

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน  
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 8 ว

ของ

นางรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์

เรื่องที่ 1

การศึกษาวิจัยเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอก

ผู้ดำเนินการ

นางรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์

นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

กลุ่มวิจัยและพัฒนา 3

กองการวิจัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ปี 2537

เอกสารผลงานที่เสนอประเมิน  
เพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์ 8 ว

ของ

นางรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์

เรื่องที่ 1

การศึกษาวิจัยเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอก

ผู้ดำเนินการ

นางรุ่งอรุณ วัฒนวงศ์  
นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

|            |          |
|------------|----------|
| เลขหมู่    | ๐๗ กค    |
|            | ๐๖ ๒๔    |
| เลขทะเบียน | 139๒3    |
| วันที่     | ๒๕/๑๒/๕๙ |

กลุ่มวิจัยและพัฒนา 8

กองการวิจัย

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

ปี 2537

## บทคัดย่อ

การศึกษาวิจัยเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอกนี้ ได้เริ่มศึกษาทดลองโดยการนำเอาออกซิเจนมาใช้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการฟอกเพื่อลดปริมาณคลอรีนในเยื่อให้อยู่ในระดับต่ำสุดก่อนนำไปฟอกต่อในขั้นคลอรีนชัน ขั้นตอนสกัดด้วยด่างและขั้นไฮโปคลอไรท์ ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์ที่จะลดปริมาณการใช้คลอรีนในขั้นคลอรีนชันลงให้ได้มากที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้ โดยยังสามารถคงความขาวสว่างที่ระดับร้อยละ 85 ISO ไว้ได้ วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาทดลองเป็นเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตไม่ฟอกจากโรงงานบริษัทสยามเซลลูโลส จำกัด มีความขาวสว่างเท่ากับร้อยละ 25.8 และมี kappa number เท่ากับ 19.2 สำหรับใช้ศึกษาทดลองในขั้นออกซิเจนและเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตซึ่งผ่านขั้นออกซิเจนแล้วจากโรงงานมีความขาวสว่างเท่ากับร้อยละ 37.8 และมี kappa number เท่ากับ 7.5 สำหรับใช้ศึกษาทดลองการฟอกแบบ  $CE_{po}H$  ผลการศึกษาทดลองพบว่า

1. การนำเอาออกซิเจนมาใช้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการฟอกมีความเหมาะสมมากเพราะนอกจากจะสามารถลดปริมาณคลอรีนในเยื่อลงได้มากแล้วยังช่วยเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้อีกด้วย และจะเพิ่มประสิทธิภาพยิ่งขึ้น เมื่อมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮโครอไซด์ร่วมด้วย ผลจากการทดลอง ณ ที่ระดับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮโครอไซด์ ในช่วงร้อยละ 0-0.5 และ 2-4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ สามารถลด kappa number ของเยื่อลงได้จากเดิมที่ระดับ 19.2 ลงเหลือต่ำสุดที่ระดับ 5.2 หน่วย และเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อจากเดิมที่ระดับร้อยละ 25.8 เป็นที่ระดับร้อยละ 35

2. การใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่อง 2 และ 3 ขั้นตอนแต่เพียงอย่างเดียว (O-O และ O-O-O) และการใช้ออกซิเจนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นที่ 2 และ 3 (O-O<sub>p</sub> และ O-O-O<sub>p</sub>) ไม่มีผลต่อการทำลายความแข็งแรงของเส้นใย แต่การมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าเสริมจะช่วยลดปริมาณคลอรีนได้ดีกว่าการใช้ออกซิเจนแต่เพียงอย่างเดียว

3. เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการใช้ออกซิเจนเพียงขั้นตอนเดียวโดยมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย (O<sub>p</sub>) กับการใช้ออกซิเจนต่อเนื่องแบบ 2 และ 3 ขั้นตอน (O-O และ O-O-O) จะเห็นว่าให้ผลในการลดปริมาณคลอรีนลงได้ไม่แตกต่างกันนัก ดังนั้นการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องจึงอาจไม่มีความจำเป็น เพราะไม่คุ้มค่าทั้งในเชิงพาณิชย์และอุตสาหกรรม

4. การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนเสริมในขั้นการสกัดด้วยด่างสามารถลดปริมาณการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอกลงได้โดยปริมาณคลอรีนที่ลดลงจะมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้เสริม

5. ผลจากการศึกษาทดลองชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้ C/K ratio ที่ระดับ 0.17 นอกจากจะลดปริมาณการใช้คลอรีนลงได้แล้ว ยังได้เยื่อฟอกที่มีความขาวสว่างสูงถึงร้อยละ 85 ISO brightness อีกด้วย

## สารบัญ

หน้า

### บทคัดย่อ

สารบัญตาราง ..... ก

สารบัญภาพ ..... ข

บทที่ 1 คำนำ ..... 1

1. วัตถุประสงค์ ..... 3

1.1 ในชั้นออกซิเจน ..... 3

1.2 ในชั้นคลอรีนชั้น ขึ้นการสกัดด้วยค่าและชั้นไฮโปคลอไรท์ ..... 3

2. แนวทางการดำเนินงาน ..... 4

2.1 การออกแบบการทดลอง ..... 4

2.2 วัสดุดิบ ..... 8

2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ ..... 8

บทที่ 2 วิธีการทดลอง ..... 9

1 การทดลองในชั้นออกซิเจน ..... 9

1.1 การศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮโครกไซด์  
ต่อการลดปริมาณลิกนินในชั้นออกซิเจน ..... 9

1.2 การศึกษาผลการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องต่อการลดปริมาณลิกนิน ..... 10

2 การทดลองในชั้นคลอรีนชั้น ขึ้นการสกัดด้วยค่าและชั้นไฮโปคลอไรท์ ..... 11

2.1 การฟอกชั้นคลอรีนชั้น ..... 11

2.2 ขึ้นการสกัดด้วยค่า โดยมีการใช้ออกซิเจนและ  
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย ..... 12

2.3 ชั้นไฮโปคลอไรท์ ..... 13

บทที่ 3 ผลการทดลอง ..... 15

1. ชั้นออกซิเจน ..... 15

2. ชั้นคลอรีนชั้น ขึ้นการสกัดด้วยค่าและชั้นไฮโปคลอไรท์ ..... 17



|                                                           | หน้า |
|-----------------------------------------------------------|------|
| บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง .....                         | 20   |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....                              | 26   |
| คำขอบคุณ .....                                            | 42   |
| เอกสารอ้างอิง .....                                       | 43   |
| ภาคผนวก ก คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ ..... | 45   |
| ภาคผนวก ข การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล .....            | 49   |

## สารบัญตาราง

หน้า

### ตารางที่

|    |                                                                                                                     |    |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | แสดงการทดลองแบบ $3^2$ factorial design ในชั้นออกซิเจน ( $O_p$ ) .....                                               | 5  |
| 2  | แสดงการทดลองแบบ $2^3$ CCD ในชั้นการฟอกแบบ $CE_{POH}$ .....                                                          | 7  |
| 3  | แสดงสภาวะการฟอกในชั้นออกซิเจน .....                                                                                 | 9  |
| 4  | แสดงสภาวะการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตในชั้นคลอรีนชั้น .....                                                              | 11 |
| 5  | แสดงสภาวะการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตในชั้นการสกัดด้วยด่าง .....                                                         | 12 |
| 6  | แสดงสภาวะการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตชั้นแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ .....                                                       | 13 |
| 7  | แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟต<br>หลังผ่านการฟอกเยื่อในชั้นออกซิเจน ( $O_p$ ) .....              | 15 |
| 8  | แสดงสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟต<br>ที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง.....                     | 16 |
| 9  | แสดงผลการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตด้วยคลอรีนในชั้นคลอรีนชั้น .....                                                       | 17 |
| 10 | แสดงผลการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตในชั้นการสกัดด้วยด่าง<br>โดยมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนร่วมด้วย (Epo)..... | 18 |
| 11 | แสดงผลการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตในชั้นไฮโปคลอไรท์ .....                                                                | 19 |

## สารบัญภาพ

หน้า

### ภาพที่

|       |                                                                                                                               |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | แสดงช่วงของ C/K ratio ที่ทำให้เกิดสาร dioxin.....                                                                             | 27 |
| 2     | แสดงอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮเดียมไฮดรอกไซด์<br>ในชั้นออกซิเจนต่อค่า kappa number.....                             | 28 |
| 3     | แสดงอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และไฮเดียมไฮดรอกไซด์<br>ในชั้นออกซิเจนต่อค่า brightness .....                              | 29 |
| 4     | แสดงการลดปริมาณลิกนินในเยื่อไม้ไม่ขัดฟัด<br>ที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง .....                                       | 30 |
| 5A    | แสดงค่า tear index ของเยื่อไม้ไม่ขัดฟัด<br>ที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง .....                                        | 31 |
| 5B    | แสดงค่า tensile index ของเยื่อไม้ไม่ขัดฟัด<br>ที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง .....                                     | 31 |
| 6     | แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CEpo kappa number และ yellowness ของเยื่อ<br>ไม้ไม่ขัดฟัดหลังผ่านการฟอกในขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง ..... | 32 |
| 7     | แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง brightness และ C/K ratio<br>ของเยื่อฟอกที่ได้ (แบบ OCEpoH) .....                                      | 33 |
| 8a-8d | แสดงผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และคลอรีน<br>ต่อค่า brightness .....                                                            | 34 |
| 9a-9d | แสดงผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และคลอรีน<br>ต่อค่า yellowness .....                                                            | 38 |

# บทที่ 1

## คำนำ

ปัจจุบันการทำลายสิ่งแวดล้อมนับวันจะทวีความรุนแรงขึ้นเป็นลำดับ ซึ่งสืบเนื่องมาจากสาเหตุหลายประการด้วยกันทั้งจากการเผาไม้ทำลายป่า การเผาขยะหรือสิ่งปฏิกูล รวมทั้งการปล่อยน้ำเสียและสารพิษจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ลงสู่แม่น้ำลำคลองและพื้นดิน ซึ่งนับวันจะเพิ่มมากขึ้นตามการขยายตัวของอุตสาหกรรม

อุตสาหกรรมกระดาษเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่ได้รับการพิจารณาว่ามีผลกระทบและทำลายสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมากทั้งในแง่การใช้ทรัพยากรธรรมชาติและการปล่อยของเสียออกมามทั้งในรูปของแข็งและของเหลวหรือน้ำทิ้ง โดยเฉพาะน้ำทิ้งในขั้นตอนการผลิตเยื่อฟอกขาวซึ่งต้องผ่านกระบวนการฟอกเพื่อเปลี่ยนเยื่อสีน้ำตาลให้เป็นสีขาว ซึ่งส่วนใหญ่จะต้องใช้สารเคมี เช่น คลอรีน (elemental chlorine) และสารประกอบคลอรีน ในกระบวนการฟอกดังกล่าวได้ก่อให้เกิดสารประกอบที่จัดเป็นสารพิษหลายตัว เช่น Dioxin และ Adsorbable organic halogen compounds (AOX) สารพิษเหล่านี้จะถูกปล่อยออกมาพร้อมกับน้ำทิ้งของโรงงานเข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ หากโรงงานไม่มีระบบบำบัดน้ำเสียที่ดีแล้วน้ำทิ้งเหล่านี้จะส่งผลกระทบทำลายสิ่งแวดล้อมอย่างรุนแรงทำให้แม่น้ำลำคลองที่รองรับน้ำเสียเกิดการเน่าเหม็นจนสัตว์น้ำไม่อาจดำรงชีวิตอยู่ได้ นอกจากจะทำลายระบบนิเวศของสัตว์น้ำแล้วยังส่งผลกระทบต่อการดำรงชีวิตของผู้นับล้านคนจำนวนมากที่อาศัยประโยชน์จากแหล่งน้ำนั้นอีกด้วย

กระบวนการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิม (conventional bleaching) ซึ่งยังคงมีใช้อยู่ในประเทศไทย เป็นการฟอกแบบ C E H ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนการฟอกที่เรียงลำดับกัน ดังนี้

ขั้นคลอรีนชัน (chlorination stage, C)

ขั้นการสกัดด้วยด่าง (alkali extraction stage, E) และ

ขั้นไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite stage, H)

ขั้นตอนการฟอกที่ทำให้เกิดสารพิษมากที่สุด คือ ขั้นคลอรีนชัน เนื่องจากในขั้นตอนนี้สารเคมีที่ใช้คือ คลอรีน (elemental chlorine) ซึ่งได้จากการผ่านแก๊สคลอรีนลงในน้ำแล้วนำน้ำคลอรีนที่ได้ไปฟอกเยื่อในระหว่างการฟอกคลอรีนจะทำปฏิกิริยากับลิกนินให้สารประกอบอินทรีย์คลอรีน (chlorinated organic compound) ออกมา มีชื่อเรียกว่า AOX<sup>4)</sup> (adsorbable organic halogen compounds) และ Dioxin (polychlorinated dibenzo-p-dioxin) ในขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยคลอรีนจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมี 2 แบบ คือ ปฏิกิริยาการแทนที่ (substitution) และปฏิกิริยาการเติม (addition) คลอรีนจะทำปฏิกิริยาเฉพาะลิกนิน (lignin) และสารสกัด (extractives) เท่านั้น แต่ไม่ทำปฏิกิริยากับ เซลลูโลส (cellulose) ในปฏิกิริยาการแทนที่คลอรีนจะเข้าแทนที่ในฟังก์ชันกรุปของลิกนินทำให้โครงสร้างของลิกนินแตกกระจายตัวออกเป็นสารประกอบอินทรีย์คลอรีน ซึ่งประกอบด้วยคลอรีนอะตอมตั้งแต่ 1,2,3 หรือมากกว่า เรียกสารประกอบนี้ว่า AOX ซึ่งเป็นสารพิษที่เกิดขึ้นในกระบวนการฟอกและถูกปล่อยออกมาทางน้ำทิ้งของโรงงาน ส่วนในปฏิกิริยาการเติมคลอรีนจะสร้างพันธะ

