การจัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อลดต้นทุนการผลิต

นางสาวอภิวรรณ พิชญเดชะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

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

GROUPING EUCALYPTUS SPECIES IN KRAFT PULP PROCESS FOR COST REDUCTION

MS. APIWAN PICHAYADECHA

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	การจัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อลดต้นทุนการผลิต
โดย	นางสาวอภิวรรณ พิชญเดชะ
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

…….. คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

…… ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ปารเมศ ชุติมา)

…….. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย)

…… กรรมการ
(อาจารย์ ดร. นระเกณฑ์ พุ่มชูศรี)

…… กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล)

อภิวรรณ พิชญเดชะ : การจัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อลดต้นทุนการผลิต. (Grouping Eucalyptus Species in Kraft Pulp Process for Cost Reduction) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย, 128 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด เบื้องต้นได้ทำการหาปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิต จากการระดมสมองของผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ ตามหลักการ 4M 1E ของแผนผังสาเหตุและผล ปัจจัยที่มีคะแนนรวมในกลุ่ม 80 เปอร์เซ็นต์แรกของพาเรโตถูกนำมาทดสอบสมมติฐานทางสถิติเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์แสดงให้เห็นว่า ปริมาณ Effective Alkali ในน้ำยาต้มเยื่อและตัวเลขคัปปามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่งานวิจัยในอดีตบ่งชี้ว่า สายพันธุ์ของไม้ยูคาลิปตัสแบ่งตามความสามารถในการต้มง่าย-ยาก มีผลต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้น ปัจจัยที่นำมาออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด คือ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ Effective Alkali ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken ที่มีปัจจัย 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยระดับของแต่ละปัจจัยอ้างอิงตามความสามารถของเครื่องจักรและกระบวนการ พบว่า ระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด คือ สัดส่วนของไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย 75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ Effective Alkali ในน้ำยาต้มเยื่อ 112 กรัมต่อลิตร และตัวเลขคัปปา 13.5 หลังจากการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อต่ำที่สุด เมื่อปรับระดับปัจจัยนำเข้าให้เหมาะสม พบว่า ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเฉลี่ยลดลงจาก 15,480 บาทต่อตัน เป็น 13,393.91 บาทต่อตัน หรือสามารถลดต้นทุนการผลิตลง 13.68 เปอร์เซ็นต์

ภาควิชา .....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

ปีการศึกษา ..2556..

5371515221 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING
KEYWORDS : EUCALYPTUS / KAPPA NO. / EA IN WHITE LIQUOR / KRAFT PULP AND PAPER

APIWAN PICHAYADECHA : GROUPING EUCALYPTUS SPECIES IN KRAFT PULP PROCESS FOR COST REDUCTION. ADVISOR : ASST. PROF. ANGSUMALIN SENJUNTICHAI, D.Eng., 128 pp.

The objective of this research is to study the level of the important factors that can decrease total cost of pulp production. First of all, experts and experienced users identify the factors that affect the total production cost by applying the principle of 4M 1E cause and effect diagram. Then the primary factors were chosen based on 80% of Pareto and tested by hypothesis for two populations' means. It was found that at the 95% confidence level the significant factors that have effects on the total production cost are amount of Effective alkali in white liquor and Kappa number. However, the proportion of easy delignification according to Eucalyptus species is considered as a significant factor based on various researches. Box-Behnken experiment is designed with respect to 3 mentioned factors and 3 levels of each factor. The response surface method (RSM) is employed to determine the non-linear relation between the total cost as the response and the proportion of easy delignification, amount of Effective alkali in white liquor and Kappa number. To minimize the total cost, the optimal values of each factor are 75% of easy delignification, 112 mg per liter of Effective alkali in white liquor and 13.5 of kappa number. Under this optimal condition, the average total cost per ton of Eucalyptus is 13,400 Baht which is significantly less than the total cost of 15,480 Baht per ton before improvement.

Department INDUSTRIAL ENGINEERING Student's Signature .....
Field of Study INDUSTRIAL ENGINEERING Advisor's Signature.....
Academic Year 2013

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดีจากความอนุเคราะห์ของบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อังศุมาลิน เสนจันทร์ฒิไชย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้เสียสละเวลาในการให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ระหว่างการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องด้วยความเอาใจใส่เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชุติมา ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ อาจารย์ ดร. นระเกณฑ์ พุ่มชูศรี กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร. บุญวา ธรรมพิทักษ์กุล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องจึงทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบริษัทกรณีศึกษาเป็นอย่างสูงที่ให้โอกาสผู้วิจัยได้เข้าไปทำการศึกษาวิจัย ให้ความร่วมมือในการเก็บข้อมูลและทำการทดลองเป็นอย่างดี และทีมงานที่ช่วยกันระดมสมองให้คำแนะนำ ความรู้ และความช่วยเหลือต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่อยู่เบื้องหลังความสาเร็จ ให้ความช่วยเหลือสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งผู้ที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่มิได้กล่าวไว้ใน ณ ที่นี้ด้วยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้งานวิจัยนี้ประสบผลสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย…… ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง…… ฌ

สารบัญภาพ…….. ญ

บทที่ 1 บทนำ…….. 1

1.1 ที่มาและความสำคัญ…… 2

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... 27

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย..... 28

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ..... 28

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 28

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย…… 29

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง……. 31

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 31

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... 38

2.3 หลักการและกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ..... 50

บทที่ 3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต……. 54

3.1 การกำหนดตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)…….. 54

3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง..... 56

3.3 การคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลอง..... 67

บทที่ 4 วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง……. 78

4.1 การกำหนดระดับ (Level) ของตัวแปรกระบวนการ…….. 80

4.2 ขั้นตอนการทดลอง..... 83

4.3 ผลการทดลอง..... 88

บทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง……... 90

หน้า

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)..... 90
5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนอง..... 92
5.3 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม..... 97
บทที่ 6 การทดสอบเพื่อยืนยันผล..... 101
6.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อยืนยันผล..... 101
6.2 ผลการทดลอง..... 101
6.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล..... 102
6.4 สรุปผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล..... 107
บทที่ 7 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... 108
7.1 สรุปผลจากการค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมด้วยแผนผังก้างปลา..... 108
7.2 สรุปผลการคัดเลือกปัจจัยโดยการทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีต..... 109
7.3 สรุปผลการทดลองโดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken..... 110
7.4 สรุปการวิเคราะห์ผลการทดลอง..... 110
7.5 สรุปผลการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม..... 111
7.6 สรุปผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล..... 111
7.7 ข้อจำกัดของงานวิจัย..... 112
7.8 ข้อเสนอแนะ..... 112
รายการอ้างอิง..... 114
ภาคผนวก..... 117
ภาคผนวก ก..... 118
ภาคผนวก ข..... 122
ภาคผนวก ค..... 125
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1ก	สัดส่วนสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้า (%) ประจำปี 2554……..	3
1.1ข	สัดส่วนสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้า (%) ประจำปี 2555……..	3
1.2	ข้อมูลกำลังผลิตของกระบวนการผลิตชิ้นไม้สับและโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขา 9 แห่งทั่วประเทศ……	4
1.3	ข้อกำหนดของคุณภาพชิ้นไม้สับตามเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้……	7
2.1	การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน……..	48
3.1	รายละเอียดของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่อหนึ่งตันเยื่อ……	56
3.2	ปัจจัยที่คาดว่าส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ……	68
3.3	แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ เบื้องต้น……..	73
3.4	ผลการทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าความแปรปรวนของประชากร 2 กลุ่ม…….	76
3.5	ผลการทดสอบสมมติฐานปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ย……..	77
3.6	ปัจจัยในการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด…..	76
4.1	แผนการทดลอง Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย……	79
4.2	สัญลักษณ์และระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองแบบ Box-Behnken……..	81
4.3	ตารางการเก็บข้อมูลการทดลองแบบ Box-Behnken……..	82
4.4	ค่าควบคุมของตัวแปรควบคุมในการทดลอง……	84
4.5	ผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด……..	88
5.1	ระดับการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนอง……	99
6.1	ผลการทดลองการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการออกแบบการทดลอง……	101
6.2	ผลการทดสอบต้นทุนการผลิตหลังการออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการในหน่วยบาทต่อตัน……	102
6.3	ค่าความขาวสว่างที่ได้จากการทดลอง……..	105

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ตำแหน่งโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขาที่กระจายตามจังหวัดทั่วประเทศ……	5
1.2	ร้อยละของเปลือกที่ปนไปกับชิ้นไม้สับและเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ...	11
1.3	กระบวนการผลิตชิ้นไม้สับ……	13
1.4	ลานกองชิ้นไม้สับ (Storage) ก่อนส่งไปยังโรงผลิตเยื่อกระดาษโดยสายพานลำเลียง (Conveyor)……	14
1.5	สายพานลำเลียงชิ้นไม้สับจากกองชิ้นไม้สับ (Storage) ไปสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ……...	14
1.6	ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงานต้มเยื่อ (Cooking)……	17
1.7	ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงาน Brown Stock……..	19
1.8	ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงานฟอกเยื่อขาว (Bleaching)……	19
1.9	ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF..	20
1.10	ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน D_0……	21
1.11	ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน EOP……	22
1.12	ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน D_1……	22
1.13	ปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกต่อตันผลิตเยื่อแห้ง (Kgs/ADT)……	24
1.14	ปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (ตัน)……	25
1.15	ปริมาณสารเคมีหลักที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษ……	26
1.16	ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ……..	27
1.17	แผนภูมิก้างปลาแสดงปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเบื้องต้น…….	30
2.1	ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลผลิตของเยื่อกระดาษในกระบวนการต้มเยื่อแบบคราฟท์และปริมาณลิกนินที่ปรากฏในไม้แต่ละสายพันธุ์……..	33
2.2	ปัจจัยนำเข้าที่มีอิทธิพล และไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง……	43
2.3	การออกแบบบอกซ์-เบห์นเคน สำหรับสามตัวแปร……...	45

รูปที่		หน้า
3.1	แสดงแผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม……	58
3.2 (ก)	กราฟแสดงปริมาณสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้าโรงงาน (ตัน) ประจำปี 2554…….	61
3.2 (ข)	กราฟแสดงปริมาณสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้าโรงงาน (ตัน) ประจำปี 2555…….	62
3.3	อัตราการทำปฏิกิริยาสัมพัทธ์……	67
3.4	กราฟแสดงคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต……	72
3.5	ผลกระทบของค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจากการเพิ่มปริมาณ Sulfidity……...	74
4.1	รูปแบบเรขาคณิตของแผนการทดลอง Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย……	79
4.2	หม้อต้มเยื่อจำลองในห้องปฏิบัติการ (Cooking digester)……..	85
4.3	Water bath ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ……	86
4.4	เครื่องฟอกเยื่อด้วยออกซิเจนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ…….	87
4.5	(ก) เครื่องเหวี่ยงและกรองหยาบ (ข) เครื่องกรองละเอียด……	88
5.1	ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวม……	91
5.2	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล……	92
5.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าและค่าที่ถูกฟิตของต้นทุนการผลิตรวม..…	93
5.4	ผลการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตรวม……	94
5.5	ปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม……..	95
5.6	อันตรกิริยา (Interaction) ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม……..	95
5.7	Contour Plot ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม……...	96
5.8	Surface Plot ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม……	96
5.9	ผลลัพธ์การหาตัวแบบถดถอยจากวิธีของ Stepwise โดยใช้โปรแกรม Minitab….	98
5.10	ผลการวิเคราะห์เพื่อหาระดับการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนองของต้นทุนการผลิตรวม……	100
5.11	กราฟ Optimization Plot เพื่อปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนองต้นทุนการผลิตรวม……..	100

รูปที่		หน้า
6.1	ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย 1 ตัวอย่างโดยโปรแกรม Minitab……	103
6.2	ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรโดยโปรแกรม Minitab……	104
6.3	กราฟ Box Plot แสดงการทดสอบสมมติฐานของ 2 กลุ่มประชากร……	105
6.4	ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของเยื่อกระดาษของสองประชากรโดยโปรแกรม Minitab……	106
6.5	กราฟ Box Plot แสดงการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของเยื่อกระดาษ……	107

บทที่ 1

บทนำ

อุตสาหกรรมกระดาษในประเทศไทยมีแนวโน้มขยายตัวอย่างต่อเนื่อง ในปี 2554 ความต้องการเยื่อกระดาษเคมีฟอกขาวทั่วโลกเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 3 เมื่อเทียบกับปี 2553 ปัจจัยหลักมาจากการปรับตัวในทิศทางที่ดีขึ้นของภาวะเศรษฐกิจ อุตสาหกรรมต่อเนื่องต่างๆ ที่ต้องใช้กระดาษเป็นวัตถุดิบ โดยเฉพาะบรรจุภัณฑ์ การขนส่งสินค้า และสิ่งพิมพ์ นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยหนุนจากกระแสรักสิ่งแวดล้อมที่ทำให้บรรจุภัณฑ์กระดาษเป็นที่นิยม รวมถึงนโยบายที่เกี่ยวข้องต่างๆ ได้แก่

1) การยกเว้นภาษีเงินได้บุคคลธรรมดาและนิติบุคคล สำหรับค่าใช้จ่ายในการซื้อหรือบริจาคเงินเพื่อซื้อหนังสือหรือสื่ออิเล็กทรอนิคให้กับสถานศึกษาและห้องสมุดเพื่อสนับสนุนและส่งเสริมการอ่าน ตามประกาศราชกิจจานุเบกษา ฉบับกฤษฎีกา เล่ม 128 ตอนที่ 15 ก วันที่ 11 มีนาคม 2554 ซึ่งมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ปีภาษี 2554 เป็นต้นไป

2) องค์การศึกษา วิทยาศาสตร์ และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (ยูเนสโก) ได้ประกาศให้กรุงเทพมหานคร เป็นเมืองหนังสือโลกประจำปี 2556 (World Book Capital 2013) ซึ่งมีส่วนช่วยในการกระตุ้นให้เกิดกิจกรรมด้านการส่งเสริมการอ่าน และการเรียนรู้ด้วยหนังสือ รวมทั้งการพัฒนาเนื้อหาและรูปแบบหนังสือ

3) นโยบายในการส่งเสริมให้สังคมไทยเป็นสังคมแห่งการเรียนรู้ของรัฐบาล โดยการกำหนดให้การอ่านเป็นวาระแห่งชาติ และกำหนดทศวรรษแห่งการอ่าน ในช่วงปี 2552-2556

ภาวะการผลิตเยื่อกระดาษของประเทศไทยซึ่งเป็นการผลิตเยื่อกระดาษใยสั้น คาดว่าจะเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 0.2 ตามความต้องการของผู้ใช้เยื่อกระดาษทั้งภายในประเทศและ

ต่างประเทศที่มีการขยายตัว ซึ่งเป็นผลมาจากอุตสาหกรรมต่อเนื่อง นอกจากนี้ความต้องการในต่างประเทศโดยเฉพาะประเทศคู่ค้าสำคัญ เช่น ประเทศจีน มีคำสั่งซื้อเยื่อกระดาษใยสั้นจากประเทศไทยในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเพื่อรองรับความต้องการในประเทศจากการเติบโดทางเศรษฐกิจ เนื่องจากปริมาณการผลิตภายในไม่เพียงพอกับความต้องการ

ปัจจัยเสี่ยงต่อการขยายตัวของอุตสาหกรรมกระดาษ คือ แนวโน้มต้นทุนการผลิตที่เพิ่มเนื่องจาก

1) ราคาวัตถุดิบในการผลิตกระดาษมีการปรับตัวสูงขึ้นตามตลาดโลก
2) ราคาพลังงานที่เพิ่มขึ้น
3) ต้นทุนการลดมลพิษจากการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ราคาขายกระดาษสูงขึ้น

แนวทางสำหรับผู้ประกอบการในการปรับตัวเพื่อลดต้นทุนผลิตคือ ปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพื่อลดการใช้พลังงานและลดการเกิดมลพิษจากการผลิต เพื่อจะช่วยลดต้นทุนในการบริหารจัดการเพื่อบำบัดสิ่งแวดล้อมหรือลดมลพิษที่เกิดจากการผลิตได้

1.1 ที่มาและความสำคัญ

วัตถุดิบสำคัญในการผลิตเยื่อกระดาษ คือ ไม้ยูคาลิปตัส (Eucalyptus) หรือที่เรียกกันว่า ไม้ท่อน (Log) ไม้ท่อนที่บริษัทรับเข้ามาเป็นวัตถุดิบส่วนใหญ่รับซื้อจากเกษตรกรที่เป็นสมาชิกของบริษัท โดยมีปริมาณการรับซื้อไม้ท่อนของบริษัทประมาณ 3,000 ตันต่อวัน ในการรับซื้อแบบนี้ทางบริษัทรับรองราคาในการซื้อพร้อมทั้งดำเนินการตัดต้นยูคาลิปตัสจากสวนของสมาชิกและขนส่งมาที่โรงงานของบริษัทเอง และการรับซื้อแบบที่สองเป็นการรับซื้อจากเกษตรกรทั่วไป โดยบริษัทรับซื้อไม้ท่อนลักษณะนี้ในจำนวนไม่จำกัดโดยมีปริมาณรับซื้อประมาณ 1,000 ตันต่อวัน โดยไม้ท่อนที่นำมาเป็นวัตถุดิบเหล่านี้เป็นไม้ยูคาลิปตัสในสายพันธุ์ต่างๆ เช่น K51, K52, K7 ฯลฯ ตารางที่ 1.1 แสดงสัดส่วนไม้ท่อนแต่ละสายพันธุ์ที่บริษัทรับซื้อในปี 2554 และปี 2555

ตารางที่ 1.1ก สัดส่วนสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้า (%) ประจำปี 2554

Monthly	สัดส่วนสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้า ประจำปี 2554 (%)												Total
	K51	K52	K7	K58	K59	K62	K63	G2	SK	294	ไม้เมล็ด	K อื่นๆ	
	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	
Jan	28.99%	0.10%	19.03%	14.51%	2.58%	1.96%	0.11%	1.73%	2.16%	0.31%	24.98%	3.54%	100.00
Feb	20.74%	0.00%	20.90%	12.98%	1.29%	2.49%	0.11%	0.78%	3.32%	0.06%	29.42%	7.90%	100.00
Mar	26.73%	0.36%	18.92%	20.99%	0.63%	2.77%	0.00%	1.02%	5.75%	0.12%	17.45%	5.26%	100.00
Apr	19.99%	0.00%	12.00%	16.14%	1.06%	2.91%	0.04%	0.71%	5.65%	0.22%	38.06%	3.21%	100.00
May	22.13%	0.00%	14.19%	18.96%	0.52%	2.29%	0.02%	1.41%	6.23%	0.42%	33.20%	0.63%	100.00
Jun	19.34%	0.00%	13.89%	16.45%	0.16%	1.15%	0.25%	4.13%	6.09%	0.59%	28.40%	9.55%	100.00
Jul	13.74%	0.05%	13.81%	22.93%	0.34%	1.10%	0.27%	5.94%	10.38%	0.93%	28.50%	2.03%	100.00
Aug	12.77%	0.11%	10.05%	21.64%	0.89%	1.13%	0.63%	3.55%	8.31%	2.93%	36.89%	1.09%	100.00
Sep	6.30%	0.35%	13.28%	15.21%	0.24%	4.51%	0.49%	1.35%	12.95%	1.06%	40.21%	4.05%	100.00
Oct	8.14%	0.38%	14.68%	13.29%	0.09%	8.63%	0.70%	1.80%	6.69%	1.24%	36.13%	8.23%	100.00
Nov	10.18%	0.87%	8.41%	16.69%	0.00%	13.10%	1.44%	0.00%	5.67%	1.32%	30.48%	11.83%	100.00
Dec	17.19%	0.20%	14.47%	17.25%	0.71%	3.82%	0.37%	2.04%	6.65%	0.84%	31.25%	5.21%	100.00

ตารางที่ 1.1ข สัดส่วนสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้า (%) ประจำปี 2555

Monthly	สัดส่วนสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้า ประจำปี 2555 (%)												Total
	K51	K52	K7	K58	K59	K62	K63	G2	SK	294	ไม้เมล็ด	K อื่นๆ	
	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	Ton	
Jan	10.08%	0.00%	35.74%	18.06%	0.21%	4.45%	0.42%	7.39%	1.46%	3.73%	16.95%	1.50%	100.00
Feb	6.89%	0.00%	30.62%	20.68%	0.19%	3.17%	0.39%	2.20%	7.83%	1.79%	26.09%	0.15%	100.00
Mar	2.68%	0.00%	32.10%	19.64%	0.21%	5.46%	0.47%	2.74%	8.89%	1.60%	26.22%	0.00%	100.00
Apr	3.85%	0.00%	28.69%	16.35%	0.69%	3.94%	0.46%	5.39%	11.45%	0.83%	28.29%	0.07%	100.00
May	6.46%	0.00%	7.96%	25.36%	0.00%	6.37%	0.08%	9.93%	17.21%	2.74%	21.87%	2.02%	100.00
Jun	5.40%	0.36%	26.04%	30.68%	0.00%	7.38%	0.00%	3.66%	15.59%	1.55%	8.92%	0.42%	100.00
Jul	6.01%	0.57%	21.78%	31.96%	0.00%	7.23%	0.03%	3.91%	11.82%	1.72%	12.58%	2.39%	100.00
Aug	3.68%	0.00%	11.27%	18.52%	0.00%	6.71%	0.81%	6.64%	12.90%	2.58%	36.47%	0.42%	100.00
Sep	2.81%	0.00%	7.49%	15.21%	0.00%	10.71%	0.34%	3.36%	9.61%	0.91%	47.76%	1.79%	100.00
Oct	2.95%	0.00%	8.62%	22.03%	0.00%	10.03%	0.00%	1.48%	5.25%	1.63%	45.97%	2.03%	100.00
Nov	2.16%	0.00%	8.63%	26.94%	0.00%	13.85%	0.26%	3.03%	9.49%	1.47%	33.51%	0.66%	100.00
Dec	1.14%	0.04%	17.85%	29.92%	0.00%	12.66%	0.00%	8.63%	6.90%	0.77%	21.77%	0.32%	100.00

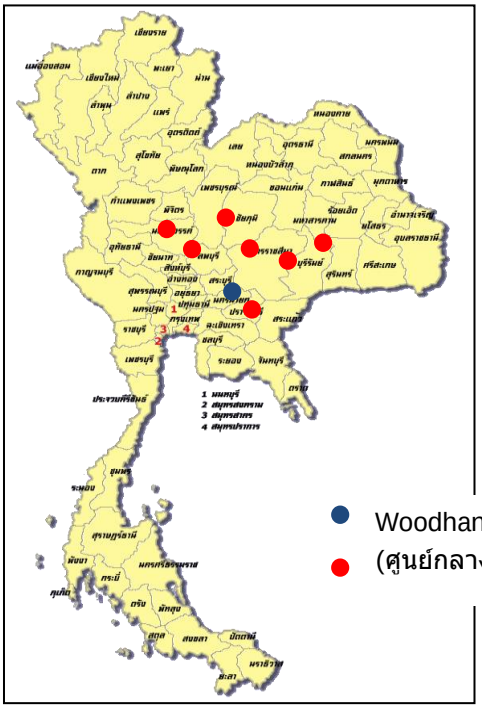
การจัดหาวัตถุดิบซึ่งได้แก่ ไม้ยูคาลิปตัสเพื่อป้อนเข้าสู่โรงงานเป็นหัวใจสำคัญของอุตสาหกรรมผลิตเยื่อกระดาษ เนื่องจากสภาวะปัจจุบันความต้องการใช้กระดาษมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น

โรงผลิตเยื่อกระดาษต้องการชิ้นไม้สับปริมาณมากตามอัตราการผลิตที่สูงขึ้น ประกอบกับกระบวนการผลิตชิ้นไม้สับของทางบริษัทไม่สามารถผลิตชิ้นไม้สับได้ทันตามความต้องการ ทำให้ทางบริษัทจำเป็นต้องรับซื้อชิ้นไม้สับจากโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขาต่างๆ จำนวน 9 แห่งทั่วประเทศ และมาคัดขนาดตามคุณสมบัติที่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษต้องการ เพื่อให้สามารถรองรับแผนการผลิตกระดาษจำนวน 600,000 ตันต่อปี

ตารางที่ 1.2 ข้อมูลกำลังผลิตของกระบวนการผลิตชิ้นไม้สับและโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขา 9 แห่งทั่วประเทศ

ชื่อโรงงาน	ชื่อย่อ	กำลังการผลิต (ตันต่อวัน)	แหล่งที่ตั้ง	หมายเหตุ
Wood handling	AA	4,000	ปราจีนบุรี	เป็นศูนย์กลางรับไม้สับ
ศาลาลำดวน	SLD	300	สระแก้ว	โรงชิพสาขา
วัฒนานคร	WTN	300	สระแก้ว	โรงชิพสาขา
หนองบัว	NOB	300	นครสวรรค์	โรงชิพสาขา
บ้านกรวด	BKD	300	บุรีรัมย์	โรงชิพสาขา
สังขะ	SAK	300	สุรินทร์	โรงชิพสาขา
ปักธงชัย	PTC	300	นครราชสีมา	โรงชิพสาขา
ห้วยแถลง	HTL	300	นครราชสีมา	โรงชิพสาขา
ชัยบาดาล	CDB	300	ลพบุรี	โรงชิพสาขา
จัตุรัส	CTR	300	ชัยภูมิ	โรงชิพสาขา

จากตารางที่ 1.2 แสดงให้เห็นว่า ทางบริษัท มีโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขาทั้งหมด 9 สาขาใน 5 ภูมิภาค ที่รับซื้อชิ้นไม้สับเพื่อส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคตะวันออก ริมมูล (ภาคอีสาน) และริมโขง (ภาคอีสาน) ซึ่งมีกำลังการผลิตรวม 6,700 ตันต่อวัน โดยภาคอีสาน มีจำนวนสาขามากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เนื่องจาก มีพื้นที่ในการปลูกต้นยูคาลิปตัสจำนวนมาก รวมทั้งระยะทางไม่ไกลจากบริษัท ปัจจุบันจะเห็นได้ว่า ไม่มีโรงชิ้นไม้สับบริเวณภาคใต้ เนื่องจาก ภาคใต้นั้นมีระยะห่างจากบริษัทค่อนข้างมาก ประกอบกับเกษตรกรในภาคใต้นิยมปลูกต้นยางพาราและต้นปาล์มมากกว่า เนื่องจากมีราคาสูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขาที่กระจายตามจังหวัดทั่วประเทศ

ชิ้นไม้สับเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อกระดาษ คุณภาพของเยื่อกระดาษขึ้นกับคุณภาพชิ้นไม้สับ โดยกระบวนการผลิตชิ้นไม้สับเริ่มตั้งแต่การวางแผนปริมาณที่ต้องการ การรับไม้เข้าโรงงาน และการแปรรูปไม้ท่อนเป็นชิ้นไม้สับเพื่อให้สะดวกต่อการต้มเยื่อ โดยคุณสมบัติของไม้ท่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการผลิต มีดังต่อไปนี้

1) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านปลายเล็ก (Diameter at small end, inch) ของไม้ท่อน มากกว่า 2 นิ้ว
2) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านปลายใหญ่ (Diameter at big end, inch) ของไม้ท่อน น้อยกว่า 8 นิ้ว
3) ความยาวของไม้ท่อน (Wood length, m) อยู่ระหว่าง 1.5 ถึง 2.7 เมตร

4) เปอร์เซ็นต์ความชื้นของไม้ท่อน (Wood moisture content, %) ไม่เกิน 46 เปอร์เซ็นต์ (ต้องเป็นไม้สด)

ในส่วนของชิ้นไม้สับที่ซื้อจากภายนอก ไม่ต้องผ่านกระบวนการสับ แต่ต้องผ่านกระบวนการตรวจสอบคุณสมบัติ ซึ่งทางบริษัทพิจารณาคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) ขนาดชิ้นไม้สับ (Chip size) กำหนดขนาดชิ้นไม้สับโดยคัดกรองจากตะแกรงทั้งหมด 6 ชั้น โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- Oversize chips คือ ชิ้นไม้สับที่ไม่ผ่านตะแกรงชั้นบนสุดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 45.0+0.1 มิลลิเมตร (เป็นชิ้นไม้สับที่มีขนาดใหญ่เกินไปต้องส่งไป Rechipper ใหม่เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม)
- Over thick chips คือ ชิ้นไม้สับที่ไม่ผ่านตระแกรงชั้นที่สอง ซึ่งมีระยะห่างของแท่งแม่เหล็ก 8.0+0.1 มิลลิเมตร (เป็นชิ้นไม้สับที่มีขนาดหนาเกินไปต้องส่งไป Rechipper ใหม่เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสม)
- Acceptable chips คือ ชิ้นไม้สับที่ผ่านตะแกรงสองชั้นบน แต่คงเหลืออยู่ตะแกรงชั้นที่สามและชั้นที่สี่ ซึ่งตะแกรงชั้นที่สี่ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.0+0.1 mm (เป็นชิ้นไม้สับที่มีขนาดเหมาะต่อการนำไปผลิตเยื่อ เหมาะต่อการดูดซึมสารเคมี (White Liquor, WL) ไอน้ำ และอุณหภูมิ)
- Pin chips คือ ชิ้นไม้สับที่เหลืออยู่บนตะแกรงชั้นที่ห้า ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.0+0.1 mm (คือส่วนที่เป็นเสี้ยนไม้ จะส่งไปทำ Fiberboard)
- Fines คือ ส่วนที่อยู่ในถาดชั้นล่างสุด (คือส่วนที่เป็นผงไม้ จะส่งไปทำ Fiberboard)

โดยชิ้นไม้สับที่ซื้อมานั้นต้องมีคุณสมบัติหลังจากคัดแยกขนาดตามที่บริษัทกำหนดในตารางที่ 1.3

ตารางที่ 1.3 : ข้อกำหนดของคุณภาพชิ้นไม้สับตามเปอร์เซ็นต์ที่ยอมรับได้

Spec	Purchase Chip
Over size	≤ 10.5 %
Over thick	
Accept 1	≥ 65.0 %
Accept 2	≤ 20.0 %
Pin	≤ 7.0 %
Fine	≤ 1.0 %
Bark	≤ 1.0 %

2) เปอร์เซ็นต์แห้ง (%Dry matter) มากกว่า 54 เปอร์เซ็นต์ (คือเปอร์เซ็นต์ความแห้งของชิ้นไม้สับ ถ้าแห้งมากเกินไปการดูดซึมสารเคมี ไอน้ำ และอุณหภูมิจะไม่ดี ทำให้เกิดเยื่อที่ต้มไม่สุก (Uncooked))

เนื่องจากทางบริษัทรับซื้อไม้ท่อนจากเกษตรกรจำนวนไม่จำกัด ทำให้ปริมาณไม้มีจำนวนมาก ทางบริษัทจึงมีลานเก็บไม้ท่อน (Log Yard) ก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต ซึ่งกระบวนการรับไม้ท่อน มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) พนักงานรับสินค้าทำการตรวจรับไม้ท่อนที่เข้าโรงงาน โดยไม้ท่อนจะต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านปลายมากกว่า 2.0 นิ้วขึ้นไป และจำนวนไม้ท่อนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านปลายเล็กกว่า 2.0 นิ้ว จำนวนไม่เกิน 10 ท่อนต่อคันรถ โดยพนักงานรับสินค้าจะต้องทำการลงบันทึกการรับสินค้าไม้ท่อนทุกคัน รายละเอียดที่บันทึกประกอบไปด้วย ลำดับคิว น้ำหนักชั่งเข้า ทะเบียนรถ ผู้ส่ง และผู้รับสินค้า ในใบรับสินค้าไม้ท่อนประจำวัน และบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์
2) ไม้ท่อนที่ได้ขนาดตามคุณสมบัติที่โรงงานกำหนด จะถูกนำเข้าผลิตโดยตรง หรือนำเข้าจัดเก็บที่ลานเก็บไม้ท่อน ตามคำสั่งของหัวหน้ากะ

3) ไม้ท่อนที่ขนาดไม่ตรงตามความต้องการ จะถูกยกเลิกทันที และไม่มีการนำไม้ท่อนในรถบรรทุกคันนั้นๆ เข้าผลิตอีก เพื่อให้คนส่งสินค้านำไม้ท่อนไปคัดขนาดตามความต้องการของโรงงานใหม่ก่อนนำไม้ท่อนเข้ามาส่งอีกครั้ง

โดยปกติการนำไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต จะเป็นแบบนำเข้าสู่การผลิตโดยตรง (Direct Load) แต่บางเวลาที่มีจำนวนรถขนไม้ท่อนเข้าสู่โรงงานพร้อมๆ กัน ทำให้ไม่สามารถรับไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตได้โดยตรงในทันที จึงต้องจัดเก็บไม้ท่อนที่ลานเก็บไม้ท่อน การจัดเก็บไม้ท่อนที่ลานเก็บไม้ท่อนและการนำไม้ท่อนที่ถูกจัดเก็บมาเข้าสู่กระบวนการ มีขั้นตอนการปฏิบัติ ดังต่อไปนี้

1) การตั้งชื่อกองจะกำหนดเป็น กองที่ 1 กองที่ 2 เป็นต้น ในแต่ละกองจะมีจำนวนแถวประมาณ 20 แถว ความสูงของแถวประมาณ 3 - 4 เมตร ส่วนความยาวของแต่ละแถวขึ้นอยู่กับพื้นที่ โดยการจัดเก็บไม้ท่อนนั้น จะใช้รถปากคีบ (Backhoe) และ รถคีบไม้ (Bell) เป็นอุปกรณ์สำคัญในการลำเลียง

2) ในแต่ละกองของไม้ท่อนที่ถูกจัดเก็บจะมีใบควบคุมการรับเข้าและจ่ายออก โดยมีการระบุวัน เวลา และน้ำหนัก ไว้อย่างชัดเจน เพื่อตรวจสอบระยะเวลาในการกองเก็บไม้ท่อน ซึ่งอายุการเก็บกองไม้ท่อนกำหนดไว้ไม่เกิน 3 เดือน เนื่องจากไม้ท่อนที่ถูกจัดเก็บไว้นานเกินไปนั้น มีผลต่อคุณภาพของเยื่อกระดาษ

3) มีการทำแนวป้องกันไฟไว้ ในบริเวณรอบๆ ของลานเก็บไม้ท่อนเป็นระยะทาง 25-30 เมตร จากรอบนอก รวมถึงมีการจัดหน่วยงานรักษาความปลอดภัย (รปภ) เฝ้ารักษาการณ์ตลอด 24 ชั่วโมง โดยกำหนดให้มีการเดินตรวจพื้นที่ทุกๆ 2 -3 ชั่วโมง ร่วมกับพนักงานรับสินค้า และมีการเซ็นต์ชื่อลงในใบตรวจประจำจุด

การนำไม้ท่อนจากลานกองเก็บไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต (ในกรณีที่ไม้ท่อนจากภายนอกเข้ามาไม่เพียงพอกับการผลิตต่อวัน หรือ ในกรณีที่ไม้ท่อนมีอายุการกองใกล้ครบ 3 เดือน) มีวิธีการดังต่อไปนี้

1) การลำเลียงไม้ท่อนจากลานกองเก็บไม้ท่อนเข้าผลิต จะเริ่มจากกองที่ 1 ไปตามลำดับ เช่น กองที่ 1 เริ่มลงวันที่ 10/01/2553 จะมีกำหนดการลำเลียงวันที่ 10/04/2553 โดยการกำหนดเป้าหมายในการลำเลียงไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตนั้นจะเป็นความรับผิดชอบของผู้วางแผนการผลิต (Planner) ฝ่ายผลิต และฝ่ายรับสินค้า

2) การขนย้ายไม้ท่อนจากลานกองเก็บไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตนั้นจะใช้รถพ่วง (Trailer) เป็นรถลำเลียงไม้ท่อนจากลานเก็บเข้าสู่บริเวณพื้นที่ของกระบวนการผลิต โดยมีรถปากคีบ (Backhoe) และรถคีบไม้ (Bell) ลำเลียงไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต

3) น้ำหนักในการขนย้ายไม้ท่อนแต่ละรอบเท่ากับ 35 ตัน ซึ่งได้จากการนำรถที่บรรทุกไม้ท่อนเต็มจำนวนแล้วไปชั่งน้ำหนักที่ห้องชั่ง

การนำไม้ท่อนจากลานเก็บไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตกำหนดให้รถขนย้ายไม้ท่อนจากลานเก็บไม้ท่อนลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิตร่วมกับรถขนไม้ท่อนที่เข้ามาใหม่ ดังนี้

1) กำหนดให้รถขนย้ายไม้ท่อนลำเลียงไม้ท่อนจากลานเก็บไม้ท่อนขึ้นด้านตะวันออก และรถขนไม้ท่อนที่เข้ามาใหม่ลำเลียงไม้ท่อนขึ้นทางทิศตะวันตก ของช่องรับไม้ท่อน (Hopper) ในกรณีที่รถขนไม้ท่อนจากเกษตรกรเข้ามาไม่ต่อเนื่อง (กรณีที่รถขนไม้ท่อนเข้ามาอย่างต่อเนื่องให้ลำเลียงไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตโดยตรง)

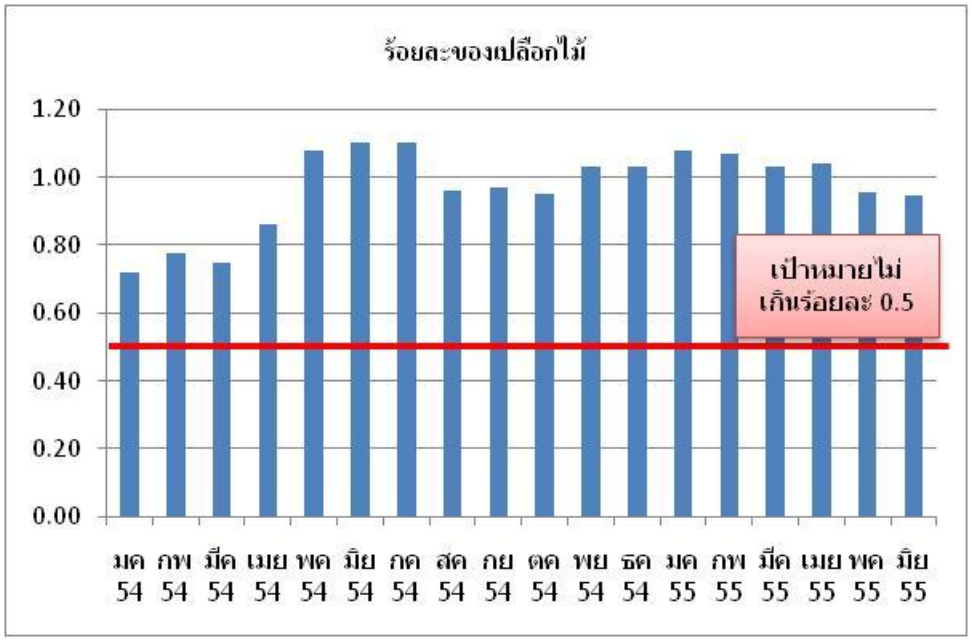
2) กำหนดให้รถขนย้ายไม้ท่อนจากลานเก็บไม้ท่อนลำเลียงไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตด้านทิศตะวันออกร่วมกับรถขนไม้ท่อนที่เข้ามาใหม่ โดยสลับกันลำเลียงไม้ท่อนในอัตราส่วน 1 : 2 (รถขนย้ายไม้ท่อนจากลานเก็บ 1 คันต่อรถขนไม้ท่อนที่เข้ามาใหม่ 2 คัน)

