า 45 กรัมต่อตารางเมตร เนื่องจากหากใช้ปริมาณเยื่อบริสุทธิ์น้อยกว่าค่าที่กำหนดนี้จะทำให้กระดาษไม่ได้คุณภาพ คือ กระดาษจะมีลักษณะหน้าลาย ความขาวและรูปลักษณะภายนอกของกระดาษจะไม่สม่ำเสมอและไม่ได้ตามข้อกำหนดด้านคุณภาพ ส่วนขอบเขตบนของการปรับปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ที่ 50 กรัมต่อตารางเมตร กำหนดโดยมาตรฐานปริมาณการผลิตต่อหน่วย (Standard Unit Used) หากใช้ปริมาณเยื่อบริสุทธิ์มากกว่าค่าขอบเขตบนนี้จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูงกว่ามาตรฐาน การปรับเพิ่มหรือลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ที่ 1 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนเยื่อที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง 169 บาทต่อตันกระดาษ หรือคิดเป็น 2.64%

ตามลำดับ ส่วนการกำหนดขอบเขตของการปรับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 35-40 กรัมต่อตารางเมตร ขอบเขตล่างกำหนดจากมาตรฐานปริมาณการผลิตต่อหน่วย ส่วนขอบเขตบน กำหนดจากคุณภาพความต้านแรงและรูปลักษณะภายนอกของกระดาษ การที่เพิ่มการใช้ปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมากกว่า 40 กรัมต่อตารางเมตร จะส่งผลให้ค่าแรงดันทะลุ ค่ารับแรงกดแนววงแหวน ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของกระดาษและความขาวของกระดาษ ต่ำกว่ามาตรฐานของค่าควบคุม การปรับเพิ่ม หรือลดปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 1 กรัมต่อตารางเมตร คิดเป็นต้นทุนเศษกระดาษที่เพิ่มขึ้น หรือลดลง 83 บาทต่อตันกระดาษ หรือ คิดเป็น 1.41% ตามลำดับ

5.1. ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน (Brightness of Deinking Pulp)

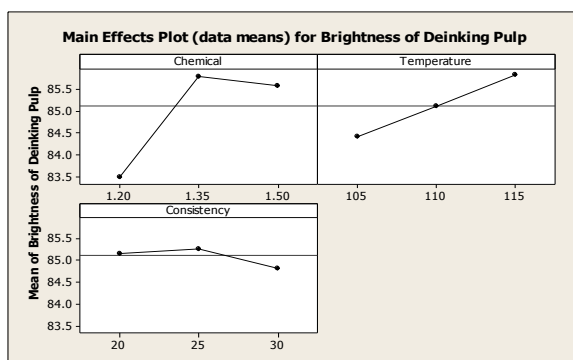
Montgomery [9] กล่าวว่า ก่อนที่จะนำข้อสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ไปใช้ จะต้องมีการตรวจสอบความเพียงพอของตัวแบบ (Model Adequacy Checking) ที่นำมาใช้เสียก่อน เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) ซึ่งประกอบด้วย การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน (Variance Stability) ในขั้นตอนการวิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทางสถิติมาทำการวิเคราะห์ผล พบว่าการทดสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรงทำให้ประมาณได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ จากการตรวจสอบความเป็นอิสระพบว่า การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปแบบและไม่สามารถประมาณรูปแบบที่แน่นอนได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และการตรวจสอบความเสถียรของค่าแปรปรวน ซึ่งพบว่าค่าส่วนตกค้างมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่งและไม่พบว่าการกระจายตัวของส่วนตกค้างมีแนวโน้มแต่อย่างใด จึงสามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์สรุปผลต่อไปได้ รูปที่ 8 แสดงการวิเคราะห์ส่วนตกค้างของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ



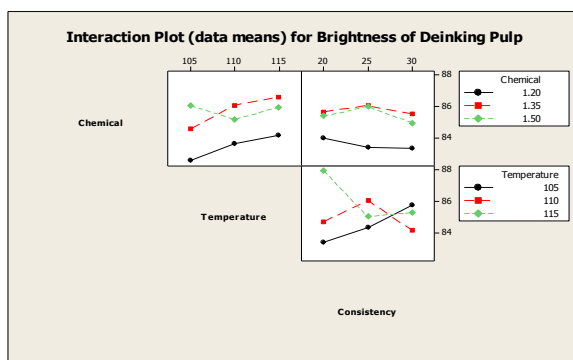
รูปที่ 8 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของตัวแปรอิสระทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่มีต่อค่าตัวแปรตอบสนอง คือ ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ถึงพักเยื่อเพื่อรอใช้งาน ก่อนส่งเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนไปเดินเป็นแผ่นกระดาษ จะพบว่าปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์เท่ากับ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ อุณหภูมิที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ 115 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นค่าอุณหภูมิสูงสุดที่เครื่องจักรสามารถปรับตั้งค่าได้ และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion ที่ 25% จะมีผลให้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงที่สุด

หลังจากเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนผ่านเครื่องจักร Hot Dispersion ไม่ว่าจะมีความเข้มข้นเป็นเท่าใดก็ตาม ระบบควบคุมคอมพิวเตอร์ก็จะทำการเปิดน้ำเพื่อเจือจาง (Dilution Water) ให้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนมีความเข้มข้นที่ 0.3-0.5% ตามที่มาตรฐานการผลิตกำหนดไว้ หลังจากนั้นเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจะถูกส่งต่อไปเดินผ่านในขั้นตอนของการผลิตกระดาษต่อไป รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก (Main Effect) 3 ปัจจัยต่อความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ



รูปที่ 9 อิทธิพลหลัก 3 ปัจจัยต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

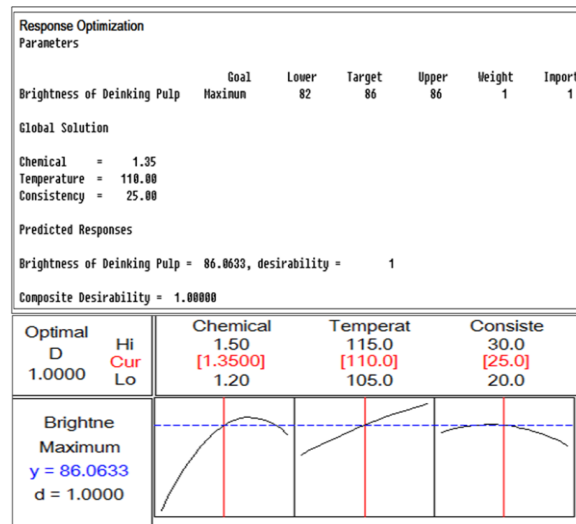


รูปที่ 10 อิทธิพลร่วมแต่ละคู่ของปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

จากรูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วม 2 ระดับ (Interaction) ของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ จากการวิเคราะห์รูปที่ 10 ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วม 2 ระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนอย่างมีนัยสำคัญ อิทธิพลร่วม 2 ระดับ ระหว่างปริมาณสารเคมีและอุณหภูมิพบว่า ที่อุณหภูมิต่ำมีผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณสารเคมีและอุณหภูมิ อิทธิพลร่วม 2 ระดับ ระหว่างปริมาณสารเคมีและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนพบว่า ที่ความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์สูงมีผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณสารเคมีและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน อิทธิพลร่วม 2 ระดับ ระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน พบว่าที่อุณหภูมิสูงมีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์

ในการหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัย สามารถใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยใช้ฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนอง (Response Optimization) ของโปรแกรม Minitab เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ สรุปผลได้ว่าระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมของการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน คือ ต้องทำการปรับปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ 1.35 กิโลกรัม