โควาเลนต์ (covalent bond) กับกลินินและสร้างสารประกอบใหม่ขึ้นมาเป็น Dioxin ซึ่งสารประกอบนี้ยากต่อการทำลายไม่ว่าจะใช้การไฮโดรไลซิส (hydrolysis) หรือดิสโซลูชัน (dissolution) สารประกอบพวกนี้ส่วนใหญ่จะยังคงตกค้างอยู่ในเยื่อในรูปของ chlorinated dioxin สารประกอบทั้ง 2 ชนิดนี้ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก

จากการตระหนักถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากขั้นตอนการฟอกเยื่อด้วยคลอรีนทำให้มีการเริ่มต้นค้นคว้าหาเทคโนโลยีการผลิตเยื่อที่ปราศจากการใช้คลอรีนขึ้นมา โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ), ออกซิเจน ( $O_2$ ), และโอโซน ( $O_3$ ) เข้ามาแทนที่คลอรีนในกระบวนการฟอกเยื่อผลที่ได้รับจะทำให้ได้เยื่อที่ปราศจากคลอรีน นอกจากนี้ยังช่วยลดปริมาณ Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), AOX และความเข้มข้นของสีในน้ำทิ้งของโรงงานได้อีกด้วย

ในปัจจุบันจึงได้มีความพยายามลดการใช้คลอรีนในกระบวนการฟอก โดยนำเอาออกซิเจน, ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโอโซนมาใช้แทนคลอรีน โดยมีขั้นตอนการฟอกเป็นแบบหลายขั้นตอน เช่น O-Z-P หรือ O-P-Z-P โดยที่

ชั้นออกซิเจน (Oxygen stage, O)

ชั้นโอโซน (Ozone stage, Z) และ

ชั้นเปอร์ออกไซด์ (Peroxide stage, P)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าไม่มีการใช้ธาตุคลอรีนหรือสารประกอบคลอรีนในกระบวนการฟอกเยื่อ เยื่อที่ได้เรียกว่า "เยื่อที่ปราศจากคลอรีน" (total chlorine free pulp, TCFP) หรืออาจจะเหลือเฉพาะการใช้สารประกอบคลอรีนซึ่งเรียกเยื่อที่ได้ว่า "เยื่อที่ปราศจากธาตุคลอรีน" (element chlorine free pulp, ECFP) ซึ่งในประเทศไทยเดิมที่ยังไม่มีการผลิตเยื่อทั้งสองชนิดนี้เพราะเกี่ยวข้องกับข้อจำกัดทั้งทางด้านเทคโนโลยีและเงินทุน แต่ในปัจจุบันจากกระแสแรงกดดันทางด้านอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้มีโรงงานบางแห่ง เช่น บริษัทโรงงานอุตสาหกรรมกระดาษบางปะอิน จำกัด และบริษัทสยามเซลลูโลส จำกัด เป็นต้น ได้พยายามที่จะลดปริมาณการใช้ธาตุคลอรีนในชั้นคลอรีนชั้นและสารประกอบคลอรีนในชั้นไฮโปคลอไรท์ โดยใช้ออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าช่วยหรือเปลี่ยนเป็นใช้คลอรีนไดออกไซด์แทนธาตุคลอรีนและสารประกอบคลอรีน แต่โดยทั่วไปแล้วประมาณร้อยละ 80 ของโรงงานที่มีอยู่ภายในประเทศยังคงใช้วิธีการฟอกเยื่อแบบดั้งเดิม ดังนั้นกลุ่มวิจัยและพัฒนา 3 จึงเห็นว่าการศึกษาวิจัยเพื่อนำไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนเข้ามาช่วยในขั้นตอนต่างๆ ของการฟอกเยื่ออาจเป็นสิ่งจูงใจและเป็นการให้ข้อมูลทางด้านวิชาการแก่โรงงานต่างๆ ภายในประเทศให้ลดปริมาณการใช้สารคลอรีนในการฟอกเยื่อลง

ในการศึกษาวิจัยนี้จึงได้พยายามศึกษาเพื่อลดปริมาณการใช้คลอรีนในขั้นตอนคลอรีนชั้น โดยการลดอัตราส่วนของ C/K ลง เนื่องจากปริมาณการใช้คลอรีนจะมีความสัมพันธ์กับค่า kappa number ของเยื่อก่อนฟอก โดยคำนวณปริมาณการใช้คลอรีนในการฟอก

จากสูตร

$$\begin{aligned}\text{ปริมาณคลอรีน, ร้อยละ} &= \text{kappa number} \times 0.22 \\ C/K &= 0.22 \\ \text{เมื่อ ; } C &= \text{chlorine charge} \\ K &= \text{kappa number}\end{aligned}$$

การใช้คลอรีนปริมาณสูงในการฟอกเยื่อจะทำให้เกิด Dioxin มากขึ้น จากสูตรข้างต้นจะเห็นว่า C/K ratio มีค่าเท่ากับ 0.22 ซึ่งเป็นค่าที่นิยมใช้กันมานาน ค่า C/K ratio อาจปรับให้สูงขึ้นถึง 0.3 ก็ได้หากต้องการให้ได้เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงมาก แต่ต้องใช้ปริมาณคลอรีนมากขึ้นซึ่งจะส่งผลเสียทำให้ความแข็งแรงของเยื่อลดลงและทำให้เกิด Dioxin มากขึ้น มีรายงานการศึกษาวิจัย<sup>11)</sup> พบว่า หากค่า C/K ratio ต่ำกว่า 0.17 จะไม่พบ Dioxin (ภาพที่ 1) แต่เยื่อที่ได้จะมีความขาวสว่างลดลง

ในการทดลองนี้ได้เริ่มต้นด้วยการใช้ออกซิเจนเพื่อช่วยแยกลิกนินออกจากเยื่อ (Pulp delignification) ซึ่งเรียกขั้นตอนนี้ว่าขั้นตอนออกซิเจน (oxygen cooking stage, O) นอกจากนี้ยังมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ลงในขั้นตอนออกซิเจนด้วย (O<sub>p</sub>) เพื่อช่วยเสริมในการลดค่า kappa number และเพิ่มความขาวสว่าง แล้วฟอกด้วยชั้นคลอรีนชั้น ตามด้วยขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง ซึ่งในขั้นการสกัดด้วยด่างนี้จะมีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนควบคู่กันแล้วฟอกด้วยแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย

การฟอกทั้งหมดจะเป็นการฟอกแบบ 4 ขั้นตอน เรียงตามลำดับดังนี้ O-C-E<sub>po</sub>-H

## 1. วัตถุประสงค์

### 1.1 ขั้นตอนออกซิเจน (Oxygen Cooking Stage)

1.1.1 ศึกษาผลการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนออกซิเจนต่อการลดปริมาณลิกนินและเพิ่มความขาวสว่างในเยื่อไม้ไผ่ไม่ฟอก (unbleached bamboo pulp)

1.1.2 ศึกษาผลการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องกันมากกว่า 1 ขั้นตอนต่อการลดค่า kappa number หรือปริมาณลิกนินในเยื่อ การเพิ่มความขาวสว่างและการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางเชิงกลของเยื่อ

### 1.2 ขั้นตอนคลอรีนชั้น ขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง และชั้นไฮโปคลอไรท์

1.2.1 ศึกษาผลของการใช้ออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เสริมในขั้นการสกัดด้วยด่าง (E<sub>po</sub>) ต่อการลดปริมาณการใช้คลอรีน (elemental chlorine) ในการฟอกเยื่อ

1.2.2 ศึกษาเพื่อหาค่า C/K ratio ต่ำสุดที่เป็นไปได้ที่จะทำให้อัตราการฟอกเยื่อมีการใช้ปริมาณคลอรีนต่ำสุดและให้เยื่อฟอกขาวที่มีค่าความขาวสว่างไม่น้อยกว่าร้อยละ 85 ISO brightness

## 2. แนวทางการดำเนินงาน

เพื่อให้การศึกษาวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดแนวทางการดำเนินงานที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้

### 2.1 การออกแบบการทดลอง (experimental design)

ผู้วิจัยเลือกใช้วิธีออกแบบการทดลองเชิงสถิติ เพื่อความสะดวกในการหาความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างตัวแปรที่ต้องการจะศึกษา รวมทั้งผลของปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างตัวแปรดังกล่าวกับสมบัติเยื่อ ซึ่งการทดลองแบบกำหนดตัวแปรทีละตัว (one variable at a time) ไม่สามารถให้ข้อมูลดังกล่าวได้ นอกจากนี้ยังสามารถเปรียบเทียบอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ และช่วยให้ทราบถึงข้อสำคัญทางสถิติของตัวแปรเหล่านั้นด้วยและยังสามารถช่วยประหยัดเวลาในการทดลองเมื่อเทียบกับวิธีกำหนดตัวแปรทีละตัว

เนื่องจากในการศึกษาวิจัยนี้มีตัวแปรหรือปัจจัยที่ต้องการจะศึกษามากกว่า 1 ตัวแปรและแต่ละตัวแปรจะมีระดับของการทรีตเมนต์หลายระดับจึงต้องเลือกใช้การทดลองแบบแฟกทอเรียล (factorial design)<sup>6)</sup> โดยใช้แบบ  $3^2$  ( $3^k$  factorial design) ในการทดลองขั้นออกซิเจน และเลือกใช้การทดลองแบบ  $2^3$  CCRD (central composite rotatable design)<sup>6)</sup> ในขั้นการฟอกย้อมแบบ C-E<sub>po</sub>-H ดังนี้

#### 2.1.1 การฟอกในขั้นออกซิเจน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์

ร่วมด้วย (Op)

ในขั้นออกซิเจนนี้ได้เลือกการทดลองเป็นแบบ  $3^2$  factorial design โดยที่  $3^2$  หมายความว่ามีความจำเป็นต้องจะศึกษา 2 ตัว คือ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ แต่ละตัวแปรจะมี 3 ระดับทรีตเมนต์ ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้กำหนดระดับทรีตเมนต์ของปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นร้อยละ 0, 0.25, 0.50 และร้อยละ 2, 3, 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ โดยแต่ละทรีตเมนต์ที่เกิดขึ้นจะเป็นการรวมระหว่างระดับต่างๆ ของตัวแปร ดังนั้นขนาดของการทดลองจึงเท่ากับ  $9 (3 \times 3)$  factorial points หรือจุดการทดลองหรือทรีตเมนต์ แต่ในการทดลองจำเป็นต้องพิสูจน์ความซ้ำของการทดลอง โดยทำการทดลองซ้ำ 3 จุดการทดลอง ณ ที่ทรีตเมนต์ระดับกลาง ซึ่งหมายถึงระดับที่มีปริมาณการใช้ปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 0.25 และร้อยละ 3 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ เรียกจุดการทดลองทั้ง 3 จุดนี้ว่า center points หรือจุดศูนย์กลาง ดังนั้นในการออกแบบการทดลองแบบ  $3^2$  factorial design นี้ จึงมีจุดการทดลองรวมกันทั้งสิ้นเท่ากับ 12 จุดหรือ 12 ชุดการทดลองนั่นเอง (ดูภาคผนวก ข) และเพื่อสะดวกในการปฏิบัติงานจึงได้ใช้ค่าแสดงปริมาณการใช้สารเคมีต่อร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเป็นเลขรหัส (coded value) 3 ตัว คือ -1, 0, +1



การแสดงค่าปริมาณการใช้สารเคมีด้วยเลขรหัส เป็นดังนี้

| เลขรหัส | ปริมาณการใช้สารเคมี, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง |                   |
|---------|--------------------------------------------------|-------------------|
|         | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์                             | โซเดียมไฮดรอกไซด์ |
| - 1     | 0                                                | 2                 |
| 0       | 0.25                                             | 3                 |
| + 1     | 0.50                                             | 4                 |

จะเห็นว่าในแต่ละจุดการทดลองหรือทรีตเมนต์จะประกอบด้วยระดับต่างๆ ของทุกตัวแปรที่จะศึกษาทดลอง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงจำนวนจุดการทดลองและปริมาณสารเคมีที่ใช้ตามการทดลองแบบ  $3^2$  factorial design

| การทดลองชุดที่ | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ |        | โซเดียมไฮดรอกไซด์ |        |
|----------------|----------------------|--------|-------------------|--------|
|                | เลขรหัส              | ร้อยละ | เลขรหัส           | ร้อยละ |
| 1              | -1                   | 0      | -1                | 2      |
| 2              | -1                   | 0      | 0                 | 3      |
| 3              | -1                   | 0      | +1                | 4      |
| 4              | 0                    | 0.25   | -1                | 2      |
| 5              | 0                    | 0.25   | 0                 | 3      |
| 6              | 0                    | 0.25   | +1                | 4      |
| 7              | +1                   | 0.50   | -1                | 2      |
| 8              | +1                   | 0.50   | 0                 | 3      |
| 9              | +1                   | 0.50   | +1                | 4      |
| 10             | 0                    | 0.25   | 0                 | 3      |
| 11             | 0                    | 0.25   | 0                 | 3      |
| 12             | 0                    | 0.25   | 0                 | 3      |