หมายเหตุ: การย้ายไม้ท่อนจากลานเก็บไม้ท่อนขึ้นอยู่กับสถานการณ์ของรถขนไม้ท่อนจากภายนอกที่เข้าสู่โรงงานและแผนการผลิตของฝ่ายผลิต

การนำไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตชิ้นไม้สับในปัจจุบัน ไม่มีการพิจารณาสายพันธุ์ในการนำไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต พิจารณาเฉพาะอายุการเก็บไม้ท่อนเท่านั้น ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกะเทาะเปลือกออก เนื่องจากเปลือกของไม้ยูคาลิปตัสแต่ละสายพันธุ์มีความเหนียวที่ต่างกัน จึงมีความยากง่ายในการกะเทาะเปลือกออกไม่เท่ากัน ส่งผลให้มีเปลือกไม้ปนกับชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษในปริมาณที่มากกว่าปริมาณที่ยอมรับได้คือ 0.5 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ 1.2 แสดงจำนวนเปลือกไม้ (ในหน่วยของร้อยละ) ที่ปนกับชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ในปี 2554 ร้อยละเฉลี่ยเปลือกไม้ที่ปลอมปนไปกับชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิตเท่ากับ 0.95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ของโรงผลิตเยื่อกระดาษ 0.45 เปอร์เซ็นต์ ในเปลือกไม้มีองค์ประกอบของลิกนินอยู่ หากเปลือกไม้ปนเข้าไปในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาก การใช้สารเคมีและไอน้ำในกระบวนการผลิตเยื่อจะมีปริมาณมากขึ้น เพื่อกำจัดลิกนินที่ติดมากับเปลือกไม้ออก และหากมีการใช้สารเคมีและไอน้ำไม่เพียงพอจะมีโอกาสทำให้เกิดชิ้นไม้สับต้มไม่สุก (Uncooked) ได้ รวมทั้งความขาวสว่างของเยื่อกระดาษลดลงจากปริมาณลิกนินที่ปนเข้ามา

กระบวนการรับสินค้า (ชิ้นไม้สับ) เข้าสู่กระบวนการผลิต มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) พนักงานขับรถหรือพนักงานขนส่งชิ้นไม้สับ นำเอกสารต่างๆ ได้แก่ ใบชั่งน้ำหนักเข้า และใบส่งสินค้ามาแสดงต่อพนักงานรับสินค้าเพื่อขอลำเลียงชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิต



รูปที่ 1.2 ร้อยละของเปลือกที่ปนไปกับชิ้นไม้สับและเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

2) พนักงานรับสินค้าทำการตรวจสอบขณะลำเลียงชิ้นไม้สับว่ามีสิ่งปลอมปนหรือไม่ และจัดทำบันทึก ทะเบียนรถ ชื่อบริษัท วันและเวลาที่รถขนส่งชิ้นไม้สับเข้าโรงงาน ในเอกสารการรับชิ้นไม้สับ พร้อมทั้งสุ่มชิ้นไม้สับจำนวน 4 - 6 กิโลกรัมต่อคัน เพื่อส่งให้พนักงานห้องทดสอบคัดแยกขนาดและตรวจสอบเปอร์เซ็นต์แห้ง รวมถึงสิ่งปลอมปนต่างๆ

3) ชิ้นไม้สับที่รับเข้ามาจะถูกลำเลียงเก็บที่กองชิ้นไม้สับ (Storage) กองที่ 2 เพื่อรอเข้าสู่กระบวนการต่อไป

4) ผลการทดลองของพนักงานห้องทดลองจะถูกส่งมายังเจ้าหน้าที่บันทึกข้อมูล ในการตรวจสอบและคำนวณหาน้ำหนักแห้ง พร้อมทั้งทำการตัดน้ำหนักในส่วนที่เกินข้อกำหนด (กรณีที่น้ำหนักไม้มากจากปริมาณความชื้นที่สูง) ก่อนการอนุมัติชำระเงิน

อุตสาหกรรมผลิตกระดาษมีกระบวนการหลัก 3 ส่วน ได้แก่

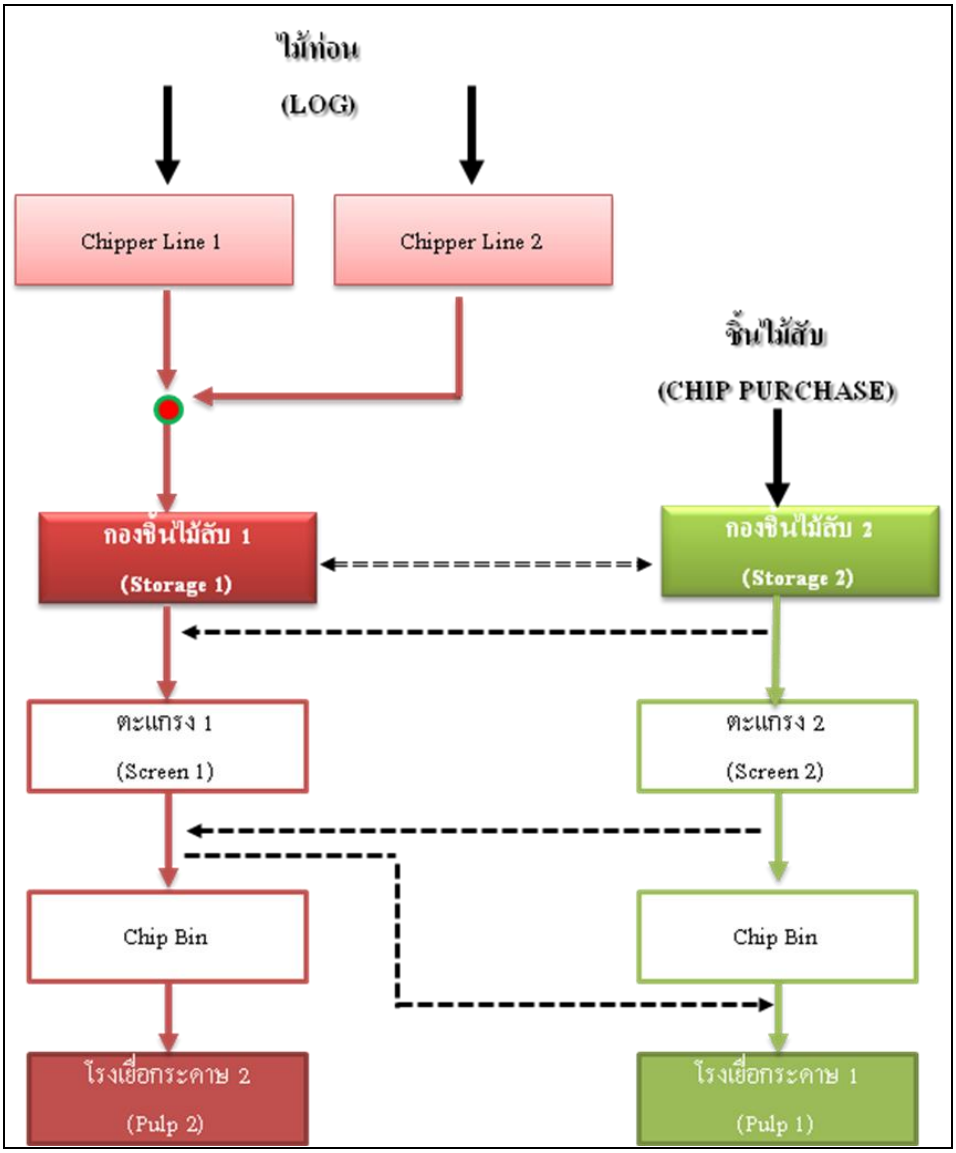
1) กระบวนการผลิตชิ้นไม้สับ เป็นกระบวนการนำไม้ท่อนสับเป็นชิ้นเล็กๆ และคัดเลือกชิ้นไม้สับที่มีคุณสมบัติตรงตามความต้องการ เพื่อเตรียมเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษต่อไป

2) กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เป็นกระบวนการเตรียมน้ำเยื่อโดยการต้มชิ้นไม้สับ การต้มเยื่อมีทั้งแบบกะ (Super batch) และระบบต่อเนื่อง (Continuous) การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน (Oxygen Delignification) และใช้กระบวนการฟอกเยื่อแบบ Elemental Chlorine Free หรือที่เรียกว่า ECF

3) กระบวนการผลิตกระดาษ เป็นกระบวนการขึ้นรูปกระดาษจากน้ำเยื่อที่ผสมเรียบร้อย ให้เป็นแผ่นกระดาษที่ยาวต่อเนื่อง

กระบวนการผลิตชิ้นไม้สับมีวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการผลิต 2 ประเภท ได้แก่ ไม้ท่อน (Log) ซึ่งรับซื้อจากเกษตรกรเข้าสู่กระบวนการสับให้เป็นชิ้นและจัดเก็บที่กองชิ้นไม้สับที่ 1 (Storage1) เพื่อรอคัดเลือกขนาด (Screen1) ก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษโรงที่ 2 (Pulp 2) และไม้สับที่รับซื้อจากโรงผลิตไม้สับสาขาต่างๆ (Chip Purchase) จะถูกนำมาเก็บที่กองชิ้นไม้สับที่ 2 (Storage2) เพื่อรอคัดเลือกขนาด (Screen2) ก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษโรงที่ 1 (Pulp1) รายละเอียดกระบวนการผลิตชิ้นไม้สับ แสดงดังรูปที่ 1.3

เมื่อโรงเยื่อต้องการชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิต ทางโรงผลิตชิ้นไม้สับจะเดินสกรูรีเคลมเมอร์ (Screw Reclaimer) ซึ่งอยู่ใต้กองชิ้นไม้สับ เพื่อลำเลียงชิ้นไม้สับผ่านทางสายพาน (Conveyor) ลำเลียงชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 1.4 และรูปที่ 1.5 โดยจะลำเลียงชิ้นไม้สับที่อยู่ด้านล่างออกไปใช้งานก่อน



รูปที่ 1.3 กระบวนการผลิตชิ้นไม้สับ

ชิ้นไม้สับที่ถูกลำเลียงออกมาจะถูกคัดขนาดที่ไม่ต้องการบางส่วนก่อนลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิต ด้วยอุปกรณ์คัดขนาด ได้แก่ ตะแกรงแผ่น (Disc Screen) เพื่อคัดแยกเศษไม้ (Sliver) หรือเศษวัสดุปลอมปนชิ้นใหญ่ออกจากชิ้นไม้สับ หลังจากนั้นชิ้นไม้สับจะผ่านตะแกรงกรองชิ้น

ไม้สับ (Chip Screen) ซึ่งมีตะแกรงคัดขนาดของชิ้นไม้สับ 3 ชั้น คือ ตะแกรงขนาดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ตะแกรงขนาดรูใหญ่ และตะแกรงขนาดรูเล็ก

รูปที่ 1.4 ลานกองชิ้นไม้สับ (Storage) ก่อนส่งไปยังโรงผลิตเยื่อกระดาษ

โดยสายพานลำเลียง (Conveyor)

รูปที่ 1.5 สายพานลำเลียงชิ้นไม้สับจากกองชิ้นไม้สับ (Storage) ไปสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ชิ้นไม้สับที่ขนาดใหญ่กว่าตะแกรง จะถูกคัดแยกออกมาสับใหม่ที่เครื่องสับไม้ (Rechipper) แล้วจะส่งกลับขึ้นไปคัดแยกขนาดอีกครั้ง ส่วนชิ้นไม้สับมีขนาดเล็กกว่าตะแกรงขนาดรูเล็ก (Pin &

Fine) จะถูกส่งออกมาเก็บที่ไซโลเก็บชิ้นไม้สับที่ไม่ได้ขนาด (Under Size Silo) และส่งออกไปให้กับโรงผลิตบอร์ด

ชิ้นไม้สับจะถูกตรวจสอบก่อนลำเลียงเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษและผ่านกระบวนการคัดร่อนขนาดก่อนเสมอ เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่า ชิ้นไม้สับที่เข้าสู่กระบวนการผลิตมีขนาดที่เหมาะสมตามความต้องการของโรงผลิตเยื่อกระดาษ

ส่วนประกอบหลักของไม้คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน การต้มเส้นใยด้วยเคมีมีจุดมุ่งหมายในการทำให้ลิกนินในลาเมลลาชั้นกลางและในผนังเส้นใยซึ่งเป็นตัวยึดเส้นใยไว้ด้วยกันละลายหรืออ่อนตัวลง ซึ่งกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกเส้นใยแต่ละเส้นในไม้ออกจากกัน โดยคงไว้ซึ่งเยื่อที่มีคุณภาพตามเกณฑ์ที่กำหนด

การผลิตเยื่อคราฟท์ (Kraft Process หรือ Sulfate Process) เป็นการผลิตที่มีความสำคัญที่สุดในปัจจุบัน และเป็นการผลิตด้วยกรรมวิธีทางเคมีที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง สำหรับกระบวนการผลิตที่ทางผู้วิจัยได้ศึกษาเป็นการต้มเยื่อแบบต่อเนื่อง (Continuous digester) ซึ่งเยื่อที่ได้นั้นจะมีจำนวนลิกนินในปริมาณน้อย และง่ายต่อการทำให้แตกตัวเป็นเส้นใย (Defiberize) และสามารถฟอกขาวถึงระดับความขาวสว่างสูงได้ โดยไม่สูญเสียความเหนียว ดัชนีที่ใช้ในการวัดปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อโดยทางอ้อมคือตัวเลขคัปปา (Kappa number)

กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ประกอบไปด้วย 2 กระบวนการหลัก ได้แก่ หน่วยงานผลิตเยื่อกระดาษ (Unbleach plant) และหน่วยงานฟอกเยื่อกระดาษ (Bleach plant)

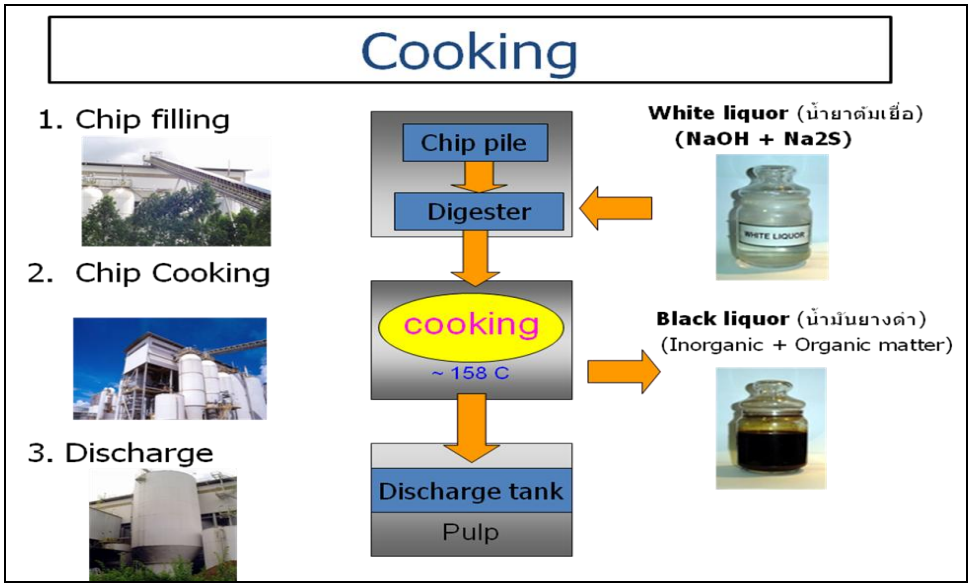
1) หน่วยงานผลิตเยื่อกระดาษ (Unbleach plant) คือหน่วยงานที่ทำการผลิตเยื่อกระดาษ โดยเยื่อกระดาษในขั้นตอนนี้จะยังไม่ผ่านการฟอกขาว ประกอบไปด้วย 2 หน่วยงานย่อย ได้แก่

- **หน่วยงานต้มเยื่อ (Cooking)** มีหน้าที่ในการต้มชิ้นไม้สับให้สุกด้วยไอน้ำ และละลายลิกนินในเส้นใยออกจากเนื้อไม้ด้วยน้ำยาต้มเยื่อที่เรียกว่า White Liquor ซึ่งเป็นสารละลายด่างเข้มข้น มีโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟล์(Na_2S) เป็นส่วนประกอบหลัก เพื่อกำจัดลิกนินออกจากเส้นใยเยื่อได้เป็นน้ำมันยางดำ (Weak Black Liquor) ซึ่งตัวแปรที่ใช้ควบคุมการต้มคือ Kappa NO. และ H - Factor ได้เป็นเยื่อที่ผ่านการต้ม (Discharge Pulp) โดยลิกนินที่ละลายออกมาจะถูกสกัดออกในขั้นตอนต่อไป รูปที่ 1.6 แสดงขั้นตอนการผลิตของหน่วยงานต้มเยื่อ (Cooking) ในการเติมน้ำยาต้มเยื่อหรือ White liquor เข้าไปในหม้อต้มเยื่อต้องพิจารณาความเข้มข้นหรือ Effective alkali, EA ของน้ำยาต้มเยื่อเพื่อให้ปริมาณด่างที่เติมเข้าไปมีสัดส่วนที่เหมาะสมกับปริมาณชิ้นไม้สับ โดยการวิเคราะห์ตัวอย่างที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการต้มเยื่อ ประกอบด้วย White Liquor, Weak Black Liquor และเยื่อที่ผ่านการต้มก่อนส่งไปสกัดลิกนินที่หน่วยงานต่อไป

    - White Liquor, WL หรือน้ำยาต้มเยื่อ เป็นสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อเพื่อกำจัดลิกนินออกจากเส้นใยเยื่อโดยได้เป็นน้ำมันยางดำ (Weak Black Liquor) มีการตรวจสอบคุณภาพของ WL ก่อนนำไปใช้งานเพื่อควบคุมให้มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ โดยพารามิเตอร์ที่กำหนด ได้แก่ Effective alkali (EA), %Sulfidity และ Causticizer Efficiency (%CE) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของน้ำยาต้มเยื่อ มีผลต่อต้นคุณภาพและต้นทุนในการผลิตเยื่อกระดาษ

    - Weak Black Liquor, WBL หรือน้ำมันยางดำ เป็นของเหลวที่ได้หลังการต้มเยื่อ มีการตรวจสอบค่า Residual alkali ซึ่งเป็นค่าที่บ่งชี้ว่าหลังการต้มเยื่อมีค่าปริมาณความเป็นด่างเหลืออยู่ ซึ่งต้องควบคุมเพื่อไม่ให้ลิกนินย้อนกลับไปจับเยื่ออีกครั้ง ทำให้ค่าตัวเลขคัปปา (Kappa Number) สูงขึ้น ส่งผลให้สิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้ในขั้นตอนต่อๆ ไป

- เยื่อ discharge เป็นเยื่อที่ผ่านการต้ม ทำการตรวจสอบตัวเลขคัปปา ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่บอกประสิทธิภาพของการต้มเยื่อ คุณภาพเยื่อกระดาษขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยด้วยกัน เช่น คุณภาพชิ้นไม้สับ คุณภาพสารเคมีที่ใช้ต้มเยื่อ อุณหภูมิ เป็นต้น



รูปที่ 1.6 ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงานต้มเยื่อ (Cooking)

- **หน่วยงาน** Brownstock มีหน้าที่คัดแยกชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุก (Uncooked) ได้แก่ ตาไม้และเสี้ยนไม้ (Knott and Reject) กลุ่มเส้นใย (Shives) และสิ่งเจือปนอื่นๆ ออกจากเยื่อกระดาษ รวมทั้งล้างเยื่อและสกัดลิกนินออกจากเยื่อกระดาษโดยการใช้ออกซิเจน (Oxigen-Dlignification) รูปที่ 1.7 ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงาน Brown Stock โดยมีการเก็บตัวอย่างเยื่อก่อนการใช้และหลังการใช้ออกซิเจน (Pre-O_2 และ Post-O_2) เพื่อวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ ดังนี้

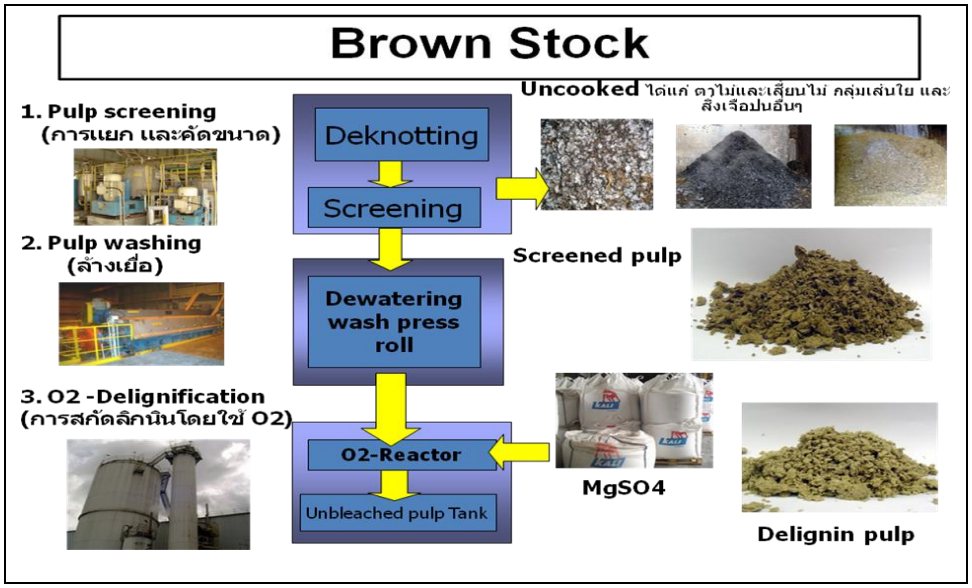
  - ตัวเลขคัปปา (Kappa no.) เป็นค่าบ่งชี้ปริมาณลิกนินที่มีในเยื่อกระดาษ ทำให้รู้ว่าต้องใช้สารเคมีและไอน้ำในการเดินเครื่องอย่างไรเพื่อให้ได้เยื่อที่มีคุณภาพ

โดยปกติแล้วค่า ตัวเลขคัปปาของเยื่อก่อนการใช้ออกซิเจนและหลังการใช้ออกซิเจนจะแปรผันตามค่า ตัวเลขคัปปาของเยื่อที่มาจากหน่วยงานต้มเยื่อที่ตั้งค่าควบคุมไว้

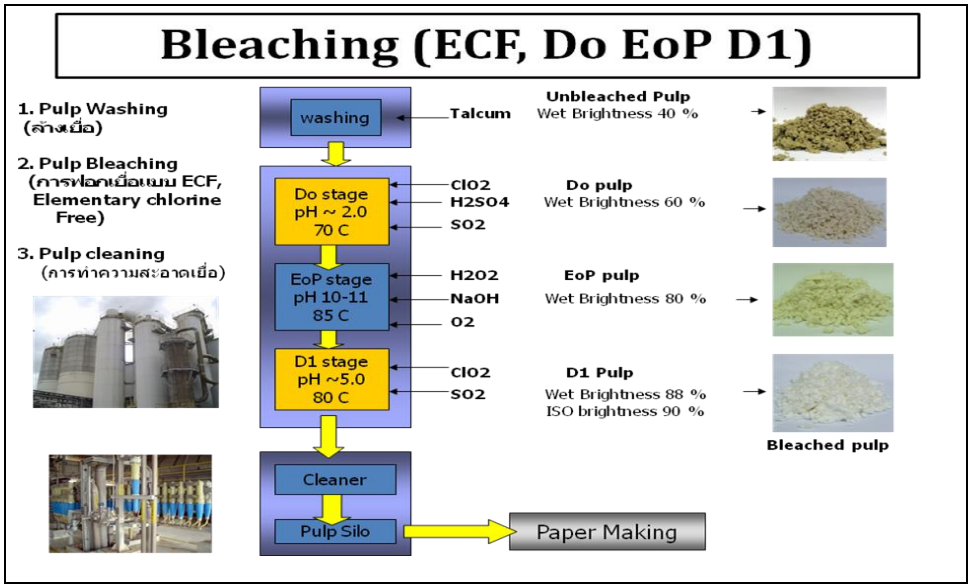
- Viscosity เป็นพารามิเตอร์ที่บอกความแข็งแรงของเยื่อ (ความแข็งแรงของพันธะระหว่างโมเลกุลของกลูโคสในเซลลูโลส) ถ้าพันธะถูกทำลายไปมากเนื่องจากสารเคมีจะส่งผลให้ค่า viscosity ต่ำ
- % Consistency คือความเข้มข้นของเยื่อ บอกให้ทราบถึงคุณภาพของการรีดน้ำออกจากเยื่อ
- % Wet brightness คือค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษ จะทำการเก็บตัวอย่างเยื่อเพื่อตรวจสอบค่าความขาวสว่างหลังการใช้ออกซิเจน เปอร์เซ็นต์ความขาวสว่างของเยื่อขึ้นอยู่กับค่าตัวเลขคัปปา กล่าวคือถ้าค่าตัวเลขคัปปาสูงจะทำให้มีค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวสว่างต่ำ ซึ่งต้องเพิ่มปริมาณการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อในขั้นตอนต่อไป

ในการสกัดลิกนินโดยใช้ออกซิเจนต้องมีการเติมแมกนีเซียมซัลเฟต (MgSO4) เพื่อจับโลหะพวก Fe, Mg, Cu เป็นต้น เนื่องจากโลหะเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาในระบบเปลี่ยนออกซิเจนเป็น free radical ทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงทำลายเซลลูโลสและส่งผลให้ค่า viscosity ต่ำ

2) กรดซัลฟูริค (H_2SO_4) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) รูปที่ 1.8 แสดงขั้นตอนการผลิตของหน่วยงานฟอกเยื่อขาวโดยเป้าหมายของการฟอกขาวคือ การผลิตเยื่อที่มีความขาวสว่างสูงโดยรักษาคุณสมบัติด้านความเหนียวให้คงอยู่ โดยการฟอกเป็นการแยกลิกนินออกโดยรักษาเซลลูโลสให้คงอยู่ คุณสมบัติด้านความเหนียวของเยื่อจะเกี่ยวข้องกับความยาวของโมเลกุลของเซลลูโลส ถ้าโมเลกุลของเซลลูโลสถูกทำให้สั้นเกินไปจากการทำปฏิกิริยาของสารเคมีที่ไม่เหมะสม ความเหนียวของเยื่อจะเสื่อมลง ดังนั้นจึงมีกระบวนการฟอกขาวที่แบ่งออกเป็นหลายขั้นตอน เพื่อทำให้เซลลูโลสเสื่อมสภาพน้อยที่สุดและได้เยื่อที่เหนียวโดยมีความขาวสว่างสูง



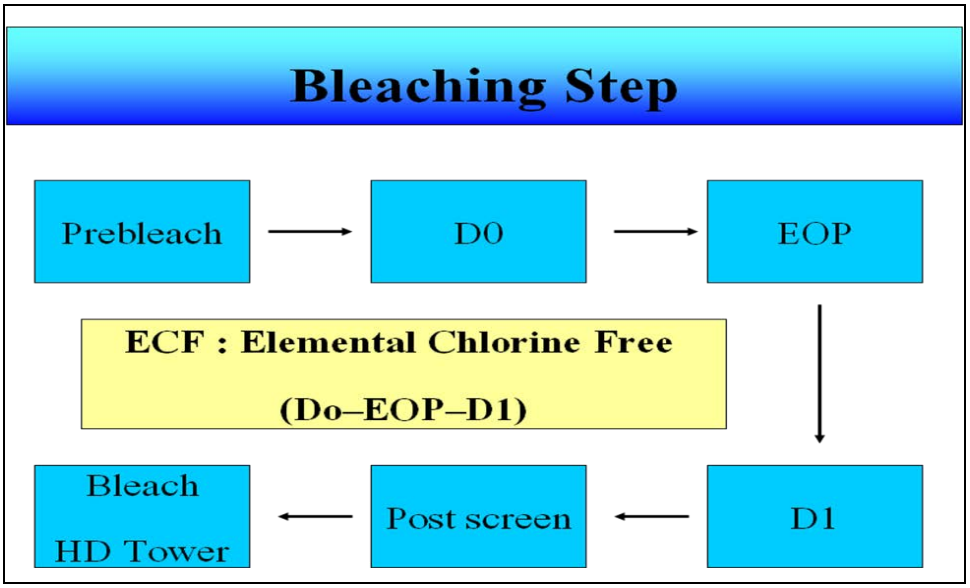
รูปที่ 1.7 ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงาน Brown Stock



รูปที่ 1.8 ขั้นตอนการผลิตของหน่วยงานฟอกเยื่อขาว (Bleaching)

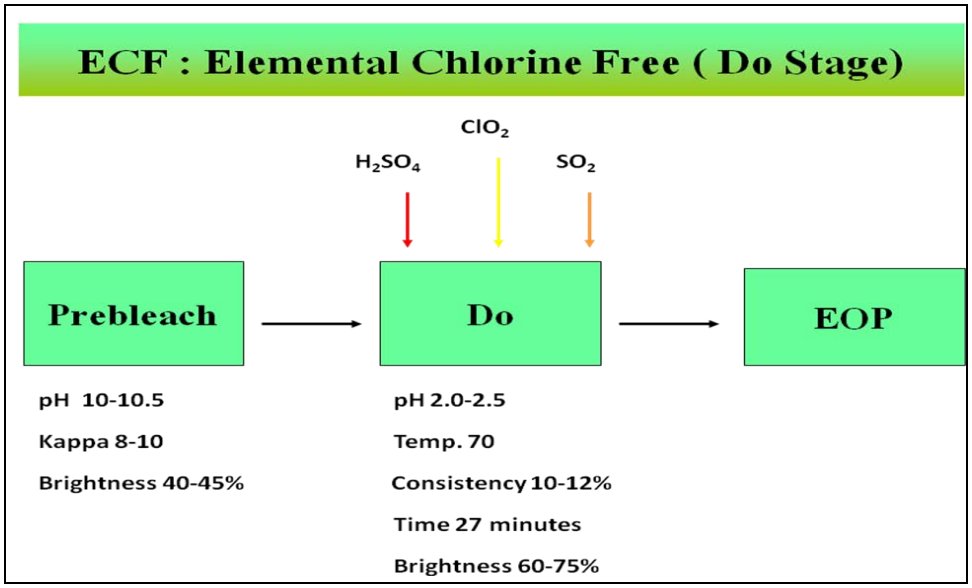
กระบวนการฟอกเยื่อของโรงงานที่ผู้วิจัยทำการศึกษาเป็นกระบวนการฟอกเยื่อแบบ Elemental Chlorine Free หรือที่เรียกว่า ECF เยื่อกระดาษจะถูกทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีต่างๆ ดังนี้

คลอรีนไดออกไซด์ (D) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (E) ออกซิเจน (O) และไฮโดเจนเปอร์ออกไซด์ (P) และสุดท้ายคลอรีนไดออกไซด์ (D) โดยลำดับการฟอกจะแบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่ D-(EOP)-D ขั้นตอนการฟอกที่ EOP และขั้นตอนสุดท้าย D จะถูกอัดด้วยความดัน รูปที่ 1.9 แสดงลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF



รูปที่ 1.9 ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF

รูปที่ 1.10 แสดงลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน D_0 เยื่อกระดาษที่ผ่านการล้างและสกัดลิกนินจะถูกส่งมาเพิ่มความเข้มข้นของเยื่อที่ Pre-bleach และจะส่งมาปรับ pH เยื่อด้วยกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ก่อนนำเยื่อไปพักที่ D_o stand pipe เพื่อทำการแยกเยื่อและอากาศออกจากกัน จากนั้นส่งเยื่อต่อไปยัง D_o mixer เพื่อทำการผสมเยื่อและคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) เข้าด้วยกัน จากนั้นจะส่งต่อไปทำปฏิกิริยาที่ D_0 tower (แบบ up flow) ซึ่งใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาประมาณ 27 นาที จากนั้นทำการเจือจางเยื่อและกำจัดคลอรีนที่เหลือด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) ก่อนส่งไปทำการละลายและแยกลิกนินต่อที่ขั้นตอน EOP

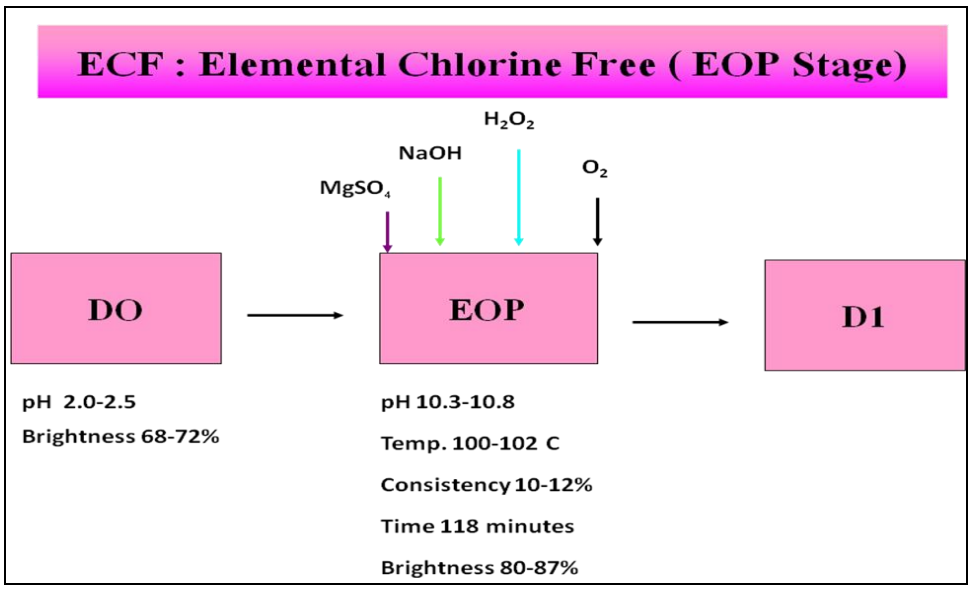


รูปที่ 1.10 ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน D_0

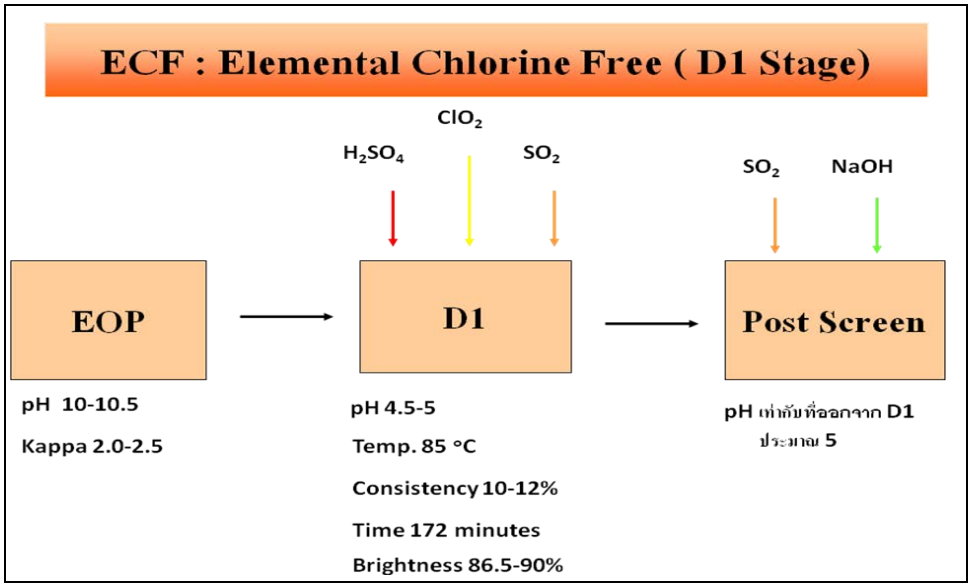
เมื่อเยื่อกระดาษผ่านการฟอกที่ขั้นตอน D_o แล้ว จะถูกส่งเข้าสู่ขั้นตอน EOP รูปที่ 1.11 แสดงลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน EOP เยื่อจะถูกทำการเจือจางและเติม NaOH ลงไป จากนั้นจะถูกลำเลียงไปที่ EOP stand pipe เพื่อพักเยื่อและเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากนั้นทำการแยกเยื่อและอากาศออกจากกัน และส่งต่อไปที่ EOP mixer เพื่อทำการผสมออกซิเจน (O_2) และไอน้ำแรงดันปานกลาง (MP-steam) กับเยื่อกระดาษภายใต้แรงดันที่ควบคุมไว้ ก่อนที่จะถูกส่งไปทำการฟอกที่ขั้นตอน D_1 ต่อไป

เยื่อกระดาษที่ผ่านการฟอกที่ขั้นตอนของ EOP จะถูกส่งต่อเข้าสู่ขั้นตอน D1 รูปที่ 1.12 แสดงลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน D1 เยื่อจะถูกทำการเจือจางและเติม NaOH จากนั้นจะถูกลำเลียงเข้าสู่ D1 stand pipe เพื่อพักเยื่อและทำการแยกเยื่อและอากาศออกจากกันก่อนส่งเข้า D1 mixer เพื่อทำการผสมคลอรีนไดออกไซด์ให้เข้ากับเยื่อภายใต้แรงดันที่ควบคุมไว้ประมาณ 13 นาที จากนั้นเยื่อกระดาษจะถูกระบายออกอย่างต่อเนื่องมาที่ส่วนบนของ D1 tower เยื่อกระดาษจะถูกพักไว้ประมาณ 162 นาทีก่อนที่ทำการเจือจางอีกครั้งพร้อม

ทั้งกำจัดคลอรีนที่เหลือด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ จากนั้นเยื่อกระดาษจะถูกส่งไปล้างและเพิ่มความเข้มข้นของเยื่อก่อนส่งต่อไปยังขั้นตอน Post screening ต่อไป