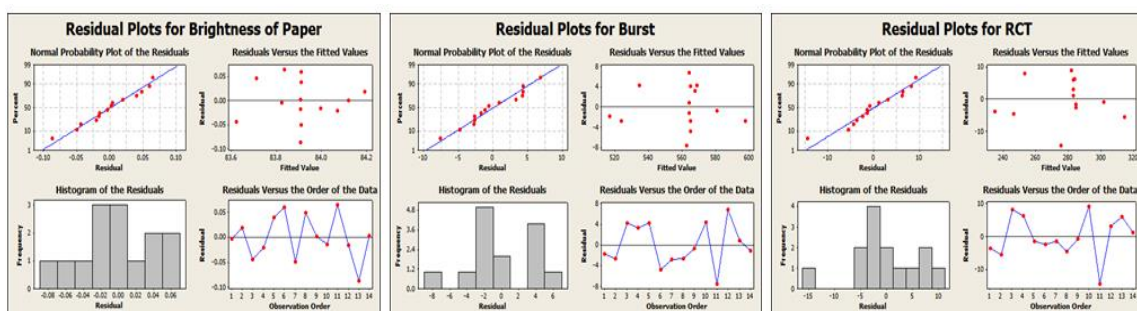
ต่อต้านเชื้อ ปรับอุณหภูมิและความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เครื่องจักร Hot Dispersion 110 องศาเซลเซียส และ 25% ตามลำดับ จึงจะทำให้ได้ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนสูงสุดตามวัตถุประสงค์ของการทดลองซึ่งมีค่าเท่ากับ 86 แสดงรายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 รายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และผลการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

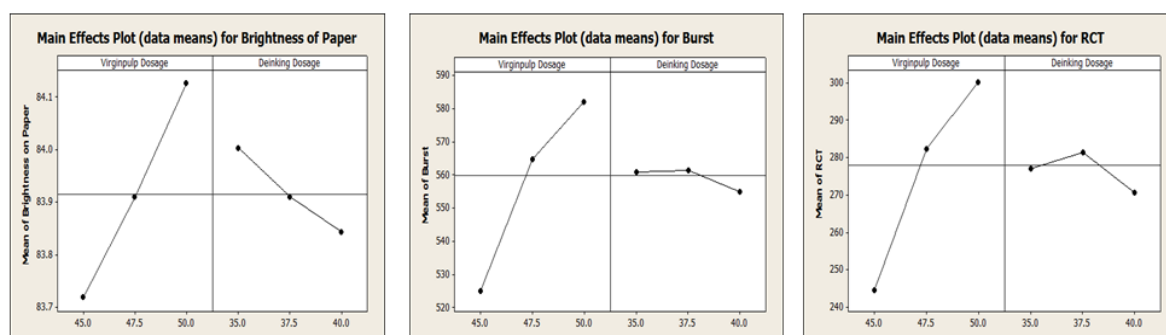
5.2. คุณภาพกระดาษ (Paper Quality)

ขั้นตอนของการผลิตกระดาษจะหาสภาวะที่เหมาะสมของปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนหลังจากทำการเพิ่มความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนแล้ว ตัวแปรตอบสนองจากการทดลองในขั้นตอนของการผลิตกระดาษที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ คือ คุณภาพกระดาษ ซึ่งจะทำให้การวัดคุณภาพด้านความขาวและคุณภาพด้านความแข็งแรงซึ่งวัดจากค่าแรงดันทะลุและค่ารับแรงกดแนววงแหวน จากการทดสอบความเพียงพอของตัวแบบและความน่าเชื่อถือของข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ส่วนตกค้างพบว่า ตัวแบบมีความเพียงพอและสามารถนำข้อมูลไปทำการวิเคราะห์สรุปผลต่อไปได้ รูปที่ 12 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของคุณภาพกระดาษ

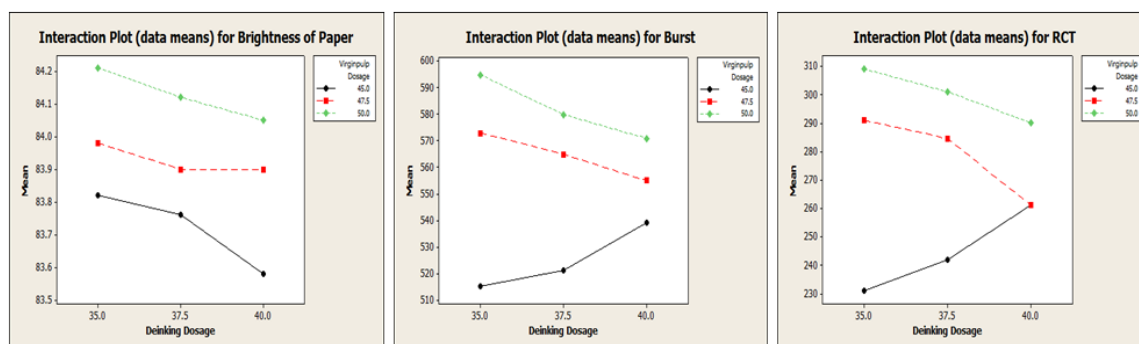


รูปที่ 12 การวิเคราะห์ส่วนตกค้างของคุณภาพกระดาษ

เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตในขั้นของการผลิตกระดาษจะทำการหาสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและปรับลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ ซึ่งจะพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของตัวแปรอิสระทั้ง 2 ปัจจัย ได้แก่ ปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ที่มีต่อผลต่อค่าตัวแปรตอบสนอง 3 ตัว คือ ความขาวของกระดาษ (Brightness of Paper) ค่าแรงดันทะลุ (Burst) และค่ารับแรงกดแนววงแหวน (RCT) จากผลการทดลองจะพบว่า การเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์จะทำให้ค่าความขาวของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวน เพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน จะทำให้ค่าความขาวของกระดาษ ค่าแรงดันทะลุ และค่ารับแรงกดแนววงแหวนลดลง รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก 2 ปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ



รูปที่ 13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลหลัก 2 ปัจจัยต่อคุณภาพกระดาษ

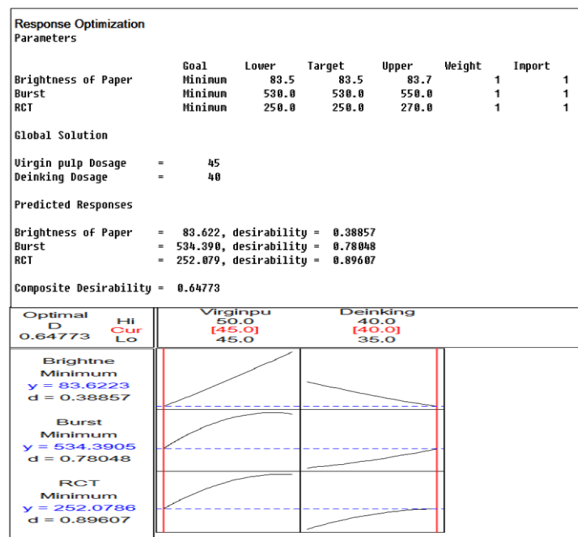


รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วมต่อคุณภาพกระดาษ

จากรูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิทธิพลร่วม 2 ระดับ (Interaction) ของ 2 ปัจจัย คือ ปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน ที่มีผลต่อคุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่า จากการวิเคราะห์รูปที่ 14 ซึ่งได้กราฟที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงที่ไม่ขนานกัน แสดงว่าอิทธิพลร่วม 2 ระดับของปัจจัยต่าง ๆ มีผลต่อคุณภาพกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ ที่ปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่เพิ่มขึ้นมีผลของอิทธิพลร่วมระหว่างปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์กับปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน

ในการหาระดับปรับตั้งที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้หลักการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ฟังก์ชันพื้นผิวตอบสนองของโปรแกรม Minitab สรุปผลได้ว่า ระดับของปัจจัยที่มีค่าเหมาะสมต้องทำการปรับปริมาณเยื่อบริสุทธิ์ที่ 45 กรัมต่อตารางเมตร และต้องทำการปรับปริมาณเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนที่ 40 กรัมต่อตารางเมตร จึงจะทำให้คุณภาพกระดาษทั้ง 3 ค่าผ่าน

เกณฑ์ตามมาตรฐานที่โรงงานกำหนดและมีต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ รูปที่ 15 แสดงรายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของคุณภาพกระดาษ



รูปที่ 15 รายละเอียดจากโปรแกรม Minitab และการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของคุณภาพกระดาษ

6. สรุปการทดลอง

การออกแบบการทดลองและการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของแต่ละปัจจัยด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดต้นทุนการผลิตกระดาษทำผิวกล่องสีขาวด้วยการปรับปรุงคุณภาพความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการเตรียมเยื่อ และทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมของการเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนและลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์ในขั้นตอนของการผลิตกระดาษ สรุปสภาวะการปรับปรุงคุณภาพเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนด้วยสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ที่ระดับนัยสำคัญ (α) 0.05 ได้ดังนี้ คือ ปริมาณสารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์ 1.35 กิโลกรัมต่อตันเยื่อ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียน 25 เปอร์เซ็นต์ ความขาวของเยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนจากการใช้สารเคมีโซเดียมไฮโดรซัลไฟด์อยู่ในช่วง 85.97 ถึง 86.51 และความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการ (C_{pk}) มีค่า 1.50 และสรุปสภาวะการเพิ่มปริมาณการใช้เยื่อเศษกระดาษพิมพ์เขียนในขั้นตอนของการผลิตกระดาษจาก 35 เป็น 40 กรัมต่อตารางเมตร ลดปริมาณการใช้เยื่อบริสุทธิ์จาก 50 เป็น 45 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเมื่อนำสภาวะทดลองที่ได้ไปผลิตจริงต่อเนื่อง ได้ความขาวกระดาษอยู่ในช่วง 83.57 ถึง 83.61 และความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการมีค่า 1.42 ค่าแรงดันทะลุอยู่ในช่วง 542.94 ถึง 549.86 กิโลปาสคาล และความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการมีค่า 1.58 ค่ารับแรงกดแนววงแหวนอยู่ในช่วง 266.49 ถึง 268.89 นิวตัน และความสามารถของด้านสมรรถนะของกระบวนการมีค่า 1.87 จากการวัดความสามารถด้านสมรรถนะของกระบวนการทุกกระบวนการที่ได้ทำการปรับปรุงพบว่ามีค่ามากกว่า 1.33 ทำให้สามารถสรุปได้ว่า กระบวนการผลิตมีความไวกับปัจจัยรบกวนน้อยมาก หรือกระบวนการมีการออกแบบอย่างแข็งแกร่ง (Robust Design) อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 324 บาทต่อตันกระดาษหรือคิดเป็น 9.89 ล้านบาทต่อปี

บรรณานุกรม

- [1] F. Päivi and G. Joseph, "Bleaching mixed office waste to high brightness," *Tappi Journal*, vol. 77, pp. 253-259, 1997.
- [2] J. Wasshausen, G. Rangamannar, R. Amyotte, and B. Cordy, "Premix: A novel process for improved bleaching of mechanical pulps using a mixture of reductive agents," *Pulp & Paper Canada*, vol. 107, pp. 44-47, 2006.
- [3] J. Ross, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1998.
- [4] T. Mohammadi and M. A. Safavi, "Application of Taguchi method in optimization of desalination by vacuum membrane distillation," *Desalination*, vol. 249, pp. 83-89, 2009.
- [5] W. Jian, C. Yong, W. Yi, Y. Shi, and Y. Han, "Optimization of the coagulation-flocculation process for pulp mill wastewater treatment using a combination of uniform design and response surface methodology," *Water Research*, vol. 45, pp. 5633-5640, 2011.
- [6] G. Nirdosha and S. Setunge, "Formulation and process modeling of particleboard production using hardwood saw mill wastes using experimental design," *Composite Structures*, vol. 75, pp. 520-523, 2006.
- [7] Y. C. Mevra and Y. Ergun, "Phosphate removal from water by fly ash: Factorial experimental design," *Journal of Hazardous Materials*, vol. B135, pp. 165-170, 2006.
- [8] C. Margarita, P. Monica, G. Selma, and L. Ferreira, "Biosorption of chromium using factorial experimental design," *Process Biochemistry*, vol. 40, pp. 779-788, 2005.
- [9] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiment*. USA: John Wiley & Sons, 2005.