ในแต่ละจุดการทดลองตั้งแต่ที่ 1 - 9 จะประกอบด้วยปริมาณการใช้ในระดับต่างๆ ของแต่ละตัวแปร ยกตัวอย่าง เช่น จุดการทดลองที่ 1 ประกอบด้วยปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับร้อยละ 0 ( เลขรหัส -1) และ 2 ( เลขรหัส -1) ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ แต่สำหรับจุดการทดลองที่ 10-12 จะประกอบด้วยปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ระดับกลาง ซึ่งเท่ากับร้อยละ 0.25 และ ร้อยละ 3 ตามลำดับ เพื่อพิสูจน์ความซ้ำของการทดลอง

### 2.1.2 ขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่างและขั้นตอนไฮโปคลอไรท์ (CE<sub>POH</sub> stage)

นำเยื่อที่ผ่านขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่างและขั้นตอนไฮโปคลอไรท์ ซึ่งได้มาจากโรงงานมาฟอกด้วยขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่างและขั้นตอนไฮโปคลอไรท์ โดยมีตัวแปรที่จะศึกษา 3 ตัว คือ สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนต่างๆ ของการฟอก เช่น คลอรีนในขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่าง ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่างและคลอรีนในขั้นตอนไฮโปคลอไรท์ โดยเลือกแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล  $2^k$  CCRD (central composite rotatable design)<sup>6)</sup> โดยออกแบบเป็น  $2^3$  CCRD ซึ่งหมายถึงมีตัวแปรที่ต้องการศึกษา 3 ตัวและในแต่ละตัวแปรมีระดับ (level) ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็น 2 ระดับ แทนด้วย (เลขรหัส+ 1 และเลขรหัส-1) ของแต่ละตัวแปร ดังนั้นขนาดของการทดลองจึงเท่ากับ  $8$  ( $2 \times 2 \times 2 = 8$ ) จุดการทดลอง แต่เนื่องจากการทดลองแฟคทอเรียลแบบ CCRD ก็ต้องกำหนดจุดการทดลองที่ centre point (แทนด้วย เลขรหัส 0) เพื่อเป็นการ estimating errors เช่นกัน จึงมีจุดการทดลองที่ centre point อีก 8 จุดการทดลอง แต่ในการปฏิบัติงานจุดทดลองที่ centre point กระทำเพียง 6 จุดการทดลองก็สามารถ estimating errors ได้ เป็นการลดเวลาในการปฏิบัติงานลงและในขณะเดียวกันจำเป็นต้องประกอบจุดการทดลองเพิ่มเติมที่จุด augmented point (แทนด้วยเลขรหัส  $+\alpha$  และ  $-\alpha$ ) ซึ่งเป็นการขยายขอบเขตการศึกษาจาก 2 ระดับเดิม เพื่อหาความสัมพันธ์อันดับสอง (สมการ  $2^{nd}$  design) สำหรับการดูแนวโน้มของผลการทดลองที่ได้ โดยที่ระยะห่างของ  $\pm \alpha$  จะห่างจากจุด centre point เท่ากันคือเท่ากับ  $1.68$  ( $2^{1/4} = 2^{3/4} = 1.6818 \sim 1.68$ ) จุดการทดลองจึงเพิ่มขึ้นอีก 6 จุดการทดลอง (ดูภาคผนวก ข) รวมจุดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ  $20$  ( $8+6+6 = 20$ ) และเพื่อสะดวกในการปฏิบัติงานจึงได้ใช้ค่าแสดงปริมาณการใช้สารเคมีต่อร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้งเป็นเลขรหัส (coded value) .

การแสดงค่าปริมาณการใช้สารเคมีด้วยเลขรหัส เป็นดังนี้

| เลขรหัส   | ปริมาณการใช้สารเคมี, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง |                                                     |                                |
|-----------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------|
|           | คลอรีน<br>(ขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่าง)            | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์<br>(ขั้นตอนการสกัดด้วยค่าต่าง) | คลอรีน<br>(ขั้นตอนไฮโปคลอไรท์) |
| $-\alpha$ | 0.8                                              | 0                                                   | 0.5                            |
| $-1$      | 1.043                                            | 0.162                                               | 0.702                          |
| 0         | 1.4                                              | 0.4                                                 | 1.0                            |
| $+1$      | 1.757                                            | 0.638                                               | 1.298                          |
| $+\alpha$ | 2.0                                              | 0.8                                                 | 1.5                            |

จะเห็นว่าปริมาณการใช้สารเคมีจะสะดวกมากขึ้นเมื่อกำหนดเป็นเลขรหัส (ดูการคำนวณให้เลขรหัสตรงกับปริมาณการใช้สารเคมีในภาคผนวก ข)

การออกแบบการทดลองในการทดลองขั้นนี้ตามตารางที่ 2



ตารางที่ 2 แสดงจำนวนจุดการทดลองและปริมาณสารเคมีที่ใช้ของแต่ละตัวแปรตามการทดลองแบบ  $2^3$  CCD

| การทดลอง<br>ชุดที่ | ขั้นคลอรีนชัน ( C ) |        | ขั้นการสกัดด้วยด่าง ( $E_{PO}$ ) |        | ขั้นไฮโปคลอไรท์ ( H ) |        |
|--------------------|---------------------|--------|----------------------------------|--------|-----------------------|--------|
|                    | ปริมาณคลอรีน        |        | ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์       |        | ปริมาณคลอรีน          |        |
|                    | เลขรหัส             | ร้อยละ | เลขรหัส                          | ร้อยละ | เลขรหัส               | ร้อยละ |
| 1                  | -1                  | 1.043  | +1                               | 0.638  | -1                    | 0.702  |
| 2                  | -1                  | 1.043  | -1                               | 0.162  | -1                    | 0.702  |
| 3                  | +1                  | 1.757  | +1                               | 0.638  | -1                    | 0.702  |
| 4                  | +1                  | 1.757  | -1                               | 0.162  | -1                    | 0.702  |
| 5                  | -1                  | 1.043  | +1                               | 0.638  | +1                    | 1.298  |
| 6                  | -1                  | 1.043  | -1                               | 0.162  | +1                    | 1.298  |
| 7                  | +1                  | 1.757  | +1                               | 0.638  | +1                    | 1.298  |
| 8                  | +1                  | 1.757  | -1                               | 0.162  | +1                    | 1.298  |
| 9                  | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | - $\alpha$            | 0.5    |
| 10                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | + $\alpha$            | 1.5    |
| 11                 | 0                   | 1.4    | - $\alpha$                       | 0      | 0                     | 1.0    |
| 12                 | 0                   | 1.4    | + $\alpha$                       | 0.8    | 0                     | 1.0    |
| *13                | - $\alpha$          | 0.8    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 14                 | + $\alpha$          | 2.0    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 15                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 16                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 17                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 18                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 19                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |
| 20                 | 0                   | 1.4    | 0                                | 0.4    | 0                     | 1.0    |

แบบการทดลอง  $2^3$  CCD จะใช้จำนวนจุดการทดลองเท่ากับ 20 ในแต่ละจุดการทดลองตั้งแต่จุดที่ 1-20 จะประกอบด้วยปริมาณการใช้สารเคมีในระดับต่างๆ ของทั้ง 3 ตัวแปร จุดการทดลองที่ 15-20 ประกอบด้วยปริมาณการใช้สารเคมีที่ระดับกึ่งกลางของทุกๆ ตัวแปรเพื่อพิสูจน์ความซ้ำของการทดลอง ดังนั้นในการทดลองฟอกแต่ละจุดการทดลองจะมีการเติมสารเคมีต่างๆ ตามระดับปริมาณการใช้ที่ระบุไว้ในตารางนี้ ยกตัวอย่างเช่น ที่จุดการทดลองหรือชุดการทดลองที่ 13 จะมีการเติมปริมาณสารเคมีในขั้นคลอรีนชัน ขั้นการสกัดด้วยด่างและขั้นไฮโปคลอไรท์ เท่ากับร้อยละ 0.8, 0.4 และ 1.0 ของน้ำหนักเยื่อแห้งตามลำดับ และอธิบายในความหมายเดียวกันในชุดการทดลองหมายเลขอื่น

## 2.2 วัตถุดิบ วัตถุดิบที่จะใช้ในการฟอก ได้แก่ เยื่อและสารเคมี

2.2.1 เยื่อ เยื่อที่ใช้เป็นเยื่อเคมีของบริษัทสยามเรลลูโลส จำกัด ซึ่งผลิตจากไม้ไผ่ด้วยกระบวนการผลิตเยื่อแบบซัลเฟต (sulfate process) 2 ชนิด คือ

2.2.1.1 เยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตไม่ฟอก (unbleached pulp) เยื่อที่ได้รับสีค่อนข้างคล้ำมีค่าความขาวสว่างเริ่มต้นร้อยละ 25.8 และค่า kappa number = 19.2 เยื่อชนิดนี้ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการศึกษาวิจัยในขั้นตอนออกซิเจน (oxygen delignification stage , O)

2.2.1.2 เยื่อไม้ไผ่ซัลเฟต ซึ่งผ่านการฟอกด้วยออกซิเจน (bamboo oxygen pulp) จากโรงงานแล้ว เยื่อที่ได้รับสีน้ำตาลเหลืองอ่อน มีค่าความขาวสว่างร้อยละ 37.8 และค่า kappa number = 7.5 เยื่อชนิดนี้ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการศึกษาวิจัยในขั้น C - E<sub>PO</sub> - H

## 2.2.2 สารเคมี การฟอกในแต่ละขั้นตอนใช้สัญลักษณ์และเรียกชื่อตามสารเคมีที่ใช้ ดังนี้

| ขั้นตอนการฟอก           | สารเคมี              | สัญลักษณ์ |
|-------------------------|----------------------|-----------|
| chlorination stage      | chlorine             | C         |
| alkali extraction stage | sodium hydroxide     | E         |
| hypochlorite stage      | calcium hypochlorite | H         |
| peroxide stage          | hydrogen peroxide    | P         |
| oxygen stage            | oxygen               | O         |

หมายเหตุ O<sub>P</sub> หมายถึง ขั้นตอนออกซิเจนที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปด้วย

E<sub>PO</sub> หมายถึง ขั้นการสกัดด้วยด่างที่มีการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนลงไปด้วย

## 2.3 อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ ได้แก่

- |                                                                         |                             |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| - อ่างควบคุมอุณหภูมิ(water bath)                                        | - เครื่องทำแผ่นทดสอบมาตรฐาน |
| - เครื่องดูดสูญญากาศ(vacuum pump)                                       | - เครื่องวัดค่าพีเอ็นเอส    |
| - ถังพลาสติกทนความร้อน                                                  | - เครื่องทดสอบแรงดึง        |
| - เครื่องกระจายเยื่อ(disintegrator)                                     | - เครื่องทดสอบแรงดันทะลุ    |
| - ตู้อบสูญญากาศ(vacuum oven)                                            | - เครื่องทดสอบความขาวสว่าง  |
| - กรวยกรองแบบแก้ว(fritted glass buchner funnel)                         | ใช้แยกน้ำออกจากเยื่อ        |
| - เครื่องให้ความร้อนด้วย polyethylene glycol (polyethylene glycol bath) |                             |
| - หม้อต้มเยื่อ(autoclave) ขนาดความจุ 2.5 ลิตร                           |                             |
| - เครื่องชั่งละเอียด                                                    |                             |



## บทที่ 2

### วิธีการทดลอง

#### 1. การทดลองในชั้นออกซิเจน

ใช้เยื่อไมไฟเซลเฟดไม่ฟอกที่ได้รับจากโรงงาน มีค่า kappa number เท่ากับ 19.2 และมีค่าความขาวสว่างร้อยละ 25.8 แยกการศึกษาในชั้นออกซิเจนเป็น 2 กรณี คือ

##### 1.1 การศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อการลดปริมาณลิกนินในชั้นออกซิเจน ( $O_p$ )

[สภาวะการฟอกเยื่อในชั้นออกซิเจน กำหนดตามตารางที่ 3 ]

ตารางที่ 3 แสดงสภาวะการฟอกเยื่อไมไฟเซลเฟดในชั้นออกซิเจน( $O_p$ )

| สภาวะการฟอกในชั้นออกซิเจน                                                                                                   |               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| น้ำหนักเยื่อ, กรัมน้ำหนักอบแห้ง                                                                                             | 200           |
| ความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ                                                                                   | 20            |
| อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส                                                                                                      | 110           |
| เวลาที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส, นาที                                                                                      | 60            |
| ปริมาณออกซิเจนอัดด้วยก๊าซออกซิเจนที่ 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 3 นาที, หลังจาก evacuated ที่ -800 มิลลิบาร์ (mbar ) | excess        |
| ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง                                                                     | 0, 0.25, 0.50 |
| ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง                                                                        | 2,3,4         |
| ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟต, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง                                                                         | 1             |

1.1.1 ชั่งเยื่อ 200 กรัมน้ำหนักอบแห้ง (จำนวน 12 ชุดตามแบบทดลองที่กำหนดตามตารางที่1) แขน้ำทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วนำไปกระจายด้วยเครื่องกระจายเยื่อ (Tappi standard disintegrator)