รูปที่ 1.11 ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน EOP



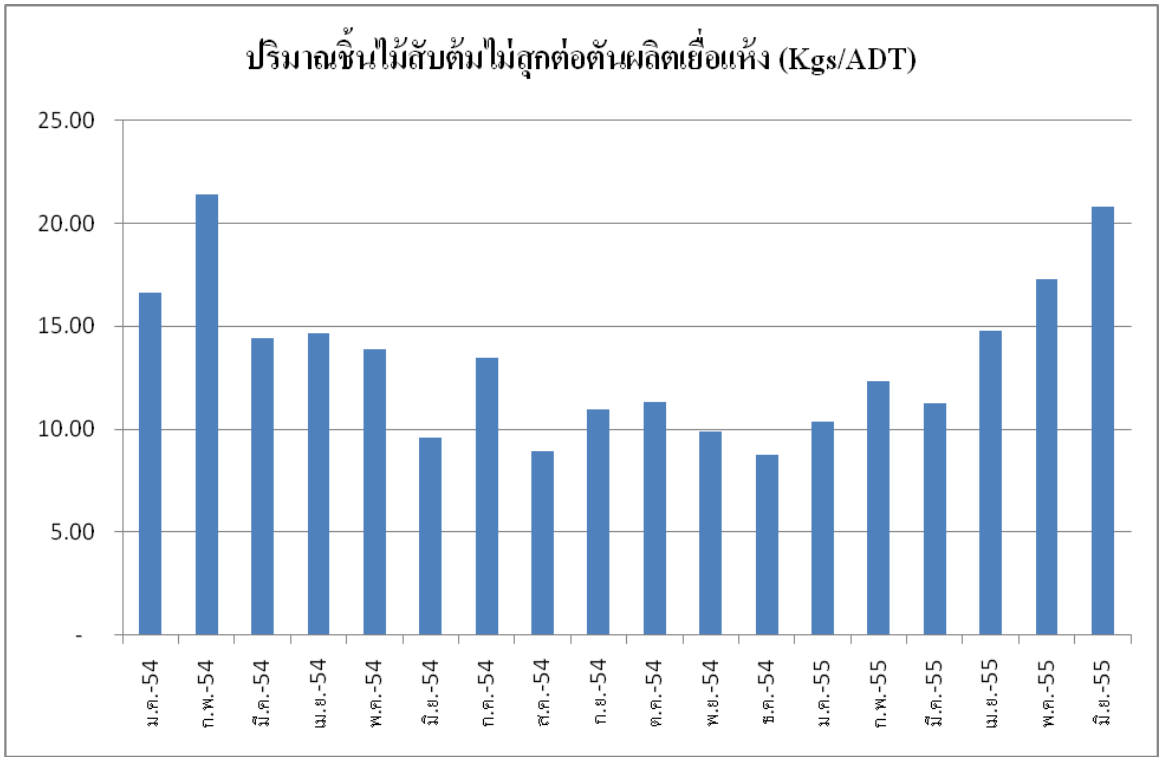
รูปที่ 1.12 ลำดับขั้นตอนการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีของกระบวนการฟอกเยื่อแบบ ECF ขั้นตอน D1

เยื่อกระดาษที่ผ่านการฟอกที่ขั้นตอน D_1 จะถูกส่งเข้าสู่ Post screen เพื่อทำการเจือจางและเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และซัลเฟอร์ไดออกไซด์เพื่อทำการปรับ pH และกำจัดคลอรีนที่หลงเหลือออกก่อนส่งไปยังหน่วยงานขึ้นรูปกระดาษ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ สายพันธุ์ของไม้ยูคาลิปตัสเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการควบคุมกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เนื่องจากคุณสมบัติของไม้ยูคาลิปตัสแต่ละสายพันธุ์มีความแตกต่างกัน ได้แก่ องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อไม้ ความหนาแน่นของไม้ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าวมีผลต่อสภาวะการผลิตเยื่อกระดาษที่แตกต่างกัน เมื่อนำไม้ยูคาลิปตัสหลากหลายสายพันธุ์เข้าสู่กระบวนการผลิตโดยไม่มีการจัดกลุ่มสายพันธุ์ที่มีสภาวะการต้มที่คล้ายคลึงกัน ทำให้เกิดการสูญเสียเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Cellulose and Hemicellulose) ส่งผลให้คุณภาพเยื่อกระดาษไม่สม่ำเสมอ และอาจเกิดเป็นชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกได้ จากรูปที่ 1.13 แสดงปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกที่เกิดขึ้นตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 – มิถุนายน 2555 พบว่ามีปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกเฉลี่ย 13 กิโลกรัมต่อการผลิตเยื่อกระดาษ 1 ตันเยื่อแห้ง (kg/ADT (Air Dry Ton)) และมีปริมาณมากกว่า 20 kg/ADT ในเดือนกุมภาพันธ์ 2554 และเดือนมิถุนายน 2555

ชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกจากกระบวนการต้มเยื่อจะถูกนำเข้าสู่กระบวนการต้มเยื่ออีกครั้ง รูปที่ 1.14 แสดงปริมาณชิ้นไม้สับต้มไม่สุกที่นำกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 – มิถุนายน 2555 โดยปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกและมีการนำกลับมาผลิตใหม่ในเดือนกุมภาพันธ์ 2554 มีปริมาณมากเป็นจำนวน 1,300 ตัน โดยมีปริมาณเฉลี่ยในช่วงเวลาดังกล่าวเท่ากับ 774 ตันต่อเดือน ซึ่งค่าใช้จ่ายในการขนส่งชิ้นไม้สับต้มไม่สุกไปโปรยที่หน่วยงานผลิตชิ้นไม้สับเพื่อปนไปกับชิ้นไม้สับที่ได้คุณภาพ ระยะทางระหว่างโรงผลิตเยื่อกระดาษและโรงผลิตชิ้นไม้สับมีระยะทาง 1 กิโลเมตร ค่าใช้จ่ายในการขนส่ง 9 บาทต่อตัน (คิดที่อัตราเชื้อเพลิงเฉลี่ย 39.50 บาทต่อลิตร) ในปี 2554 มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งชิ้นไม้สับต้มไม่สุกเพื่อนำกลับเข้ามาสู่กระบวนการผลิตใหม่อีกครั้งเป็นเงิน 79,569 บาท นอกจากนั้น ยังมีค่าใช้จ่ายในการต้มชิ้นไม้สับเหล่านี้อีกครั้ง โดยในการผลิตเยื่อกระดาษ

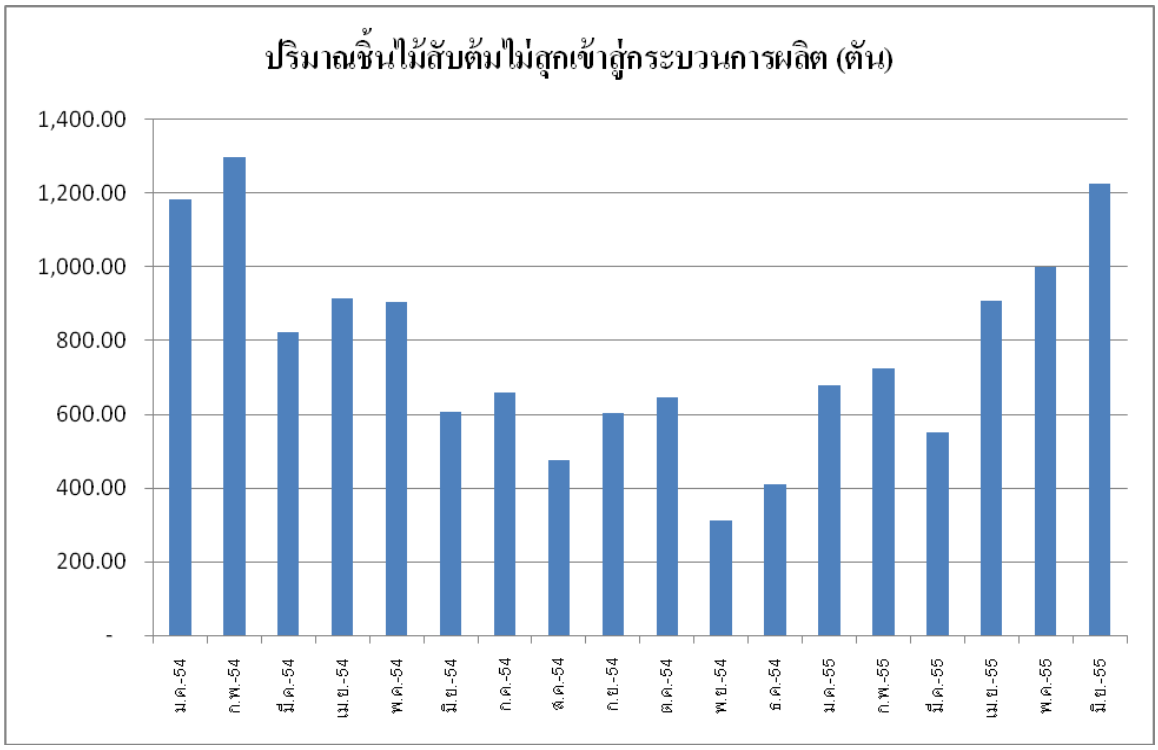
1 ตันเยื่อแห้ง จะมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ย 7,000 บาท ซึ่งในปี 2554 โรงผลิตเยื่อกระดาษมีค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตที่เกิดจากการนำชิ้นไม้สับต้มไม่สุกกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตใหม่อีกครั้ง โดยคิดเป็นเงิน 61,887,000 บาท



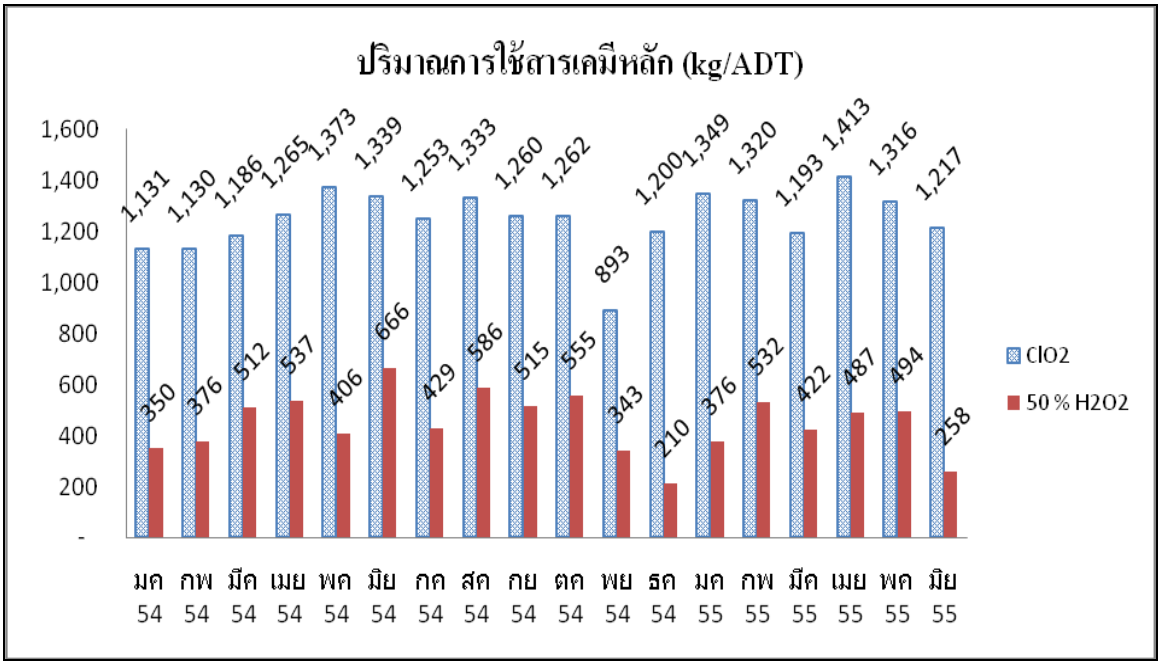
รูปที่ 1.13 ปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกต่อตันผลิตเยื่อแห้ง (Kgs/ADT)

เมื่อชิ้นไม้สับหลายสายพันธุ์เข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษพร้อมกัน ทำให้ไม่สามารถควบคุมสภาวะการต้มเยื่อได้ (การควบคุมสภาวะในการต้มเยื่อ ได้แก่ อุณหภูมิ เวลา และสารเคมี) ส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อกระดาษเพื่อปรับค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษให้ได้ตามเกณฑ์ที่ต้องการ โดยสารเคมีที่ใช้ได้แก่ คลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) และสารเคมีอื่นๆ รวมทั้งพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการสกัดลิกนินออกจากเยื่อกระดาษ รูปที่ 1.15 และ 1.16 แสดงปริมาณการใช้สารเคมี และไอน้ำในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จะเห็นได้ว่าปริมาณการใช้สารเคมีหลักและปริมาณการใช้ไอน้ำในการผลิตเยื่อกระดาษต่อตันเยื่อแห้ง (ADT: Air Dry Ton) ในแต่ละเดือนมีค่าไม่คงที่ โดยปริมาณการใช้คลอรีนไดออกไซด์มีค่ามากที่สุด

เท่ากับ 1,413 kgs/ADT ในเดือนเมษายน 2555 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 893 kgs/ADT ในเดือนพฤศจิกายน 2554 โดยมีปริมาณการใช้เฉลี่ยเดือนละ 1,246 kgs/ADT หรือเฉลี่ยเดือนละ 975 ตัน ต้นทุนคลอรีนไดออกไซด์ 51 บาท/กิโลกรัม ดังนั้นต้นทุนการใช้คลอรีนไดออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษช่วงปีที่ผ่านมาถึงปัจจุบัน เฉลี่ยเดือนละ 49,725,000 บาท ในส่วนของปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 666 kg/ADT ในเดือนมิถุนายน 2554 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 210 kg/ADT ในเดือนธันวาคม 2554 โดยมีปริมาณการใช้เฉลี่ยเดือนละ 448 kg/ADT หรือเฉลี่ยเดือนละ 354 ตัน ต้นทุนของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 11.95 บาทต่อกิโลกรัม ดังนั้นต้นทุนการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อกระดาษช่วงปีที่ผ่านมาถึงปัจจุบัน เฉลี่ยเดือนละ 4,225,799 บาท

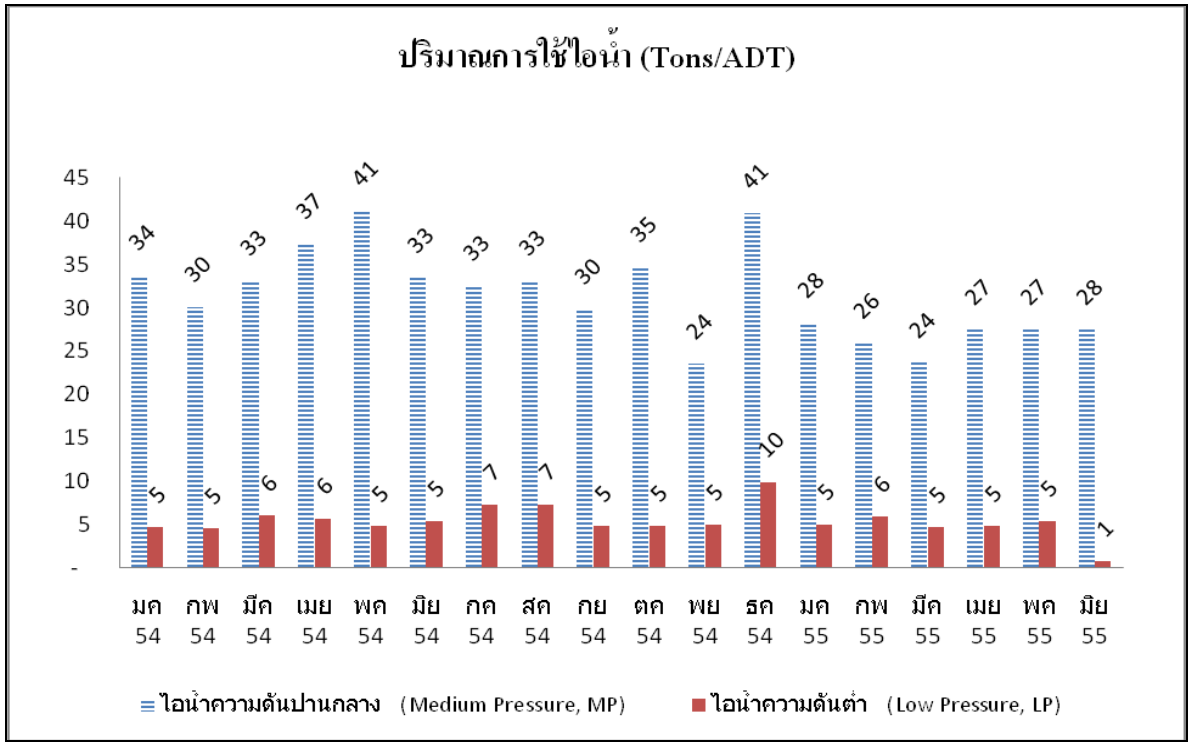


รูปที่ 1.14 ปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุกเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (ตัน)



รูปที่ 1.15 ปริมาณสารเคมีหลักที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษ

การใช้ไอน้ำในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมี 2 ประเภท คือ ไอน้ำแรงดันปานกลางหรือ MP-Steam และไอน้ำแรงดันต่ำหรือ LP-Steam รูปที่ 1.16 แสดงปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ แสดงให้เห็นว่าในแต่ละเดือนมีปริมาณการใช้ไม่คงที่ โดยปริมาณการใช้ไอน้ำแรงดันปานกลาง (MP steam) มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 41 Tons/ADT ในเดือนพฤษภาคม และธันวาคม 2554 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 24 Tons/ADT ในเดือนพฤศจิกายน 2554 และเดือนมีนาคม 2555 โดยปริมาณการใช้เฉลี่ยเดือนละ 36 Tons/ADT หรือเฉลี่ยเดือนละ 24,734 ตัน ต้นทุนของไอน้ำแรงดันปานกลางมีค่าเท่ากับ 900 บาทต่อตัน ดังนั้นโรงงานมีต้นทุนการใช้ไอน้ำแรงดันปานกลางเฉลี่ยเดือนละ 22,260,300 บาท ส่วนการใช้ไอน้ำแรงดันต่ำ (LP steam) ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 7 Tons/ADT ในเดือนกรกฎาคม และสิงหาคม 2554 และมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1 Tons/ADT ในเดือนมิถุนายน 2555 โดยมีปริมาณการใช้ไอน้ำแรงดันต่ำเฉลี่ยเดือนละ 5 Tons/ADT หรือเฉลี่ยเดือนละ 3,953 ตัน ต้นทุนของไอน้ำแรงดันต่ำมีค่าเท่ากับ 850 บาทต่อตัน ดังนั้นโรงงานมีต้นทุนการใช้ไอน้ำแรงดันต่ำเฉลี่ยเดือนละ 3,360,050 บาท



รูปที่ 1.16 ปริมาณไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต ดังจะเห็นได้จากการรวบรวมความคิดเห็น (Brainstorm) เบื้องต้นจากผู้ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิต ดังแสดงในรูปที่ 1.17 ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่ ปัจจัยที่เกิดจากคน ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ และปัจจัยที่เกิดจากวิธีการผลิต ซึ่งทางผู้วิจัยต้องทำการศึกษารายละเอียดของแต่ละปัจจัยต่อไป เพื่อหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อลดต้นทุนในการต้มเยื่อและฟอกเยื่อกระดาษขาว

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1) พิจารณาเฉพาะชิ้นไม้สับที่มาจากกระบวนการผลิตชิ้นไม้สับภายในบริษัท (ไม่พิจารณาไม้สับที่ซื้อจากโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขาต่างๆ)
2) พิจารณาเฉพาะโรงผลิตเยื่อกระดาษที่รับชิ้นไม้สับจากการผลิตภายในโรงงานเท่านั้น (โรงผลิตเยื่อกระดาษที่ 2) ไม่พิจารณาโรงผลิตเยื่อกระดาษที่รับชิ้นไม้สับจากโรงผลิตชิ้นไม้สับสาขาต่างๆ
3) พิจารณาต้นทุนด้านวัตถุดิบในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเท่านั้น เนื่องจากโรงงานกรณีศึกษาเปิดทำการผลิต 24 ชั่วโมง และการควบคุมระบบการผลิตเป็นการควบคุมโดยใช้ระบบ DCS (Distributed Control System) ซึ่งเป็นการควบคุมการผลิตและเฝ้าติดตามผ่านหน้าจอ ดังนั้น ต้นทุนด้านแรงงานและโสหุ้ยไม่มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งต้นทุนวัตถุดิบที่พิจารณา ได้แก่
    - สารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ (White Liquor)
    - ไอน้ำที่ใช้ในการต้มเยื่อ
    - สารเคมีหลักที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษให้ขาว (ClO_2 และ H_2O_2)
    - ต้นทุนในการนำชิ้นไม้สับต้มไม่สุกกลับเข้าสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1) ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ในกระบวนการผลิตที่ส่งผลต่อต้นทุนด้านวัตถุดิบในการต้มเยื่อและฟอกเยื่อ
2) ระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนด้านวัตถุดิบรวมต่ำที่สุด

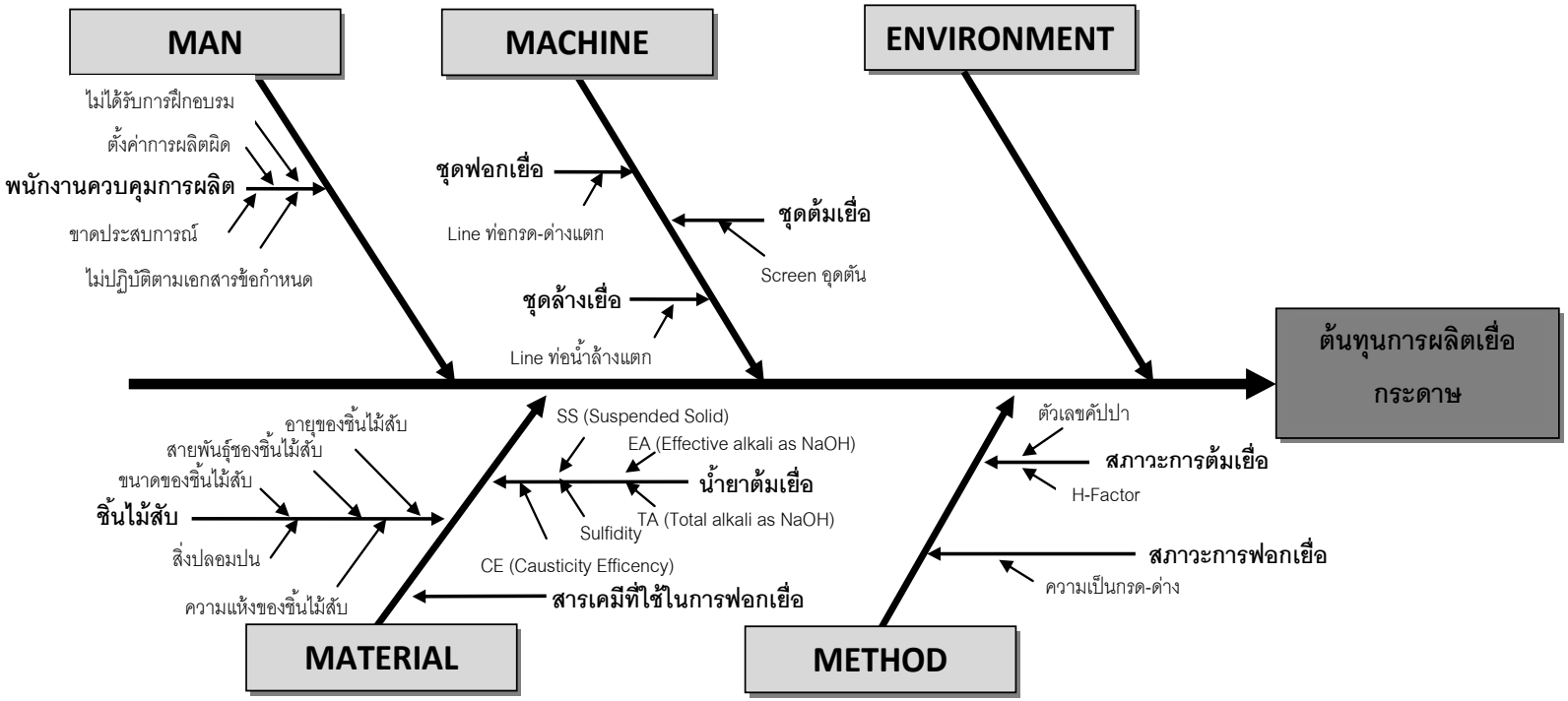
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) สามารถลดปริมาณเปลือกไม้ (Bark) ที่ปนไปกับชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

2) สามารถลดปริมาณชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุก (Uncooked)
3) สามารถลดต้นทุนในการผลิต (Production Cost) ของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่ สารเคมี ไอน้ำ ค่าขนส่งชิ้นไม้สับต้มไม่สุกเข้าสู่กระบวนการผลิตอีกครั้ง เป็นต้น
4) สามารถวางแผนการผลิตและการจัดการไม้ท่อนเข้าสู่กระบวนการผลิตได้

1.6 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาสถานการณ์ปัจจุบันของการบริหารจัดการไม้ท่อน กระบวนการผลิตชิ้นไม้สับ และกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยศึกษาถึงวัตถุดิบ คุณภาพของเยื่อกระดาษ และโครงสร้างด้านต้นทุนการผลิต
2) วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดจากการไม่จัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสก่อนเข้าสู่กระบวนการผลิต
3) ศึกษาค้นคว้าทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
4) รวบรวมข้อมูลโครงสร้างต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่ ต้นทุนการต้มเยื่อและต้นทุนการฟอกเยื่อกระดาษ
5) ออกแบบการทดลองสำหรับกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่มีผลต่อโครงสร้างต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ
6) ดำเนินการทดลอง เพื่อหาต้นทุนการผลิตที่ต่ำสุดของแต่ละกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส
7) วิเคราะห์และสรุปผลจากการวิจัย
8) ทดสอบเพื่อยืนยันผล
9) จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์



รูปที่ 1.17 แผนภูมิก้างปลาแสดงปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเบื้องต้น

บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่ใช้ในการวิจัยและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาเป็นแนวคิดในการออกแบบการวิจัย ทั้งการหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่เหมาะสม รวมถึงวิธีการเทคนิคต่างๆ ที่จะใช้ประกอบการดำเนินงานวิจัย

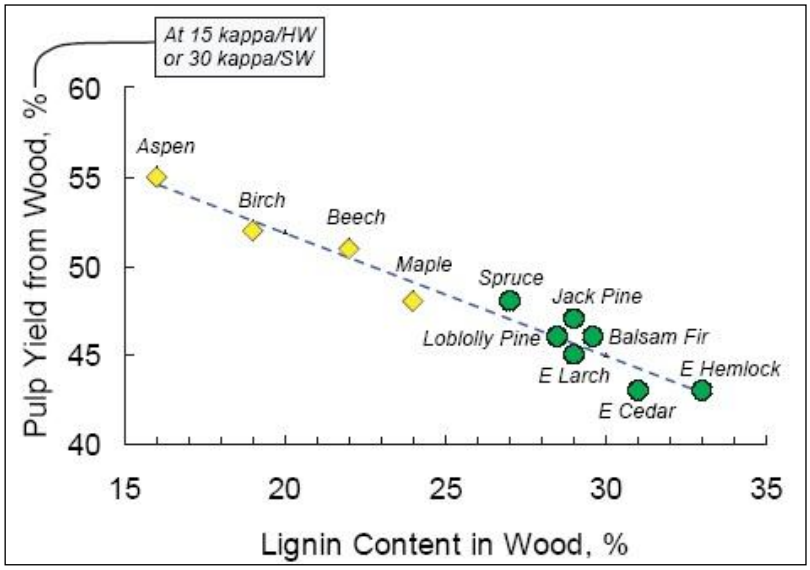
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ต้นยูคาลิปตัส (Eucalyptus) เป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตกระดาษในปัจจุบัน ยูคาลิปตัสเป็นไม้เนื้อแข็งมีถิ่นกำเนิดในทวีปออสเตรเลีย ประเทศไทยได้เริ่มนำไม้ยูคาลิปตัสสายพันธุ์ต่างๆ มาปลูกตั้งแต่ปี 2493 และมีการพัฒนาสายพันธุ์เรื่อยมา จนกระทั่งปัจจุบันมีสายพันธุ์ต่างๆ มากกว่า 700 สายพันธุ์

ไม้ยูคาลิปตัสแต่ละสายพันธุ์มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น ความหนาแน่นของเนื้อไม้ ความยาวของเส้นใย ความเหนียวของเปลือกไม้ ปริมาณสารเคมีในเนื้อไม้ ฯลฯ ซึ่งคุณสมบัติที่แตกต่างกันดังกล่าวมีผลต่อคุณภาพของกระดาษที่มีไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ โดยเฉพาะคุณภาพของเยื่อกระดาษจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบคราฟท์ ซึ่งจะเห็นได้จากงานวิจัยด้านสายพันธุ์ของห้องปฏิบัติการ Forest Products ภาควิชาเกษตรกรรม [1] ที่แสดงให้เห็นว่าผลผลิตของเยื่อกระดาษ (Pulp yield) ระหว่างไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ N. A. Ndukwe และคณะ [2] ที่ทำการศึกษาผลผลิตของเยื่อกระดาษจากกระบวนการผลิตแบบคราฟท์ของไม้ไนจีเรียแต่ละสายพันธุ์ เป็นจำนวน 20 สายพันธุ์ ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Duncan's multiple-range test พบว่าผลผลิตของเยื่อกระดาษของไม้ไนจีเรียแต่ละสายพันธุ์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

ปริมาณลิกนินและชนิดของลิกนินในไม้แต่ละสายพันธุ์เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษ N. A. Ndukwe และคณะ [2] ได้ทำการประเมินผลผลิตของเยื่อกระดาษโดยใช้วิธีวิเคราะห์อินฟราเรด (Infra-red analysis) ของไม้ไนจีเรีย 20 สายพันธุ์ โดยพิจารณาจากสารเคมีที่มีอยู่ในเนื้อไม้ พบว่า ไม้ไนจีเรียสายพันธุ์ T. superba สามารถดูดซึม OH^{-1} ช่วง 3150-3400 cm^{-1} และพันธะ C-C ช่วง 550-1300 cm^{-1} ได้ ซึ่งความสามารถในการดูดซึม OH และพันธะ C-C พบได้ในเซลลูโลส ตัวชี้วัดผลผลิตของเยื่อกระดาษโดยทั่วไปสามารถดูได้จากปริมาณของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส จากการทดลองของ N.A. Ndukwe และคณะพบว่า ไม้ไนจีเรียสายพันธุ์ T. superb, H. ciliate และ S. globulifera ให้ผลผลิตของเยื่อกระดาษสูงที่สุด ซึ่งความแตกต่างของผลผลิตเยื่อกระดาษแต่ละสายพันธุ์แสดงได้จากปริมาณลิกนินและชนิดของลิกนินที่ปรากฏอยู่ในสายพันธุ์ไม้ต่างๆ Martin MacLeod [3] ได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณลิกนินและผลผลิตของเยื่อกระดาษของไม้แต่ละสายพันธุ์ พบว่าผลผลิตของเยื่อกระดาษแปรผกผันกับปริมาณลิกนินที่อยู่ในเนื้อไม้ ดังรูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณลิกนินในหน่วยเปอร์เซ็นต์ที่ปรากฏในไม้แต่ละสายพันธุ์กับผลผลิตของเยื่อกระดาษในหน่วยเปอร์เซ็นต์ โดยกำหนดค่าตัวเลขคัปปาในการทดลองต้มเยื่อเท่ากับ 15 สำหรับไม้เนื้อแข็ง และกำหนดค่าตัวเลขคัปปาในการทดลองต้มเยื่อเท่ากับ 30 สำหรับไม้เนื้ออ่อน ในขณะที่งานวิจัยของ Schimleck และคณะ [4] พบว่าปริมาณเซลลูโลสของไม้ยูคาลิปตัสสายพันธุ์ไนเทนสัสซิ่ง (Eucalyptus nitensusing) มีความสัมพันธ์โดยตรงกับผลผลิตของเยื่อกระดาษเช่นกัน

ไม้ยูคาลิปตัสจากถิ่นกำเนิดต่างๆ ให้คุณสมบัติเยื่ออินทรีย์ของไม้แตกต่างกัน วิขัณฑ์ อรรณพานุรักษ์ และคณะวิจัย [6] ได้ทำการนำไม้ยูคาลิปตัสสายพันธุ์คามาลดูเลนซีสจากถิ่นกำเนิด 3 แห่งมาทดลองปลูกในท้องที่เดียวกัน และศึกษาลักษณะสัณฐานเส้นใย องค์ประกอบทางเคมี และคุณสมบัติของเยื่อทั้งผลผลิตและคุณสมบัติทางเคมี มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.01$)



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างผลผลิตของเยื่อกระดาษในกระบวนการต้มเยื่อแบบคราฟท์และปริมาณลิกนินที่ปรากฏในไม้แต่ละสายพันธุ์ [3]

นอกจากปริมาณสารเคมีในเนื้อไม้ของไม้แต่ละสายพันธุ์ที่มีผลต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษแล้ว ความเข้มข้นของน้ำยาต้มเยื่อเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษอย่างมีนัยสำคัญ ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยของ N. A. Ndukwe และคณะ [2] พบว่าปริมาณ Sulfidity 28.5% , active alkali 25.4% และ effective alkali 21.5% ในน้ำยาต้มเยื่อให้ผลผลิตของเยื่อกระดาษที่สูงกว่ากระบวนการผลิตที่ใช้น้ำยาต้มเยื่อที่มีปริมาณ Sulfidity 25.93%, active alkali 25.4% และ effective alkali 21.5% อย่างมีนัยสำคัญ โดยทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธี Duncan's multiple-range test

นอกจากปริมาณสารเคมีในเนื้อไม้ของไม้สายพันธุ์ต่างๆ และความเข้มข้นของน้ำยาต้มเยื่อที่มีผลต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษแล้ว สายพันธุ์ของไม้ ขนาดชิ้นไม้สับ สภาวะในการต้มเยื่อ เครื่องจักรที่ในกระบวนการผลิต รวมถึงปัจจัยอื่นๆ ต่างมีผลต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษ Martin MacLeod [3] ได้รวบรวมปัจจัยที่ส่งผลต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษ 10 ปัจจัยแรกของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบคราฟท์ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปปรับปรุงกระบวนการผลิตจริง ซึ่งได้พิจารณาถึงความเป็นไปได้ ความสำคัญ และค่าใช้จ่ายที่เหมาะสม ซึ่งปัจจัยดังกล่าว ได้แก่

1) สายพันธุ์ของไม้ หรือองค์ประกอบทางเคมีของไม้ (Wood species)
2) สัดส่วนของเส้นใย (Wood anatomy or proportion of fibres)
3) การกระจายขนาดของชิ้นไม้สับ (Chip size distribution)
4) คุณภาพชิ้นไม้สับหรือชิ้นไม้สับที่ไม่ได้ขนาด (Chip quality or other than size)
5) สารเคมีโดยทั่วไปที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (Pulping chemistry)
6) การใช้สารเคมีใหม่หรือการดัดแปลงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต (Modified/advanced pulping chemistry)
7) ระบบหม้อต้มเยื่อกระดาษ (Mill digester system)
8) ระบบหลังจากต้มเยื่อกระดาษ (Beyond pulping) ได้แก่ การสกัดลิกนินออก ความสม่ำเสมอของเส้นใยในน้ำเยื่อผ่านกระบวนการทางเคมี และการสูญเสียเส้นใยระหว่างกระบวนการผลิต
9) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลผลิตและตัวเลขคัปปา (Yield/Kappa relationship)
10) อื่นๆ เช่น ต้นไม้ปราศจากลิกนิน การสกัดเส้นใยออกจากไม้ ไม้เนื้อแข็งที่ไม่มีท่อน้ำลำเลียง เป็นต้น

ปัจจุบันไม้ยูคาลิปตัสในประเทศไทยมีหลากหลายสายพันธุ์ แต่ละสายพันธุ์มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป เช่น บางชนิดสามารถเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ น้ำน้อย ทนแล้งได้ดี บางชนิดมีจุดเด่นด้านทนทานต่อโรคแมลง บางชนิดมีคุณสมบัติลำต้นตรง ความสูงดี หรือบางชนิดมีคุณสมบัติเนื้อไม้ดี มีสารเคมีในเนื้อไม้ที่เหมาะกับที่โรงงานผลิตเยื่อกระดาษต้องการ ซึ่งทั้งหมดนี้มาจากการพัฒนาปรับปรุงสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสทั่วไปให้เป็นยูคาลิปตัสลูกผสมที่มีคุณสมบัติหลายด้านไว้ด้วยกัน ส่งผลให้สารเคมีภายในเนื้อไม้แตกต่างกันออกไป เมื่อนำไม้ยูคาลิปตัสต่างสายพันธุ์ต่างคุณสมบัติเข้าสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษร่วมกันก่อให้เกิดปัญหาดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 Hakan Kolmodin และคณะวิจัย [5] ได้ทำการศึกษาคุณสมบติของไม้ยูคาลิปตัสพบว่า ไม้ที่อายุมากกว่า 3 ปีจะมีคุณสมบัติในการต้มเยื่อและความแข็งแรงของเยื่อกระดาษมากกว่าไม้ที่อายุน้อยกว่า 3 ปี แต่จะใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อ (Bleaching) มากขึ้น

จากงานวิจัยหลายฉบับพบว่า สายพันธุ์ของไม้เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตของเยื่อกระดาษ (Pulp yield) ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบคราฟท์ (Kraft Process) ปัจจุบันกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษของโรงงานกรณีศึกษาใช้ไม้ยูคาลิปตัสหลายสายพันธุ์เป็นวัตถุดิบดังแสดงในตารางที่ 1.1 โดยไม้ยูคาลิปตัสที่นำเข้ากระบวนการผลิตแต่ละครั้งประกอบด้วยสายพันธุ์ต่างๆ ซึ่งก่อให้เกิดต้นทุนผลิตรวมที่ไม่คงที่ จึงได้มีแนวคิดที่จะนำหลักของการออกแบบการทดลองมาประยุกต์ใช้แก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในอดีตที่ผ่านมามีผู้ทำการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองจำนวนมาก เช่น อลงกต กาญจนคช [7] ได้ทำการวิจัยเพื่อปรับปรุงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่ใช้ในการผลิตกล่องกระดาษ โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองเพื่อปรับปรุงค่าความสามารถในการต้านทานแรงกดลอนลูกฟูก (Flat Crush) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกที่มีความสำคัญมาก ก่อนทำการทดลองผู้วิจัยได้นำเครื่องมือมาใช้ ได้แก่ แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ผังกลุ่มความคิด (Affinity Diagram) การวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) แผนภูมิพาเรโต(Pareto Diagram) การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis) และการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Test) หลังจากนั้น ได้นำไปออกแบบการทดลองเพื่อกรองปัจจัย (Screening DOE) ซึ่งทำให้ลดระยะเวลาในการทดลอง เหลือเพียงปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยคำนึงถึงเรื่องคุณภาพเป็นหลัก แต่ไม่มีการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องค่าใช้จ่ายซึ่งอาจเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีนัยสำคัญเช่นกัน

การทดลองทางวิศวกรรมนั้น ในบางกระบวนการมีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาและค่าใช้จ่าย วัชรศักดิ์ ทวีสุข [8] ได้นำการออกแบบการทดลองมาใช้ในการศึกษาถึงปัจจัยในกระบวนการผลิตชุดประกอบสำเร็จหัวเขียนอ่านข้อมูลที่มีผลกระทบต่อค่าการโก่งตัวของตัวหัวเขียนอ่านข้อมูล โดยพิจารณาหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่เป็นไปได้จริงในทางปฏิบัติ แต่เนื่องจากผู้วิจัยมีข้อจำกัดเรื่องค่าใช้จ่ายและระยะเวลาในการดำเนินการทดลอง จึงเลือกใช้แผนการทดลองแบบแฟรกชันนอลแบบครึ่งหนึ่งของวิธีแฟคทอเรียล โดยที่ทุกปัจจัยมีระดับปัจจัย 2 ระดับ จึงช่วยย่นระยะเวลาในการทดลอง

รวมถึงค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นได้ แต่ทั้งนี้ข้อจำกัดของปริมาณวัตถุดิบและเวลาที่สามารถใช้ทำการทดลองนั้น ทำให้ไม่สามารถทำการทดลองซ้ำ และไม่สามารถทำการทดลองที่มีจำนวนตัวอย่างในแต่ละชุดการทดลองมากได้ ซึ่งส่งผลให้ตัวแปรตอบสนองที่เป็นตัววัดความแปรปรวน ไม่สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้อย่างสมบูรณ์

การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลที่แต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ เรียกว่า การออกแบบ 3^k สรียา กสิกพันธุ์ [9] ได้ทำการวิจัยศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความแข็งแรงและความคงขนาดของแผ่นพาร์ทิเคิลและหาเงื่อนไขส่วนผสมที่เหมาะสมในการนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริมมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องเพียง 3 ปัจจัย ผู้วิจัยได้อาศัยหลักการการออกแบบการทดลองแบบ 3^k เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดไปทดลองผลิตจริง และได้ผลใกล้เคียงกับที่ได้จากการทดลอง แต่งานวิจัยนี้ ผู้วิจัยไม่ได้คำนึงถึงคุณสมบัติด้านค่าใช้จ่ายต้นทุนมาประกอบการตัดสินใจในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสมและการเลือกใช้ในการผลิต

งานวิจัยบางเรื่องมีความซับซ้อน ผู้วิจัยต้องใช้หลักการหลายอย่างมาแก้ไขปัญหา ไกรกุล ลิกขะไชย [10] ได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุและลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ ซึ่งทางผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ศึกษาสภาพปัจจุบันของโรงงานตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ว่าของเสียส่วนใหญ่มาจากปัจจัยหลักใดบ้าง 2) ดำเนินการวัดเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา ประกอบไปด้วยการคัดเลือกตัวแปรวัดปัจจัยป้อนเข้าโดยใช้ แผนผังก้างปลา ตารางสาเหตุและผล เชื่อมโยงเพื่อหาความรุนแรงของปัญหาด้วย FMEA ตลอดจนวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบการวัด 3) ดำเนินการวิเคราะห์และปรับปรุงโดยทำการทดสอบสมมติฐานของตัวแปร จากปัจจัยที่ผ่านการคัดเลือก จากนั้นนำมาออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k โดยเพิ่มจุดศูนย์กลาง 3 จุด ทดลองซ้ำ 2 Replicate เพื่อหาอิทธิพลของตัวแปร พบว่ามีเพียง 2 ปัจจัยที่มีผลต่อค่าความเปรียบเทียบสี โดยรูปแบบการทดลองมีลักษณะเป็นส่วนโค้ง (Curvature) จึงทำการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบเพิ่มเติมเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมทั้ง 2 ปัจจัย จากนั้นผู้วิจัยได้ใช้หลักการ

ทางสถิติ (One Sample T-Test) มาทดสอบว่าสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้จริง จากนั้นจึงทำแผนเพื่อควบคุมกระบวนการต่อไป

โปรแกรมเชิงเส้นเป็นการแก้ปัญหาภายใต้ข้อบังคับต่างๆ โดยมีเป้าหมายที่ต้องการให้ได้ค่าสูงสุดหรือค่าต่ำสุดของฟังก์ชัน ในการจัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เพื่อลดต้นทุนการผลิตสามารถนำหลักการวิจัยดำเนินงานในการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์มาประยุกต์ใช้ ดังงานวิจัยของโชคชัย ธนเมธี [12] ได้นำหลักการสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อจำลองปัญหาในการวางแผนผลิต และใช้เทคนิคการโปรแกรมเชิงเส้นตรงในการแก้ไขปัญหา โดยประยุกต์วิธีหนึ่งของเทคนิคโปรแกรมเชิงเส้นตรง (Goal Programming) โดยใช้โปรแกรมที่เรียกว่า เอ็กเทนด์ลินโก (Extended Lingo) และได้วิเคราะห์ความไวของการเปลี่ยนแปลงปัจจัยการผลิต ทั้งภายในและภายนอก พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถใช้วางแผนการผลิต และการแก้ไขปัญหาเมื่อปัจจัยการผลิตต่างๆ เปลี่ยนแปลง และเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการให้ผลลัพธ์ในการวางแผนผลิตแบบต่างๆ

ทฤษฎีที่นิยมนำมาใช้เปลี่ยนระบบไร้เชิงเส้นมาเป็นระบบเชิงเส้นได้แก่อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor) ภัทรินทร์ เอี่ยมเซี่ยม [13] ได้เสนอวิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุด สำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังชนิดมีแป้นรองรับหัวเสา โดยใช้วิธีการออกแบบอย่างเหมาะสมด้วยวิธีซิมเพล็กซ์ โดยมีราคาแผ่นพื้นเป็นสมการเป้าหมาย การคำนวณเริ่มต้นจากคำตอบที่เป็นไปได้ จากนั้นสร้างอสมการขอบเขตซึ่งจะถูกเปลี่ยนจากระบบไร้เชิงเส้นเป็นเชิงเส้น ด้วยอนุกรมลำดับที่หนึ่งและสองของ Taylor หลังจากนั้นโปรแกรมเชิงเส้นจะทำการแก้ปัญหาซ้ำไปซ้ำมาจนกระทั่งผลต่างของราคาแผ่นพื้นรอบที่ติดกันน้อยกว่า 0.05% อดินันท์ ธีรานุพัฒนา [14] ได้นำวิธีการคำนวณอย่างเหมาะสมโดยใช้วิธีซิเพล็กซ์ โดยมีราคาพื้นเป็นสมการเป้าหมาย และได้นำอนุกรมเทย์เลอร์มาใช้ในการเปลี่ยนอสมการแบบไร้เชิงเส้นเป็นแบบเชิงเส้นเช่นกัน

เนื่องจากงานวิจัยต่างๆ มีการเลือกใช้หลักการทางสถิติและวิธีการออกแบบการทดลอง ทั้งในส่วนการทดลองเบื้องต้น และการหาสภาวะที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้งานจริงในกระบวนการผลิต ดังนั้นหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อลดต้นทุนรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษจากการจัดกลุ่มสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสต่อไป

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ขั้นตอนการระบุหัวข้อปัญหา (Define Phase)

จุดประสงค์หลักของขั้นตอนนี้คือ การกำหนดปัญหาและเป้าหมายให้ตรงตามความต้องการของวัตถุประสงค์และปัญหาที่ตั้งไว้ เพื่อที่จะพัฒนาปรับปรุงกระบวนการผลิต ซึ่งเครื่องมือที่จะนำมาช่วยในการวิเคราะห์ถึงปัญหามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การระดมสมอง (Brainstorming) [5]

เป็นกระบวนการรวบรวมความคิดเห็นโดยทุกคนสามารถแสดงความเห็นได้อย่างอิสระ สมาชิกในทีมสามารถแสดงความคิดเห็นได้โดยไม่มีการจำกัดความคิดด้วยวิธีการใดๆ และทำให้เกิดการมีส่วนร่วมของทีม มีทางออกใหม่ๆ ในการแก้ปัญหา สำหรับเทคนิคที่ใช้ในการระดมสมองเช่น การใช้คำถาม Why -Why ไป 3-4 รอบเพื่อให้ได้รากเหง้าของสาเหตุของปัญหา การคิดที่ไร้กรอบ จะทำให้คนอิสระที่คิด ความคิดจะมีความหลากหลาย นอกจากนี้ผู้นำของทีมต้องทำเรื่องให้ยุติที่ทุกคนยอมรับได้ มิฉะนั้นจะมีเรื่องคาใจอยู่ตลอดเวลา เพราะพื้นฐานต่างๆ ของคนแตกต่างกัน เป็นต้น ก่อนการดำเนินการระดมสมองนั้น จะต้องเตรียมการ 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ [5]

1) ขั้นตอนการกำหนดเป้าหมาย ต้องกำหนดให้กระชับ เฉพาะเจาะจง และชัดเจนที่สุดว่าทำการระดมสมองเรื่องอะไร เพื่ออะไรและต้องทำให้สมาชิกเข้าใจเห็นด้วยกับเป้าหมายนั้น

2) ขั้นตอนการกำหนดกลุ่ม จะมีจำนวนเท่าไร ใครบ้าง ใครจะทำหน้าที่เขียนความคิดของสมาชิก และสถานที่ที่จะนำแผ่นการ์ดความคิดไปติดต้องให้มองเห็นได้ชัดเจน และในบางครั้งผู้นำกลุ่มต้องเด็ดขาดหากมีสมาชิกบางคนเริ่มครอบงำหรือข่มผู้อื่น

3) ขั้นตอนการกำหนดเวลา ต้องแน่ชัดและเหมาะสม จะเริ่มและจะต้องยุติเมื่อใดการมีเวลาจำกัดจะสร้างความกดดันให้สมองเร่งทำงานอย่างเต็มที่ สมองซีกขวาจะคิดส่วนสมองซีกซ้ายจะประเมินความคิดของตนเองว่าเหมาะสมหรือไม่ แล้วรีบแสดงออกมาโดยเร็ว

2. แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram)

แผนภูมิพาเรโตเป็นเครื่องมือที่ถูกนามาใช้ในการตรวจสอบปัญหาต่างๆ เพื่อสังเกตดูและจัดลำดับความสำคัญของปัญหาว่า ปัญหาใดควรจะมีการนำมาพิจารณาเป็นอันดับแรกโดยแสดงผลด้วยกราฟแท่งและค่าสะสมกราฟเส้นที่เรียงจากมากไปหาน้อย การนำพาเรโตมาใช้เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1897 โดยนักเศรษฐศาสตร์ชาวอิตาเลียนที่ชื่อว่า วี พาเรโต และต่อมาได้ถูกนามาประยุกต์ใช้ในการควบคุมคุณภาพเพื่อแสดงให้เห็นว่า สาเหตุความบกพร่องเพียงไม่กี่สาเหตุแต่ก่อให้เกิดความสูญเสียอย่างมาก ในขณะที่สาเหตุความสูญเสียเล็กน้อยที่เหลืออยู่กลับมาจากสาเหตุจำนวนมาก ซึ่งเรียกว่ากฎ 80/20 โดยเรียกวิธีการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุของความบกพร่องกับความสูญเสียที่เกิดขึ้นนี้ว่า การวิเคราะห์แบบพาเรโต (Pareto Analysis) และเรียกแผนภูมิที่แสดงความสัมพันธ์นี้ว่า แผนภูมิพาเรโต (Pareto Diagram)

2.2.2 ขั้นตอนการวัดเพื่อระบุสาเหตุเบื้องต้นของปัญหา (Measure Phase)

เป็นขั้นตอนที่จำเป็นสำหรับกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเนื่องจากเราต้องเข้าใจถึงระบบและสภาพของกระบวนการที่เป็นอยู่ปัจจุบันว่ามีจำนวนข้อบกพร่องอยู่เท่าใด ความสามารถของกระบวนการอยู่ที่ระดับไหนซึ่งจะทำให้เราสามารถเปรียบเทียบผลการทดลองก่อนและหลังได้อย่าง

ชัดเจน โดยเครื่องมือที่จะนำมาใช้ในส่วนของการวัดเพื่อระบุสาเหตุเบื้องต้นของปัญหาของงานวิจัยฉบับนี้ คือแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) มีดังรายละเอียดต่อไปนี้

แผนผังสาเหตุและผลเป็นแผนผังที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัญหา (Problem) กับสาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ที่อาจก่อให้เกิดปัญหานั้น (Possible Cause) ซึ่งอาจจะเรียกแผนผังสาเหตุและผลในชื่อของ "ผังก้างปลา (Fish Bone Diagram)" เนื่องจากหน้าตาแผนภูมิมีลักษณะคล้ายปลาที่เหลือแต่ก้าง หรืออีกชื่อหนึ่งรู้จักในชื่อของแผนผังอิชิกาว่า (Ishikawa Diagram) แผนผังนี้จะใช้เมื่อต้องการค้นหาสาเหตุของปัญหาโดยการระดมสมองของทุกคนในทีมเพื่อช่วยกันวิเคราะห์ ส่วนมากจะใช้หลักของ 5M 1E ในการแยกแยะออกเป็นกลุ่มปัจจัย คือ คน (Man), เครื่องจักร (Machine), วัตถุดิบ (Material), วิธีการทางาน (Method), เครื่องมือวัด (Measurement) และสภาพแวดล้อม (Environment) โดยแต่ละกลุ่มปัจจัยจะมีการกาหนดสาเหตุต่างๆ ได้อย่างเป็นระบบ และเป็นเหตุเป็นผลกัน

วิธีการสร้างแผนผังสาเหตุและผลหรือผังก้างปลา สิ่งสำคัญในการสร้างแผนผัง คือ ต้องทำเป็นทีม เป็นกลุ่มโดยใช้ขั้นตอน 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) กำหนดประโยคปัญหาที่หัวปลา
2) กำหนดกลุ่มปัจจัยที่จะทำให้เกิดปัญหานั้นๆ
3) ระดมสมองเพื่อหาสาเหตุในแต่ละปัจจัย
4) หาสาเหตุหลักของปัญหา
5) จัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ
6) ใช้แนวทางการปรับปรุงที่จำเป็น

แต่ไม่ได้หมายความว่า การกำหนดก้างปลาจะต้องใช้ 5 M 1E เสมอไป เพราะหากเราไม่ได้อยู่ในกระบวนการผลิตแล้ว ปัจจัยนำเข้า (input) ในกระบวนการก็จะเปลี่ยนไป เช่น ปัจจัยการนาเข้าเป็น 4P ได้แก่ Place, Procedure, People และ Policy หรือเป็น 4S Surrounding , Supplier, System และ Skill ก็ได้ หรืออาจจะเป็น MILK Management, Information, Leadership, Knowledge ก็ได้

นอกจากนั้น หากกลุ่มที่ใช้ก้างปลามีประสบการณ์ในปัญหาที่เกิดขึ้นอยู่แล้ว ก็สามารถที่จะกำหนดกลุ่ม ปัจจัยใหม่ให้เหมาะสมกับปัญหาตั้งแต่แรกเลยก็ได้ เช่นกัน

การกำหนดหัวข้อปัญหาควรกำหนดให้ชัดเจนและมีความเป็นไปได้ ซึ่งหากเรากำหนดประโยคปัญหานี้ไม่ชัดเจนตั้งแต่แรกแล้ว จะทำให้เราใช้เวลามากในการค้นหา สาเหตุ และจะใช้เวลานานในการทำผังก้างปลา การกำหนดปัญหาที่หัวปลา เช่น อัตราของเสีย อัตราชั่วโมงการทางานของคนที่ไม่มีประสิทธิภาพ อัตราการเกิดอุบัติเหตุ หรืออัตราต้นทุนต่อสินค้าหนึ่งชิ้น เป็นต้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า ควรกำหนดหัวข้อปัญหาในเชิงลบ

เทคนิคการระดมความคิดเพื่อจะได้ก้างปลาที่ละเอียดสวยงาม คือ การถาม ทำไม ทำไม ทำไม ในการเขียนแต่ละก้างย่อยๆ สาเหตุของปัญหาจะถูกเขียนไว้ในก้างปลาแต่ละก้าง ก้างย่อยเป็นสาเหตุของก้างรองและก้างรองเป็นสาเหตุของก้างหลัก

หลักการเบื้องต้นของแผนภูมิก้างปลา คือการใส่ชื่อของปัญหาที่ต้องการวิเคราะห์ ลงทางด้านขวาสุดหรือซ้ายสุดของแผนภูมิ โดยมีเส้นหลักตามแนวยาวของกระดูกสันหลัง จากนั้นใส่ชื่อของปัญหาย่อย ซึ่งเป็นสาเหตุของปัญหาหลัก 3 - 6 หัวข้อ โดยลากเป็นเส้นก้างปลาทามุมเฉียงจากเส้นหลัก เส้นก้างปลาแต่ละเส้นให้ใส่ชื่อของสิ่งที่ทำให้เกิดปัญหานั้นขึ้นมา ระดับของปัญหาสามารถแบ่งย่อยลงไปได้อีก ถ้าปัญหานั้นยังมีสาเหตุที่เป็นองค์ประกอบย่อยลงไปอีก โดยทั่วไปมักจะมีการแบ่งระดับของสาเหตุย่อยลงไปมากที่สุด 4-5 ระดับ เมื่อมีข้อมูลในแผนภูมิที่สมบูรณ์แล้ว จะทำให้มองเห็นภาพขององค์ประกอบทั้งหมด ที่จะเป็นสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้น

2.2.3 **การออกแบบการทดลอง** (Design of Experiment) [11]

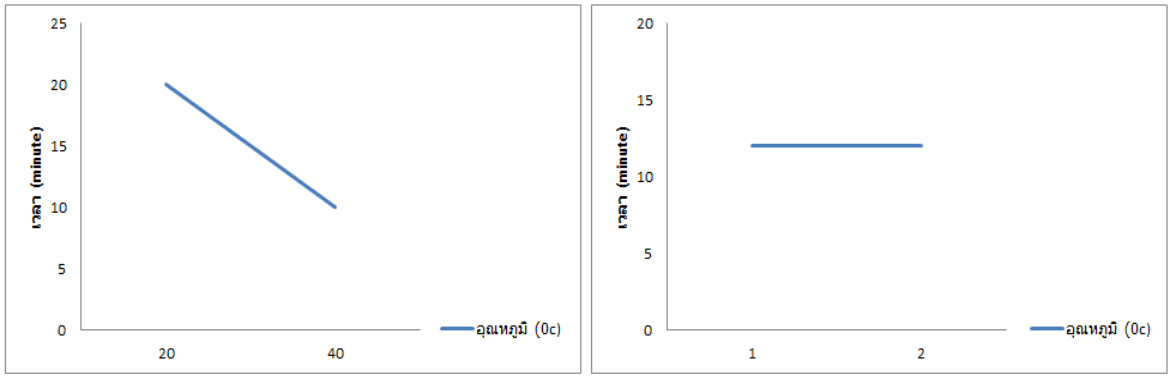
เป็นขั้นตอนการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยนำปัจจัยนาเข้าที่สำคัญของกระบวนการที่ได้มาจากการขั้นตอนก่อนหน้านี้ มาทำการทดสอบความมีนัยสาคัญทางสถิติ (Hypothesis Testing) และการออกแบบการทดลองทางสถิติ (Design of Experiment: DOE) เพื่อกรองปัจจัยนำเข้าทั้งหมดให้เหลือแต่ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง และนาปำจจัยเหล่านี้ไปทำการปรับปรุงต่อไป

การออกแบบการทดลองเป็นการออกแบบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความเหมาะสม โดยการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) ซึ่งอาศัยแบบจำลองหรือสมการทางคณิตศาสตร์มาอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ สามารถศึกษาผลของหลายๆ ปัจจัยพร้อมกันในเวลาเดียวกันด้วยวิธีใช้จำนวนการทดลองน้อยกว่าการศึกษาทีละปัจจัย การออกแบบการทดลองจึงเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ input (factors) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของ output (response) ที่เกิดขึ้น กระบวนการที่มีปัจจัย (factor) หรือ input (X1, X2, X3, X4) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (quality characteristic) ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลอง ต้องทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยที่ใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ความหมายของการออกแบบการทดลอง

หมายถึง การการออกแบบการทดลองเพื่อตรวจสอบดูว่าปัจจัยนำเข้าใด (Input Factors) ซึ่งเป็นตัวแปรที่สนใจหรือเป็นสาเหตุที่เกี่ยวข้องต่อกระบวนการ โดยมีจุดมุ่งหมายคือ เพื่อยืนยันข้อเท็จจริง (Confirmation) และเพื่อค้นหาข้อเท็จจริง (Exploration)

ในการออกแบบการทดลองนั้น จะทำการวิเคราะห์เพื่อหาว่าปัจจัยนำเข้าที่ศึกษามีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่ โดยทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนำเข้าอย่างน้อย 2 ระดับ เพื่อทราบถึงผลกระทบที่เปลี่ยนแปลงของตัวแปรตอบสนอง แล้วทำการทดลอง จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ในการศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยมีปัจจัยนำเข้าที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ และตัวแปรตอบสนองที่สนใจคือเวลาในการทำปฏิกิริยาเคมี ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังรูปที่ 2.2



(1) อุณหภูมิมีผลต่อเวลาในการทำปฏิกิริยา (2) อุณหภูมิไม่มีผลต่อเวลาในการทำปฏิกิริยา

รูปที่ 2.2 ปัจจัยนำเข้าที่มีอิทธิพล และไม่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนอง

ส่วนประกอบต่าง ๆ ของการทดลอง

1) ทรีทเมนต์ (Treatment) คือ วิธีที่เราปฏิบัติต่อสิ่งทดลองเพื่อวัดผลเปรียบเทียบตามวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2) หน่วยทดลอง (Experiment Unit) เป็นหน่วยซึ่งใช้วัดอิทธิพลของทรีทเมนต์

3) ปัจจัย (Factor) ได้แก่ กลุ่มของทรีทเมนต์ที่มีความเกี่ยวข้องกัน หรืออาจจะใช้คำว่าตัวแปรอิสระแทนก็ได้ ซึ่งปัจจัยนั้นเป็นได้ทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพ และข้อมูลเชิงปริมาณ โดยปัจจัยสามารถแบ่งแยกย่อยได้อีก ดังรูปที่ 2.3 รูปแบบแสดงปัจจัยและพารามิเตอร์ของกระบวนการ

3.1) ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึงปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในการทดลอง

3.2) ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึงปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ อันเนื่องมาจาก ขีดความสามารถของเครื่องจักรและเครื่องมือ โดยสามารถแบ่งออกเป็น ตัวแปรรบกวน (Noise Variable) ส่วนใหญ่มักได้แก่ เวลา หรือเครื่องมืออุปกรณ์เป็นต้น และ Nuisance Variable คือตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง แต่เราไม่ทราบมาก่อน ซึ่งสามารถลดผลกระทบดังกล่าวลงได้ โดยทำการสุ่มลำดับการทดลอง

4) ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือตัวแปรที่ถูกสังเกตหรือวัดค่าในการทดลอง หรือเรียกอีกอย่างว่าตัวแปรตาม ซึ่งเป็นตัวแปรที่สะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของตัวแปรอิสระนั่นเอง

หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง

1) การทำแบบสุ่ม (Randomization) คือ การสุ่มลำดับของการทดลองเพื่อกระจายโอกาส โดยให้แต่ละหน่วยทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์ใดทรีทเมนต์หนึ่งเท่าๆกัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อขจัดอคติหรือความเอนเอียงของผู้ทำการทดลอง การสุ่มจึงเป็นการประกันว่าจะไม่มีอคติใดๆ เกิดขึ้นในการทดลอง การสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธี ดังนี้

1.1) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)

1.2) การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)

1.3) การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2) การทำซ้ำ (Replication) คือ การที่ทรีทเมนต์หนึ่งกระทำต่อหน่วยทดลองมากกว่า 1 หน่วยทดลอง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มความเที่ยง (Precision) ของการทดลองโดยการลดขนาดของค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย

3) การบล็อก (Blocking) คือ การจัดกลุ่มการทดลองเพื่อลดผลปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

1) การระบุปัญหา (Recognition of and Statement of the problem)

2) การเลือกปัจจัย ระดับ และขอบเขต (Choice of Factors and Levels)

3) การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Choice of Response Variable)

4) การเลือกการออกแบบการทดลอง (Choice of Experimental Design)

5) การดำเนินการทดลอง (Performing the Experiment)

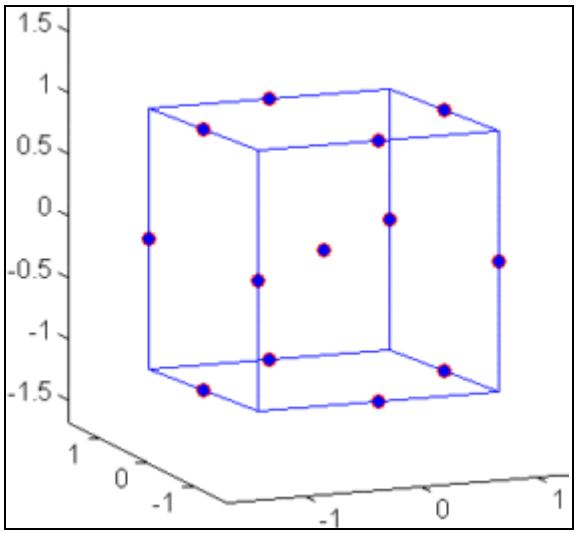
6) การวิเคราะห์ข้อมูล (Statistical Analysis of data)

7) การสรุปผลการทดลองและเสนอแนะ (Conclusions and Recommendations)

การเลือกการออกแบบการทดลอง [18]

การเลือกการออกแบบการทดลอง เกี่ยวข้องกับการพิจารณาขนาดของกลุ่มตัวอย่าง การเลือกลำดับที่เหมาะสมของการทดลองที่จะใช้ในการเก็บข้อมูลและตัดสินใจว่าควรจะใช้วิธีบล็อค หรือการใช้แรนดอมไมเซชั่นอย่างใดอย่างหนึ่งหรือไม่ ในการเลือกการออกแบบการทดลองจะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้แผนการทดลองแบบบอกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Design) โดยมีรายละเอียดดังนี้

การออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบสามระดับบนพื้นผิวผลตอบ การออกแบบถูกสร้างขึ้นมาจากการรวบรวมเอาการออกแบบแฟกทอเรียล 2^k กับการออกแบบบล็อคไม่สมบูรณ์ ผลของการออกแบบมีประสิทธิภาพมากในด้านจานวนของการรันที่ต้องการและการออกแบบนี้ยังมีความสามารถในการหมุนหรือเกือบหมุนได้อีกด้วย



รูปที่ 2.3 การออกแบบบอกซ์-เบห์นเคน สำหรับสามตัวแปร

จากรูปที่ 2.3 แสดงให้เห็นถึงการออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนที่มีตัวแปร 3 ตัวแปร รูปทางเรขาคณิตของการออกแบบจะสังเกตเห็นว่า การออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนเป็นการออกแบบรูปทรงกลมที่ทุกจุดวางอยู่บนรูปทรงกลมรัศมี นอกจากนั้น การออกแบบบอกซ์-เบห์นเคนไม่ได้รวมเอา

จุดใดๆ ที่เป็นจุดยอดของรูปลูกบาศก์ที่สร้างขึ้นจากขีดจากัดบนและล่างของแต่ละตัวแปรเอาไว้ การกระทำเช่นนี้เป็นประโยชน์อย่างมากเมื่อจุดที่อยู่บนมุมของลูกบาศก์ คือ การรวมเอาปัจจัยระดับ (Factor Level Combination) ที่แพงมากหรือเป็นไปไม่ได้ที่จะทำการทดลองเนื่องจากข้อจำกัดด้านกายภาพของกระบวนการ

2.2.4 หลักการทางสถิติที่จำเป็นในการวิเคราะห์ข้อมูล

เพื่อให้แน่ใจในผลการทดลอง จึงจำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยการทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ และการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

การทดสอบสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R - Square)

เป็นการวิเคราะห์ว่าการออกแบบที่ได้ออกแบบขึ้นมาใช้ในการทดลองมีความเหมาะสมเพียงใด ซึ่งในการทดลองทุกครั้งจะต้องมีความผันแปรที่อธิบายไม่ได้ (Unexplained Variable) หรือ ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นเสมอ การออกแบบการทดลองที่ดีจะต้องทำให้เกิดความผันแปรที่อธิบายไม่ได้น้อยที่สุด

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R – Square)} = \frac{\text{ความผันแปรที่อธิบายได้}}{\text{ความผันแปรทั้งหมด}} \times 100\%$$

ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R – Square) ต่ำสามารถแก้ไขได้โดย

1) เพิ่มจำนวนซ้ำในการทดลอง

2) ตรวจสอบหาปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้องแล้วออกแบบการทดลองใหม่

3) ถ้าทำการเพิ่มปัจจัยอื่นแล้ว ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R – Square) ยังต่ำอยู่แสดงว่าผลจากปัจจัยรบกวน (Noise Factor) มีมาก ต้องทำการบล็อก (Blocking) เพื่อลดปัจจัยรบกวน

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

จากสมการ $y_{ij} = \mu + \sigma_i + \varepsilon_{ij}$

ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ย

σ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ε คือ ความคลาดเคลื่อน

ในการออกแบบการทดลองส่วนใหญ่ มักจะตั้งสมมติฐานในการวิเคราะห์จากการที่ y (ตัวแปร) มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ (Normal Distribution) ดังนั้น y จะมีการกระจายแบบนี้ได้ ต้องให้ ε มีการกระจายแบบปกติด้วย และต้องเป็นการกระจายที่เป็นอิสระ $\varepsilon_{ij} \sim NID(0, \sigma^2)$

การตรวจสอบ ε_{ij} มี 3 ขั้นตอน คือ

1) การตรวจสอบการกระจายว่าเป็นแบบแจกแจงปกติ (Normal distribution) หรือไม่ โดยใช้

1.1) การทดสอบแบบไคร์สแควร์ (X^2 - Goodness of Fir Test)

1.2) การทดสอบแบบโคโมโกรอฟ – สเมอร์นอฟ (Kologomorov – Smirov Test)

1.3) การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงปกติ (NOPP)

2) การตรวจสอบความเป็นอิสระ (Independent) โดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) แล้วดูลักษณะการกระจายของจุดที่แทนข้อมูลบนแผนภูมิว่าแนแบบอิสระหรือไม่

3) การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน (Variance Stability) โดยใช้แผนภูมิการกระจายซึ่งเป็นแผนภูมิการกระจายค่าความคลาดเคลื่อน (Residual) ในแต่ละระดับของปัจจัย ถ้ารูปร่างการกระจายของจุดที่ออกมาไม่เป็นลักษณะของการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของความแปรปรวน (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวน

4) การทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

การทดสอบสมมติฐานเชิงสถิติ เป็นถ้อยแถลงที่เกี่ยวกับความน่าจะเป็นของตัวแปรแบบสุ่มที่มีความสัมพันธ์กับค่าพารามิเตอร์ที่มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งค่าพารามิเตอร์ โดยสมมติฐานแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ

1) สมมติฐานที่กำหนด (Null Hypothesis) เป็นข้อสงสัยหรือข้อสมมติเกี่ยวกับลักษณะต่างๆ ในประชากรที่ต้องการพิสูจน์ว่าจริงหรือไม่ โดยใช้สัญลักษณ์ H_0

2) สมมติฐานแย้ง (Alternative Hypothesis) เป็นข้อความหรือความคิดเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่หวังว่าจะเป็น โดยจะต้องมีความหมายที่แย้งกับสมมติฐานที่กำหนดโดยชัดเจน โดยใช้สัญลักษณ์ H_1

โดยโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะทำการปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด (Reject H_0) จะถูกกำหนดโดยระดับนัยสำคัญ ซึ่งเป็นโอกาสหรือความน่าจะเป็นที่น้อยมากที่ค่าพารามิเตอร์จะตกอยู่ในช่วงของการปฏิเสธเมื่อสมมติฐานเป็นจริง โดยทั่วไปมักจะทำการเปลี่ยนช่วงของการปฏิเสธสมมติฐานหรือระดับความมีนัยสำคัญเป็นค่าวิกฤติ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบหรือใช้ในการตัดสินใจว่าจะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดการตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนดอาจเกิดความผิดพลาดได้ 2 กรณี คือ

ก) ความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด โดยที่สมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้องหรือมีความเป็นจริง เรียกว่า ความผิดพลาดแบบที่ 1 (Type I error) ซึ่งความผิดพลาดนี้คือ ระดับมีนัยสำคัญในการตรวจสอบสมมติฐาน

ข) ความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานที่กำหนดโดยที่สมมติฐานที่กำหนด มีความไม่ถูกต้องหรือไม่มีความจริง เรียกว่า ความผิดพลาดแบบที่ 2 (Type II error) ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐาน

สมมติฐานที่กำหนด	สมมติฐานที่กำหนดมีความถูกต้อง	สมมติฐานที่กำหนดไม่มีความถูกต้อง
ยอมรับ	การตัดสินใจถูกต้อง	ความผิดพลาดแบบที่ 2
ปฏิเสธ	ความผิดพลาดแบบที่ 1	การตัดสินใจถูกต้อง

โอกาสหรือความน่าจะเป็นที่จะเกิดความผิดพลาดแบบที่ 1 และ 2 สามารถแสดงได้ดังนี้

α = P (ความผิดพลาดแบบที่ 1)

= P (การปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด: สมมติฐานที่กำหนดถูกต้อง)

β = P (ความผิดพลาดแบบที่ 2)

= P (การยอมรับสมมติฐานที่กำหนด: สมมติฐานที่กำหนดไม่ถูกต้อง)

โดย $1 - \beta$ = อำนาจของการทดสอบ

= P (การปฏิเสธสมมติฐานที่กำหนด: สมมติฐานที่กำหนดถูกต้อง)

ในการตั้งสมมติฐานจะประกอบด้วยแนวทาง 3 ประการด้วยกันคือ

1. เป็นการกำหนดจากประสบการณ์ในอดีตหรือความรู้เกี่ยวกับกระบวนการหรือจากการทดลองก่อนหน้านี้ โดยการตั้งสมมติฐานเช่นนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อการทดสอบว่าสภาวะที่สนใจมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ตัวอย่างของการประยุกต์การตัดสินใจแบบนี้จะใช้มากกับกรณีการควบคุมกระบวนการ อาทิ แผนภูมิควบคุม

2. เป็นการกำหนดค่าจากทฤษฎีหรือตัวแบบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการที่ทำการศึกษา โดยการตั้งสมมติฐานเช่นนี้ จะมีจุดประสงค์เพื่อการทวนสอบทฤษฎีหรือตัวแบบนั้นๆ ตัวอย่างของการประยุกต์กาตัดสินใจแบบนี้จะใช้มากกับกรณีงานวิจัยและพัฒนา (R&D)

3. เป็นการกำหนดค่าจากการพิจารณาถึงปัจจัยภายนอกต่างๆ อาทิ แบบทางวิศวกรรม ข้อกำหนดทางวิศวกรรม หรือจากสัญญาที่กำหนด โดยการตั้งสมมติฐานเช่นนี้จะมีจุดประสงค์เพื่อการทดสอบความถูกต้องของเครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการสอบเทียบ เป็นต้น

อย่างไรก็ตามภายใต้แนวทางดังกล่าวนี้ อาจจะสรุปเป็นสมมติฐานเพื่อการประยุกต์ในทางวิศวกรรมได้ 3 ประเภทคือ

1. **การควบคุม** ซึ่งเป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่ากระบวนการเปลี่ยนแปลงไปจากมาตรฐานหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

H_0 : กระบวนการอยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ (หรือ $\mu = \mu_0$)

H_1 : กระบวนการมิได้อยู่ภายใต้การควบคุมเชิงสถิติ (หรือ $\mu \neq \mu_0$)

การวิเคราะห์ ซึ่งเป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณาเป็นสาเหตุของปัญหาที่พิจารณาหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐาน ว่า

H_0 : ปัจจัยที่พิจารณามิได้เป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงตัวแปร y (หรือ $\mu = \mu_0$)

H_1 : ปัจจัยที่พิจารณาเป็นสาเหตุการเปลี่ยนแปลงตัวแปร y (หรือ $\mu \neq \mu_0$)

2. **การปรับปรุง** ซึ่งเป็นการตัดสินใจเพื่อยืนยันว่าปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงค่าตัวแปรตอบสนองที่พิจารณาหรือไม่ โดยกำหนดสมมติฐานว่า

H_0 : ปัจจัยที่พิจารณามิได้มีผลต่อการปรับปรุงตัวแปร y (หรือ $\mu = \mu_0$)

H_1 : ปัจจัยที่พิจารณามีผลต่อการปรับปรุงตัวแปร y (หรือ $\mu \neq \mu_0$)

2.3 หลักการและกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

กระบวนการผลิตเยื่อฟอกแบ่งย่อยออกเป็น 2 ขั้นตอน ได้แก่ การต้มเยื่อ และการฟอกเยื่อ โดยใช้กระบวนการต้มเยื่อแบบคราฟท์ (Kraft Process) ซึ่งใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ในการต้มเยื่อ กระบวนการผลิตเยื่อเริ่มจากชิ้นไม้สับถูกลำเลียงเข้าสู่หม้อต้ม ซึ่งชิ้นไม้จะถูกต้มด้วยความร้อนและสารเคมี กลายเป็นเยื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำดำ จากนั้นเยื่อจะถูกส่งเข้าถังลดความดัน และเครื่องกรองเพื่อแยกสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่เส้นใยออก เยื่อที่แยกได้จะถูกนำมาล้างและทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเพื่อละลายลิกนินที่ยังหลงเหลืออยู่ก่อนส่งเข้าสู่กระบวนการฟอกเยื่อ เพื่อเพิ่มความขาวสะอาดให้แก่เยื่อ และเยื่อที่ผ่านการฟอกจะถูกทำเป็นแผ่นด้วยเครื่องทำแผ่นเพื่อส่งให้ลูกค้าต่อไป รายละเอียดกระบวนการผลิตในแต่ละขั้นตอนเป็นดังนี้