1.1.2 นำเยื่อจากข้อ 1.1.1 ไปแช่น้ำออกโดยใช้กรวยกรองแบบแก้ว (fitted glass) ที่ต่อเข้ากับเครื่องดูดสูญญากาศเพื่อดูดน้ำออกแล้วนำเยื่อที่ได้ไปรีดน้ำออกอีกครั้งหนึ่งโดยใช้กระดาษซับและเครื่องอัดแผ่นที่มีแรงอัด 3.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อให้แผ่นเยื่อมีความชื้น (consistency) ประมาณร้อยละ 30-35

1.1.3 ใช้ปิเปตดูดสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตามปริมาณที่กำหนดในตารางที่ 3 ( ซึ่งกำหนดตามแผนการทดลองในตารางที่ 1 ) แล้วปล่อยลงบนแผ่นเยื่อให้ทั่วอย่างสม่ำเสมอทั้งด้านหน้าและด้านหลัง ตามลำดับ

1.1.4 ใช้ปิเปตดูดสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แล้วปฏิบัติเช่นเดียวกับข้อ 1.1.3 และหลังจากเติมตามขั้นตอนนี้แล้วแผ่นเยื่อที่ได้จะมีความชื้นเท่ากับร้อยละ 20 ตรงตามที่กำหนดไว้ในตารางที่ 3

1.1.5 นำแผ่นเยื่อที่ได้ใส่ลงในหม้อต้มเยื่อ มีขนาดความจุ 2.5 ลิตร ปิดฝาแล้วดูดอากาศออกที่ -800 มิลลิบาร์ โดยใช้สูบลมสูญญากาศ แล้วอัดก๊าซออกซิเจนให้มีความดัน 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ลงไปในหม้อต้มเยื่อประมาณ 3 นาที

1.1.6 นำหม้อต้มเยื่อ จากข้อ 1.1.5 ใส่ลงในเครื่องให้ความร้อนด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอล (polyethylene glycol bath) หม้อต้มจะติดตั้งอยู่บนเพลลาซึ่งหมุนตลอดเวลา ควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 110 องศาเซลเซียส ตลอดช่วงการต้ม

1.1.7 เมื่อครบกำหนดเวลา คือ 60 นาที นำหม้อต้มออกจากเครื่องให้ความร้อนแล้วปิดฝาหม้อต้มเพื่อนำเยื่อออกมาแล้วล้างเยื่อให้สะอาดด้วยน้ำประปาโดยกรองผ่านด้วยกรวยกรองแบบแก้วซึ่งน้ำหนักของเยื่อที่ได้แล้วนำไปหาปริมาณความชื้น เพื่อบันทึกเป็นร้อยละของผลผลิตเยื่อ (yield) ที่ได้

1.1.8 แบ่งเยื่อไปทำแผ่นทดสอบ เพื่อวัดค่าความขาวสว่างตามมาตรฐาน SCAN C-11-75 หลังจากได้แผ่นทดสอบแล้ววัดค่าความขาวสว่างด้วยเครื่อง Elrepho 2000

1.1.9 แบ่งเยื่อไปวิเคราะห์เพื่อหาค่า kappa number ตามมาตรฐาน Tappi T 236

#### **ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7**

#### **1.2 การศึกษาผลการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องต่อการลดปริมาณลิกนิน**

ได้กำหนดลำดับการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องเป็นดังนี้ [(O),(O-O),(O-O<sub>p</sub>),(O-O-O),(O-O-O<sub>p</sub>)]

1.2.1 ชั่งเยื่อ 200 กรัมบนน้ำหนักอบแห้งจำนวน 5 จุด แชน้ำทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงแล้วนำไปกระจายด้วยเครื่องกระจายเยื่อ ( Tappi standard disintegrator )

1.2.2 ดำเนินการทดลองเหมือนกับข้อ 1.1.2 จนถึงข้อ 1.1.9 โดยกำหนดสภาวะการฟอกตามตารางที่ 8 แต่แตกต่างจากการทดลองตามข้อ 1.1 ตรงที่ในขั้นนี้จะกำหนดปริมาณการใช้สารเคมีไว้ที่ระดับเดียวเท่านั้น คือมีปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และแมกนีเซียมซัลเฟตเท่ากับ ร้อยละ 4, 0.5 และ 1 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ

1.2.3 ทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางเคมีตามมาตรฐาน TAPPI STANDARD T414,T404, T403, T236, T525

#### **ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 8**



## 2. การทดลองในชั้นคลอรีนชั้น ขั้นการสกัดด้วยด่าง และชั้นไฮโปคลอไรท์ ( $CE_{POH}$ )

วัตถุดิบที่ใช้ในการฟอกแบบ  $CE_{POH}$  นี้ เป็นเยื่อไม้ไฟซ์ลเฟดที่ผ่านการฟอกชั้นออกซิเจนจากโรงงานมาแล้วมีค่า kappa number เท่ากับ 7.5 และมีค่าความขาวสว่างร้อยละ 37.8 จำนวนชุดการทดลองมีทั้งหมด 20 ชุด

2.1 การฟอกชั้นคลอรีนชั้น (chlorination stage, C) ปริมาณคลอรีนที่ใช้ในการฟอกอยู่ในช่วงร้อยละ 0.8-2.0 ของน้ำหนักอบแห้ง แต่ละชุดการทดลองจะใช้คลอรีนในปริมาณที่กำหนดไว้ในแต่ละหมายเลขของชุดการทดลองตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 ดังนั้นในแต่ละชุดการทดลองจะมีค่า C/K ratio ที่แตกต่างกันตามระดับปริมาณการใช้คลอรีน โดยสามารถคำนวณหาค่า C/K ratio ได้ดังนี้

$$C/K \text{ ratio} = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนที่ใช้}}{\text{kappa number ของเยื่อเริ่มต้น}}$$

ยกตัวอย่างเช่น ที่ชุดการทดลองที่ 13 มีปริมาณการใช้คลอรีนเท่ากับร้อยละ 0.8 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง, เยื่อที่ใช้มีค่า kappa number = 7.5

$$\text{ดังนั้น } C/K \text{ ratio ของชุดการทดลองที่ 13} = 0.8/7.5 = 0.11$$

การคำนวณหาค่า C/K ratio ของชุดการทดลองหมายเลขอื่นใช้วิธีเดียวกัน

(สภาวะการฟอกชั้นคลอรีนชั้น กำหนดตามตารางที่ 4)

### ตารางที่ 4 สภาวะการฟอกเยื่อไม้ไฟซ์ลเฟดในชั้นคลอรีนชั้น (C)

| สภาวะการฟอกเยื่อไม้ไฟซ์ลเฟดในชั้นคลอรีนชั้น |                             |
|---------------------------------------------|-----------------------------|
| น้ำหนักเยื่อ, กรัม/น้ำหนักอบแห้ง            | 150                         |
| ความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ   | 3.5                         |
| อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส                      | 40                          |
| เวลาที่ใช้ในการฟอก, นาที                    | 60                          |
| ปริมาณคลอรีน, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง   | 0.8, 1.043, 1.4, 1.757, 2.0 |

2.1.1 ชั่งเยื่อไม้ไฟซ์ลเฟดที่ผ่านชั้นออกซิเจนมาแล้วจำนวน 20 ชุดหนักชุดละเท่ากับ 150 กรัม/น้ำหนักเยื่ออบแห้ง แต่ละชุดกำกับหมายเลขไว้ตั้งแต่ 1-20 นำเยื่อแต่ละชุดไปกระจายในน้ำด้วยเครื่องกระจายเยื่อ เมื่อเยื่อกระจายตัวดีแล้วจึงนำไปแยกน้ำออกโดยใช้กรวยกรองแบบแก้ว นำแผ่นเยื่อเปียกที่ได้บรรจุในถุงพลาสติกทนความร้อนแล้วเติมน้ำคลอรีนลงไปในแต่ละชุดการทดลอง โดยให้มีปริมาณการใช้คลอรีนของแต่ละชุดการทดลองเป็นไปตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 ปรับความชื้นของน้ำเยื่อให้เท่ากับร้อยละ 3.5 แล้ว



คลุกเคล้าน้ำคลอรีนและเชื้อให้เข้ากันดีหลังจากนั้นจึงนำถุงเชื้อไปแช่ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 60 นาที ระหว่างช่วงเวลากการฟอกให้น้ำถุงเชื้อออกมาจนคลุกเคล้าเป็นครั้งคราวเพื่อให้การฟอกเชื้อเป็นไปอย่างสม่ำเสมอทั่วกัน สถานะการฟอกเชื้อในขั้นนี้กำหนดตามตารางที่ 4

2.1.2 หลังจากฟอกทิ้งไว้จนครบกำหนดเวลา 60 นาที นำเชื้อไปกรองด้วยกรวยกรองแบบแก้วเพื่อแยกเอาส่วนน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณคลอรีนที่เหลือ เพื่อใช้ในการคำนวณหาปริมาณของคลอรีนที่ถูกใช้ไป โดยคิดหน่วยเป็นกิโลกรัมคลอรีนที่ใช้ต่อ 1 ตันน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

2.1.3 นำส่วนที่เป็นเชื้อไปล้างด้วยน้ำให้สะอาดจนแน่ใจว่าไม่มีคลอรีนตกค้างอยู่ ตรวจสอบโดยใช้กระดาษไอโอดีน ( iodine paper ) ถ้ามีคลอรีนตกค้างอยู่กระดาษไอโอดีนจะให้สีน้ำเงิน

2.1.4 เชื้อที่ได้นำไปหาความชื้นเพื่อคำนวณหาผลผลิตเชื้อเป็นร้อยละเทียบกับน้ำหนักเยื่ออบแห้งเริ่มต้นแล้วแบ่งเชื้อส่วนหนึ่งไปเตรียมแผ่นทดสอบสำหรับวัดค่าความขาวสว่างของเชื้อ

### ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 9

## 2.2. ขั้นการสกัดด้วยด่าง โดยมีการใช้ออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย ( E<sub>PO</sub> )

นำเชื้อที่ผ่านการฟอกชั้นคลอรีนชั้นมาแล้วทั้ง 20 ชุดการทดลอง ไปฟอกต่อในขั้นการสกัดด้วยด่าง ที่มีการเติมออกซิเจนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงไปด้วย ในขั้นการสกัดด้วยด่างนี้ได้กำหนดปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ไว้ที่ระดับเดียว คือ ที่ร้อยละ 1.5 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง และปริมาณออกซิเจนที่ใช้กำหนดให้มีปริมาณมากเกินไป ส่วนปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของแต่ละชุดการทดลองเป็นไปตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 การฟอกในขั้นนี้ใช้สัญลักษณ์เป็น E<sub>PO</sub> และสถานะการฟอกเชื้อในขั้นนี้ กำหนดตามตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงสถานะการฟอกเชื้อไม้ไผ่ซัลเฟตในขั้นการสกัดด้วยด่าง (E<sub>PO</sub>)

| สถานะการฟอกเชื้อไม้ไผ่ในขั้นการสกัดด้วยด่าง                                                                                |                             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| น้ำหนักเชื้อ, กรับน้ำหนักอบแห้ง                                                                                            | 120                         |
| ความชื้นของน้ำเชื้อ (consistency), ร้อยละ                                                                                  | 10                          |
| อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส                                                                                                     | 70                          |
| เวลาที่ใช้ในการฟอก, นาที                                                                                                   | 120                         |
| ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง                                                                       | 1.5                         |
| ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง                                                                    | 0.0, 0.162, 0.4, 0.638, 0.8 |
| ปริมาณออกซิเจน, อัตราส่วนออกซิเจนที่ 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นาน 3 นาที, หลังจาก evacuated ที่ -400 มิลลิบาร์ (mbar) | excess                      |



วิธีการทดลองในขั้นการสกัดด้วยค่าต่าง ๆ ทุกชุดการทดลองดำเนินการ ดังนี้

2.2.1 นำเยื่อที่ผ่านชั้นคลอรีนชั้นจากข้อ 2.1.4 ใส่ในหม้อต้มเยื่อเติมโซเดียมไฮดรอกไซด์และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์โดยมีปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของแต่ละชุดการทดลองเป็นไปตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 แล้วเติมน้ำจนได้ความชื้นของน้ำเยื่อตามต้องการ ปิดฝาของหม้อต้มเยื่อ แล้วเปิดวาล์วดูดอากาศภายในหม้อต้มเยื่อออกจนได้ความดันภายในเป็น -400 มิลลิบาร์ แล้วนำไปอัดด้วยก๊าซออกซิเจน ซึ่งมีความดัน 1.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรใช้เวลานาน 3 นาที ปิดวาล์วเพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซออกซิเจน

2.2.2 นำหม้อต้มเยื่อจากข้อ 2.2.1 ใส่ในเครื่องให้ความร้อนด้วยโพลีเอทิลีนไกลคอล (poly ethylene glycol bath) หม้อต้มจะติดตั้งอยู่บนเพลลาซึ่งหมุนตลอดเวลา ควบคุมอุณหภูมิที่ 70 องศาเซลเซียส ตลอดช่วงการต้ม จนกระทั่งครบกำหนดเวลา 120 นาที

2.2.3 เอาเยื่อออกจากหม้อต้ม นำน้ำเยื่อไปกรองด้วยกรวยกรองแบบแก้วเพื่อแยกเอาส่วนที่เป็นน้ำและเยื่อออกจากกัน