2.3.1 **การต้มเยื่อ** (Digesting)

กระบวนการต้มเยื่อ เริ่มจากชิ้นไม้สับถูกลำเลียงเข้าสู่หม้อต้ม (Digester) ซึ่งเป็นแบบ Isothermal ซึ่งเป็นระบบที่อุณหภูมิในการต้มเท่ากันในแต่ละส่วน โดยชิ้นไม้สับจะถูกลำเลียงเข้าทางด้านบน (Top Separator) ซึ่งมีลักษณะเป็นสกรู (Screw Conveyor) ทำหน้าที่รับชิ้นไม้เข้าสู่หม้อต้มเยื่อ โดยการป้อนชิ้นไม้เข้าสู่หม้อต้มจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

ภายในหม้อต้มเยื่อ ชิ้นไม้สับจะถูกต้มพร้อมกับสารเคมีที่ลำเลียงมาพร้อมกัน ซึ่งได้แก่สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้ไอน้ำอย่างต่อเนื่องภายใต้ความดัน 6.5 บาร์ อุณหภูมิ 160-170 องศาเซลเซียส โดยใช้ระยะเวลาในการต้มประมาณ 3-4 ชั่วโมง ทำให้ชิ้นไม้สับกลายเป็นเยื่อแขวนลอยอยู่ในน้ำดำ (Black Liquor) ส่วนลิกนินก็จะละลายอยู่ในน้ำยาต้มเยื่อกลายเป็นน้ำดำดังกล่าว จากนั้นเยื่อจะถูกส่งเข้าถังลดความดัน (Blow Tank) เพื่อลดความดันให้เท่ากับความดันบรรยากาศ จากนั้นจะส่งเข้า Knotter เพื่อแยกตาไม้และเข้าเครื่องร่อนแยกเยื่อ (Primary Screen) เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่ไม่ใช่เส้นใย เช่น หิน ทราย ยาง พลาสติก และประเภทที่เป็นวัสดุเส้นใย เช่น มัดเส้นใย เสี้ยน และข้อ ฯลฯ ซึ่งต้มไม่สุกออกมาแล้วนำกลับไปต้มใหม่ ส่วนเยื่อที่ได้ขนาดจะถูกล้างให้สะอาดอีกครั้งในเครื่องบีบล้าง โดยใช้น้ำ Condensate และน้ำหมุนเวียน จากนั้นเยื่อจะเข้าสู่ขั้นตอนการสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนต่อไป ส่วนของน้ำล้างซึ่งเป็นน้ำดำจะถูกส่งไปยังหน่วยผลิตสารเคมีกลับคืนต่อไป

2.3.2 **การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจน** (Oxygen Delignification)

การสกัดลิกนินด้วยออกซิเจนเป็นการกำจัดลิกนินที่ยังเหลืออยู่ในขั้นตอนแรกโดยใช้ออกซิเจน (O_2) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และไอน้ำเข้าทำปฏิกิริยากับลิกนิน โดยกระบวนการเริ่มต้นจากการผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้ากับเยื่อ จากนั้นจะส่งส่วนผสมทั้งหมดเข้าไปในถังปฏิกิริยา (Oxygen Reactor) ภายใต้อุณหภูมิ 100-115 องศาเซลเซียส และความดัน 8.5 บาร์ โดยใช้เวลาประมาณ 60 นาที ภายในถัง โซเดียมไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนไปสกัดลิกนินในเยื่อให้หลุด

ออกโดยมีไอน้ำเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิ จากนั้นเยื่อที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังถังลดความดันก่อนผ่านเข้าเครื่องล้างด้วยระบบการใช้น้ำหมุนเวียนแบบย้อนกลับเช่นเดียวกับการล้างเยื่อ เยื่อที่ได้จะมีสีน้ำตาลอ่อน

แม้ว่าการละลายลิกนินด้วยออกซิเจนจะมีต้นทุนที่สูงและใช้พลังงานมาก แต่ในแง่ของสิ่งแวดล้อมแล้วการละลายลิกนินด้วยออกซิเจน คือ การทำให้การใช้สารเคมีต่าง ๆ ในขั้นตอนการฟอกเยื่อลดลง จากค่า Kappa Number ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อ (คำนวณจากจำนวนมิลลิลิตรของด่างทับทิมเข้มข้น 0.1 N ที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเยื่อแห้ง 1 กรัม ตามสภาวะที่กำหนด) ลดลง โดยค่า Kappa Number ของเยื่อก่อนการละลายลิกนินด้วยออกซิเจนมีค่าประมาณ 15 และหลังจากทำปฏิกิริยาในถัง Oxygen Reactor จะได้เยื่อที่มีค่า Kappa Number 9 ซึ่งหมายถึงปริมาณลิกนินจะเหลือเพียงครึ่งหนึ่งของปริมาณที่ใช้ในการต้ม เป็นผลให้การใช้สารเคมีในขั้นตอนการฟอกลดน้อยลง ทำให้ปริมาณสารเคมีที่จะติดไปกับน้ำเสียลดลงด้วย จึงเป็นการลดปริมาณน้ำทิ้งและค่าความสกปรกในน้ำทิ้ง ทั้งนี้น้ำล้างจะถูกนำกลับไปเผาที่หน่วยผลิตสารเคมีกลับคืน

2.3.3 **การฟอกเยื่อ** (Bleaching)

เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเยื่อในด้านความขาวสว่างโดยใช้สารเคมีในการฟอก 3 ขั้นตอนด้วยกัน คือขั้นตอนการฟอก D0 , EOP (Extraction by NaOH, Oxygen and H_2O_2) และ D1 ซึ่งเป็นระบบการฟอกเยื่อแบบ Elementary Chlorine Free (ECF) โดยก่อนการฟอกเยื่อ จะมีการเติม $MgSO_4$ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงของเยื่อ จากนั้นเยื่อจะถูกฟอกด้วยคลอรีนไดออกไซด์ (ClO_2) ก่อนแล้วผ่านเข้าเครื่องล้างเยื่อเพื่อทำความสะอาด จากนั้นจึงสกัดด้วยออกซิเจน โซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) จากนั้นเยื่อที่ได้จะถูกส่งไปทำความสะอาดโดยผ่านเข้าเครื่องล้างเยื่ออีกครั้ง ก่อนส่งไปฟอกด้วยคลอรีนไดออกไซด์อีกครั้ง เยื่อหลังผ่านการฟอกจะถูกนำมาทำการล้างทำความสะอาดอีกครั้ง ด้วยระบบกรองแบบแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centri-Cleaner)

เยื่อที่ฟอกขาวและทำความสะอาดแล้วจะถูกทำให้แห้ง และถูกตัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องตัดก่อนที่จะมัดรวมกัน จากนั้นจะทำการชั่งน้ำหนัก ห่อและส่งเข้าไปเก็บในโกดังเก็บเยื่อเพื่อรอการส่งขายต่อไป

บทที่ 3

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต

จากการศึกษาข้อมูลและสภาพปัญหาเบื้องต้นในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษพบว่า ปัจจัยเสี่ยงต่อการขยายตัวของอุตสาหกรรมกระดาษ คือ แนวโน้มของต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากราคาวัตถุดิบในการผลิตกระดาษมีการปรับตัวสูงขึ้นตามตลาดโลก ราคาพลังงานที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งต้นทุนการลดมลพิษจากการผลิตที่เพิ่มขึ้น ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมสูง แนวทางสำหรับผู้ประกอบการในการปรับตัวเพื่อลดต้นทุนการผลิตคือ ปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตโดยไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือเป็นการเพิ่มมลพิษที่เกิดจากการผลิต

3.1 **การกำหนดตัวแปรตอบสนอง** (Response Variables)

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อลดต้นทุนการผลิต ได้แก่ สารเคมีและไอน้ำ จากการนำวัตถุดิบหลักคือไม้ยูคาลิปตัสหลายสายพันธุ์เข้าสู่กระบวนการผลิต และต้องมีการควบคุมตัวแปรตอบสนองที่สำคัญในกระบวนการผลิต ซึ่งได้แก่ ต้นทุนการผลิตให้มีค่าต่ำที่สุด โดยมีการควบคุมคุณภาพเยื่อกระดาษให้ได้ตามความต้องการของลูกค้า ในงานวิจัยนี้ ได้เลือกกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมาทำการทดลองเพราะเป็นกระบวนการที่สำคัญของอุตสาหกรรมผลิตกระดาษที่มีค่าใช้จ่ายสารเคมีและไอน้ำในกระบวนการผลิตมากและไม่คงที่ ดังนั้น ในการทำวิจัยครั้งนี้จึงกำหนดตัวแปรตอบสนองที่สนใจ คือ ต้นทุนการผลิตรวม ซึ่งประกอบไปด้วย ชิ้นไม้สับ ไอน้ำ สารเคมี ออกซิเจน และค่าใช้จ่ายในการจัดการชิ้นไม้สับที่ต้มไม่สุก ดังต่อไปนี้

3.1.1 **หน่วยงานต้มเยื่อ**

- ชิ้นไม้สับ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตเยื่อกระดาษ ราคา 2,600 บาทต่อตัน
- ไอน้ำ ที่ใช้ในการต้มชิ้นไม้สับให้สุก ประกอบด้วยไอน้ำที่แรงดัน 2 ระดับ ได้แก่

- ไอน้ำแรงดันปานกลาง (Medium Pressure, MP) ที่แรงดัน 120 บาร์ และอุณหภูมิเท่ากับ 200 องศาเซลเซียส ราคา 900 บาทต่อตัน
- ไอน้ำแรงดันต่ำ (Low Pressure, LP) ที่แรงดัน 4 บาร์ และอุณหภูมิเท่ากับ 160 องศาเซลเซียส ราคา 850 บาทต่อตัน

• น้ำยาต้มเยื่อเป็นสารละลายด่างเข้มข้นที่มีองค์ประกอบหลักคือ โซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟล์ทำหน้าที่ละลายลิกนินในเส้นใยออกจากเนื้อไม้ ราคา 300 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ที่ความเข้มข้นของ EA เท่ากับ 112 กรัมต่อลิตรและ Sulfidity เท่ากับ 35 เปอร์เซ็นต์ (ที่ความเข้มข้นต่างกันค่าใช้จ่ายในการผลิตไม่แตกต่าง)

3.1.2 **หน่วยงาน** Brownstock

• ออกซิเจนที่ใช้ในการสกัดลิกนินออกจากเยื่อ ราคา 4.9 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

3.1.3 **หน่วยงานฟอกเยื่อขาว**

มีการใช้สารเคมีหลายชนิดในการฟอกเยื่อกระดาษให้มีความขาวสว่างที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตกระดาษ โดยสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อขาว ได้แก่

• คลอรีนไดออกไซด์ ราคา 51,000 บาทต่อตัน
• ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ราคา 11,000 บาทต่อตัน
• โซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ราคา 54,000 บาทต่อตัน
• กรดซัลฟูริก ราคา 2,650 บาทต่อตัน
• ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ ราคา 2,650 บาทต่อตัน
• ออกซิเจน ราคา 4.9 บาทต่อลูกบาศก์เมตร

การผลิตเยื่อกระดาษขาวจากชิ้นไม้สับ โดยผ่านกระบวนการต้มเยื่อกระดาษแบบคราฟท์ มีต้นทุนการผลิตหลักโดยเฉลี่ย 15,000 บาทต่อตันเยื่อแห้ง ทั้งนี้ ค่าใช้จ่ายในกระบวนการผลิตเยื่อ

กระดาษขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น สายพันธุ์ของไม้ที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ความแห้งของชิ้นไม้สับที่เข้าสู่กระบวนการผลิต ขนาดของชิ้นไม้สับ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ เป็นต้น

จากข้อมูลใน 1 ไตรมาสของปี 2555 พบว่า ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเฉลี่ยเท่ากับ 15,500 บาทต่อตันเยื่อแห้ง โดยรายละเอียดของต้นทุนที่ใช้ในการผลิตแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 รายละเอียดของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่อหนึ่งตันเยื่อ

ต้นทุนหลักในการผลิตเยื่อกระดาษ 1 ตันเยื่อ									
ชิ้นไม้สับ	MP	LP	WL	O_2	ClO_2	NaOH	H_2SO_4	H_2O_2	Uncooked
3.666	0.871	0.180	3.014	19.220	0.043	0.018	0.019	0.013	0.097
ตัน	ตัน	ตัน	ลบ.ม.	ลบ.ม.	ตัน	ตัน	ตัน	ตัน	ตัน
9,531.04	784.21	153.20	904.07	94.18	2,207.15	951.53	49.03	161.02	681.63
บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท	บาท

จากตารางที่ 3.1 แสดงต้นทุนหลักในการผลิตเยื่อกระดาษ 1 ตันแห้ง ต้องใช้ชิ้นไม้สับปริมาณ 3.666 ตัน คิดเป็นเงิน 9,531.04 บาท ไอน้ำแรงดันปานกลางปริมาณ 0.871 ตัน คิดเป็นเงิน 784.21 ไอน้ำแรงดันต่ำปริมาณ 0.180 ตัน คิดเป็นเงิน 153.20 บาท น้ำยาต้มเยื่อปริมาณ 3.014 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นเงิน 904.07 บาท ออกซิเจนปริมาณ 19.220 ลูกบาศก์เมตร คิดเป็นเงิน 94.18 บาท คลอรีนไดออกไซด์ปริมาณ 0.043 ตัน คิดเป็นเงิน 2,207.15 บาท โซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 0.018 ตัน คิดเป็นเงิน 951.53 บาท กรดซัลฟูริคปริมาณ 0.019 ตัน คิดเป็นเงิน 49.03 บาท ไฮดรอเจนเปอร์ออกไซด์ปริมาณ 0.013 ตัน คิดเป็นเงิน 161.02 บาท และค่าบริหารจัดการชิ้นไม้สับต้มไม่สุกปริมาณ 0.097 ตัน คิดเป็นเงิน 681.63 บาท ดังนั้น ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ 1 ตันมีค่าใช้จ่ายทั้งสิ้น 15,517.06 บาท

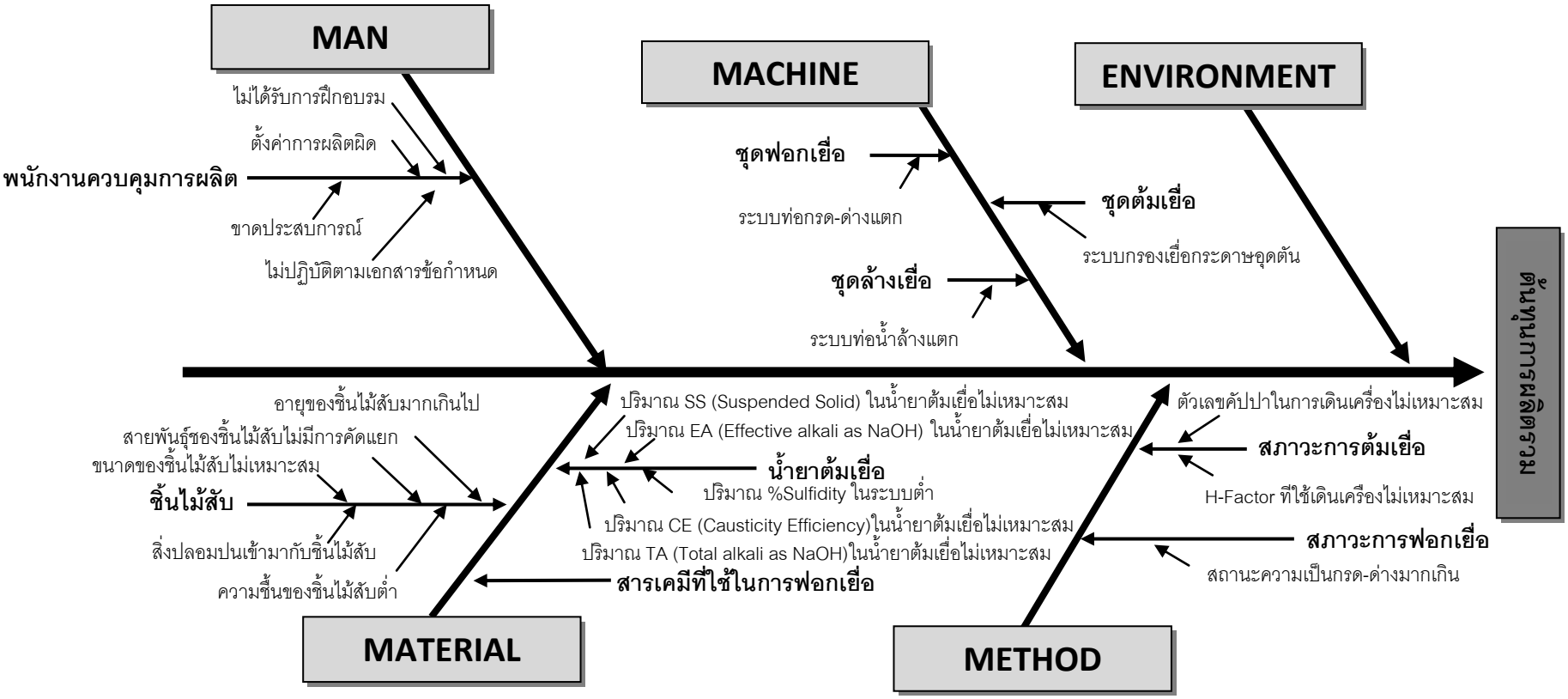
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง

ในการทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จะใช้วิธีการระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

ผู้จัดการโรงงาน (Mill Manager) จำนวน 1 คน ผู้จัดการหน่วยงาน (Plant Manager) จำนวน 3 คน ผู้จัดการกะ (Shift Manager) จำนวน 2 คน วิศวกรกะ (Shift Engineer) จำนวน 2 คน พนักงานควบคุมคุณภาพ จำนวน 1 คน พนักงานเดินเครื่อง (Distributed Control System, DCS) จำนวน 2 คน และพนักงานภาคสนาม (Field Operator) จำนวน 2 คน โดยอ้างอิงจากข้อมูลจากการทดลองในอดีต และข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาเกณฑ์การพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เมื่อพิจารณาปัจจัยในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ พบว่ามีปัจจัยจำนวนมากที่เกี่ยวข้องและมีอิทธิพลต่อต้นทุนการผลิตรวม ดังนั้นในขั้นต้น พิจารณาเฉพาะปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ตามหลักการ 4M 1E ดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
2. ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
3. ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
4. ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)
5. สิ่งแวดล้อม (Environment)

ผู้วิจัย ผู้เชี่ยวชาญ และผู้มีประสบการณ์เกี่ยวกับกระบวนการผลิต ได้ร่วมกันระดมสมองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนการผลิตรวมกับปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยการประยุกต์ใช้แผนผังเหตุและผล (Cause and effect diagram) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ ซึ่งผลการระดมสมองแสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่ามีปัจจัยจำนวนมากที่มีผลต่อต้นทุนการผลิต เช่น สายพันธุ์ของชิ้นไม้สับที่นำเข้าผลิต ตัวเลขคัปปาที่ใช้เดินเครื่อง ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ เป็นต้น โดยแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.1 แสดงแผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม

3.2.1 ปัจจัยที่เกิดจากคน

1. **พนักงานไม่ได้รับการฝึกอบรม** เนื่องจากพนักงานใหม่ที่ยังได้รับการฝึกอบรมไม่ครบตามข้อกำหนดของบริษัท แต่ได้รับมอบหมายงานจากหัวหน้างานให้ปฏิบัติงาน อาจส่งผลให้เกิดข้อผิดพลาดในการทำงานซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตได้

2. **พนักงานตั้งค่าการผลิตผิด** พนักงานเดินเครื่องหรือพนักงานภาคสนามมีโอกาสที่จะปรับตั้งค่าการผลิตผิด ซึ่งอาจส่งผลต่อต้นทุนการผลิตได้

3. **พนักงานขาดประสบการณ์** พนักงานที่เข้ามาใหม่ขาดประสบการณ์ในการเดินเครื่อง เมื่อเกิดปัญหาเฉพาะหน้าอาจตัดสินใจปรับตั้งค่าการผลิตที่ไม่เหมาะสม ซึ่งอาจส่งผลต่อต้นทุนการผลิตได้

4. **พนักงานไม่ปฏิบัติตามเอกสารข้อกำหนด** พนักงานเมื่อมีความเชี่ยวชาญระดับหนึ่ง อาจไม่เปิดคู่มือปฏิบัติงานซึ่งมีโอกาสให้เกิดข้อผิดพลาดในกระบวนการผลิตที่อาจส่งผลต่อต้นทุนการผลิตได้

3.2.2 ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร

1. **ระบบท่อกรด-ด่างของชุดฟอกเยื่อแตก** อุปกรณ์เกี่ยวกับระบบฟอกเยื่อส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์เกี่ยวกับระบบท่อกรด-ด่างที่ส่งสารเคมีเข้าสู่ระบบเพื่อทำการฟอกเยื่อ ซึ่งสารเคมีที่ใช้นั้นเป็นกรด-ด่างที่เข้มข้นมีความเสี่ยงที่จะกัดกร่อนอุปกรณ์ดังกล่าว หากไม่มีการดูแลรักษาที่ดีอาจทำให้ระบบท่อต่างๆ รั่ว ซึม หรือแตกได้

2. **ระบบท่อน้ำล้างของชุดล้างเยื่อแตก** เนื่องด้วยโรงงานผลิตเยื่อกระดาษมีการใช้สารเคมีกรด-ด่างเข้มข้น ส่งผลให้มีไอกรด-ด่างที่มีโอกาสกัดกร่อนระบบท่อต่างๆ ได้ ดังนั้น หากไม่มีการดูแลรักษาระบบท่อต่างๆ โดยเฉพาะระบบท่อน้ำล้างของชุดล้างเยื่อ อาจส่งผลให้ท่อถูกกัดกร่อนและรั่วซึมได้

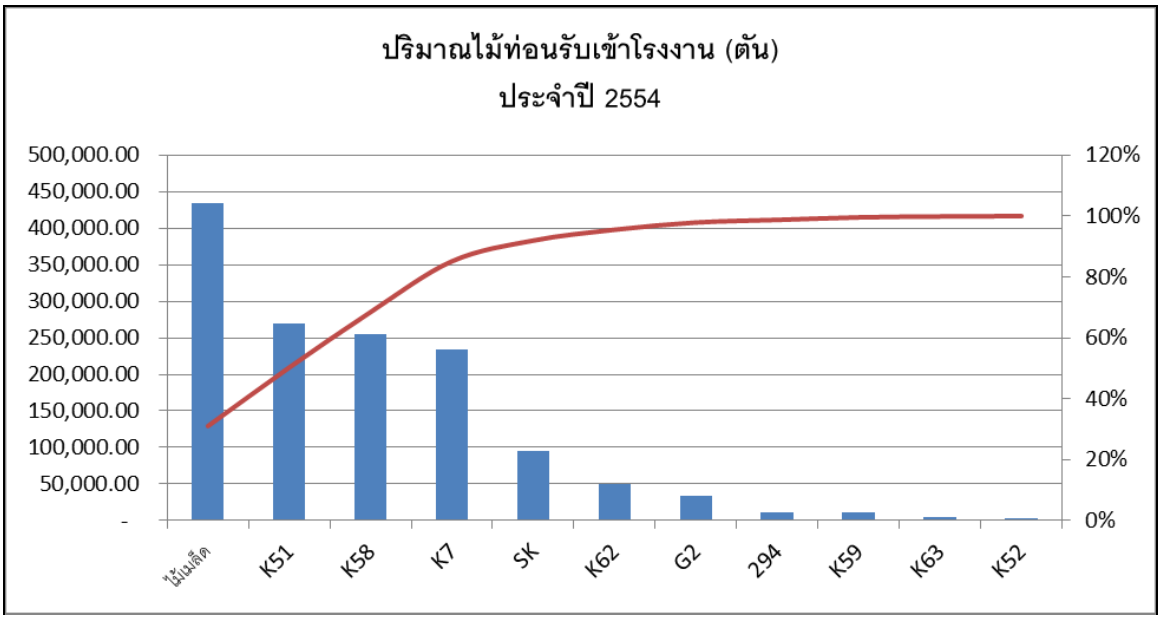
3. **ระบบกรองเยื่อกระดาษของชุดต้มเยื่ออุดตัน** หากไม่มีการดูแลรักษาระบบกรองเยื่อที่ดี เมื่อเยื่ออุดตันทำให้ต้องใช้ปริมาณไอน้ำมากกว่าปกติในการชะเหยื่อออก รวมถึงทำให้ได้ปริมาณผลผลิตน้อยลงและใช้เวลาในการผลิตมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตรวม

3.2.3 ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ

1. สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสไม่มีการคัดแยก

ยูคาลิปตัส หรือ ต้นกระดาษ เป็นไม้เนื้อแข็งโดยมีถิ่นกำเนิดในทวีปออสเตรเลีย ประเทศไทยได้เริ่มนำไม้ยูคาลิปตัสชนิดต่างๆ มาปลูกตั้งแต่ปี 2493 ปัจจุบันโรงงานมีไม้ยูคาลิปตัสหลายสายพันธุ์ที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษที่มีคุณภาพ ยูคาลิปตัสแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป เช่น บางชนิดสามารถเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่ดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ น้ำน้อย ทนแล้งได้ดี บางชนิดทนทานต่อโรคแมลง บางชนิดมีลำต้นตรงและสูง หรือบางชนิดมีเนื้อไม้ดีหรือมีสารเคมีในเนื้อไม้ที่เหมาะกับความต้องการของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ปัจจุบันทางโรงงานได้พัฒนาปรับปรุงสายพันธุ์จากยูคาลิปตัสทั่วไปให้เป็นยูคาลิปตัสผสมที่มีคุณสมบัติหลายด้านด้วยกัน เพื่อรองรับกับความต้องการของโรงงาน โดยสามารถปลูกได้ในพื้นที่ที่หลากหลาย และพัฒนาสายพันธุ์เพื่อต้านทานต่อโรคและแมลงต่างๆ ต้นกระดาษได้รับการค้นคว้า วิจัย และปรับปรุงสายพันธุ์อย่างต่อเนื่อง เพื่อพัฒนาและปรับตัวให้แข็งแกร่ง ต้านทานต่อโรคและแมลง พร้อมที่จะผลิตสู่มือเกษตรกรหรือผู้ปลูก ปัจจุบัน ต้นยูคาลิปตัสที่เข้าสู่โรงงานมีหลายสายพันธุ์และมีปริมาณที่แตกต่างกัน รูปที่ 3.2 (ก) แสดงปริมาณไม้ยูคาลิปตัสของแต่ละสายพันธุ์ที่ส่งเข้ามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษในปี 2554 จากรูป สายพันธุ์ที่มีปริมาณมาก 8 อันดับแรก ได้แก่ ไม้เมล็ด K51 K58 K7 SK K62 G2 และ 294 รูปที่ 3.2 (ข) แสดงปริมาณไม้ยูคาลิปตัสของแต่ละสายพันธุ์ที่ส่งเข้ามาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดาษในปี 2555 จากรูป สายพันธุ์ที่มีปริมาณมาก 8 อันดับแรก ได้แก่ ไม้เมล็ด K58 K7 SK K62 G2 K51 และ 294

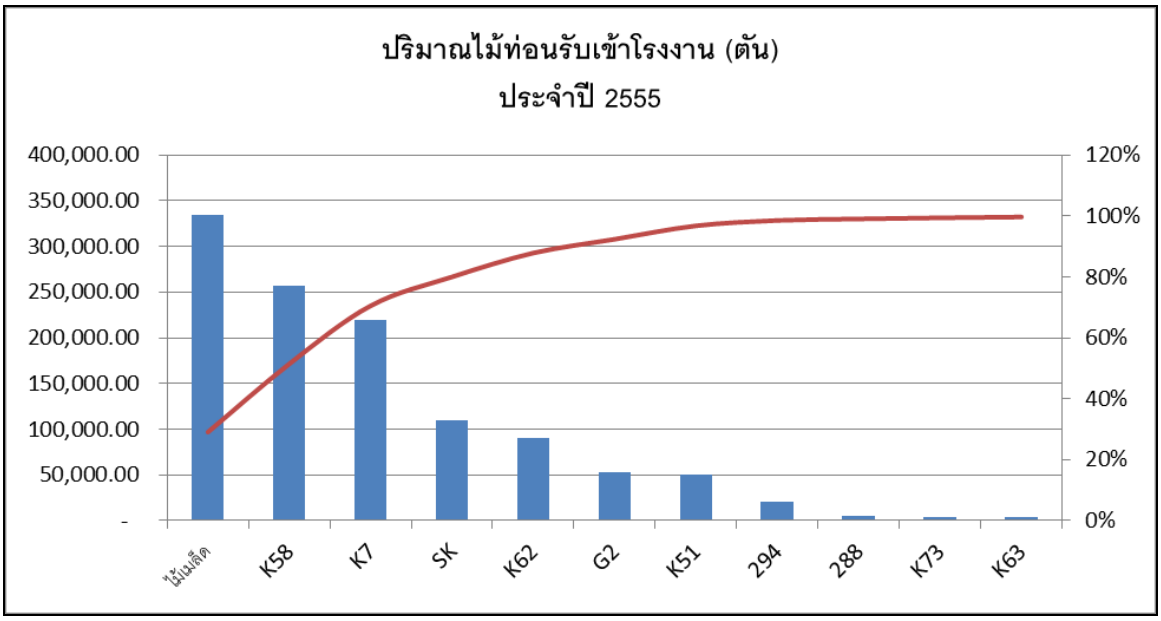
เนื่องจากทีมงานวิจัยสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสของโรงงานได้ทำการพัฒนาสายพันธุ์ให้เหมาะสมตามสภาพแวดล้อมของประเทศไทยและตามความต้องการของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ ทำให้ในอนาคตอาจมีสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ปัจจุบัน ทางโรงงานได้ค้นคว้าวิจัยการจัดกลุ่มสายพันธุ์ และทำการแบ่งกลุ่มไม้ยูคาลิปตัสโดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ (Percentile) ของอัตราส่วนระหว่างปริมาณเยื่อที่ได้จากการต้ม (Cooking yield) ต่อปริมาณลิกนินที่เหลือจากการต้ม (Kappa no.) โดยปัจจุบัน สามารถแบ่งสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้



รูปที่ 3.2 (ก) กราฟแสดงปริมาณสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้าโรงงาน (ตัน) ประจำปี 2554

- ต้มง่าย หรือ Easy Delignification (Percentile $\geq$ 50) คือ สายพันธุ์ที่เมื่อนำไปต้มจะได้ปริมาณเยื่อต่อปริมาณลิกนินที่เหลือจากการต้มสูง ได้แก่ K62 G2 SK K58 และ H294

- ต้มยาก หรือ Hard Delignification (Percentile < 50) คือ สายพันธุ์ที่เมื่อนำไปต้มจะได้ปริมาณเยื่อต่อปริมาณลิกนินที่เหลือจากการต้มต่ำ ได้แก่ ไม้เมล็ด K7 และ K51



รูปที่ 3.2 (ข) กราฟแสดงปริมาณสายพันธุ์ไม้ท่อนรับเข้าโรงงาน (ตัน) ประจำปี 2555

2. **ความชื้นของชิ้นไม้สับ**

ถ้าชิ้นไม้สับมีความชื้นต่ำหรือแห้งมากเกินไปการดูดซึมสารเคมี ไอน้ำ และอุณหภูมิของชิ้นไม้สับจะต่ำทำให้เยื่อต้มไม่สุก โดยความชื้นของชิ้นไม้สับที่โรงงานผลิตเยื่อกระดาษต้องการอยู่ระหว่าง 40 ถึง 50 เปอร์เซ็นต์

3. **ขนาดของชิ้นไม้สับ**

ขนาดของชิ้นไม้สับพิจารณาจากความหนาของชิ้นไม้สับ โดยความหนาที่เหมาะสมมีค่าระหว่าง 2-5 มิลลิเมตร ถ้าชิ้นไม้สับมีความหนามากกว่า 5 มิลลิเมตร จำนวนชิ้นไม้สับต้มไม่สุกจะเพิ่มขึ้นและถูกส่งกลับเข้ากระบวนการต้มอีกครั้งมีผลทำให้ผลผลิตเยื่อกระดาษลดลงและความเหนียวของเยื่อกระดาษลดลง ในขณะที่ความยาวของชิ้นไม้สับไม่ส่งผลต่อคุณภาพดังกล่าว แต่จะก่อให้เกิดฝุ่นผงเพิ่มขึ้นถ้าชิ้นไม้สับสั้นเกินไป และอาจก่อให้เกิดปัญหาต่อการหมุนเวียนของน้ำยาเคมี

4. **อายุของชิ้นไม้สับมากเกินไป**

อายุของชิ้นไม้สับมีผลต่อการดูดซึมสารเคมี ไอน้ำ และอุณหภูมิของชิ้นไม้สับ หากชิ้นไม้สับมีอายุมากจะทำให้เยื่อต้มไม่สุก โดยอายุของชิ้นไม้สับที่เหมาะสมที่โรงงานผลิตเยื่อกระดาษต้องการคือ 1 ถึง 3 เดือน

5. **สิ่งปลอมปนเข้ามากับชิ้นไม้สับ**

สิ่งปลอมปนที่เข้ามากับชิ้นไม้สับ ได้แก่ ตะปู เศษโลหะต่างๆ เป็นต้น หากเข้ามาสู่กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ จะส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิตทำให้มีการหยุดเครื่องจักรเพื่อนำสิ่งปลอมปนนั้นๆ ออกจากระบบ

น้ำยาต้มเยื่อ

น้ำยาต้มเยื่อ คือ สารละลายด่างเข้มข้นที่มีองค์ประกอบหลักคือโซเดียมไฮดรอกไซด์และโซเดียมซัลไฟด์ ($NaOH + Na_2S$) มีหน้าที่ในการแยกลิกนินออกจากเส้นใยเยื่อ [17] องค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติของน้ำยาต้มเยื่อถูกคำนวณเป็นพารามิเตอร์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

6. **TA (Total alkali as NaOH)** หมายถึง องค์ประกอบของโซเดียมอิออนทั้งหมดในน้ำยาต้มเยื่อ มีค่าอยู่ในช่วง 152-162 กรัมต่อลิตร

<u>ต่ำ</u> - ประสิทธิภาพการต้มเยื่อลดลง

- ปริมาณการใช้น้ำยาต้มเยื่อเพิ่มขึ้น

- ทำให้ค่า %Sulfidity[๕], %CE[๕๕], Na_2CO_3 และ Na_2S ในระบบต่ำ ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณภาพเยื่อกระดาษ

<u>สูง</u> - ถุงกรอง เกิดการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบการกรองลดลง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการล้างถุงกรองมากขึ้น

- การใช้แคลเซียมออกไซด์หรือ Burnt Lime ในการผลิตน้ำยาต้มเยื่อสูงขึ้น ทำให้กากปูนขาว หรือ Lime Mud มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย (Lime Mud เป็นกากของเสียประเภทหนึ่งของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ)

- แคลเซียมในระบบสูง ส่งผลให้เกิดตะกรันในท่อ

7. **EA (Effective alkali as NaOH)** หมายถึง องค์ประกอบของไฮดรอกไซด์อิออนที่ปรากฏอยู่ในน้ำยาต้มเยื่อ ซึ่งเป็นส่วนผสมของอัลคาไลน์หรือความเป็นด่างภายใต้การผลิตเยื่อกระดาษ [16] โดยปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 112-120 g/l

<u>ต่ำ</u> - ประสิทธิภาพการต้มเยื่อลดลง

- ปริมาณการใช้น้ำยาต้มเยื่อเพิ่มขึ้น

- โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4) หรือ Dead load สูง หมายถึง ในน้ำยาต้มเยื่อมี Na_2SO_4 สูงซึ่งไม่ได้มีส่วนในการดึงลิกนินออกจากเยื่อกระดาษ และทำให้สัดส่วนของ NaOH+Na_2S ต่ำลง

<u>สูง</u> - ถุงกรอง เกิดการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบการกรองลดลง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการล้างถุงกรองมากขึ้น

- การใช้แคลเซียมออกไซด์หรือ Burnt Lime ในการผลิตน้ำยาต้มเยื่อสูงขึ้น ทำให้กากปูนขาว หรือ Lime Mud มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย (Lime Mud เป็นกากของเสียประเภทหนึ่งของโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ)

- แคลเซียมในระบบสูง ส่งผลให้เกิดตะกรันในท่อ

8. **% Sulfidity*** คือ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซัลไฟด์และแอคทีฟอัลคาไลน์ (Active alkaline: NaOH+Na2S) ในน้ำยาต้มเยื่อ ดังแสดงในสมการที่ 3.1 [16] ทำหน้าที่ในปฏิกิริยา Delignification หรือการเร่งปฏิกิริยาการดึงลิกนินออกจากเยื่อกระดาษและทำหน้าที่ในการป้องกันการเสื่อมสภาพของคาร์โบไฮเดรต ปัจจุบันมีค่าอยู่ในช่วง 30-35 เปอร์เซ็นต์

$$\%Sulfidity = \frac{Na2S}{NaOH + Na2S} * 100\% \quad \text{..... (3.1)}$$

<u>ต่ำ</u> - เยื่อกระดาษที่ได้จากการต้มลดลง (Yield ลดลง)

- โซเดียมซัลเฟต (Na2SO4) หรือ Dead load สูง หมายถึง ในน้ำยาต้มเยื่อมี Na_2SO_4 สูงซึ่งไม่ได้มีส่วนในการดึงลิกนินออกจากเยื่อกระดาษ และทำให้สัดส่วนของ NaOH+Na_2S ต่ำลง

<u>สูง</u> - ปริมาณซัลเฟอร์ในระบบสูง ส่งผลต่ออัตราการกัดกร่อนจากสภาวะการเป็นกรดทำให้ท่อและอุปกรณ์ต่างๆ เสียหาย

- คุณภาพอากาศที่ออกจากปล่องระบายอากาศ (Stack Emission) ต่างๆ มีค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO_2) สูง ซึ่งกฎหมายกำหนดค่าดังกล่าวต้องไม่เกิน 54 ส่วนในล้านส่วน (ppm)