2.2.4 ส่วนที่เป็นเยื่อล้างด้วยน้ำให้สะอาดแล้วกรองให้แห้งนำไปหาความชื้นเพื่อคำนวณหาผลผลิตเยื่อหน่วยเป็นร้อยละ แบ่งเยื่อบางส่วนไปหาค่า kappa number, ความขาวสว่าง (brightness), ความเหลือง (yellowness)

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 10

### 2.3 ขั้นไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite stage, H)

นำเยื่อที่ผ่านการฟอกชั้นคลอรีนชั้น ขั้นการสกัดด้วยค่าต่าง ๆ แล้วทั้ง 20 ชุดการทดลองไปฟอกต่อในขั้นไฮโปคลอไรท์ โดยมีปริมาณการใช้ไฮโปคลอไรท์ของแต่ละชุดการทดลองเป็นไปตามแผนการทดลองที่กำหนดไว้ในตารางที่ 2 และสภาวะการฟอกเยื่อในขั้นนี้กำหนดตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงสภาวะการฟอกเยื่อไม้ไฟซัลเฟตในขั้นไฮโปคลอไรท์ (H)

| สภาวะการฟอกเยื่อไม้ไฟในขั้นไฮโปคลอไรท์                                |                             |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| น้ำหนักเยื่อ, กรัม น้ำหนักอบแห้ง                                      | 60                          |
| ความชื้นของน้ำเยื่อ (consistency), ร้อยละ                             | 10                          |
| อุณหภูมิ, องศาเซลเซียส                                                | 40                          |
| เวลาที่ใช้ในการฟอก, นาที                                              | 280                         |
| ปริมาณแคลเซียมไฮโปคลอไรท์ (ปริมาณคลอรีน), ร้อยละของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง | 0.5, 0.702, 1.0, 1.298, 1.5 |
| ความเป็น กรด-ด่าง เริ่มต้น                                            | ~11                         |

### วิธีการทดลองในขั้นนี้ ดำเนินการดังต่อไปนี้

2.3.1 นำเยื่อที่ผ่านขั้นตอนการสกัดด้วยค่าง จากข้อ 2.2.4 ทั้ง 20 ชุดการทดลองมาทำการฟอกต่อในชั้นไฮโปคลอไรท์ โดยมีสภาวะการฟอกตามที่กำหนดในตารางที่ 6 และมีปริมาณการใช้กลอรีนในแต่ละชุดการทดลองเป็นไปตามแผนการทดลองในตารางที่ 2 แล้วปรับความเป็นกรดต่างให้ได้ประมาณ 11 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ คลุกเคล้าให้เข้ากันดีการฟอกกระทำในอุณหภูมิความร้อนแล้วนำถุงไปแช่ในอ่างน้ำร้อน ซึ่งควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 40 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 280 นาที ระหว่างช่วงเวลาดการฟอกให้นำถุงเยื่อออกมานวดคลุกเคล้า ทุกๆ 30 นาที

2.3.2 เมื่อครบเวลาตามที่กำหนดแล้ว นำน้ำเยื่อไปกรองด้วยกรวยกรองแบบแก้วแยกเอาส่วนที่เป็นน้ำและเยื่อออกจากกัน เยื่อที่ได้นำไปล้างด้วยน้ำให้สะอาดจนแน่ใจว่าไม่มีกลอรีนเหลือติดอยู่ในเยื่อ นำเยื่อที่ได้ไปหาค่าความขาวสว่าง ส่วนน้ำยานำไปหาปริมาณของไฮโปคลอไรท์ที่ใช้ โดยคิดหน่วยเป็นกิโลกรัมของไฮโปคลอไรท์ต่อ 1 ตันน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 11



### บทที่ 3

#### ผลการทดลอง

##### 1. ขั้นตอนออกซิเจน (Oxygen Cooking Stage)

1.1 การศึกษาผลการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนออกซิเจน ( $O_p$ ) ต่อการลดค่า Kappa Number หรือปริมาณลิกนินในเยื่อ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเยื่อไม้ไผ่ขัดฟัดหลังผ่านการฟอกเยื่อในขั้นตอนออกซิเจน ( $O_p$ )

วัตถุดิบเป็นเยื่อไม้ไผ่ขัดฟัดไม่ฟอกมีค่า kappa number เริ่มต้น = 19.2 และค่าความขาวสว่าง = 25.8

| การทดลอง<br>ชุดที่ | ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ |        | ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ |        | Kappa Number |         | ความขาวสว่าง |         |
|--------------------|----------------------------|--------|-------------------------|--------|--------------|---------|--------------|---------|
|                    | เลขรหัส                    | ร้อยละ | เลขรหัส                 | ร้อยละ | เริ่มต้น     | หลังฟอก | เริ่มต้น     | หลังฟอก |
| 1                  | -1                         | 0      | -1                      | 2.0    | 19.2         | 10.5    | 25.8         | 29.1    |
| 2                  | -1                         | 0      | 0                       | 3.0    | 19.2         | 8.4     | 25.8         | 31.2    |
| 3                  | -1                         | 0      | +1                      | 4.0    | 19.2         | 8.6     | 25.8         | 31.1    |
| 4                  | 0                          | 0.25   | -1                      | 2.0    | 19.2         | 7.6     | 25.8         | 32.2    |
| 5                  | 0                          | 0.25   | 0                       | 3.0    | 19.2         | 8.6     | 25.8         | 33.4    |
| 6                  | 0                          | 0.25   | 0                       | 3.0    | 19.2         | 7.4     | 25.8         | 32.1    |
| 7                  | 0                          | 0.25   | 0                       | 3.0    | 19.2         | 7.8     | 25.8         | 30.7    |
| 8                  | 0                          | 0.25   | 0                       | 3.0    | 19.2         | 7.4     | 25.8         | 30.9    |
| 9                  | 0                          | 0.25   | +1                      | 4.0    | 19.2         | 6.1     | 25.8         | 35.4    |
| 10                 | +1                         | 0.50   | -1                      | 2.0    | 19.2         | 6.5     | 25.8         | 32.8    |
| 11                 | +1                         | 0.50   | 0                       | 3.0    | 19.2         | 6.2     | 25.8         | 34.2    |
| * 12               | +1                         | 0.50   | +1                      | 4.0    | 19.2         | 5.2     | 25.8         | 35.4    |

ผลการทดลองจากตารางที่ 7 ซึ่งให้เห็นว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนออกซิเจนในช่วงร้อยละ 0 - 0.5 และ ร้อยละ 2 - 4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ นอกจากมีผลต่อการลดปริมาณลิกนินในเยื่อแล้วยังมีส่วนเพิ่มความขาวสว่างให้สูงขึ้นด้วย ยกตัวอย่างที่ชุดการทดลองที่ 12 ซึ่งมีปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.50 (เลขรหัส +1) และ 4.0 (เลขรหัส +1) ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับ สามารถเพิ่มความขาวสว่างได้มากถึง 9.6 หน่วย โดยเพิ่มจากเดิม ซึ่งมีค่าความขาวสว่าง เริ่มต้นร้อยละ 25.8 เป็นร้อยละ 35.4 และลดค่า kappa number ได้มากถึง 14 หน่วย โดยลดลงจากเดิมซึ่งมีค่า kappa number เท่ากับ 19.2 ลดลงต่ำสุดเท่ากับ 5.2



1.2 การศึกษาผลของการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่องต่อการเปลี่ยนแปลงค่าของ kappa number ค่าความขาวสว่างและสมบัติทางเชิงกลของเยื่อ ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 8 ตารางที่ 8 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง วัตถุดิบเป็นเยื่อไม้ไผ่ไม่ฟอกมีค่า kappa number = 19.2 และค่าความขาวสว่าง = 25.8

| สมบัติทางกายภาพและเคมี              | ขั้นตอนการฟอกด้วยออกซิเจน |      |      |                                 |       |                                   |
|-------------------------------------|---------------------------|------|------|---------------------------------|-------|-----------------------------------|
|                                     | เยื่อเริ่มต้น             | O    | O-O  | O-O <sub>p</sub> <sup>0.3</sup> | O-O-O | O-O-O <sub>p</sub> <sup>0.3</sup> |
| Kappa Number                        | 19.2                      | 7.5  | 5.6  | 4.7                             | 5.3   | 4.5                               |
| Brightness, %                       | 25.8                      | 37.8 | 36.4 | 39.5                            | 37.5  | 39.4                              |
| Yellowness, %                       | -                         | 36.8 | 40.8 | 40.2                            | 41.6  | 41.2                              |
| Freeness, ml CSF                    | -                         | 360  | 400  | 440                             | 455   | 480                               |
| Drainage Time, sec                  | -                         | 6.0  | 5.3  | 5.3                             | 5.2   | 4.7                               |
| Apparent Density, kg/m <sup>3</sup> | -                         | 605  | 594  | 584                             | 646   | 564                               |
| Tensile Index, kNm/kg               | -                         | 58.8 | 59.3 | 57.3                            | 55.7  | 53.1                              |
| Stretch, %                          | -                         | 5.0  | 5.1  | 5.0                             | 5.4   | 5.2                               |
| Tear Index, Nm <sup>2</sup> /kg     | -                         | 18.8 | 18.8 | 18.3                            | 18.5  | 18.4                              |
| Burst Index, kPa. m <sup>2</sup> /g | -                         | 4.92 | 4.71 | 4.67                            | 4.73  | 4.36                              |

ผลการทดลองจากตารางที่ 8 ซึ่งให้เห็นว่าการใช้ออกซิเจนในการฟอกแบบขั้นตอนเดียวสามารถลดค่า kappa number จาก 19.2 เหลือ 7.5 และการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่อง 2 และ 3 ขั้นตอน (O-O, O-O-O) เยื่อฟอกที่ได้มีค่า kappa number ลดลงจาก 19.2 เหลือ 5.6 และ 5.3 ตามลำดับ ส่วนการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่อง 2 และ 3 ขั้นตอน โดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยนั้น (O-O<sub>p</sub><sup>0.3</sup>, O-O-O<sub>p</sub><sup>0.3</sup>) เยื่อฟอกที่ได้มีค่า kappa number ลดลงจาก 19.2 เหลือ 4.7 และ 4.5 ตามลำดับ จะเห็นว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยกับออกซิเจนในการฟอกเยื่อแบบต่อเนื่องสามารถลดค่า kappa number หรือลดปริมาณลิกนินในเยื่อได้ดีกว่าการฟอกเยื่อด้วยการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องที่ไม่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย ในขณะที่เดียวกับการใช้ออกซิเจนในการฟอกแบบขั้นตอนเดียวเพิ่มค่าความขาวสว่างของเยื่อได้ใกล้เคียงกับการใช้ออกซิเจนในการฟอกแบบ 2 และ 3 ขั้นตอนและเมื่อเปรียบเทียบเยื่อที่ระดับการบดเดียวกัน (4000 รอบ) จะเห็นว่าการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง ไม่แสดงผลชัดเจนต่อการสูญเสียความแข็งแรงของเส้นใยเลย (tear index และ tensile index ถือว่าไม่เปลี่ยนแปลง)

- หมายเหตุ
1. O = one stage of oxygen cooking from mill
  2. O-O = two stage of oxygen cooking
  3. O-O<sub>p</sub><sup>0.3</sup> = two stage of oxygen cooking which the second stage is added by the hydrogen peroxide = 0.3%
  4. O-O-O = three stage of oxygen cooking
  5. O-O-O<sub>p</sub><sup>0.3</sup> = three stage of oxygen cooking which the third stage is added by the hydrogen peroxide = 0.3%



## 2. การศึกษาชั้นคลอรีนชั้น ขึ้นการสกัดด้วยด่าง และชั้นไฮโปคลอไรท์

วัตถุดิบเป็นเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตที่ผ่านการฟอกชั้นออกซิเจนจากโรงงานมาแล้วมี kappa number = 7.5

และค่าความขาวสว่าง = 37.8

### 2.1 การฟอกในชั้นคลอรีนชั้น ( C ) (ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 แสดงผลการฟอกเยื่อไม้ไผ่ซัลเฟตด้วยคลอรีนในชั้นคลอรีนชั้น (C)

| การทดลอง<br>ชุดที่ | ปริมาณคลอรีน |        | C/K ratio | ความขาวสว่าง<br>(Brightness) | ความเหลือง<br>(Yellowness) |
|--------------------|--------------|--------|-----------|------------------------------|----------------------------|
|                    | เลขรหัส      | ร้อยละ |           |                              |                            |
| 1                  | -0.1         | 0.8    | 0.11      | 50.3                         | 30.6                       |
| 2                  | -1           | 1.043  | 0.14      | 54.2                         | 28.5                       |
| 3                  | -1           | 1.043  | 0.14      | 50.4                         | 29.7                       |
| 4                  | -1           | 1.043  | 0.14      | 49.5                         | 30.1                       |
| 5                  | -1           | 1.043  | 0.14      | 48.4                         | 30.7                       |
| 6                  | 0            | 1.4    | 0.19      | 59.2                         | 26.2                       |
| 7                  | 0            | 1.4    | 0.19      | 58.9                         | 26.6                       |
| 8                  | 0            | 1.4    | 0.19      | 60.1                         | 25.7                       |
| 9                  | 0            | 1.4    | 0.19      | 60.0                         | 25.7                       |
| 10                 | 0            | 1.4    | 0.19      | 55.2                         | 27.3                       |
| 11                 | 0            | 1.4    | 0.19      | 55.8                         | 27.1                       |
| 12                 | 0            | 1.4    | 0.19      | 55.3                         | 27.5                       |
| 13                 | 0            | 1.4    | 0.19      | 54.3                         | 27.6                       |
| 14                 | 0            | 1.4    | 0.19      | 57.4                         | 26.3                       |
| 15                 | 0            | 1.4    | 0.19      | 54.1                         | 28.1                       |
| 16                 | +1           | 1.757  | 0.23      | 62.8                         | 23.7                       |
| 17                 | +1           | 1.757  | 0.23      | 59.7                         | 25.3                       |
| 18                 | +1           | 1.757  | 0.23      | 57.3                         | 26.0                       |
| 19                 | +1           | 1.757  | 0.23      | 56.3                         | 27.5                       |
| * 20               | +0.1         | 2.0    | 0.27      | 63.4                         | 23.3                       |

ผลการทดลองในชั้นคลอรีนชั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณการใช้คลอรีนในการฟอกเยื่อจากร้อยละ 0.8 (ชุดการทดลองที่ 1 ) เป็น ร้อยละ 2.0 (ชุดการทดลองที่ 20) ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งสามารถเพิ่มค่าความขาวสว่างได้ 13.1 หน่วย โดยเพิ่มจากที่ระดับความขาวสว่างเท่ากับร้อยละ 50.3 เป็นที่ระดับความขาวสว่างเท่ากับ ร้อยละ 63.4 ส่วนค่าความเหลืองของเยื่อจะลดลงจากร้อยละ 30.6 เป็น 23.3 ซึ่งค่าความเหลืองนี้ถ้ามีค่าลดลงแสดงว่าเยื่อฟอกขาวที่ได้มีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นและสามารถคำนวณหาค่า C/K ratio อยู่ในช่วง 0.11-0.27 ซึ่งค่า C/K ratio นี้คำนวณได้จากสูตร

$$C/K \text{ ratio} = \frac{\text{ปริมาณคลอรีนที่ใช้}}{\text{kappa number ของเยื่อเริ่มต้น}}$$



## 2.2 การพอกในชั้นการสกัดด้วยค่า โดยมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนร่วมด้วย ( $E_{PO}$ )

ตารางที่ 10 แสดงผลการพอกเยื่อไม้ในขั้นตอนการสกัดด้วยค่า โดยมีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกซิเจนร่วมด้วย ( $E_{PO}$ )

| การทดลอง<br>ชุดที่ | ปริมาณคลอรีน |        | ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ |        | CE Kappa No | ความขาวสว่าง, | ความเหลือง, |
|--------------------|--------------|--------|----------------------------|--------|-------------|---------------|-------------|
|                    | เลขรหัส      | ร้อยละ | เลขรหัส                    | ร้อยละ |             | ร้อยละ        | ร้อยละ      |
| 1                  | - $\alpha$   | 0.8    | 0                          | 0.4    | 2.6         | 59.0          | 25.0        |
| 2                  | -1           | 1.043  | -1                         | 0.162  | 1.7         | 62.1          | 23.0        |
| 3                  | -1           | 1.043  | -1                         | 0.162  | 1.7         | 61.8          | 23.2        |
| 4                  | -1           | 1.043  | +1                         | 0.638  | 1.6         | 66.3          | 20.4        |
| 5                  | -1           | 1.043  | +1                         | 0.638  | 1.6         | 66.2          | 20.9        |
| * 6                | 0            | 1.4    | - $\alpha$                 | 0      | 1.5         | 63.4          | 22.2        |
| 7                  | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 69.6          | 19.1        |
| 8                  | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 69.9          | 18.8        |
| 9                  | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 69.1          | 19.3        |
| 10                 | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 69.9          | 18.8        |
| 11                 | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 69.8          | 18.4        |
| 12                 | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 69.8          | 18.3        |
| 13                 | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 68.6          | 19.6        |
| 14                 | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 1.4         | 68.9          | 19.3        |
| * 15               | 0            | 1.4    | + $\alpha$                 | 0.8    | 1.2         | 71.6          | 17.2        |
| 16                 | +1           | 1.757  | -1                         | 0.162  | 1.2         | 68.2          | 19.9        |
| 17                 | +1           | 1.757  | -1                         | 0.162  | 1.2         | 67.5          | 20.2        |
| 18                 | +1           | 1.757  | +1                         | 0.638  | 1.0         | 73.0          | 16.8        |
| 19                 | +1           | 1.757  | +1                         | 0.638  | 1.0         | 73.3          | 16.8        |
| 20                 | + $\alpha$   | 2.0    | 0                          | 0.4    | 1.3         | 71.0          | 18.4        |

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เสริมในขั้นตอนการสกัดด้วยค่ามีผลต่อการลดค่า kappa number หรือปริมาณลิกนินในเยื่อได้เล็กน้อย ณ ที่ระดับปริมาณการใช้คลอรีนเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ชุดการทดลองที่ 6 และ 15 ซึ่งมีปริมาณการใช้คลอรีนที่ระดับเดียวกันเท่ากับร้อยละ 1.4 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง การเพิ่มปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากร้อยละ 0 เป็น 0.8 ของน้ำหนักเยื่อแห้ง สามารถลดค่า kappa number ได้เพียงเล็กน้อยโดยลดลงจาก 1.5 เป็น 1.2 แต่จะช่วยให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 63.4 เป็นร้อยละ 71.6 และในขณะเดียวกันยังช่วยให้เยื่อมีความคงทนต่อการกลับริ้วเพิ่มขึ้น โดยดูจากค่าความเหลืองที่ลดลงจากร้อยละ 22.2 เป็นร้อยละ 17.2 (ค่าความเหลืองเป็นตัวบ่งชี้ความคงทนต่อการกลับริ้วของเยื่อถ้ามี่ค่าสูงแสดงว่าเยื่อกลับริ้วได้ง่าย)



## 2.3 การฟอกในชั้นไฮโปคลอไรท์ (H)

ตารางที่ 11 สมบัติทางกายภาพของเยื่อไมโครฟิล์มหลังผ่านการฟอกในชั้นไฮโปคลอไรท์ (H)

| การทดลองชุดที่ | ปริมาณคลอรีน |        | ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ |        | ปริมาณไฮโปคลอไรท์ |        | ความขาวสว่าง/ความเหลือง, ร้อยละ | post colour number | C/K ratio |
|----------------|--------------|--------|----------------------------|--------|-------------------|--------|---------------------------------|--------------------|-----------|
|                | เลขรหัส      | ร้อยละ | เลขรหัส                    | ร้อยละ | เลขรหัส           | ร้อยละ |                                 |                    |           |
| 1              | -Cl          | 0.8    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 79.8/12.3                       | 3.37               | 0.11      |
| 2              | -1           | 1.043  | -1                         | 0.162  | -1                | 0.702  | 80.9/12.4                       | 2.19               | 0.14      |
| 3              | -1           | 1.043  | -1                         | 0.162  | +1                | 1.298  | 83.0/10.6                       | 3.29               | 0.14      |
| 4              | -1           | 1.043  | +1                         | 0.638  | -1                | 0.702  | 81.6/11.5                       | 2.09               | 0.14      |
| 5              | -1           | 1.043  | +1                         | 0.638  | +1                | 1.298  | 84.5/9.4                        | 3.31               | 0.14      |
| 6              | 0            | 1.4    | -Cl                        | 0      | 0                 | 1.0    | 83.9/10.3                       | 2.62               | 0.19      |
| * 7            | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | -Cl               | 0.5    | 82.9/11.1                       | 2.06               | 0.19      |
| * 8            | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | +Cl               | 1.5    | 86.0/8.3                        | 2.91               | 0.19      |
| 9              | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 84.8/9.3                        | 2.39               | 0.19      |
| 10             | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 85.3/9.1                        | 2.41               | 0.19      |
| 11             | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 85.0/8.6                        | 2.29               | 0.19      |
| 12             | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 85.6/8.7                        | 2.96               | 0.19      |
| 13             | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 85.3/8.0                        | 2.91               | 0.19      |
| 14             | 0            | 1.4    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 85.2/8.3                        | 2.82               | 0.19      |
| 15             | 0            | 1.4    | +Cl                        | 0.8    | 0                 | 1.0    | 85.6/8.7                        | 2.70               | 0.19      |
| 16             | +1           | 1.757  | -1                         | 0.162  | -1                | 0.702  | 85.1/9.3                        | 2.03               | 0.23      |
| 17             | +1           | 1.757  | -1                         | 0.162  | +1                | 1.298  | 86.2/7.1                        | 3.34               | 0.23      |
| 18             | +1           | 1.757  | +1                         | 0.638  | -1                | 0.702  | 85.8/8.7                        | 1.77               | 0.23      |
| 19             | +1           | 1.757  | +1                         | 0.638  | +1                | 1.298  | 86.6/7.8                        | 2.98               | 0.23      |
| 20             | +Cl          | 2.0    | 0                          | 0.4    | 0                 | 1.0    | 84.9/9.0                        | 2.42               | 0.27      |

ผลจากการศึกษาทดลองชี้ให้เห็นว่า เมื่อเปรียบเทียบ ณ ที่ระดับการใช้คลอรีนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เดียวกัน ความขาวสว่างจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณการใช้ไฮโปคลอไรท์ที่เพิ่มขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การทดลองชุดที่ 7 และ 8 ซึ่งมีการใช้ไฮโปคลอไรท์ที่เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.5 (ชุดการทดลองที่ 7) เป็นร้อยละ 1.5 (ชุดการทดลองที่ 8) ของน้ำหนักเยื่อแห้ง จะทำให้เยื่อมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 82.9 เป็นร้อยละ 86.0



## บทที่ 4

### วิจารณ์ผลการทดลอง

#### 1. การศึกษาวิจัยในชั้นออกซิเจน

ผลจากการศึกษาวิจัยในชั้นนี้ชี้ชัดว่าการใช้ออกซิเจนเป็นขั้นตอนแรกก่อนการฟอกในชั้นคลอรีนชั้นสามารถลดปริมาณลิกนิน (หรือค่า kappa number) ในเยื่อลงได้มาก ซึ่งส่งผลกระทบต่อปริมาณการใช้คลอรีนในชั้นคลอรีนชั้นอย่างเห็นได้ชัดเจน เนื่องจากการฟอกในชั้นคลอรีนชั้นปริมาณของคลอรีนที่ใช้จะมากหรือน้อยจะขึ้นกับปริมาณลิกนิน (หรือค่า kappa number) ที่มีอยู่ในเยื่อว่ามีมากหรือน้อย โดยคำนวณจากสูตร

$$\text{ปริมาณคลอรีน, ร้อยละ} = \text{ค่า kappa number} \times 0.22$$

ดังนั้นถ้าเยื่อก่อนฟอกในชั้นคลอรีนชั้นค่า kappa number ต่ำ จะทำให้การใช้ปริมาณคลอรีนในชั้นคลอรีนชั้นลดต่ำลงด้วย ผลการทดลองการศึกษาวิจัยในชั้นออกซิเจนแสดงใน ตารางที่ 7 และ 8 ดังนี้

##### 1.1 การศึกษาผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในชั้นออกซิเจนต่อการลดปริมาณลิกนินในเยื่อ

ในชั้นนี้เยื่อที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบมี Kappa number เท่ากับ 19.2 หรือคิดเป็นปริมาณลิกนินที่อยู่ในเยื่อเท่ากับร้อยละ 2.88 (ปริมาณลิกนินในเยื่อ, ร้อยละ =  $0.15 \times \text{Kappa number}$ ) และมีความขาวสว่างเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 25.8 แต่เมื่อนำเยื่อไปผ่านชั้นออกซิเจนโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมด้วยในช่วงร้อยละ 0-0.5 และ 2-4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งตามลำดับแล้วเยื่อที่ได้จะมีค่า Kappa number ลดลงอยู่ในช่วง 5.2-10.5 และมีความขาวสว่างในช่วงร้อยละ 29.1-35.4 จะเห็นได้ว่าการใช้ออกซิเจนโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้าช่วยในการฟอกสามารถลดปริมาณลิกนินในเยื่อได้มากถึงร้อยละ 45 - 72.9 ซึ่งถือได้ว่ามีนัยเดียวกันกับการลดปริมาณการใช้คลอรีนในชั้นคลอรีนชั้นในปริมาณเดียวกันด้วย ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 7

เพื่อแสดงถึงอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อการลดปริมาณลิกนินในเยื่อหรือ Kappa number จึงได้นำค่าทั้ง 3 มาหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ 1

$$\begin{array}{llll} \text{Kappa number} & = & 7.575 - 1.600X_1 - 0.7833X_2 & R^2 = 0.87 \quad \dots\dots\dots 1) \\ \text{Brightness} & = & 32.215 + 1.833 X_1 + 1.300 X_2 & R^2 = 0.76 \quad \dots\dots\dots 2) \end{array}$$

โดยที่  $X_1$  = ปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (coded value)

$X_2$  = ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (coded value)

จากสมการที่ 1 จะเห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อการลดลงของลิกนินในเยื่อหรือ Kappa number มากกว่าไฮเดียมไฮดรอกไซด์ดังภาพที่ 2 ซึ่งเป็น response surface ของสมการที่ 1 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเราสามารถลด Kappa number จาก 19.2 ลงเหลือ 5.607 หน่วย โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮเดียมไฮดรอกไซด์ประมาณร้อยละ 0.5 และ 3.5 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ (ตาม \* บนเส้นที่ 5 ของภาพที่ 2)

ในทำนองเดียวกันการหาความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างค่าความขาวสว่างต่อปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮเดียมไฮดรอกไซด์ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเราสามารถเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้ประมาณ 10 หน่วย จากเดิมมีความขาวสว่างร้อยละ 25.8 เป็นร้อยละ 34.795 โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 0.5 และ 3.5 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ตามลำดับ ดังภาพที่ 3 (ตาม \* บนเส้นที่ 12 ของภาพที่ 3)

### 1.2 การศึกษาผลการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องต่อการลดปริมาณลิกนินในเยื่อ

การทดลองฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่องเป็นการหาแนวทางการลดปริมาณลิกนินในเยื่อให้มีค่าต่ำสุด เพื่อให้มีความต้องการใช้คลอรีนในปริมาณต่ำสุดเท่าที่จะทำได้ ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 8 ดังนี้

การใช้ออกซิเจนเพียงขั้นตอนเดียว (O) สามารถลด kappa number จาก 19.2 เหลือเพียง 7.5 ซึ่งถือได้ว่าเป็นการลดปริมาณลิกนินในเยื่อลงมาได้มากถึงร้อยละ 60

การใช้ออกซิเจนอย่างต่อเนื่อง แบบ 2 และ 3 ขั้นตอน [(O-O) และ (O-O-O)] ให้เยื่อฟอกที่มี kappa number เท่ากับ 5.6 และ 5.3 ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าการลดลงของ kappa number จากขั้นตอนที่ 2 ไปยังขั้นตอนที่ 3 เห็นได้ไม่ชัดเจน เพราะลดลงเพียง 0.3 หน่วยเท่านั้น

การใช้ออกซิเจนร่วมกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0.3 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้งในการฟอกแบบ 2 และ 3 ขั้นตอน O-O<sub>p</sub> และ O-O-O<sub>p</sub> สามารถลด kappa number ของเยื่อเหลือเท่ากับ 4.7 และ 4.5 ตามลำดับ

เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องแต่เพียงอย่างเดียวกับการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วย จะเห็นว่ากรณีการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยจะสามารถลด kappa number หรือปริมาณลิกนินในเยื่อได้ดีกว่า ดังแสดงในภาพที่ 4

ในรายงานศึกษาวิชาญนี้ได้ทดลองทำการฟอกเยื่อด้วยออกซิเจนต่อเนื่องมากกว่า 1 ขั้นตอน ซึ่งไม่เคยมีใครได้ทำการศึกษามาก่อนทั้งนี้เพราะการใช้ออกซิเจนนอกจากมีข้อดีในแง่ของการช่วยลดปริมาณลิกนินในเยื่อแล้วยังมีข้อเสียตามมาด้วยอีกประการหนึ่งคือการไปลดความแข็งแรงของเส้นใย (fiber strength) ด้วยเหตุนี้ในอุตสาหกรรมจึงไม่นิยมการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องแต่จะเลือกใช้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียวเพื่อให้คงความแข็งแรงของเส้นใยไว้ได้ แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองในตารางที่ 8 ได้แสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของเยื่อมิได้รับผลกระทบกระเทือนแม้ว่าจะผ่านการฟอกด้วยออกซิเจน ถึง 3 ขั้นตอน โดยที่ค่า  $icar$



index ไม่เปลี่ยนแปลง ส่วน tensile index ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ความแข็งแรงของพันธะเส้นใยลดลงเพียงเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบที่ระดับการบดเคี้ยวกัน ดังภาพที่ 5 (A-B)

โดยเฉพาะ tear index ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับความแข็งแรงของเส้นใย (fibre strength) ซึ่งสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การเสื่อมสลายของเส้นใย (fibre degradation) ได้เป็นอย่างดี<sup>4,5)</sup> ดังนั้นการฟอกเยื่อไม้ได้ช่วยออกซิเจนถึง 3 ขั้นตอน โดยไม่มีผลกระทบต่อความแข็งแรงของเส้นใย จึงเป็นสิ่งที่มิได้คาดหวังก่อน

## 2. การศึกษาขั้นตอนการฟอกเยื่อไม้ การสกัดด้วยด่างและขั้นตอนไฮโปคลอไรท์

นอกจากความพยายามลดปริมาณลิกนินในเยื่อโดยการผ่านขั้นตอนออกซิเจนก่อนฟอกขั้นตอนคลอรีนแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการทดลองศึกษาอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง เพื่อหาแนวโน้มในการลดปริมาณคลอรีนในขั้นตอนคลอรีน โดยมีเป้าหมายที่ยังคงความขาวสว่างสุดท้ายของเยื่อ ณ ระดับร้อยละ 85 ISO brightness ผลการทดลองดังปรากฏในตารางที่ 9-11 ซึ่งให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งดังต่อไปนี้

### 2.1 ขั้นตอนคลอรีน (Chlorination stage)

เยื่อที่นำมาฟอกเป็นเยื่อออกซิเจนจากโรงงาน ซึ่งมีค่า kappa number เท่ากับ 7.5 และความขาวสว่างร้อยละ 37.8 การใช้ปริมาณคลอรีนในช่วงร้อยละ 0.8 - 2.0 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง ตามที่กำหนดในตารางที่ 2 สามารถเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้เป็นร้อยละ 50.3 - 63.4 ตามลำดับ และค่า C/K ratio ที่คำนวณได้จากปริมาณคลอรีนที่ใช้ในช่วง 0.11 - 0.27 ผลการทดลองดังตารางที่ 9

### 2.2 ขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง (Alkali Extraction stage)

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมกับออกซิเจนในขั้นตอนนี้มีผลต่อการลดปริมาณลิกนินในเยื่อเพียงเล็กน้อย ณ ที่ระดับปริมาณการใช้คลอรีนเดียวกัน เช่น ชุดการทดลองที่ 6 และ 15 การเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากร้อยละ 0 เป็นร้อยละ 0.8 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง (กำหนดไว้ในการทดลองตามตารางที่ 2) จะลดค่า kappa number ได้เพียง 0.3 หน่วย เท่านั้น (จาก 1.5 ลดลงเป็น 1.2) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากเยื่อที่ใช้ฟอกมีปริมาณลิกนินหรือ kappa number อยู่ในระดับต่ำมากอยู่แล้วและปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งกำหนดไว้ในแผนการทดลองอาจต่ำเกินไป

แต่อย่างไรก็ตามการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการเพิ่มความขาวสว่างของเยื่ออย่างชัดเจน โดยเยื่อจะมีความขาวสว่างเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 63.4 เป็น 71.6 ตามลำดับ ซึ่งสามารถเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อได้มากกว่าเดิมถึง 8.2 หน่วย ผลการทดลองในขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง แสดงในตารางที่ 10

นอกจากนี้การใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นยังมีผลต่อการเพิ่มความคงทนในการกลบสีของกระดาษอย่างเห็นได้ชัดจนพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้ความคงทนต่อการกลบสีของกระดาษ

คือ ความเหลือง (yellowness) ถ้าเอ้อมีค่าความเหลืองค่าแสดงว่าเอื่อนั้นมีความคงทนต่อการกลีบสีสูง โดยเปรียบเทียบเอื่อที่ผ่านการฟอกที่ใช้คลอรีนในปริมาณเดียวกันแต่มีการเติมปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกัน จะเห็นได้ว่าเอื่อที่ใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สูงกว่าจะมีค่าความเหลืองต่ำกว่า เช่น การทดลองชุดที่ 6 และ 15 การเพิ่มปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จากร้อยละ 0 (ชุดการทดลองที่ 6) เป็นร้อยละ 0.8 (ชุดการทดลองที่ 15) ของน้ำหนักเอื่ออบแห้งสามารถลดค่าความเหลืองลงได้มากถึง 5 หน่วย จากเดิมเท่ากับ 22.2 เป็น 17.2 หน่วย

นอกจากนี้ค่าความเหลืองสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณลิกนินที่เหลือในเอื่อได้อย่างมีนัยสำคัญอีกด้วยดังความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ระหว่าง  $CE_{PO}$  kappa number และค่าความเหลือง (yellowness) ในสมการที่ 3 และภาพที่ 6

$$CE_{PO} \text{ kappa number} = 0.00755 * \text{yellowness}^{1.7363} \quad R^2 = 0.77 \quad \dots\dots\dots 8)$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอื่อที่มีค่า kappa number ต่ำจะให้ค่าความเหลืองต่ำหรืออาจพูดอีกอย่างหนึ่งได้ว่าเอื่อที่มีค่าความเหลืองสูงจะมีปริมาณลิกนินเหลืออยู่ในเอื่อมากกว่าเอื่อที่มีค่าความเหลืองต่ำ

### 2.3 ขั้นตอนต่อไปคืออะไร

การศึกษาทดลองในขั้นนี้ ถือเป็นขั้นสุดท้ายของการฟอกเอื่อแบบ  $CE_{PO}H$  แม้ว่าผลจากการทดลองตามตารางที่ 11 จะชี้ให้เห็นว่าไฮโปคลอไรท์มีผลต่อการเพิ่มความขาวสว่างของเอื่อค่อนข้างสูงมากก็ตาม แต่ควรต้องคำนึงด้วยว่าไม่ได้เกิดจากอิทธิพลของไฮโปคลอไรท์เพียงอย่างเดียว แต่เป็นผลรวมซึ่งเกิดจากอิทธิพลของคลอรีนในขั้นคลอรีนชันและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นการสกัดด้วยด่างรวมอยู่ด้วย

เมื่อนำค่า C/K ratio และค่าความขาวสว่างไปหาความสัมพันธ์ ดังภาพที่ 7 จะเห็นว่า ณ ระดับ C/K ratio เท่ากับ 0.17 จะให้เอื่อที่มีค่าความขาวสว่างในช่วงร้อยละ 82 - 85 ซึ่งผลจากการทดลองที่ได้จะเป็นสิ่งยืนยันได้ว่าโรงงานยังคงสามารถใช้คลอรีน (elemental chlorine) เป็นสารฟอกอีกต่อไปได้หากควบคุม C/K ratio ไว้ไม่เกิน 0.17 ซึ่งนอกจากจะไม่ก่อให้เกิดสาร Dioxin แล้วยังคงให้เอื่อที่มีความขาวสว่างสูงถึงร้อยละ 85 ซึ่งเป็นค่าความขาวสว่างระดับใกล้เคียงกับการใช้ C/K ratio เดิมซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.22 อีกด้วย (การเลือก C/K ratio ที่ระดับไม่เกิน 0.17 นี้เนื่องจากมีรายงานการศึกษาวิจัยยืนยันว่าที่ระดับการใช้ C/K ratio ไม่เกิน 0.17 สามารถป้องกันการเกิดสาร Dioxin<sup>2)</sup> ได้)

### 3. การศึกษาสมบัติของเอื่อหลังการฟอกด้วยไฮโปคลอไรท์

เนื่องจากผลการทดลองในขั้นไฮโปคลอไรท์ซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายของการฟอกแบบ  $CE_{PO}H$  นี้จะเป็นผลรวมอันเกิดจากอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ในแต่ละขั้นตอนการฟอกที่ผ่านมาด้วยเหตุนี้สมบัติของเอื่อที่ได้



ในขั้นตอนนี้จึงจึงไม่ได้ขึ้นอยู่กับอิทธิพลของตัวแปรตัวใดตัวหนึ่ง แต่จะขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งหมดของทุกขั้นตอนการฟอก ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเยื่อและตัวแปรต่างๆในเชิงคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

### 3.1 ความขาวสว่างและความเหลือง

การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนการสกัดด้วยด่างมีผลต่อการเพิ่มความขาวสว่างและการลดค่าความเหลืองอย่างชัดเจน ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเยื่อและตัวแปรต่างๆ แสดงในสมการที่ 4 และ 5

$$\begin{aligned}\text{Brightness} &= 85.268 + 1.632 C + 0.451 P + 0.887 H - 0.388 C \cdot H - 0.944 C^2 & R^2 &= 0.98 \dots 4) \\ \text{Yellowness} &= 8.947 - 1.212 C - 0.344 P - 0.858 H + 0.521 C^2 & R^2 &= 0.95 \dots 5)\end{aligned}$$

โดยที่  $C$  = ปริมาณคลอรีนในขั้นตอนคลอรีนชัน ( $C$ )

$P$  = ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง ( $E_{P0}$ )

$H$  = ปริมาณคลอรีนในขั้นตอนไฮโปคลอไรท์ ( $H$ )

หน่วยของตัวแปรทุกตัวเป็นเลขรหัส (coded values)

ความสัมพันธ์ตามสมการที่ 4 และ 5 แสดงเป็น response surface ดังภาพที่ 8a - 8d และ 9a - 9d ตามลำดับ

จากสมการที่ 4 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์เชิงคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาณสารเคมีที่ใช้คือค่าความขาวสว่างของเยื่อที่ได้ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อที่มีความสำคัญจากมากไปหาน้อยเรียงตามลำดับดังนี้ คือ  $C > H > P$  โดยสังเกตจากค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละตัวแปรในสมการที่ได้ แม้ว่าคลอรีนจะมีอิทธิพลต่อการเพิ่มความขาวสว่างของเยื่อมาก แต่หากมีการใช้คลอรีนในปริมาณที่สูงมากเกินไปอาจมีผลทำให้ความขาวสว่างของเยื่อมีค่าลดลงสังเกตได้จากเทอมกำลังสองของคลอรีนในสมการที่ 4 มีค่าเป็นลบ และในขณะเดียวกันก็มีผลทำให้ความเหลืองของเยื่อมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยสังเกตได้จากเทอมกำลังสองของคลอรีนในสมการที่ 5 มีค่าเป็นบวก ซึ่งให้ผลสอดคล้องยืนยันในลักษณะเดียวกันทั้งสองสมการ