- กลิ่นจากการต้มเยื่อมีมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อพนักงานและชุมชนโดยรอบโรงงาน เมื่อมีกลิ่นมากอาจเกิดการร้องเรียนจากชุมชน

9. % CE** (Causticity Efficiency) คือ อัตราส่วนระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์และแอคทีฟอัลคาไลน์ (Active alkaline: NaOH+Na2S) ในน้ำยาต้มเยื่อ ดังแสดงในสมการที่ 3.2 [16] มีค่าระหว่าง 75-83%

$$Causticity = \frac{NaOH}{NaOH + Na2S} * 100\% \quad \text{..... (3.2)}$$

<u>ต่ำ</u> - ประสิทธิภาพการต้มเยื่อลดลง

- ปริมาณการใช้น้ำยาต้มเยื่อเพิ่มขึ้น

<u>สูง</u> - ถุงกรอง เกิดการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบการกรองลดลง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการล้างถุงกรองมากขึ้น

- กากปูนขาวมีปริมาณเพิ่มขึ้น

10. SS (Suspended Solid) หมายถึง ของแข็งแขวนลอย ที่ลอยอยู่ในน้ำยาต้มเยื่อ และมองเห็นด้วยตาเปล่า โดย SS ต้องมีปริมาณน้อยกว่า 40 มิลลิกรัมต่อลิตร

สูง - ถุงกรอง เกิดการอุดตัน ส่งผลให้ประสิทธิภาพระบบการกรองลดลง รวมถึงค่าใช้จ่ายในการล้างถุงกรองมากขึ้น

- เกิดตะกรันในระบบท่อส่ง (Transfer)

3.2.4 ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ

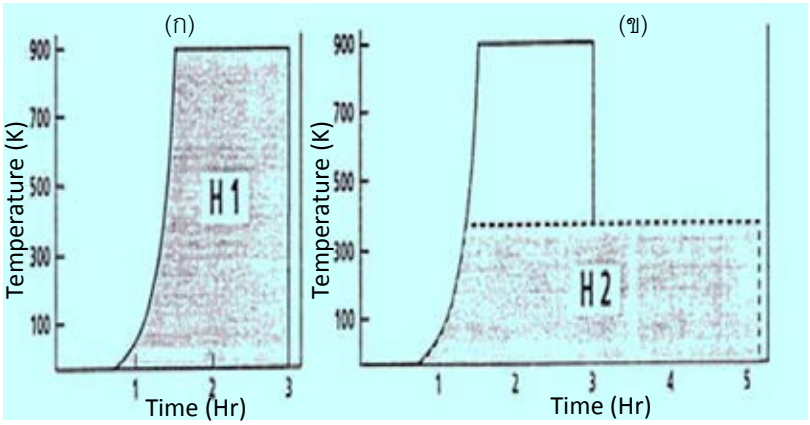
1. ตัวเลขคัปปา

ตัวเลขคัปปาคือดัชนีชี้วัดปริมาณลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อกระดาษโดยวิธีการวิเคราะห์ที่เป็นมาตรฐาน [15] และสามารถบอกถึงประสิทธิภาพของการต้มเยื่อ โดยเป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดึงลิกนินออกจากเยื่อของกระบวนการต้มเยื่อ ซึ่งทางโรงงานสามารถควบคุมการผลิตให้ได้ตามตัวเลขคัปปาที่ต้องการ โดยการปรับปริมาณสารเคมี อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการผลิต หากตัวเลขคัปปาสูง จะส่งผลให้ค่าความสว่างของเยื่อต่ำเนื่องจากมีปริมาณลิกนินปนอยู่ในเยื่อสูง ตัวเลขคัปปาที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบคราฟท์มีค่าอยู่ระหว่าง 12.5-15.5

2. H-Factor

H-Factor คือ ดัชนีที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิในการต้มเยื่อ เนื่องจากเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อแปรผกผันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะลดลง และในทางกลับกันหากอุณหภูมิในการต้มเยื่อต่ำลงระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อจะมากขึ้น ดังนั้น H-Factor จึงเป็นการรวมผลกระทบของระยะเวลาและอุณหภูมิในการต้มเยื่อต่อรอบการต้มเยื่อ 1 ครั้ง (Batch) แสดงโดยพื้นที่ใต้เส้นโค้งในไดอะแกรมของอัตราการทำปฏิกิริยาสัมพัทธ์ (Relative reaction rate) ของการละลายลิกนินต่อเวลา ดังแสดงในรูปที่ 3.3 ความสัมพัทธ์ระหว่างอัตราการทำปฏิกิริยาสัมพันธ์ โดยแกน X คือระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ หน่วยเป็นชั่วโมง และแกน Y คืออุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อ หน่วยเป็นองศาเคลวิน ซึ่งจะเห็นได้ว่า รูปที่ 3.3 (ก) แสดงระยะเวลาการ

ต้มเยื่อ 3 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 900 องศาเคลวิน แต่ในรูปที่ 3.3 (ข) แสดงให้เห็นว่า หากลดอุณหภมิในการต้มเยื่อเหลือ 400 องศาเคลวิน ระยะเวลาการต้มเยื่อจะเป็น 5 ชั่วโมง



รูปที่ 3.3 อัตราการทำปฏิกิริยาสัมพัทธ์

3. สถานะความเป็นกรด-ด่างมากเกินไป

หากมีการปรับสถานะความเป็นกรด-ด่างไม่เหมาะสม จะส่งผลให้มีการใช้ปริมาณสารเคมีมากขึ้นในกระบวนถัดไป เนื่องจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษแบบคราฟท์นั้น มีการใช้สารเคมีในการฟอกเยื่อหลายขั้นตอน โดยระหว่างการฟอกเยื่อแต่ละขั้นตอนนั้น จะมีการเติมสารเคมีเพื่อปรับสภาพให้เป็นกลาง

3.3 การคัดเลือกปัจจัยสำหรับการทดลอง

จากการระดมความคิดของผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องอย่างละเอียดทำให้ได้สาเหตุทั้งหมดที่เป็นไปได้ ที่อาจส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ ในขั้นตอนต่อไปจะทำการวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้นที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตและยืนยันผลการวิเคราะห์โดยใช้ข้อมูลในอดีตมาทำการพิสูจน์

3.3.1 **การคัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นจากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาจากการหาความสัมพันธ์สาเหตุและผล** (Cause and Effect Matrix)

ผู้วิจัยและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องจำนวน 13 คน ได้นำปัจจัยทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัยโดยผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องลงคะแนนแต่ละปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมเพื่อคัดกรองปัจจัยเบื้องต้น โดยพิจารณาต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ ได้แก่ ชิ้นไม้สับ น้ำยาต้มเยื่อ ไอน้ำ และสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษขาว (ClO_2, SO_2, NaOH, H_2SO_4, O_2) เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจลงคะแนน โดยคะแนนอยู่ระหว่าง 0 ถึง 10 ซึ่งมีเกณฑ์ดังต่อไปนี้

0 คะแนน คือ ไม่มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนอง

1 คะแนน คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองน้อยมาก

3 คะแนน คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองน้อย

5 คะแนน คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองระดับปานกลาง

8 คะแนน คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองระดับมาก

10 คะแนน คือ มีความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองระดับมากที่สุด

การลงคะแนนของผู้เชี่ยวชาญเป็นการลงคะแนนจากประสบการณ์และความชำนาญส่วนบุคคล โดยปราศจากการปรึกษาหารือกัน เพื่อลดความเอนเอียงของการให้คะแนน ซึ่งผลการให้คะแนนจากผู้วิจัยและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องแสดงดังตารางที่ 3.2 และพาเรโตดังรูปที่ 3.4

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่คาดว่าส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ

ลำดับที่	ปัจจัย	คะแนน	สัดส่วน	สัดส่วนสะสม
1	สายพันธุ์ของชิ้นไม้สับไม่มีการคัดแยก	118	14%	14%
2	EA ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	112	13%	27%

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่คาดว่าส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ (ต่อ)

ลำดับที่	ปัจจัย	คะแนน	สัดส่วน	สัดส่วนสะสม
3	ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องไม่เหมาะสม	89	11%	38%
4	ความแห้งของชิ้นไม้สับสูง	71	8%	46%
5	%CE ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	62	7%	53%
6	ขนาดของชิ้นไม้สับไม่เหมาะสม	46	5%	59%
7	TAในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	42	5%	64%
8	SS ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	31	4%	67%
9	%Sulfidity ในระบบต่ำ	29	3%	71%
10	H-Factor ที่ใช้เดินเครื่องไม่เหมาะสม	29	3%	74%
11	สิ่งปลอมปนเข้ามากับชิ้นไม้สับ	27	3%	77%
12	อายุของชิ้นไม้สับมากเกินไป	27	3%	81%
13	พนักงานไม่ปฏิบัติตามเอกสารข้อกำหนด	25	3%	84%
14	ท่อน้ำล้างของชุดล้างเยื่อแตก	25	3%	87%
15	สถานะความเป็นกรด-ด่างมากเกิน	25	3%	89%
16	ท่อกรด-ด่างของชุดฟอกเยื่อแตก	23	3%	92%
17	พนักงานตั้งค่าการผลิตผิด	21	2%	95%

ตารางที่ 3.2 ปัจจัยที่คาดว่าส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ (ต่อ)

ลำดับที่	ปัจจัย	คะแนน	สัดส่วน	สัดส่วนสะสม
18	ตะแกรง ชิ้นไม้สับของชุดต้มเยื่ออุดตัน	19	2%	97%
19	พนักงานไม่ได้รับการฝึกอบรม	13	2%	98%
20	พนักงานขาดประสบการณ์	13	2%	100%
รวมคะแนน		847	100%	100%

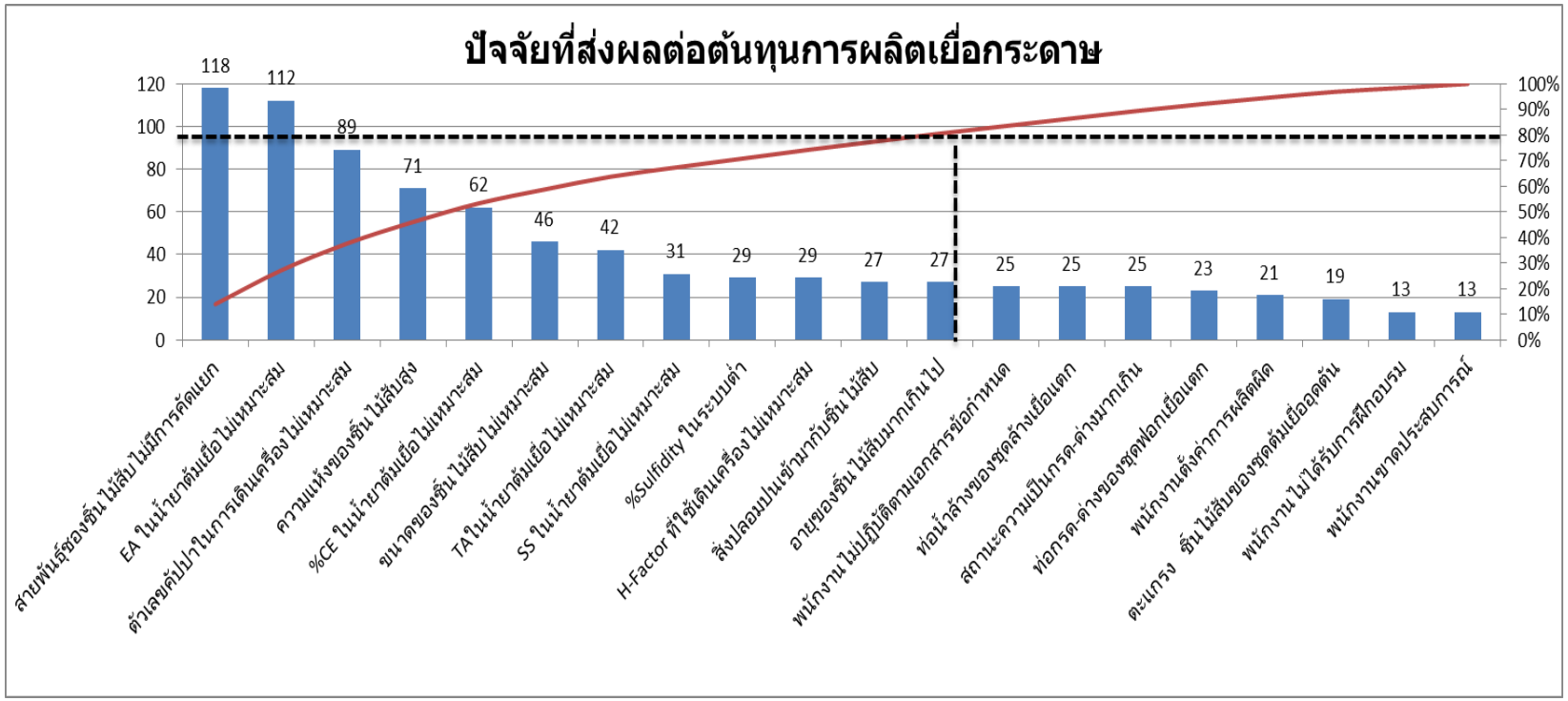
จากตารางที่ 3.2 พบว่า ปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 20 ปัจจัย รวมคะแนนจากผู้เชี่ยวชาญได้เท่ากับ 847 คะแนน จากนั้นนำปัจจัยมาเรียงลำดับคะแนนจากมากไปหาน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3.4 พบว่า 81 เปอร์เซ็นต์แรกของพาเรโต มีปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 12 ปัจจัย ดังนี้

1. สายพันธุ์ของชิ้นไม้สับไม่มีการคัดแยก 118 คะแนน
2. EA ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม 112 คะแนน
3. ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องไม่เหมาะสม 89 คะแนน
4. ความชื้นของชิ้นไม้สับต่ำ 71 คะแนน
5. เปอร์เซ็นต์ CE ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม 62 คะแนน
6. ขนาดของชิ้นไม้สับไม่เหมาะสม 46 คะแนน
7. TAในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม 42 คะแนน
8. SS ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม 31 คะแนน
9. เปอร์เซ็นต์ Sulfidity ในระบบต่ำ 29 คะแนน
10. H-Factor ที่ใช้เดินเครื่องไม่เหมาะสม 29 คะแนน
11. สิ่งปลอมปนเข้ามากับชิ้นไม้สับ 27 คะแนน
12. อายุของชิ้นไม้สับมากเกินไป 27 คะแนน

หลังจากนั้น ทำการจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยนำเข้าทั้ง 12 ปัจจัย พบว่า ปัจจัยส่วนใหญ่ที่มีคะแนนสูงเป็นอันดับแรกๆ ของพาเรโต มาจากสาเหตุประเภทของวัตถุดิบ เนื่องจากในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษมีวัตถุดิบหลักคือชิ้นไม้สับและสารเคมีที่ใช้ในการต้มเยื่อ ในปัจจุบันไม่มีการคัดแยกสายพันธุ์ของชิ้นไม้สับที่เข้าสู่กระบวนการผลิต รวมทั้งพารามิเตอร์ของสารเคมีที่ใช้ต้มเยื่อมีการกำหนดค่าเป็นช่วงกว้างตามความสามารถของกระบวนการ แต่ไม่มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมอย่างชัดเจน และอีกประเภทคือ สาเหตุจากวิธีการ ซึ่งทางโรงงานได้กำหนดสภาวะการเดินเครื่องที่เหมาะสมเป็นช่วงกว้างตามความสามารถของเครื่องจักรที่ปรับค่าได้ แต่ไม่มีการกำหนดค่าที่เหมาะสมเช่นกัน ดังนั้น จากการพิจารณาปัจจัยนำเข้าทั้ง 12 ตัว ผู้เชี่ยวชาญจึงได้ช่วยกันวิเคราะห์โดยอาศัยประสบการณ์ของทุกคน และมีเกณฑ์การพิจารณาเลือกปัจจัยเพื่อนำมาทดสอบสมมติฐานที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ ดังต่อไปนี้

1. ปัจจัยที่ถูกเลือกต้องปรับเปลี่ยนค่าได้
2. ปัจจัยที่ถูกเลือกจะพิจารณาโดยใช้ข้อมูลการทดลองที่ได้ทำแล้วในอดีต หรือความรู้เชิงวิศวกรรมประกอบด้วย
3. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร ซึ่งเป็นลักษณะที่เกี่ยวกับความสามารถของเครื่องจักรจะไม่นำมาพิจารณาและกำหนดเป็นปัจจัยควบคุม
4. ปัจจัยที่อยู่นอกเหนือความรับผิดชอบ จากหน่วยงานที่รับผิดชอบจะไม่นำมาพิจารณาปัจจัยที่ถูกเลือกนั้นจะต้องไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อม อาทิเช่น คุณภาพอากาศที่ออกจากปล่องระบาย เนื่องจากมีกฎหมายกำหนดและป้องกันการร้องเรียนจากชุมชน

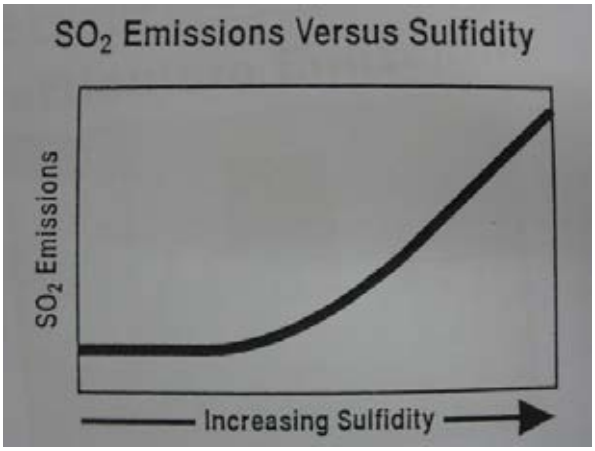
ดังนั้น ปัจจัยทั้ง 12 ปัจจัย จะมีการพิจารณาเลือกปัจจัยเพื่อนำมาทดสอบสมมติฐานที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ แสดงดังตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.4 กราฟแสดงคะแนนของแต่ละปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 3.3 แสดงเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ เบื้องต้น

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
1. สิ่งปลอมปนเข้ามากับชิ้นไม้สับ	สามารถแก้ไขปัญหาได้โดยการติดตั้งเครื่องดักจับสิ่งแปลกปลอม ได้แก่ แม่เหล็ก เป็นต้น
2. %Sulfidity ในระบบต่ำ	เนื่องจากปริมาณ Sulfidity มีผลต่อคุณภาพอากาศที่ออกจากปล่องระบายและกลิ่นที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนอย่างมากหากขาดการควบคุมที่ดี โดยปริมาณ Sulfidity ในระบบแปรผันตรงกับปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ออกจากปล่องระบายอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.5
3. H-Factor ที่ใช้เดินเครื่องไม่เหมาะสม	เป็นปัจจัยที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนและควบคุมค่าในระหว่างการผลิตได้ทันที
4. อายุของชิ้นไม้สับมากเกินไป	สามารถควบคุมได้โดยการจัดทำ FIFO (First in First out)
5. ขนาดของชิ้นไม้สับไม่เหมาะสม	สามารถควบคุมที่ตะแกรงชิ้นไม้สับของชุดต้มเยื่อให้สามารถใช้งานได้
6. SS ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	เป็นปัจจัยที่อยู่นอกเหนือความรับผิดชอบของหน่วยงาน แต่สามารถร้องเรียนหน่วยงานผลิตน้ำยาต้มเยื่อให้ผลิตตรงตามความต้องการได้



รูปที่ 3.5 ผลกระทบของค่าซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ระบายออกสู่สิ่งแวดล้อมจากการเพิ่มปริมาณ Sulfidity

จากการพิจารณาเกณฑ์การเลือกปัจจัยเพื่อนำมาทดสอบสมมติฐานที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษจากข้อมูลในอดีต ได้แก่ ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ ตัวเลขคัปปา ความแห้งของชิ้นไม้สับ ปริมาณ CE ในน้ำยาต้มเยื่อ และปริมาณ TA ในน้ำยาต้มเยื่อ

3.3.2 การคัดเลือกปัจจัยโดยการทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีต

เพื่อตรวจสอบสมมติฐานว่าปัจจัยที่ผู้มีประสบการณ์คาดว่าจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวม ทางผู้วิจัยจะทำการเปรียบเทียบอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยรวบรวมข้อมูลที่มีในอดีตมาทำการทดสอบสมมติฐานของต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีค่าของปัจจัยสูงที่สุดและต่ำที่สุด กลุ่มละ 30 ตัวอย่าง สำหรับปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัย ยกเว้นสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส เนื่องจากไม่มีการบันทึกสายพันธุ์ไม้ที่นำเข้าผลิตในแต่ละวัน

การทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีจำนวนตัวอย่างมากกว่า 30 ตัวอย่าง มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ตั้งสมมติฐาน

$$H_0 : \mu_1^2 = \mu_2^2$$
$$H_1 : \mu_1^2 \neq \mu_2^2$$

โดย μ_1 : คือค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเมื่อน้ำยาต้มเยื่อมีปริมาณ EA สูงที่สุด เท่ากับ 119 กรัมต่อลิตร

μ_2 : คือค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเมื่อน้ำยาต้มเยื่อมีปริมาณ EA ต่ำที่สุด เท่ากับ 109 กรัมต่อลิตร

2. ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ Z
3. กำหนดความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05
4. ผลการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Excel แสดงในตารางที่ 3.4

จากตารางที่ 3.4 พบว่า ค่า z มากกว่า z Critical two-tail และ P (Z<=z) two-tail มีค่าน้อยกว่า α จึงปฏิเสธสมมติฐานหลัก นั่นคือ จากการทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีจำนวนตัวอย่างมากกว่า 30 ตัวอย่าง สรุปว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อมีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

การวิเคราะห์เพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยใช้เครื่องมือทางสถิติผ่านโปรแกรม Excel โดยการทดสอบ Two-sample z-test อีก 4 พารามิเตอร์ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังตารางที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปามีค่าเปลี่ยนไป จะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่าความแห้งของชิ้นไม้สับ ปริมาณ CE และปริมาณ TA ในน้ำยาต้มเยื่อ มีค่า P-Value มากกว่า 0.05 แสดงให้เห็นว่า เมื่อปัจจัยดังกล่าวมีค่าเปลี่ยนไปจะไม่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสไม่มีการบันทึกสายพันธุ์ที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตในแต่ละวัน ทำให้ไม่สามารถนำปัจจัยดังกล่าวมาทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีตได้ แต่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ ดังนั้น ปัจจัยที่นำไปออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา ดังแสดงในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าความแปรปรวนของประชากร 2 กลุ่ม

	EA=119	*EA=109*
Mean	15352.692	14722.05867
Known Variance	139279.8	157069.5
Observations	30	30
Hypothesized Mean Difference	0	
z	6.34505801	
P(Z<=z) one-tail	1.11171E-10	
z Critical one-tail	1.644853627	
P(Z<=z) two-tail	2.22342E-10	
z Critical two-tail	1.959963985	

ตารางที่ 3.6 ปัจจัยในการทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย
1. สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส	A	% สายพันธุ์ต้มง่าย (Easy Delignification) ที่เข้าสู่กระบวนการผลิต
2. ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ	B	g/l
3. ตัวเลขคัปปา	C	-

ตารางที่ 3.5 ผลการทดสอบสมมติฐานปัจจัยที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ย

ลำดับ	ปัจจัย	ค่าสูงสุด	ค่าต่ำสุด	Test statistic (z)	P-value	ผลการทดสอบสมมติฐาน
1	ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ	119	109	6.34505801	2.22342E-10	มีผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ
2	ตัวเลขคัปปา	15	11	59.01723466	<0.001	มีผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ
3	ความแห้งของชิ้นไม้สับ	55	47	-0.726173173	0.467732616	ไม่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ
4	ปริมาณ CE ในน้ำยาต้มเยื่อ	85	76	-0.029768058	0.976252033	ไม่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ
5	ปริมาณ TA ในน้ำยาต้มเยื่อ	162	152	-0.029756093	0.976261575	ไม่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเฉลี่ยอย่างมีนัยสำคัญ

บทที่ 4

วิธีการทดลองและการออกแบบการทดลอง

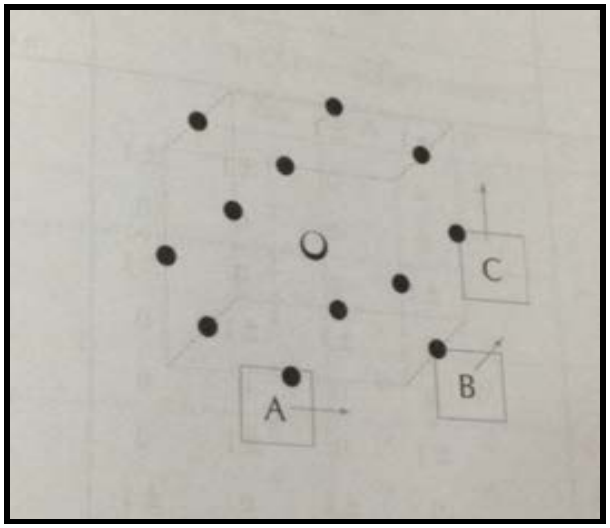
ผู้วิจัยได้คัดเลือกวิธีการออกแบบการทดลองและระดับการทดลอง (Level) ของแต่ละตัวแปร โดยประเมินวิธีการออกแบบการทดลองที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ ต้องสามารถนำไปสู่การปรับตั้งที่ดีที่สุด (Optimization) การออกแบบการทดลองมีให้เลือกหลากหลายรูปแบบ ได้แก่

- **การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูป** (Full Factorial Design) วิธีการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะต้องทำการทดลองให้ครบทุกเงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงค่าของทุกปัจจัย ซึ่งต้องทำการทดลองทั้งหมดเท่ากับ m^k โดยที่ m คือ จำนวนระดับที่ทดลองของแต่ละปัจจัย และ k คือจำนวนปัจจัย เมื่อคำนวณจำนวนการทดลองโดยมีการกำหนดระดับการปรับตั้ง 3 ระดับที่จำนวนปัจจัยเป็น 3 จะมีรูปแบบการทดลองเท่ากับ 3^3 หรือเท่ากับ 27 การทดลอง ซึ่งเป็นจำนวนการทดลองที่มีปริมาณมากเกินไปสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากเวลาและงบประมาณมีจำกัด

- **การทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน** (Fractional Factorial Experiment) เป็นการทดลองที่ผู้ทำการทดลองจะทำโดยลดรูปลงจากการทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปในสัดส่วนของจำนวนระดับปัจจัย ซึ่งการทดลองจะทำทั้งหมดเท่ากับ 3^{k-p} เมื่อ p คือ 1 และ k คือจำนวนปัจจัย เท่ากับ 3 เมื่อคำนวณจำนวนการทดลองโดยมีค่าระดับการปรับตั้งเท่ากับ 3 ที่จำนวนปัจจัยเป็น 3 จะมีรูปแบบการทดลองเท่ากับ 3^{3-1} หรือเท่ากับ 9 การทดลอง แต่การทดลองนี้จะมีข้อเสีย คือ ไม่สามารถศึกษาผลกระทบหลัก หรือผลกระทบร่วมได้ทุกกรณี เนื่องจากมีการเกิดโครงสร้างซ้ำซ้อน (Alias Structure) ทำให้การตีความผลการทดลองมีความซับซ้อนมากขึ้น

- **การทดลองแบบ Box-Behnken** (Box-Behnken Designs) การทดลองนี้เป็นการทดลองที่มีประสิทธิภาพและนิยมใช้มากสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่ 3 ระดับ (3-level design) โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแบบเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Factors) เช่นเดียวกับ

ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิตรวม ได้แก่ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ ตัวเลขคัปปา เป็นต้น ซึ่งลักษณะของการออกแบบวิธี Box-Behnken จะใช้หลักการของ 2^2 การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป ผนวกกับจุดกึ่งกลาง (Central Points) รวมเข้าไป ซึ่งการทดลองแบบ Box-Behnken มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ 3^k การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป โดยที่ k คือ จำนวนปัจจัย Box และ Behnken ได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลองเพื่อใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย โดยกรณี 3 ปัจจัย จำนวนการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 15 การทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 รูปแบบเรขาคณิตของแผนการทดลอง Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย [18]

ตารางที่ 4.1 แผนการทดลอง Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย [18]

Run	ปัจจัย		
	A	B	C
1	-	-	0
2	-	+	0
3	+	-	0
4	+	+	0
5	-	0	-

ตารางที่ 4.1 แผนการทดลอง Box-Behnken กรณีศึกษา 3 ปัจจัย [18] (ต่อ)

Run	ปัจจัย		
	A	B	C
6	-	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	+	+
11	0	-	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

ในงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้เลือกการทดลองแบบ Box-Behnken เนื่องจากเป็นวิธีการที่ให้ผลอย่างมีประสิทธิภาพ และมีจำนวนการทดลองที่น้อยกว่า ทำให้ช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทำการทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ประกอบไปด้วย 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 3 ระดับ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 การกำหนดระดับ (Level) ของตัวแปรกระบวนการ

ปัจจัยที่ถูกเลือกมาทำการทดลองมีระดับของแต่ละปัจจัยคือ 3 โดยอิงจากความสามารถของเครื่องจักรและกระบวนการ รวมทั้งมาตรฐานปัจจุบันที่โรงงานปฏิบัติ ซึ่งแต่ละปัจจัยมีรายละเอียดแสดงในตารางที่ 4.2 รายละเอียดระดับของตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 สัญลักษณ์และระดับของปัจจัยสำหรับการทดลองแบบ Box-Behnken

ปัจจัย	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับของปัจจัย		
			ต่ำ (-)	กลาง (0)	สูง (+)
สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส	A	% สายพันธุ์ต้มง่าย ที่เข้าสู่กระบวนการผลิต	25	50	75
ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ	B	g/l	112	116	120
ตัวเลขคัปปา	C	-	12.5	14.0	15.5

1) สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส แบ่งกลุ่มตามลักษณะการต้มง่ายและต้มยาก โดยอิงมาจากการแบ่งประเภทของสายพันธุ์ที่โรงงานใช้ในปัจจุบัน สามารถแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย 25 เปอร์เซ็นต์
ระดับที่ 2 สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย 50 เปอร์เซ็นต์
ระดับที่ 3 สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย 75 เปอร์เซ็นต์

2) ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ ตามมาตรฐาน ISO9001 ของโรงงานได้กำหนดปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อให้มีค่าอยู่ระหว่าง 112 – 120 กรัมต่อลิตร ดังนั้นทางผู้วิจัยทำการแบ่งปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ 112 กรัมต่อลิตร
ระดับที่ 2 ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ 116 กรัมต่อลิตร
ระดับที่ 3 ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ 120 กรัมต่อลิตร

3) ตัวเลขคัปปา ตามมาตรฐาน ISO9001 ของโรงงานได้กำหนดตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องให้อยู่ระหว่าง 12.5 – 15.5 ดังนั้นทางผู้วิจัยทำการแบ่งการเดินเครื่องโดยควบคุมตัวเลขคัปปาออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องเท่ากับ 12.5

ระดับที่ 2 ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องเท่ากับ 14.0

ระดับที่ 3 ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องเท่ากับ 15.5

หลังจากทำการออกแบบการทดลองแล้วจึงเริ่มดำเนินการทดลองตามแผนการทดลองแบบ Box-Behnken ซึ่งจะมีจำนวนการทดลองทั้งหมด 15 การทดลอง และมีลำดับการทดลองเป็นการสุ่มอย่างสมบูรณ์ โดยตารางที่ 4.3 แสดงตารางการเก็บข้อมูลการทดลองแบบ Box-Behnken

ตารางที่ 4.3 ตารางการเก็บข้อมูลการทดลองแบบ Box-Behnken

หมายเลขสภาวะการทดลอง	ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง
		A	B	C	Y
10	1	50	120	12.5	
9	2	50	112	12.5	
12	3	50	120	15.5	
14	4	50	116	14.0	
5	5	25	116	12.5	
7	6	25	116	15.5	
3	7	25	120	14.0	
15	8	50	116	14.0	

ตารางที่ 4.3 ตารางการเก็บข้อมูลการทดลองแบบ Box-Behnken (ต่อ)

หมายเลขสภาวะการทดลอง	ลำดับการทดลอง	ปัจจัย			ตัวแปรตอบสนอง
		A	B	C	Y
2	9	75	112	14.0	
13	10	50	116	14.0	
1	11	25	112	14.0	
11	12	50	112	15.5	
6	13	75	116	12.5	
4	14	75	120	14.0	
8	15	75	116	15.5	

4.2 ขั้นตอนการทดลอง

การหาตัวแปรตอบสนองตามการออกแบบการทดลองของ Box-Behnken ได้ทดลองต้มจริงในห้องปฏิบัติการ (Laboratory) โดยมีผู้วิจัยเป็นผู้ทำการทดลองเพียงผู้เดียว และเครื่องมือวัดทุกชนิดในห้องปฏิบัติการมีการสอบเทียบตามมาตรฐานที่ระบบ ISO9001 กำหนด ขั้นตอนการทดลองดังต่อไปนี้

4.2.1 ตรวจสอบความพร้อมของวัตถุดิบ สารเคมี อุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ

4.2.2 ทำการควบคุมตัวแปรควบคุมให้มีค่าดังแสดงในตารางที่ 4.4

4.2.3 ทำการทดลองตามลำดับการทดลองที่กำหนดไว้ในช่องสภาวะการทดลองที่แสดงในตารางที่ 4.3 จนครบ 15 การทดลอง โดยวิธีทำการทดลอง เป็นดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.4 ค่าควบคุมของตัวแปรควบคุมในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ค่าควบคุม
ความชื้นของชิ้นไม้สับ	%	$\geq$ 50
ขนาดชิ้นไม้สับ		
- Bulk density	kg/m3	330-350
- Over size (OS)	%	< 1.0
- Over thick (OT)	%	< 10.0
- Accept 1	%	> 65.0
- Accept 2	%	< 20
Sulfidity	%	30-35
Wet Brightness	%	85-89
Viscosity	mg/l	> 600

1. การเก็บตัวอย่างชิ้นไม้สับ

ตัวอย่างชิ้นไม้สับที่นำมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ จะเลือกสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่มีปริมาณเข้าสู่โรงงานมาก 8 อันดับแรกของปี 2554 และปี 2556 จากนั้น นำตัวอย่างชิ้นไม้สับมาตากแห้งจนมีค่าความชื้นของชิ้นไม้สับมากกว่าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ และจัดเก็บในถุงเพื่อให้ควบคุมความชื้นก่อนนำชิ้นไม้สับแห้งไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป

2. การต้มชิ้นไม้สับ

การต้มชิ้นไม้สับในห้องปฏิบัติการนั้น เป็นการจำลองการต้มจริงจากกระบวนการผลิต เพื่อให้ทราบถึงผลผลิตจากการต้มเยื่อในแต่ละตัวอย่าง โดยการควบคุมปริมาณชิ้น

ไม้สับ อุณหภูมิ และความดันที่แน่นนอน เพื่อได้ค่าผลผลิตที่มีความเบี่ยงเบนจากกระบวนการผลิตน้อยที่สุด

ขั้นตอนการต้มเยื่อเริ่มจากการชั่งน้ำหนักชิ้นไม้สับโดยสุ่มตามสัดส่วนสายพันธุ์ที่ต้มง่ายต่อสายพันธุ์ที่ต้มยากตามระดับปัจจัยนำเข้าที่กำหนดในตารางที่ 4.3 โดยตัวอย่างละ 300 กรัมแห้งต่อ 1 หลอด (Autoclave) ซึ่งใน 1 หม้อต้มเยื่อจำลองมี 6 หลอดดังแสดงในรูปที่ 4.2 ต่อเข้ากับเครื่องปล่อยไอน้ำเพื่อให้ไม้ดูดซึมสารเคมีได้มากขึ้น เติมน้ำยาต้มเยื่อที่เตรียมไว้ตามปัจจัยนำเข้าที่กำหนดในตารางที่ 4.3 และควบคุมค่าควบคุมต่างๆ ในตารางที่ 4.4 เติมน้ำปราศจากไอออนลงไปด้วยอัตราส่วนไม้ต่อของเหลว 1 ต่อ 4 คำนวณเวลาต่ออุณหภูมิหรือค่า H-Factor ให้ได้ตัวเลขคัปปาที่ต้องการตามตารางที่ 4.3 เมื่อครบกำหนดเวลา นำเยื่อที่ต้มได้หรือเยื่อ discharge มาแยกน้ำออกและล้างเยื่อเพื่อเตรียมนำไปฟอกขาวในขั้นตอนต่อไป

รูปที่ 4.2 หม้อต้มเยื่อจำลองในห้องปฏิบัติการ (Cooking digester)

3. การฟอกเยื่อแบบ ECF

เยื่อ discharge จะถูกเพิ่มความเข้มข้นเยื่อและปรับ pH ด้วยกรดซัลฟูริก จากนั้นเยื่อที่ถูกปรับ pH เรียบร้อยแล้ว จะถูกผสมกับคลอรีนไดออกไซด์ให้เข้ากัน โดยทำปฏิกิริยากันภายใน water bath ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ใช้เวลาประมาณ 30 นาที จากนั้นทำการเจือจางเยื่อและกำจัดคลอรีนที่เหลือด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ก่อนส่งไปทำการละลายและแยกลิกนินต่อที่ขั้นตอน EOP

รูปที่ 4.3 water bath ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

ขั้นตอน EOP ในห้องปฏิบัติการจะใช้เครื่อง Quantum หรือเครื่องฟอกเยื่อด้วยออกซิเจนจำลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ซึ่งในขั้นตอนนี้ เยื่อจะถูกทำการเจือจางและเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงไปทำปฏิกิริยา จากนั้นจะเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพื่อทำการฟอกเยื่อขาว พร้อมกับการผสมออกซิเจนและไอน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากันเป็นเวลาประมาณ 120 นาทีตามค่า wet brightness ที่ควบคุม

เยื่อที่ได้จากขั้นตอน EOP จะถูกทำการเจือจางและเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และคลอรีนไดออกไซด์ตามลำดับ รอทำปฏิกิริยาเป็นเวลา 15 นาทีใน water bath หลังจากนั้นพักเยื่อทิ้งไว้ประมาณ 160 นาที ทำการกำจัดคลอรีนที่เหลือด้วยซัลเฟอร์ไดออกไซด์ และปรับ pH เยื่อให้เป็นกลางโดยการเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์

4. ขั้นตอน Post screening

เยื่อที่ได้จากขั้นตอนการฟอกแบบ ECF ถูกนำมาเหวี่ยงและกรองหยาบ (Coarse screen) และนำไปกรองละเอียด (Fine screen) เพื่อแยกชิ้นไม้สับต้มไม่สุกออกจากเยื่อ ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ก) และ 4.5 (ข)

รูปที่ 4.4 **เครื่องฟอกเยื่อด้วยออกซิเจนที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ**

(ก)

(ข)

รูปที่ 4.5 (ก) เครื่องเหวี่ยงและกรองหยาบ (ข) เครื่องกรองละเอียด

4.3 ผลการทดลอง

จากการทดลองในห้องปฏิบัติการตามหัวข้อที่ 4.2 ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.5 โดยตารางการเก็บข้อมูลโดยละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข แบบฟอร์มการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

Std Order	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C	Total cost Baht/Batch
10	1	2	1	50	120	12.5	73.86
9	2	2	1	50	112	12.5	64.55
12	3	2	1	50	120	15.5	77.68
14	4	0	1	50	116	14	55.18
5	5	2	1	25	116	12.5	79.42
7	6	2	1	25	116	15.5	72.71
3	7	2	1	25	120	14	65.83

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด (ต่อ)

Std Order	RunOrder	PtType	Blocks	A	B	C	Total cost Baht/Batch
15	8	0	1	50	116	14	61.61
2	9	2	1	75	112	14	50.52
13	10	0	1	50	116	14	59.56
1	11	2	1	25	112	14	56.58
11	12	2	1	50	112	15.5	70.42
6	13	2	1	75	116	12.5	54.27
4	14	2	1	75	120	14	60.62
8	15	2	1	75	116	15.5	72.39

บทที่ 5

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยใช้หลักการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับการหาพื้นผิวตอบสนอง [19-21] เพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตรวมต่ำที่สุด โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

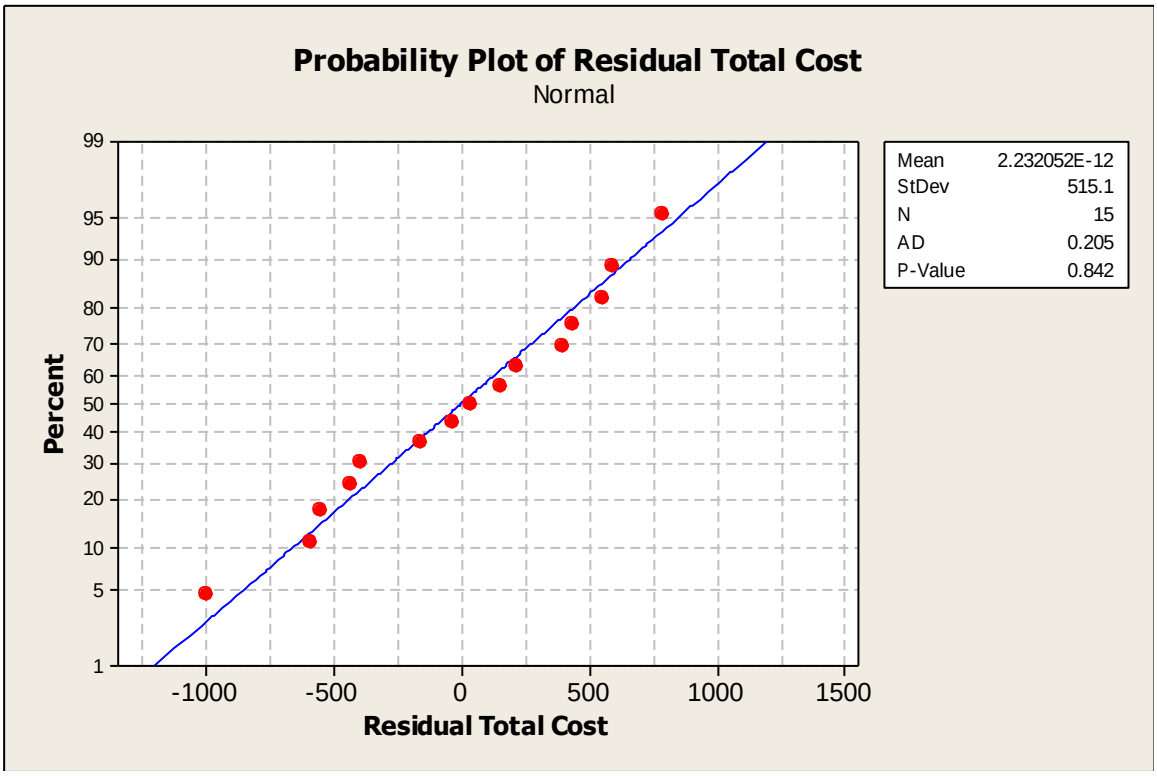
ในการคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรตอบสนอง นั่นคือ “ต้นทุนการผลิตรวม” อย่างมีนัยสำคัญ โดยเบื้องต้นก่อนนำข้อสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนไปใช้งาน จะต้องทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยพิจารณาจากส่วนตกค้างของข้อมูลว่าเป็นไปตามสมมติฐาน $\varepsilon_{ij} \sim NID\left(o, \sigma^2\right)$ ดังต่อไปนี้

1. การทดสอบการแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวม (Normal Plot of Residuals)

การวิเคราะห์การกระจายตัวของส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมว่ามีการแจกแจงปกติหรือไม่ สามารถทำได้โดยการนำส่วนตกค้างทั้งหมดมาพล๊อต Normal Probability ถ้าข้อมูลส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ จะทำให้การเรียงตัวของส่วนตกค้างกระจายอยู่รอบๆ เส้นตรง และจากการทดสอบการกระจายตัวของส่วนตกค้าง (Normality Test) ของต้นทุนการผลิตรวม ที่ระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 โดยใช้วิธีทางสถิติพบว่า ค่า P-Value จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 0.842 ดังแสดงในรูปที่ 5.1 สรุปได้ว่า ส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมมีการแจกแจงแบบปกติ

2. การทดสอบสมมติฐานความเป็นอิสระของส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวม (Independence of Residual)

ในการตรวจสอบความเป็นอิสระของส่วนตกค้าง ทำเพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและเวลาในการเก็บข้อมูล โดยการพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างตามลำดับเวลา พบว่า ข้อมูลส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมมีการกระจายตัวอยู่ทั้งด้านบวกและด้านลบในรูปแบบที่เป็นอิสระต่อกัน โดยไม่มีรูปแบบที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมมีความเป็นอิสระ

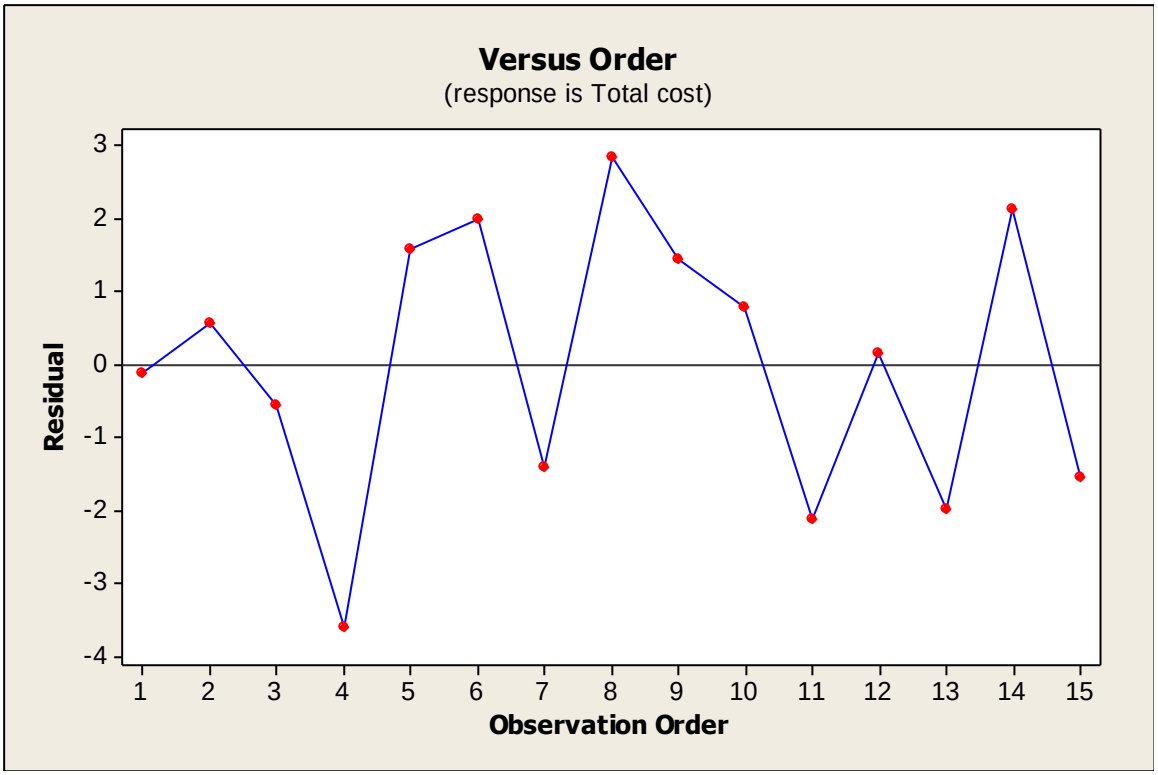


รูปที่ 5.1 ผลการทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติของส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวม

3. การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวนของต้นทุนการผลิตรวม (Variance Stability)

การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน สามารถทำได้โดยการพล็อตกราฟส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมกับค่าที่ถูกฟิต (Residual vs Fits) ดังแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่า

การกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างไม่มีรูปร่างที่แน่นอนหรือเป็นรูปแบบของกรวยปากเปิด ซึ่งสรุปได้ว่าข้อมูลส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวมมีค่าความแปรปรวนคงที่



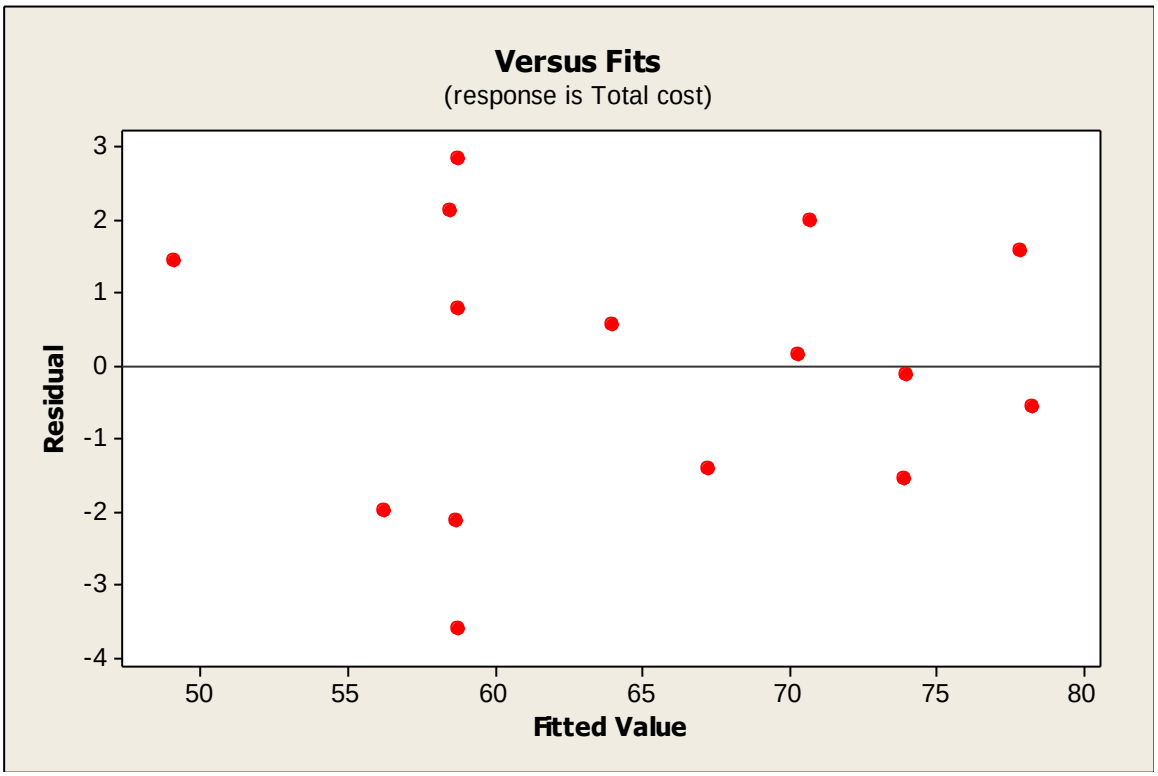
รูปที่ 5.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างของต้นทุนการผลิตรวม
ตามลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล

จากการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน $\varepsilon_{ij} \sim NID(o, \sigma^2)$ สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมและตรงตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ คือ ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน และความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ ดังนั้น จึงสามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ

5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองกรณีตัวแปรตอบสนองคือต้นทุนการผลิตรวม ผลการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab แสดงดังรูปที่ 5.4 ซึ่งจากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือ R-

Sq (adj) พบว่าการทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 88.22 เปอร์เซ็นต์ สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ นั่นคือ ตัวแบบถดถอยนี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้พยากรณ์ต่างๆ



รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าและค่าที่ถูกฟิตของต้นทุนการผลิตรวม

จากรูปที่ 5.4 พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยและตัวแปรตอบสนอง มีพจน์ของ First Order พจน์ของ Second Order และพจน์ของอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 โดยตัวเลขคัปปามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 เช่นเดียวกับพจน์ของ Second Order ของตัวเลขคัปปา รวมทั้งอันตรกิริยาระหว่างสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสกับตัวเลขคัปปา ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากมีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 เช่นกัน ซึ่งการวิเคราะห์ Main Effect Plot, Interaction Plot, Contour Plot และ Surface Plot ของต้นทุนการผลิตรวม จากการวิเคราะห์ปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวม ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา แสดงในรูปที่ 5.5 ถึง 5.8 ตามลำดับ

Response Surface Regression: Total cost versus A, B, C

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for Total cost

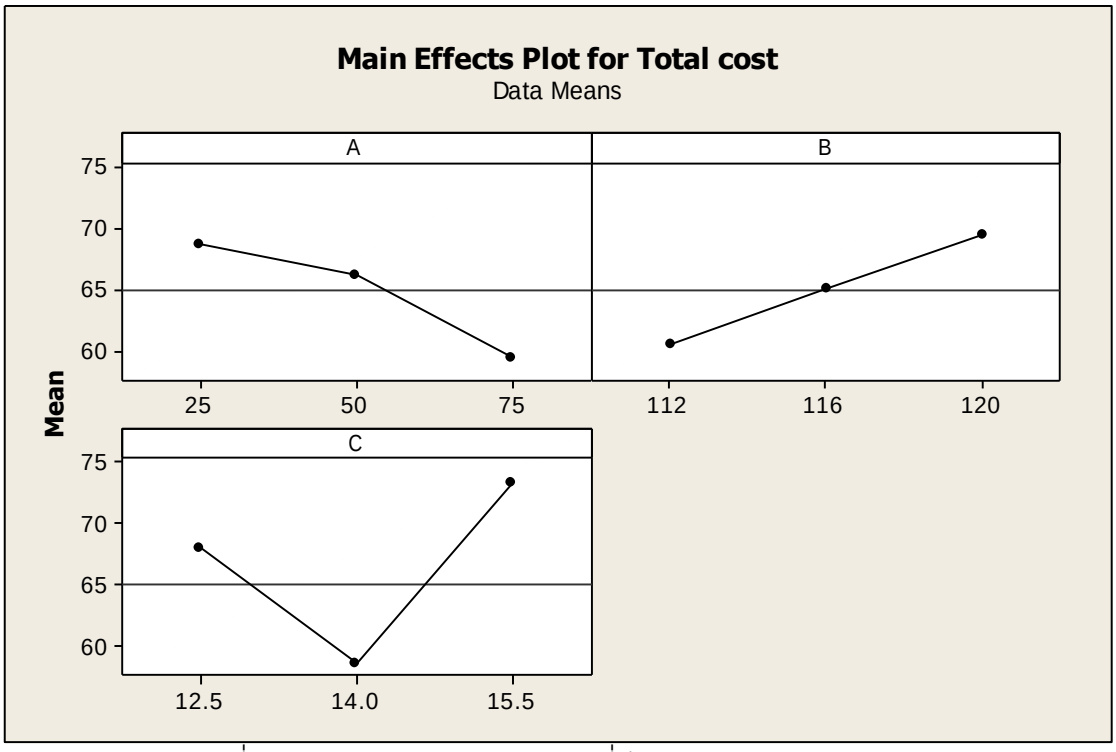
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1594.90	1441.57	1.106	0.319
A	-2.56	1.91	-1.342	0.237
B	-8.90	23.71	-0.376	0.723
C	-146.92	36.17	-4.062	0.010
A*A	-0.00	0.00	-0.720	0.504
B*B	0.05	0.10	0.475	0.655
C*C	5.37	0.72	7.480	0.001
A*B	0.00	0.02	0.137	0.896
A*C	0.17	0.04	4.000	0.010
B*C	-0.09	0.26	-0.330	0.755

S = 3.10269 PRESS = 473.364
R-Sq = 95.79% R-Sq(pred) = 58.62% R-Sq(adj) = 88.22%

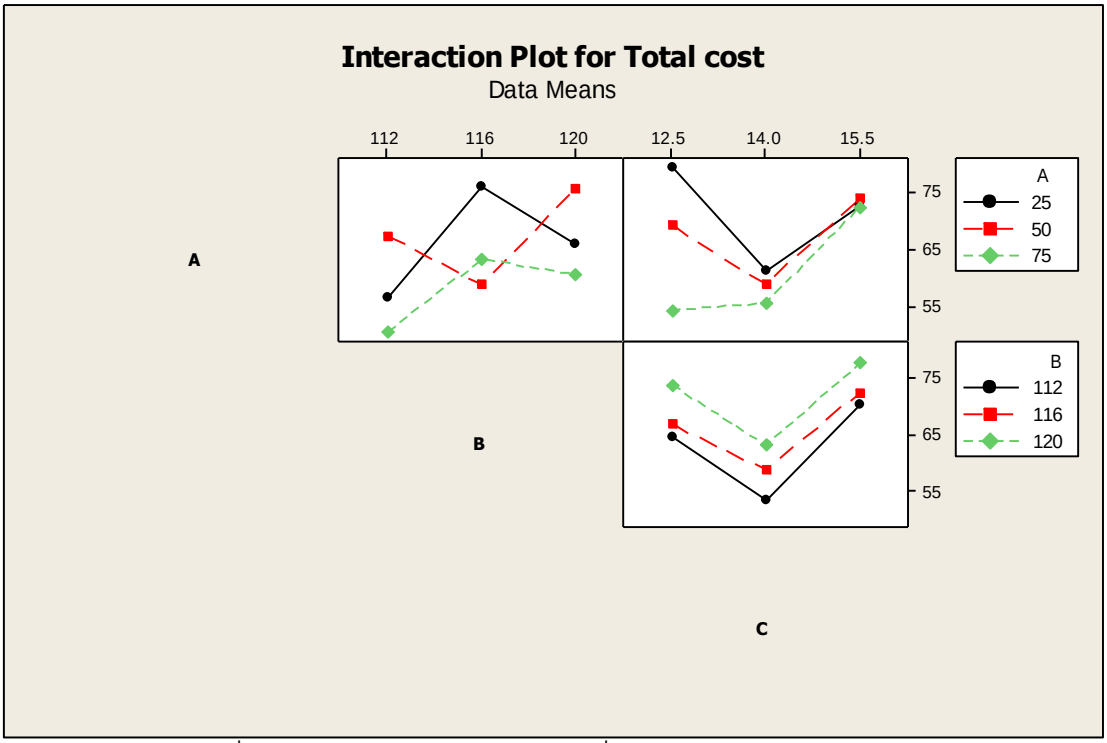
Analysis of Variance for Total cost

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	1095.79	1095.79	121.755	12.65	0.006
Linear	3	385.69	175.10	58.368	6.06	0.040
A	1	168.77	17.33	17.331	1.80	0.237
B	1	161.26	1.36	1.358	0.14	0.723
C	1	55.65	158.85	158.847	16.50	0.010
Square	3	554.84	554.84	184.948	19.21	0.004
A*A	1	16.15	4.99	4.991	0.52	0.504
B*B	1	0.10	2.17	2.170	0.23	0.655
C*C	1	538.59	538.59	538.592	55.95	0.001
Interaction	3	155.26	155.26	51.753	5.38	0.051
A*B	1	0.18	0.18	0.180	0.02	0.896
A*C	1	154.03	154.03	154.031	16.00	0.010
B*C	1	1.05	1.05	1.048	0.11	0.755
Residual Error	5	48.13	48.13	9.627		
Lack-of-Fit	3	26.55	26.55	8.850	0.82	0.590
Pure Error	2	21.58	21.58	10.792		
Total	14	1143.92				

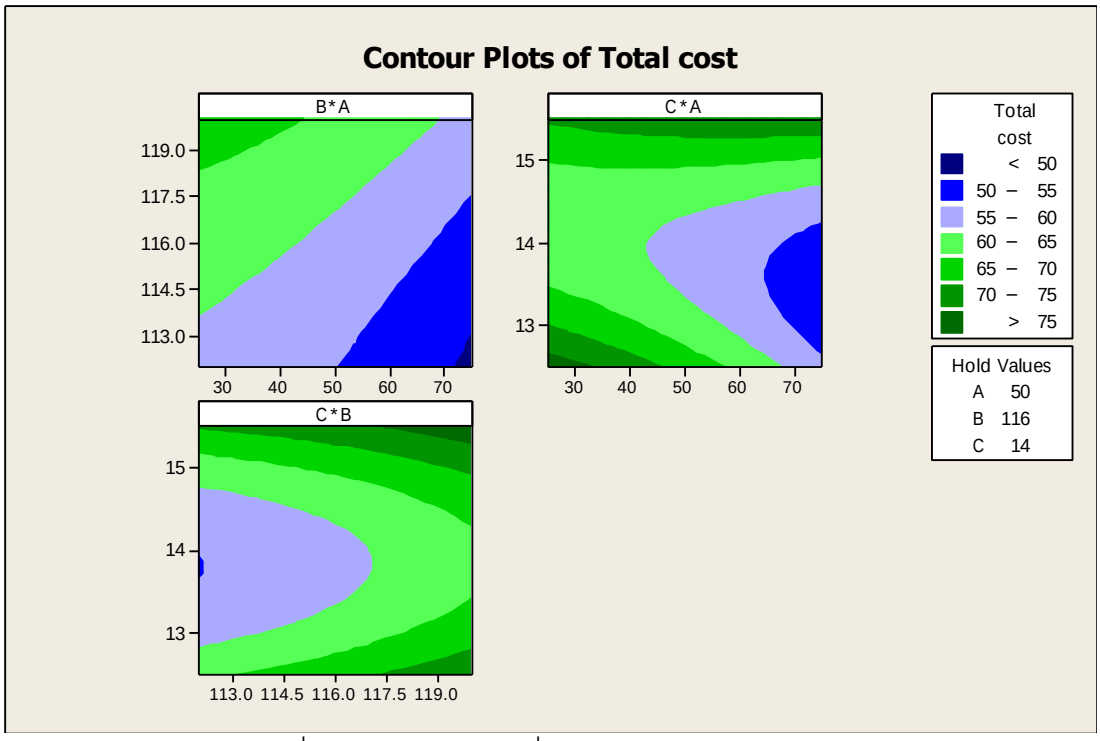
รูปที่ 5.4 ผลการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตรวม



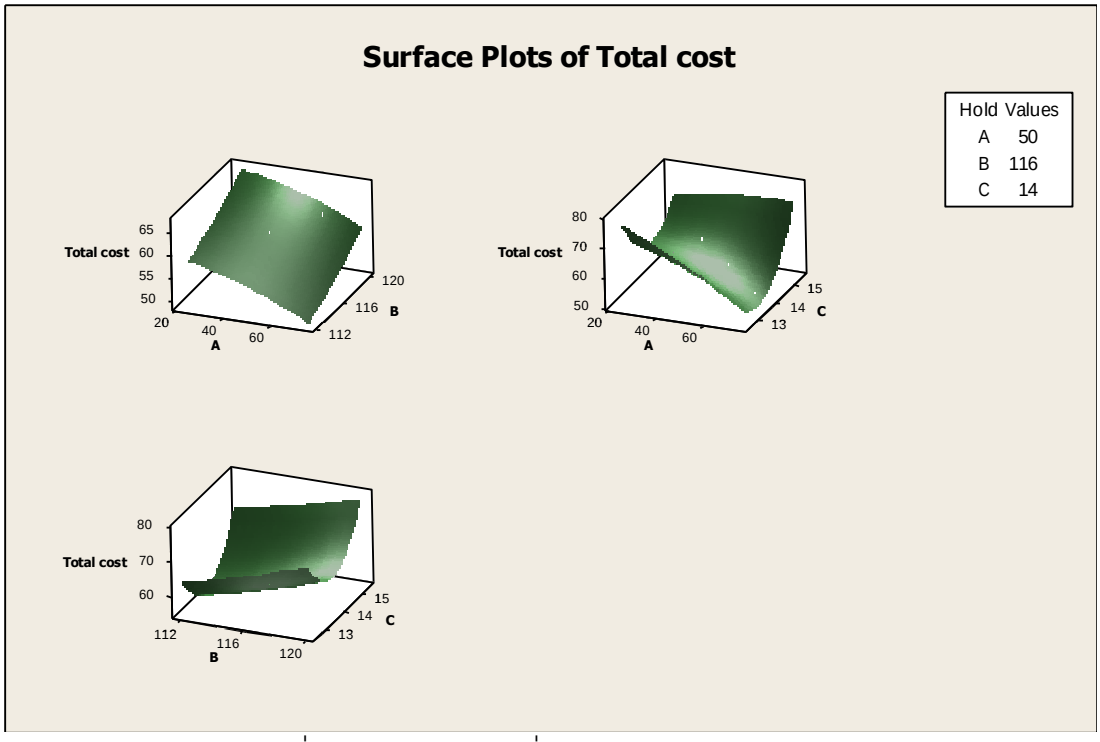
รูปที่ 5.5 ปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 5.6 อันตรกิริยา (Interaction) ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 5.7 Contour Plot ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 5.8 Surface Plot ที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม

5.3 การหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสม ดังนั้น การวิเคราะห์เพื่อหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัย จึงพิจารณาที่ตัวแปรตอบสนองที่เป็นต้นทุนการผลิตรวม โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.3.1 ตัวแบบถดถอย

จากข้อมูลและผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้โปรแกรม Minitab ดังแสดงในรูปที่ 5.4 นำเทอมของปัจจัยนำเข้าที่สำคัญทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา มาหาความสัมพันธ์เพื่อหาตัวแบบถดถอยของเทอมปัจจัยที่มีนัยสำคัญ โดยใช้โปรแกรม Minitab วิเคราะห์ตัวแบบถดถอยโดยวิธีของ Stepwise Regression (Backward Elimination) ที่ Alpha-to-remove เท่ากับ 0.05 พบว่ามีเพียง 5 พจน์ที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อต้นทุนการผลิตรวม นั่นคือ ปัจจัยหลัก A, C และอันตรกิริยาของ BB, CC, AC ผลของการวิเคราะห์ด้วยวิธี Stepwise Regression แสดงดังรูปที่ 5.9 และตัวแปรถดถอยแสดงได้ในสมการที่ 5.1

$$Y = 1149-2.50A-157C+0.00484B^2+5.38C^2+0.165AC \quad \text{..... (5.1)}$$

เมื่อ

Y คือ ต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

A คือ สัดส่วนของสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสต้มง่ายที่เข้าสู่กระบวนการผลิต

B คือ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ

C คือ ตัวเลขคัปปาที่ใช้ในการเดินเครื่อง

จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจหรือ R-Sq (adj) ของตัวแบบถดถอยจากวิธีของ Stepwise ดังแสดงในรูปที่ 5.9 พบว่ามีค่า R-Sq (adj) เท่ากับ 92.30 เปอร์เซ็นต์ สามารถอธิบายได้ว่า สมการแบบถดถอยนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปพยากรณ์ต้นทุนการผลิตให้มีความถูกต้องสูงสุดถึง 93.20 เปอร์เซ็นต์

Stepwise Regression: Total cost versus A, B, C, AA, BB, CC, AB, AC, BC

Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05

Response is Total cost on 9 predictors, with N = 15

Step	1	2	3	4	5
Constant	1595	1583	1721	1137	1149
A	-2.56	-2.31	-2.31	-2.31	-2.50
T-Value	-1.34	-3.98	-4.25	-4.45	-5.33
P-Value	0.237	0.007	0.004	0.002	0.000
B	-9	-9	-10		
T-Value	-0.38	-0.41	-0.50		
P-Value	0.723	0.699	0.633		
C	-147	-147	-157	-156	-157
T-Value	-4.06	-4.44	-9.06	-9.51	-9.68
P-Value	0.010	0.004	0.000	0.000	0.000
AA	-0.0019	-0.0019	-0.0019	-0.0019	
T-Value	-0.72	-0.79	-0.84	-0.93	
P-Value	0.504	0.461	0.428	0.381	
BB	0.04791	0.04791	0.04791	0.00484	0.00484
T-Value	0.47	0.52	0.55	5.03	5.07
P-Value	0.655	0.622	0.596	0.001	0.001
CC	5.37	5.37	5.37	5.34	5.38
T-Value	7.48	8.18	8.74	9.17	9.33
P-Value	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
AB	0.002				
T-Value	0.14				
P-Value	0.896				
AC	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165
T-Value	4.00	4.37	4.67	4.91	4.95
P-Value	0.010	0.005	0.002	0.001	0.001
BC	-0.09	-0.09			
T-Value	-0.33	-0.36			
P-Value	0.755	0.731			
S	3.10	2.84	2.66	2.53	2.51
R-Sq	95.79	95.78	95.68	95.53	95.05
R-Sq(adj)	88.22	90.15	91.37	92.18	92.30
Mallows Cp	10.0	8.0	6.1	4.3	2.9

รูปที่ 5.9 ผลลัพธ์การหาตัวแบบถดถอยจากวิธีของ Stepwise โดยใช้โปรแกรม Minitab

5.3.2 การหาค่าสำหรับการปรับตั้งระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ในขั้นตอนนี้จะทำการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด โดยมีค่าใกล้เคียงเป้าหมายที่กำหนดไว้เท่ากับ 65 บาทต่อการทดลอง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาผลของปัจจัยหลักโดยใช้ฟังก์ชัน Response Optimization ในโปรแกรม Minitab ทำให้ได้ค่าระดับการปรับตั้งของแต่ละปัจจัยแสดงดังตารางที่ 5.1 และจากการพยากรณ์หาค่าผลตอบสนองที่ระดับการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสม โดยใช้ตัวแบบถดถอยที่ลดรูปเหลือเฉพาะปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตรวม หรือ Y เท่ากับ 48.24 บาทต่อการทดลอง ทำให้ได้ระดับความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 5.10 และ 5.11

ในขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษสำหรับหาต้นทุนการผลิตที่ต่ำที่สุด ได้มีการพิจารณาปัจจัยหลัก และอันตรกิริยา เฉพาะปัจจัยที่มีผลอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น พร้อมกับการวิเคราะห์ตัวแบบถดถอยเพื่อพยากรณ์ค่าผลตอบสนองของต้นทุนการผลิตรวม ดังนั้น จากตัวแบบถดถอย สามารถหาค่าการปรับตั้งระดับปัจจัยที่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าตัวแปรตอบสนอง คือ ปัจจัย A อัตราส่วนสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่ายมีค่าเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์ของสายพันธุ์ที่ต้มง่าย ปัจจัย B ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ มีค่าเท่ากับ 112 มิลลิกรัมต่อลิตร และปัจจัย C ตัวเลขคัปปาที่ใช้ในการเดินเครื่อง มีค่าเท่ากับ 13.5 ทำให้ได้ต้นทุนการผลิตรวมเท่ากับ 48.24 บาทต่อการทดลอง

ตารางที่ 5.1 ระดับการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนอง

ลำดับที่	สัญลักษณ์ปัจจัย	ปัจจัย	ระดับปัจจัยที่เหมาะสม
1	A	สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส	75
2	B	ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ	112
3	C	ตัวเลขคัปปา	13.5

Optimize : Stepwise model

Response Optimization

Parameters

	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Import
Total cost	Minimum	65	65	79.42	1	1

Global Solution

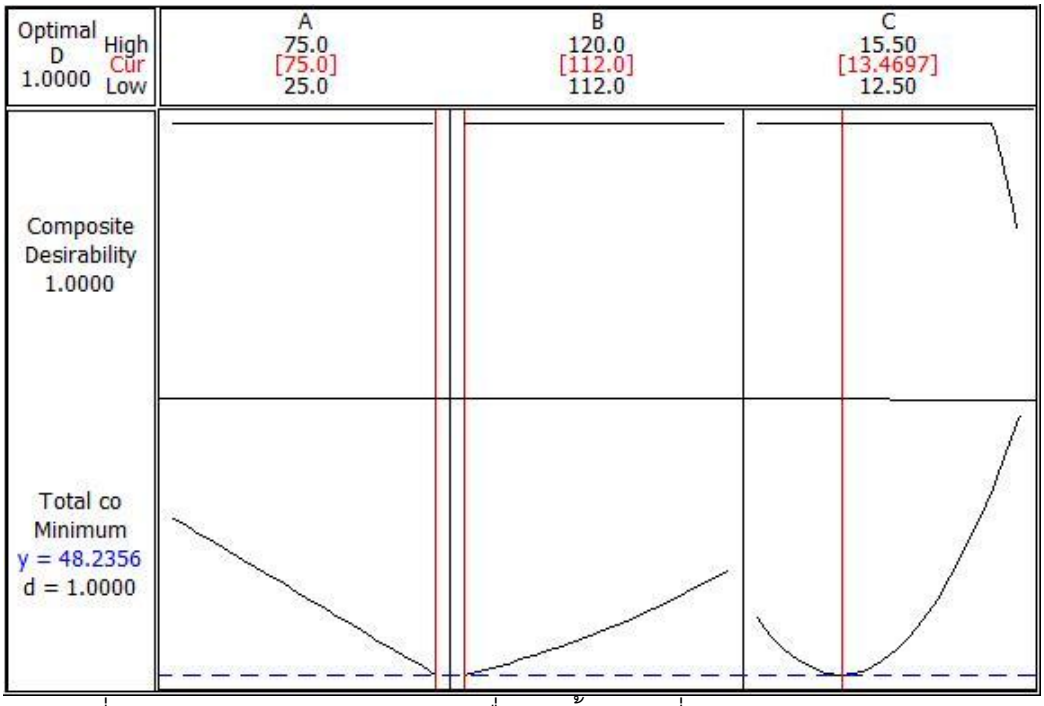
A = 75
B = 112
C = 13.4697

Predicted Responses

Total cost = 48.2356 , desirability = 1.000000

Composite Desirability = 1.000000

รูปที่ 5.10 ผลการวิเคราะห์เพื่อหาระดับการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนองของต้นทุนการผลิตรวม



รูปที่ 5.11 กราฟ Optimization Plot เพื่อปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนองต้นทุนการผลิตรวม

บทที่ 6

การทดสอบเพื่อยืนยันผล

บทนี้เป็นการทดสอบเพื่อยืนยันผลสรุปจากบทที่ 5 การวิเคราะห์ผลการทดลองของค่าปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัย โดยนำระดับปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการทดสอบ Response Optimization ของโปรแกรม Minitab มาทำการทดลองในห้องปฏิบัติการอีกครั้ง เพื่อยืนยันผลอีกครั้งหนึ่ง

6.1 ขั้นตอนการทดสอบเพื่อยืนยันผล

ในขั้นตอนการเตรียมการทดลองสำหรับการยืนยันผล ประกอบด้วยการเตรียมความพร้อมของวัตถุดิบ เครื่องมือ ตลอดจนวิธีการทดลองที่ถูกต้อง เพื่อให้การทดลองมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามบทที่ 4 หัวข้อ 4.2 ขั้นตอนการทดลอง ซึ่งปัจจัยนำเข้าที่นำมาทดสอบเพื่อยืนยันผล เป็นไปตามตารางที่ 5.1 ระดับการปรับตั้งปัจจัยที่เหมาะสมต่อผลตอบสนองที่ได้จากการทดสอบ Response Optimization โดยทำการทดสอบ 4 ซ้ำ เพื่อนำค่าที่ได้ไปทดสอบสมมติฐานเพื่อยืนยันผลต่อไป

6.2 ผลการทดลอง

เมื่อปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทางสถิติทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา ตามค่าที่ได้สรุปไว้ในตารางที่ 5.1 ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 6.1

ตารางที่ 6.1 ผลการทดลองการทดสอบเพื่อยืนยันผลหลังการออกแบบการทดลอง

การทดลองที่	TC1	TC2	TC3	TC4
ต้นทุนการผลิตรวม (บาทต่อการทดลอง)	47.52	47.98	49.09	48.28

6.3 การวิเคราะห์ผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล

จากผลการทดสอบเพื่อยืนยันผลในห้องปฏิบัติการจะได้ต้นทุนการผลิตรวมในหน่วย “บาทต่อการทดลอง” ซึ่งใน 1 การทดลองนั้น ใช้ชิ้นไม้สับ 3.6 กิโลกรัม ดังนั้น เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตรวมจากห้องปฏิบัติการเทียบกับต้นทุนการผลิตรวมจริงในหน่วย “บาทต่อตัน” คิดที่ความชื้นของชิ้นไม้สับเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ จะได้ผลการทดลองในหน่วยบาทต่อตันดังแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ผลการทดสอบต้นทุนการผลิตหลังการออกแบบการทดลองในห้องปฏิบัติการในหน่วยบาทต่อตัน

การทดลองที่	ต้นทุนการผลิตรวมที่ได้จากการทดลอง	
	บาทต่อการทดลอง	บาทต่อตันเยื่อ
TC1	47.52	13,200.97
TC2	47.98	13,326.42
TC3	49.09	13,636.36
TC4	48.28	13,411.89

จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 ทำการทดสอบสมมติฐานเพื่อทดสอบค่าเฉลี่ยต้นทุนต่อการทดลองจากการยืนยันผลกับค่าเฉลี่ยต้นทุนที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง ด้วยการทดสอบทางสถิติ One-sample T ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ หรือระดับนัยสำคัญเท่ากับ 0.05 โดยมีขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. กำหนดสมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 : \mu_1 = 48.2356$$

$$H_1 : \mu_1 \neq 48.2356$$

โดย μ คือ ค่าเฉลี่ยต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม

2. ค่าทางสถิติที่ใช้ทดสอบ คือ T
3. กำหนดความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05

4. ผลการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Minitab แสดงในรูปที่ 6.1

รูปที่ 6.1 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตรวมที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิธีวิเคราะห์ผลการทดลองพื้นผิวตอบสนองและผลการทดสอบยืนยันผลในห้องปฏิบัติการ พบว่า ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.960 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น ยอมรับสมมติฐานหลัก นั่นคือ ค่าเฉลี่ยผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบยืนยันผลในห้องปฏิบัติการไม่แตกต่างกับค่าเฉลี่ยที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยวิเคราะห์ผลการทดลองพื้นผิวตอบสนอง

One-Sample T: Confirm Result

Test of mu = 48.2356 vs not = 48.2356

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
Confirm Result	4	48.2175	0.6603	0.3302	(47.1668, 49.2682)	-0.05	0.960

รูปที่ 6.1 ผลการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย 1 ตัวอย่างโดยโปรแกรม Minitab

จากข้อมูลในตารางที่ 6.2 ทำการทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างต้นทุนการผลิตในสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในห้องปฏิบัติการ 4 ตัวอย่าง โดยปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการทดสอบ Response Optimization และข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงในเดือนมิถุนายน 2556 ดังแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.1 ตารางเก็บข้อมูลของต้นทุนการผลิตจริงประจำเดือนมิถุนายน 2556 เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยมีขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดสมมติฐานทางสถิติ [22]

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

โดย μ_1 : คือค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษในสภาวะที่เหมาะสม

μ_2 : คือค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษในกระบวนการผลิตจริงของเดือนมิถุนายน 2556

2. ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ T
3. กำหนดความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05
4. ผลการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Minitab แสดงในรูปที่ 6.2

Two-Sample T-Test and CI: After, Before

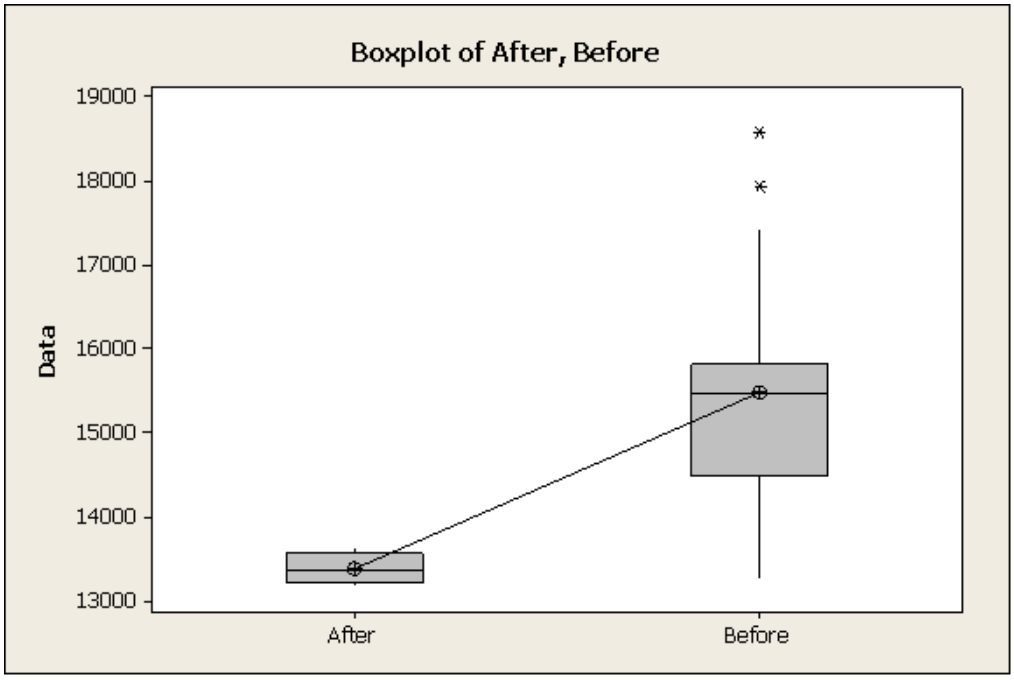
```
Two-sample T for After vs Before

         N   Mean  StDev  SE Mean
After    4  13394    183        92
Before  30  15479   1236       226


Difference = mu (After) - mu (Before)
Estimate for difference:  -2085
95% CI for difference:  (-2582, -1588)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -8.56  P-Value = 0.000  DF = 31
```

รูปที่ 6.2 ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของสองประชากรโดยโปรแกรม Minitab

จากการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Minitab ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.2 พบว่าค่า P-Value น้อยกว่า 0.001 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า α (0.05) จึงปฏิเสธสมมติฐาน หลัก $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ ดังนั้น สรุปผลการทดสอบสมมติฐานได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของ 2 กลุ่มประชากรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นคือ ต้นทุนการผลิตที่ได้จากการปรับระดับปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมจากการทดสอบ Response Optimization มีความแตกต่างจากต้นทุนการผลิตรวมในกระบวนการผลิตปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 กราฟ Box Plot แสดงการทดสอบสมมติฐานของ 2 กลุ่มประชากร

ตารางที่ 6.3 ค่าความขาวสว่างที่ได้จากการทดลอง

การทดลองที่	1	2	3	4
ค่าความขาวสว่าง (%)	88.99	88.52	89.29	88.05

จากตารางที่ 6.3 แสดงค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษที่ได้จากการทดลองยืนยันผลในห้องปฏิบัติการ เมื่อนำมาทดสอบสมมติฐานสำหรับค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มที่มีจำนวนตัวอย่างน้อยกว่า 30 ตัวอย่าง โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างความขาวสว่างของเยื่อกระดาษก่อนและหลังการปรับปรุง โดยปรับค่าปัจจัยนำเข้าที่ได้จากการทดสอบ Response Optimization และข้อมูลจากกระบวนการผลิตจริงในเดือนมิถุนายน 2556 ดังแสดงในภาคผนวก ค ตารางที่ ค.2 เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยมีขั้นตอนการทดสอบสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

1. กำหนดสมมติฐานทางสถิติ

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$
$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

โดย μ_1 : คือค่าเฉลี่ยของความขาวสว่างของเยื่อกระดาษหลังการปรับปรุง

μ_2 : คือค่าเฉลี่ยของความขาวสว่างของเยื่อกระดาษในกระบวนการผลิตจริงของเดือนมิถุนายน 2556

2. ค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ T
3. กำหนดความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ระดับนัยสำคัญหรือ α เท่ากับ 0.05
4. ผลการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Minitab แสดงในรูปที่ 6.4

จากการทดสอบสมมติฐานโดยโปรแกรม Minitab ได้ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 6.4 พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.654 ซึ่งมีค่ามากกว่า α (0.05) จึงยอมรับสมมติฐาน หลัก ดังนั้น สรุปผลการทดสอบสมมติฐานได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของ 2 กลุ่มประชากรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นั่นคือ คุณภาพเยื่อกระดาษ หรือค่าความขาวสว่างก่อนและหลังการปรับปรุง ให้คุณภาพที่ไม่แตกต่างกันดังแสดงในรูปที่ 6.5 แต่ให้ต้นทุนการผลิตรวมที่ต่ำกว่า

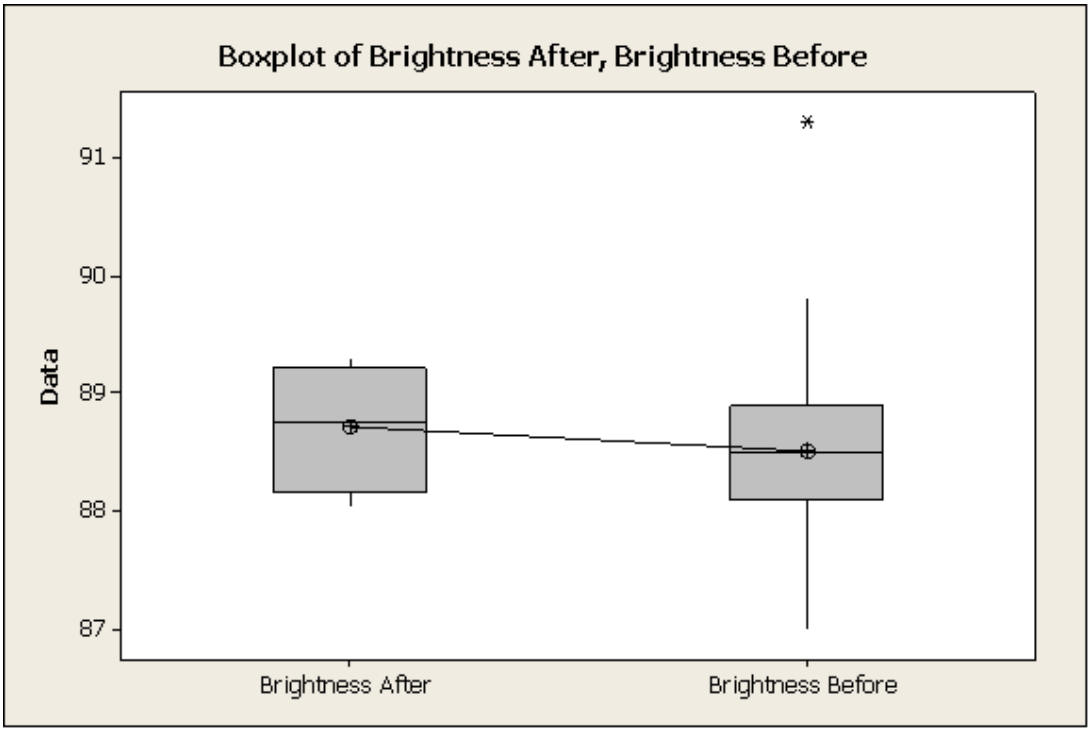
Two-Sample T-Test and CI: Brightness After, Brightness Before

```
Two-sample T for Brightness After vs Brightness Before

                  N    Mean  StDev  SE Mean
Brightness After   4  88.713  0.544     0.27
Brightness Befor  30  88.520  0.820     0.15


Difference = mu (Brightness After) - mu (Brightness Before)
Estimate for difference:  0.192500
95% CI for difference:  (-0.673079, 1.058079)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0.45  P-Value = 0.654  DF = 32
Both use Pooled StDev = 0.7983
```

รูปที่ 6.4 ผลการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของเยื่อกระดาษของสองประชากรโดยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 6.5 กราฟ Box Plot แสดงการทดสอบสมมติฐานการทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความขาวสว่างของเยื่อกระดาษ

6.4 **สรุปผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล**

ขั้นตอนการทดสอบเพื่อยืนยันผล พบว่า การกำหนดระดับปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ต้มง่าย 75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อที่ระดับ 112 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเลขคัปปาที่ระดับ 13.5 สามารถลดต้นทุนการผลิตเฉลี่ยจาก 15,479 บาทต่อตัน เป็น 13,394 บาทต่อตัน หรือสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมลงได้ 13.68 เปอร์เซ็นต์ โดยที่ค่าเฉลี่ยของ 2 กลุ่มประชากร ซึ่งได้แก่ ผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ และข้อมูลในกระบวนการผลิตจริงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพเยื่อกระดาษ แสดงว่าการกำหนดสภาวะดังกล่าวมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการปฏิบัติงานจริง

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยซึ่งได้เสนอแนะแนวทางการประยุกต์ใช้วิธีการออกแบบการทดลอง โดยขั้นตอนเริ่มตั้งแต่การนิยามปัญหาด้วยแผนผังก้างปลาเพื่อหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวม การวิเคราะห์การคัดเลือกปัจจัยตั้งแต่ การคัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นจากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยการหาความสัมพันธ์สาเหตุและผล การคัดเลือกปัจจัยโดยการทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีต และการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken การทำการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ การทดสอบเพื่อยืนยันผลการทดลองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ โดยสามารถลดต้นทุนการผลิตรวมให้ต่ำที่สุดได้ ซึ่งสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปาเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ

ก่อนการออกแบบการทดลองเพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด ต้นทุนการผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 15,517.06 บาทต่อตัน โดยกระบวนการผลิตในปัจจุบัน ไม่มีการคัดแยกสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่เข้าสู่กระบวนการผลิต รวมทั้งการปรับค่าปัจจัยต่างๆ ของกระบวนการขึ้นอยู่กับความเชี่ยวชาญส่วนบุคคล โดยมีการกำหนดค่ามาตรฐานเป็นช่วง ตามความสามารถของเครื่องจักรและกระบวนการ หลังจากการออกแบบการทดลองเพื่อหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด พบว่า ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษเฉลี่ยเท่ากับ 13,393.91 บาทต่อตัน หรือสามารถลดต้นทุนการผลิตลง 13.68 เปอร์เซ็นต์

7.1 สรุปผลจากการค้นหาปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมด้วยแผนผังก้างปลา

ผู้วิจัยได้จัดให้มีการประชุมเพื่อระดมสมองจากผู้เชี่ยวชาญและผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ผู้จัดการโรงงาน ผู้จัดการหน่วยงาน ผู้จัดการกะ วิศวกรกะ พนักงานควบคุมคุณภาพ พนักงานเดินเครื่อง และพนักงานภาคสนาม โดยได้จัดทำเป็นแผนผังก้างปลา โดยพิจารณาเฉพาะปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัยที่เกิดจากคน ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ ปัจจัยที่เกิดจาก

วิธีการ และสิ่งแวดล้อม ซึ่งสามารถหาปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษได้ทั้งหมด 20 ปัจจัยดังแสดงในรูปที่ 3.1 และจากนั้นได้นำปัจจัยทั้งหมด 20 ปัจจัยมาทำการคัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นจากการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาจากการหาความสัมพันธ์สาเหตุและผล โดยมีเกณฑ์ในการพิจารณาดังกล่าวในหัวข้อที่ 3.3.1 และได้นำปัจจัยมาเรียงลำดับคะแนนจากมากไปหาน้อยเพื่อนำไปพล็อตกราฟพาเรโต ดังแสดงในรูปที่ 3.4 พบว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของพาเรโตมีปัจจัย 12 ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวม ซึ่งทางผู้วิจัยได้ทำการพิจารณาเลือกปัจจัยเพื่อนำมาทดสอบสมมติฐานที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิต โดยได้แสดงเหตุผลของปัจจัยต่างๆ ที่ไม่ถูกเลือกไปทดสอบสมมติฐานดังแสดงในตารางที่ 3.3 จากนั้นนำปัจจัยดังกล่าวไปทำการคัดเลือกปัจจัยโดยการทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีตต่อไป

7.2 สรุปผลการคัดเลือกปัจจัยโดยการทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีต

จากการจัดลำดับความสำคัญด้วยผังพาเรโตและเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยจาก 12 ปัจจัยเหลือ 6 ปัจจัยที่จะนำมาทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีต ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ ตัวเลขคัปปา ความแห้งของชิ้นไม้สับ ปริมาณ CE ในน้ำยาต้มเยื่อ และปริมาณ TA ในน้ำยาต้มเยื่อ โดยค่าสถิติที่ใช้ทดสอบคือ Z ทำการทดสอบโดยนำค่าสูงสุดและต่ำสุดของแต่ละปัจจัยที่เคยมีในอดีตมาทดสอบสมมติฐาน โดยใช้เครื่องมือทางสถิติผ่านโปรแกรม Excel พบว่าปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา

สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสไม่มีการบันทึกสายพันธุ์ไม้ที่นำเข้าสู่กระบวนการผลิตในแต่ละวัน ทำให้ไม่สามารถนำปัจจัยดังกล่าวมาทดสอบสมมติฐานจากข้อมูลในอดีตได้ แต่มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องได้กล่าวถึงสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่มีผลต่อกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษดังกล่าวในบทที่ 2 ดังนั้น ปัจจัยที่ถูกคัดเลือกนำไปทดลองเพื่อหาระดับของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด ได้แก่ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ และตัวเลขคัปปา

7.3 สรุปผลการทดลองโดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken

เป็นการนำปัจจัยที่ถูกคัดเลือกจากการทดสอบสมมติฐาน ซึ่งมีเพียง 3 ปัจจัยมาเป็นแนวทางในการทดลอง โดยการออกแบบการทดลองแบบ Box-Behnken แต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ โดยอ้างอิงจากความสามารถของกระบวนการและมาตรฐานปัจจุบันที่โรงงานปฏิบัติ รายละเอียดของระดับปัจจัยแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งแผนการทดลอง Box-Behnken กรณี 3 ปัจจัย ปัจจัยละ 3 ระดับ ประกอบไปด้วยการทดลอง 15 การทดลอง โดยมีรายละเอียดแผนการทดลองแสดงในตารางที่ 4.3

ขั้นตอนการทดลองหาระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุดเป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยมีการควบคุมตัวแปรควบคุมในการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.4 ซึ่งผลการทดลองเป็นดังตารางที่ 4.5

7.4 สรุปการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองตามสมมติฐาน $\varepsilon_{ij} \sim NID\left(o, \sigma^2\right)$ โดยการนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์พบว่า ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความเหมาะสมและตรงตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อที่ตั้งไว้ ได้แก่

1) ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ
2) ข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน
3) ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่

ดังนั้น สามารถนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนได้อย่างมีความน่าเชื่อถือ โดยในขั้นตอนต่อไปคือการวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวแปรตอบสนอง “ต้นทุนการผลิตรวม” ซึ่งวิเคราะห์ผลผ่านโปรแกรม Minitab ได้ผลดังรูปที่ 5.4 เมื่อพิจารณาค่า R-Sq (adj) พบว่า การทดลองนี้มีค่าเท่ากับ 88.22 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปได้ว่า ตัวแบบถดถอยที่ได้จากการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้พยากรณ์ต่างๆ

จากผลการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัย 3 ปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ มีพจน์ของ First Order พจน์ของ Second Order และพจน์ของอันตรกิริยาที่มีนัยสำคัญต่อตัวแปรตอบสนอง เนื่องจากข้อมูลทางสถิติ P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งได้แก่ ตัวเลขคัปปา

Second Order ของตัวเลขคัปปา และอันตรกิริยาระหว่างสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสกับตัวเลขคัปปาที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ

7.5 สรุปผลการหาเงื่อนไขที่เหมาะสม

จากการวิเคราะห์ตัวแบบถดถอยโดยวิธีของ Stepwise Regression (Backward Elimination) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า มีเพียง 5 พจน์ที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวมอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งได้แก่ ปัจจัยหลัก A, C และอันตรกิริยาของ BB, CC, AC ผลของการวิเคราะห์ แสดดังรูปที่ 5.9 และสมการตัวแปรถดถอยแสดงในสมการที่ 5.1

การพิจารณาความน่าเชื่อถือของตัวแบบถดถอยที่ได้จากการวิเคราะห์ดังกล่าวผ่านโปรแกรม Minitab พบว่าค่า R-Sq (adj) มีค่าเท่ากับ 92.30 เปอร์เซ็นต์ สามารถสรุปได้ว่า ตัวแบบถดถอยที่ได้จากการทดลองนี้มีความน่าเชื่อถือเพียงพอที่จะนำไปใช้พยากรณ์ต่างๆ ดังนั้น สามารถพิจารณาผลของปัจจัยหลักที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด โดยมีค่าใกล้เคียงเป้าหมายที่ 65 บาทต่อการทดลอง โดยใช้ฟังก์ชั่น Response Optimization ในโปรแกรม Minitab พยากรณ์หาค่าผลตอบแทนตอบสนองและจากการพยากรณ์หาค่าผลตอบสนองที่ระดับการปรับตั้งปัจจัยที่ระดับนี้ โดยใช้ตัวแบบถดถอยที่ลดรูปเหลือเฉพาะปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญ ทำให้ได้ค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตรวม (Y) เท่ากับ 48.24 บาทต่อการทดลอง ทำให้ได้ระดับความพึงพอใจโดยรวม (Composite Desirability) เท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยระดับการปรับตั้งปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมคือ สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสสายพันธุ์ที่ต้มง่าย 75 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณ EA ในน้ำยาต้มเยื่อ 112 มิลลิกรัมต่อลิตร และตัวเลขคัปปา 13.5

7.6 สรุปผลการทดสอบเพื่อยืนยันผล

จากการนำปัจจัยนำเข้าที่มีนัยสำคัญทั้ง 3 ปัจจัยที่ได้จากการทดสอบ Response Optimization ของโปรแกรม Minitab มาทดสอบยืนยันผลในห้องปฏิบัติการพบว่า ค่าเฉลี่ยของต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษมีค่าเท่ากับ 48.22 บาทต่อการทดลอง หรือ 13,393.91 บาทต่อตัน เมื่อนำมาทดสอบสมมติฐานเทียบกับต้นทุนการผลิตเฉลี่ยในปัจจุบัน เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของกลุ่มประชากร

ทั้ง 2 กลุ่มว่ามีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าสถิติที่ใช้คือ T พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยของทั้ง 2 กลุ่มประชากรมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

7.7 ข้อจำกัดของงานวิจัย

7.7.1 ในกรณีที่จะทำการทดลองเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตนั้น ต้องเป็นการทดสอบ ยืนยันผลในห้องปฏิบัติการ และควบคุมโดยผู้วิจัยเท่านั้น เพื่อลดผลกระทบต่อกำลังการผลิต

7.7.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลองเป็นวัตถุดิบชนิดเดียวกับที่ใช้จริงในกระบวนการผลิต ดังนั้น จำเป็นต้องขอความร่วมมือจากฝ่ายผลิตเตรียมวัตถุดิบต่างๆ เพื่อใช้ในการทดลอง

7.7.3 การทดลองในห้องปฏิบัติการต้องอาศัยความร่วมมือจากหน่วยงานวิจัยของทางบริษัท เนื่องจากปัจจุบัน มีงานวิจัยจำนวนมากที่ต้องใช้ห้องปฏิบัติการต้มเยื่อกระดาษจำลอง

7.7.4 ปัจจัยที่เลือกมาทำการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลองนั้น ไม่สามารถทำการทดลองมากกว่า 1 ซ้ำได้ เนื่องจากมีข้อจำกัดของเครื่องจักรและเครื่องมือในห้องปฏิบัติการไม่เพียงพอในการทดลอง

7.8 ข้อเสนอแนะ

7.8.1 ผลของระดับปัจจัยนำเข้าที่เหมาะสมของสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุด สามารถนำไปเป็นแนวทางการบริหารจัดการไม้ทั้งด้านการจัดเก็บและการส่งชิ้นไม้สับเข้าสู่กระบวนการผลิตต่อไป

7.8.2 เนื่องจากในการวิจัยนี้เป็นการออกแบบการทดลองเพียง 1 ซ้ำ ดังนั้นอาจส่งผลต่อค่าความแม่นยำของการทดลอง ในขั้นตอนการออกแบบการทดลอง ควรหาจำนวนตัวอย่างที่เหมาะสม ซึ่งต้องมีค่าอำนาจแห่งการทดสอบ (Power of the test) อย่างน้อย 0.8

7.8.3 จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า สายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัส มีผลต่อต้นทุนการผลิต ดังนั้น ในการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพของเยื่อกระดาษ ควรพิจารณาสายพันธุ์ไม้ยูคาลิปตัสในแง่ของต้นทุนการผลิตด้วย

7.8.4 ระดับปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษต่ำที่สุดเป็นการวิเคราะห์และยืนยันผลจากห้องปฏิบัติการเท่านั้น หากต้องการนำระดับปัจจัยนำเข้าดังกล่าวไปใช้งานควรมีการทดสอบในกระบวนการผลิตจริง

รายการอ้างอิง

[1] Forest Products Laboratory, Forest Service U.S. Department of Agriculture. Pulp yield for various processes and wood species. U.S. Forest Service Research Note (May 1980): FPL-031.

[2] Ndukwe, N. A.; Jenmi, F. O.; Okiei, W. O.; and Alo, B. I. Comparative study of percentage yield of pulp from various Nigerian wood species using the kraft process. African Journal of Environmental Science and Technology 3 (January 2009): 21-25.

[3] MacLeod, M. The top ten factors in kraft pulp yield. Paperi ja Puu-Paper and Timber 89 (2007): 1-7.

[4] Scchimleck, L. R.; Kube, P. D.; and Raymond, C. A. Genetic improvement of kraft pulp yield in Eucalyptus nitensusing cellulose content determined by near infrared spectroscopy. Canadian Journal of Forest Research 34 (November 2004): 2363-2370.

[5] ประสิทธิ์ เขียวศรี. เทคนิคการระดมสมอง [online]. แหล่งที่มา: http://www.moe.go.th/wijai /brainstroming.html [2556].

[6] วิขัณฑ์ อรรณพานุรักษ์, รัศมี บุญประดิษฐ์, ธีรวุฒิ จันทร์หอม, สมบูรณ์ ปลื้มปัญญา และ สมพร จันฉนวน. คุณสมบัติเยื่ออินทรีย์ของไม้ยูคาลิปตัสจากถิ่นกำเนิดต่างๆ ที่ปลูกในท้องที่จังหวัดสระแก้ว. Proceedings of 43rd Kasetsart University Annual Conference (2005) : 518-526.

[7] อลงกต กาญจนคช. การปรับปรุงความแข็งแรงของแผ่นกระดาษลูกฟูกด้วยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[8] วัชรศักดิ์ ทวีสุข. การศึกษาปัจจัยในกระบวนการการประกอบชุดประกอบสำเร็จหัวเขียนอ่านข้อมูลฮาร์ดดิสก์ที่มีผลกระทบต่อการโก่งตัวของตัวหัวเขียนอ่านข้อมูลโดยใช้การออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.

[9] สรียา กสิกพันธุ์. การนำเศษแผ่นพาร์ทิเคิลจากการตัดริมมาเป็นส่วนผสมในการผลิตแผ่นพาร์ทิเคิล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[10] ไกรกุล ลิกขะไชย. การวิเคราะห์และลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตบรรจุภัณฑ์กล่องกระดาษ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550.

[11] ปารเมศ ชุติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[12] โชคชัย ธนเมธี. การวางแผนการผลิตสำหรับโรงแยกก๊าซธรรมชาติ โดยใช้การโปรแกรมเป้าหมาย. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

[13] ภัทรินทร์ เอี่ยมเชี่ยม. การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังชนิดมีแป้นรองรับหัวเสาด้วยวิธีซิมเพล็กซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

[14] อดินันท์ ธีรานุพัฒนา. การคำนวณออกแบบอย่างเหมาะสมที่สุดสำหรับพื้นคอนกรีตไร้คานอัดแรงภายหลังด้วยวิธีซิมเพล็กซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

[15] International Organization for Standardization (ISO). ISO302 version 2004. Pulps Determination of Kappa number, 1-10. Switzerland: ISO, 2013.

[16] Gullichsen, J.; and Carl-Johan, F. Chemical pulping. Papermaking Science and Technology (2000): 291-292.

[17] Gullichsen, J.; and Carl-Johan, F. Chemical pulping. Papermaking Science and Technology (2000): 41-42.

[18] ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท้อป, 2551.

[19] Senjuntichai, A. Process setting through general linear model and response surface method. IEANG Transactions on Engineering Technologies 5 (2010): 237-248.

[20] Premngam, M.; and Senjuntichai, A. Cycle time reduction in printing and coloring process on front cover of camera. 2013 International Conference on Applied Statistics, Maha Sarakham (2013): 155-160.

[21] Pongtrairat, A.; and Senjuntichai, A. Spiral defect reduction of hard disk drive media. Applied Mechanics and Materials 421 (2013): 93-98.

[22] สายชล สินสมบูรณ์ทอง. สถิติวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จามจุรีโปรดักท์, 2545.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

Cause & Effect Matrix ของปัจจัยนาเข้าที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง

ตารางที่ ก.1 แบบฟอร์มการลงคะแนนสำหรับการจัดลำดับความสำคัญปัจจัยที่มีผลต่อต้นทุนการผลิตเยื่อกระดาษ

ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ						
ข้อมูลทั่วไปของผู้ทำประเมิน						
ชื่อ: _____ นามสกุล: _____						
ตำแหน่ง: _____ วันที่ทำประเมิน: _____ ประสบการณ์ทำงาน (ปี) _____						
แบบสอบถาม : ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ						
ปัจจัย	**คะแนน**					**ความคิดเห็นเพิ่มเติม**
	1	3	5	8	10	
Man						
พนักงานไม่ได้รับการฝึกอบรม						
พนักงานตั้งค่าการผลิตผิด						
พนักงานขาดประสบการณ์						
พนักงานไม่ปฏิบัติตามเอกสารข้อกำหนด						
Machine						
ตะแกรง (Screen) ชิ้นไม้สับของชุดต้มเยื่ออุดตัน						
ท่อน้ำล้างของชุดล้างเยื่อแตก						
ท่อกรด-ด่างของชุดฟอกเยื่อแตก						
Material						
สิ่งปลอมปนเข้ามากับชิ้นไม้สับ						
สายพันธุ์ของชิ้นไม้สับไม่มีการคัดแยก						
ความชื้นของชิ้นไม้สับต่ำ						
ขนาดของชิ้นไม้สับไม่เหมาะสม						
อายุของชิ้นไม้สับมากเกินไป						
ปริมาณ TA (Total alkali as NaOH)ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม						
ปริมาณ EA (Effective alkali as NaOH) ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม						
ปริมาณ CE (Causticity Efficiency)ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม						
ปริมาณ SS (Suspended Solid) ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม						
Method						
ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องไม่เหมาะสม						
H-Factor ที่ใช้เดินเครื่องไม่เหมาะสม						
สถานะความเป็นกรด-ด่างมากเกิน						

หมายเหตุ : ต้นทุนการผลิต ได้แก่ ชิ้นไม้สับ น้ำยาต้มเยื่อ (White Liquor) ไอน้ำ และสารเคมีที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษขาว (ClO2, SO2, NaOH, H2SO4, O2)

ตารางที่ ก.2 Cause and Effect Matrixในการจัดลาดับความสาคัญปัจจัยนาเข้าที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวม

ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ																
สรุปจากแบบสอบถาม : ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ																
ปัจจัย	คะแนน		ประสบการณ์ทำงาน (ปี)													ความคิดเห็นเพิ่มเติม
	คะแนน	%	15	11	5	4	9	15	12	7	3	5	8	2	10	
Man																
พนักงานไม่ได้รับการฝึกอบรม	13	2%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
พนักงานตั้งค่าการผลิตผิด	21	2%	3	3	1	1	1	3	3	1	1	1	1	1	1	
พนักงานขาดประสบการณ์	13	2%	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
พนักงานไม่ปฏิบัติตามเอกสารข้อกำหนด	25	3%	3	3	1	1	3	3	3	1	1	1	1	1	3	
Machine																
ตะแกรง (Screen) ชิ้นไม้สับของชุดต้มเยื่ออุดตัน	19	2%	1	1	1	3	1	3	1	3	1	1	1	1	1	
ท่อน้ำล้างของชุดล้างเยื่อแตก	25	3%	3	1	3	3	1	1	3	1	3	3	1	1	1	
ท่อกรด-ด่างของชุดฟอกเยื่อแตก	23	3%	1	3	3	1	3	1	1	3	1	1	3	1	1	
Material																
สิ่งปลอมปนเข้ามากับชิ้นไม้สับ	27	3%	3	3	1	1	1	1	1	3	1	3	3	3	3	
ปริมาณ %Sulfidity ในระบบต่ำ	29	3%	3	3	1	3	3	1	1	1	1	3	3	3	3	
สายพันธุ์ของชิ้นไม้สับไม่มีการคัดแยก	118	14%	8	10	10	10	10	8	8	8	8	10	10	8	10	Yield ของเนื้อไม้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์แต่ละชนิด
ความชื้นของชิ้นไม้สับต่ำ	71	8%	5	5	5	5	5	5	5	5	5	8	5	5	8	
ขนาดของชิ้นไม้สับไม่เหมาะสม	46	5%	3	1	3	3	3	3	3	3	3	5	3	5	8	

ตารางที่ ก.2 Cause and Effect Matrixในการจัดลาดับความสาคัญปัจจัยนาเข้าที่ส่งผลต่อต้นทุนการผลิตรวม (ต่อ)

ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ																
สรุปจากแบบสอบถาม : ปัจจัยที่คาดว่ามีผลต่อต้นทุนการผลิตรวมของกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ																
ปัจจัย	คะแนน		ประสบการณ์ทำงาน (ปี)													ความคิดเห็นเพิ่มเติม
	คะแนน	%	15	11	5	4	9	15	12	7	3	5	8	2	10	
Material																
อายุของชิ้นไม้สับมากเกินไป	27	6%	1	3	1	3	3	1	3	1	3	3	1	1	3	
ปริมาณ TA (Total alkali as NaOH)ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	42	10%	3	1	1	1	3	3	3	3	3	5	3	5	8	
ปริมาณ EA (Effective alkali as NaOH) ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	112	27%	8	8	8	8	10	8	10	8	8	10	8	8	10	
ปริมาณ CE (Causticity Efficiency)ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	62	15%	3	8	5	3	3	3	3	3	3	5	5	8	10	เกิดการอุดตันของ screen กับทาง RC ต้องเพิ่ม capacity
ปริมาณ SS (Suspended Solid) ในน้ำยาต้มเยื่อไม่เหมาะสม	31	7%	3	1	1	1	3	3	3	3	3	5	1	1	3	เกิดการอุดตันของ screen เกิด Dirt
Method																
ตัวเลขคัปปาในการเดินเครื่องไม่เหมาะสม	89	21%	5	8	5	5	8	8	5	8	8	8	5	8	8	
H-Factor ที่ใช้เดินเครื่องไม่เหมาะสม	29	7%	3	3	3	3	3	1	3	1	3	1	3	1	1	
สถานะความเป็นกรด-ด่างมากเกิน	25	6%	3	3	1	1	1	3	1	3	1	3	1	3	1	
	417															

ภาคผนวก ข

แบบฟอร์มการเก็บข้อมูลในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ ข.1 แบบฟอร์มการเก็บข้อมูลของผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

Run	ปัจจัย			Production bleaching	Total cost	ชิ้นไม้สับ			MP			LP			WL			O2		
	A	B	C	Ton	Baht/Experiment	kg chip	Baht/kg chip	Baht/experiment	kg MP	Baht/kg MP	Baht/experiment	kg LP	Baht/kg LP	Baht/experiment	m^3 WL	Baht/L WL	Baht/experiment	m_3 O^2	Baht/m_3 O^2	Baht/experiment
1	50	120	12.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
2	50	112	12.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
3	50	120	15.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
4	50	116	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
5	25	116	12.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
6	25	116	15.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
7	25	120	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
8	50	116	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
9	75	112	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
10	50	116	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
11	25	112	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
12	50	112	15.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
13	75	116	12.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
14	75	120	14				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	
15	75	116	15.5				2.60			0.90			0.85			300.00			4.90	

ตารางที่ ข.1 แบบฟอร์มการเก็บข้อมูลของผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ (ต่อ)

Run	ปัจจัย			Production bleaching	Total cost	ClO2			SO2			NaOH			H2SO4			H2O2			Uncooked		
	A	B	C	Ton	Baht/Experiment	kg ClO2	Baht/kg ClO2	Baht/experiment	kg SO2	Baht/kg SO2	Baht/experiment	kg NaOH	Baht/kg NaOH	Baht/experiment	kg H2SO4	Baht/kg H2SO4	Baht/experiment	kg H2O2	Baht/kg H2O2	Baht/experiment	kg Uncooked	Baht/kg Uncooked	Baht/experiment
1	50	120	12.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
2	50	112	12.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
3	50	120	15.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
4	50	116	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
5	25	116	12.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
6	25	116	15.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
7	25	120	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
8	50	116	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
9	75	112	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
10	50	116	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
11	25	112	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
12	50	112	15.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
13	75	116	12.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
14	75	120	14				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	
15	75	116	15.5				51.00			1.10			54.00			2.65			11.95			7.00	

ภาคผนวก ค

ตารางเก็บข้อมูลของต้นทุนการผลิตจริงประจำเดือนมิถุนายน 2556

ตารางที่ ค.1 ตารางเก็บข้อมูลของต้นทุนการผลิตจริงประจำเดือนมิถุนายน 2556

วันที่	ต้นทุนการผลิตรวมจากค่าเฉลี่ยในปัจจุบัน	วันที่	ต้นทุนการผลิตรวมจากค่าเฉลี่ยในปัจจุบัน	วันที่	ต้นทุนการผลิตรวมจากค่าเฉลี่ยในปัจจุบัน	วันที่	ต้นทุนการผลิตรวมจากค่าเฉลี่ยในปัจจุบัน	วันที่	ต้นทุนการผลิตรวมจากค่าเฉลี่ยในปัจจุบัน
	บาทต่อตันเยื่อ		บาทต่อตันเยื่อ		บาทต่อตันเยื่อ		บาทต่อตันเยื่อ		บาทต่อตันเยื่อ
1	15,517.06	7	15,804.82	13	15,347.21	19	14,155.37	25	15,647.23
2	15,458.32	8	14,992.33	14	15,828.44	20	16,845.52	26	17,004.15
3	17,930.92	9	15,721.35	15	18,570.12	21	13,261.82	27	17,412.38
4	14,053.02	10	15,010.77	16	15,455.93	22	14,053.02	28	14,588.00
5	14,054.02	11	17,088.24	17	15,425.02	23	14,053.02	29	15,458.32
6	15,071.93	12	15,458.32	18	14,183.74	24	15,458.32	30	15,458.32

ตารางที่ ค.2 ตารางเก็บข้อมูลของความขาวสว่างของเยื่อกระดาษประจำเดือนมิถุนายน 2556

วันที่	ค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษในปัจจุบัน	วันที่	ค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษในปัจจุบัน	วันที่	ค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษในปัจจุบัน	วันที่	ค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษในปัจจุบัน	วันที่	ค่าความขาวสว่างของเยื่อกระดาษในปัจจุบัน
	%		%		%		%		%
1	88.10	7	88.60	13	89.00	19	88.30	25	88.00
2	88.30	8	89.40	14	88.60	20	87.00	26	88.90
3	88.90	9	89.10	15	88.50	21	88.20	27	87.40
4	88.30	10	88.10	16	89.80	22	87.40	28	88.50
5	88.50	11	88.70	17	91.30	23	87.30	29	88.20
6	88.70	12	88.10	18	88.50	24	88.40	30	89.50

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวอภิวรรณ พิชญเดชะ เกิดวันที่ 5 มกราคม 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2550 หลังจากนั้นเข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อมในโรงไฟฟ้าแห่งหนึ่งเป็นเวลา 3 ปี และได้ศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 ปัจจุบัน ทำงานในตำแหน่งวิศวกรสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์แห่งหนึ่ง