ในการศึกษาวิจัยนี้ได้พยายามลดปริมาณการใช้คลอรีนลงโดยการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเป็นสารฟอกขาวตัวหนึ่งซึ่งไม่ก่อให้เกิดสารพิษเหมือนคลอรีน เข้าช่วยในขั้นตอนการสกัดด้วยด่าง ผลจากการศึกษาทดลองชี้ให้เห็นว่าการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร่วมด้วยในขั้นตอนการสกัดด้วยด่างมีผลต่อการลดปริมาณการใช้คลอรีนในขั้นตอนคลอรีนชัน ยกตัวอย่างเช่น ภาพที่ 8b ซึ่งแสดงผลการฟอก ณ ระดับการใช้ไฮโปคลอไรท์ที่ร้อยละ 0.702 (เลขรหัส -1) ในภาพจะมีจำนวนเส้นที่แสดงระดับความขาวสว่างของเยื่อ

ฟอกทั้งหมด 16 เส้น โดยมีค่าความขาวสว่างตั้งแต่ร้อยละ 76.292 ถึง ร้อยละ 85.729 การที่เยื่อจะมีความขาวสว่างมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณคลอรีนและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ เช่นเส้นที่ 15 ( ภาพที่ 8b) ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 นี้จะมีระดับค่าความขาวสว่างเท่ากันที่ร้อยละ 85.100 จะเห็นว่าสามารถลดปริมาณการใช้คลอรีนจากร้อยละ 1.757 เป็นร้อยละ 1.4 ของน้ำหนักเยื่ออบแห้ง โดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.2215 (จุด A) เป็นร้อยละ 0.757 (จุด B) [ ตามภาพที่ 8b] โดยที่ยังคงค่าความขาวสว่างที่ระดับร้อยละ 85.1 ISO ไว้ได้ แม้ว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์จะมีราคาแพงกว่าคลอรีนแต่หากคำนึงถึงค่าใช้จ่ายในการขจัดสารพิษและปัญหาสิ่งแวดล้อมก็น่าจะเป็นทางเลือกที่ดีทางหนึ่งในการลดปริมาณการเกิดสาร dioxin และ AOX จากโรงงานเยื่อที่ยังจำเป็นต้องใช้คลอรีน

### 3.2 การเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ

เป็นที่น่าสังเกตว่าการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ในขั้นตอนการสกักด้วยด่างไม่มีผลต่อการเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อในขณะที่คลอรีนมีส่วนช่วยลดการเสื่อมสภาพลงได้บ้างเล็กน้อย แต่ไฮโปคลอไรท์ทำให้เกิดการการเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อได้ง่ายขึ้น ดังสมการที่ 6

หน่วยวัดความเสื่อมสภาพความขาวสว่างเรียกว่า Post Colour number (P.C.no.) ค่าที่สูงจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าเยื่อมีการเสื่อมสภาพความขาวสว่างได้ง่าย

$$\text{P.C. no.} = 2.682 - 0.173 C + 0.459 H \quad R^2 = 0.77 \quad \dots 6)$$

$$\text{โดยที่ P.C. no} = \text{Post colour number}$$

จะเห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์ของเทอมไฮโปคลอไรท์มีค่าสูงส่วนเทอมของคลอรีนมีค่าค่อนข้างต่ำดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการใช้ไฮโปคลอไรท์ในปริมาณสูงๆเพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 1. การศึกษาวิจัยในชั้นออกซิเจน

1.1 การใช้ออกซิเจนโดยมีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และไฮเดรียมไฮดรอกไซด์ร่วมด้วย (Op) เป็นขั้นตอนแรกก่อนการฟอกด้วยคลอรีนสามารถช่วยลด kappa number ในเยื่อลงได้มาก ผลจากการศึกษาทดลองชี้ให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีอิทธิพลต่อการตกตะกอนในเยื่อมากกว่าไฮเดรียมไฮดรอกไซด์

1.2 การใช้ออกซิเจนต่อเนื่องแบบ 2 และ 3 ขั้นตอน (O-O และ O-O-O) ช่วยลดค่า kappa number ในเยื่อลงได้อีกเพียงเล็กน้อย เมื่อเทียบกับการใช้ออกซิเจนแบบขั้นตอนเดียว (O) ดังนั้นการใช้ออกซิเจนแบบต่อเนื่องมากกว่า 1 ขั้นตอน อาจไม่มีความจำเป็นเพราะจะทำให้สิ้นเปลืองมากขึ้น

1.3 การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เข้าช่วยเสริมในขั้นสุดท้ายของการฟอกออกซิเจนต่อเนื่องแบบ 2 และ 3 ขั้นตอน (O-Op และ O-O-Op) จะช่วยลดปริมาณตกตะกอนในเยื่อได้ดีกว่าการใช้ออกซิเจนแต่เพียงอย่างเดียวในทุกขั้นตอน (O-O และ O-O-O)

#### 2. การศึกษาวิจัยในชั้นคลอรีนชั้น ขึ้นการสกัดด้วยค่าและชั้นไฮโปคลอไรท์

2.1 การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นตอนการสกัดด้วยค่าจะช่วยเพิ่มความขาวสว่างได้มาก แต่มีผลต่อการลดค่า kappa number เพียงเล็กน้อยเท่านั้น

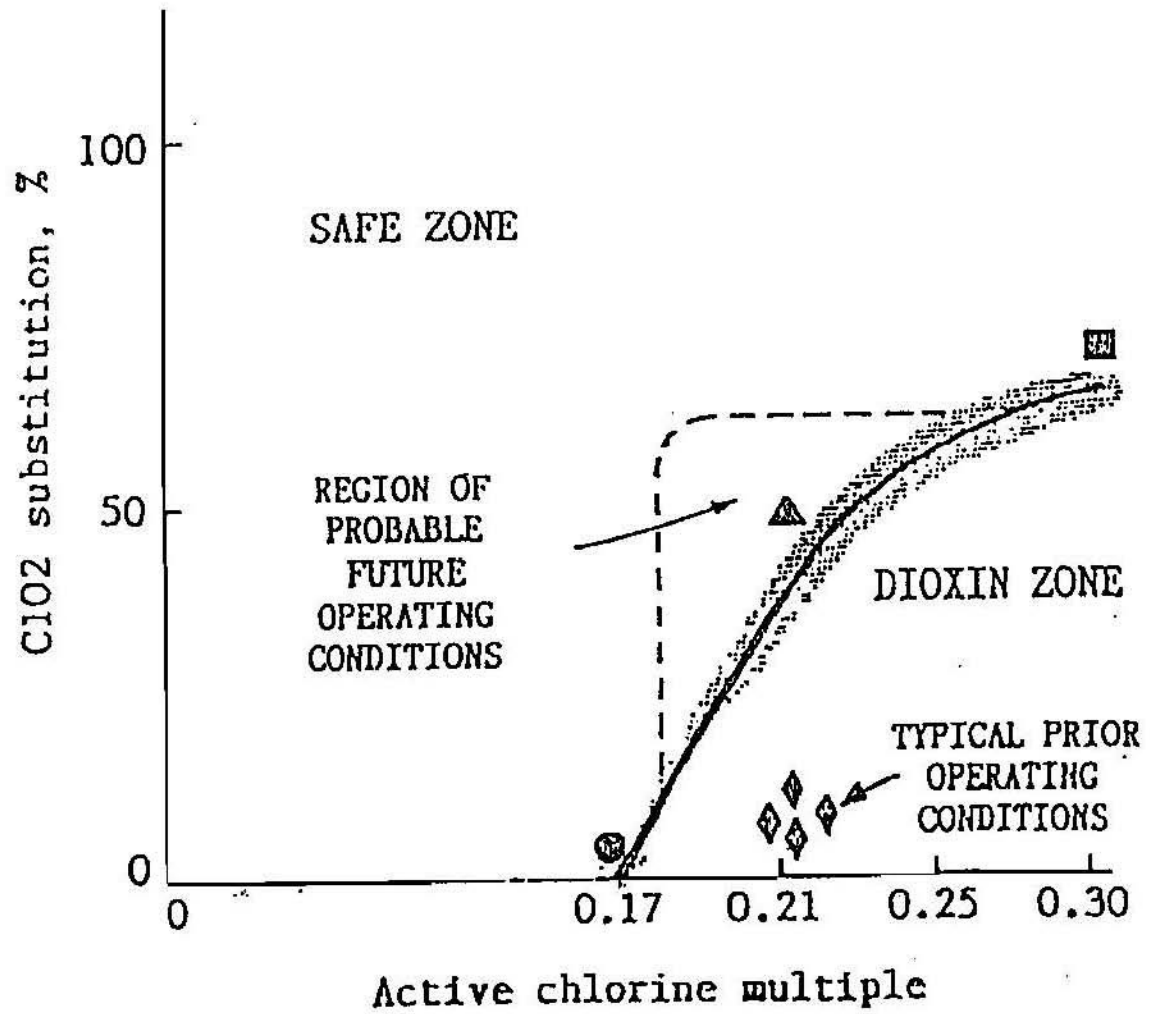
2.2 ความเหลือง (yellowness) ของเยื่อจะมีค่าลดลงตามปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีผลต่อการเพิ่มความคงทนของการกลับสีของเยื่ออย่างชัดเจน

2.3 การใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในขั้นการสกัดด้วยค่าสามารถช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนในขั้นตอนคลอรีนชั้นลงได้ในปริมาณใกล้เคียงกับปริมาณการใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต้องใช้เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ความขาวสว่างที่ระดับสูงประมาณร้อยละ 85 ISO

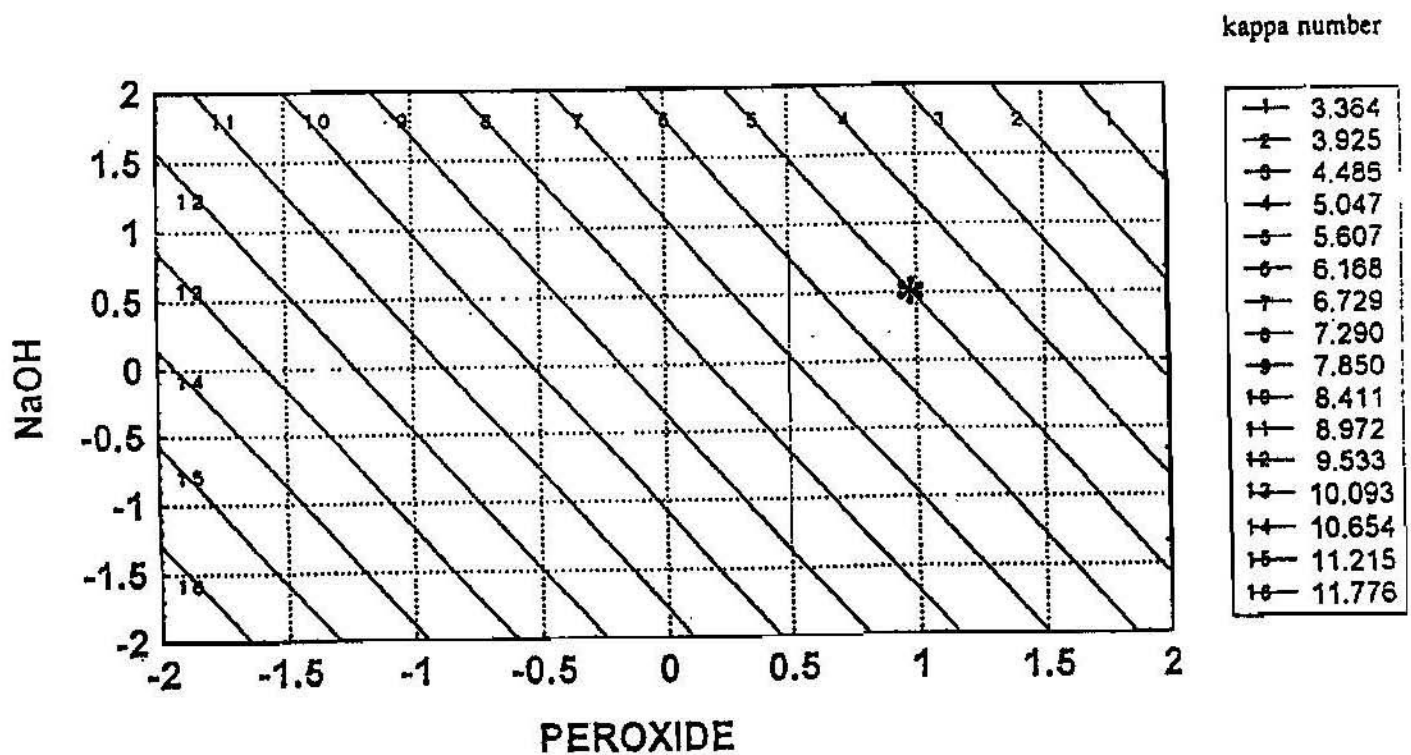
2.4 การใช้ไฮโปคลอไรท์ในปริมาณสูงในการฟอกเยื่อ แม้จะช่วยเพิ่มความขาวสว่างขึ้นแต่ในขณะเดียวกันยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการเสื่อมสภาพความขาวสว่างได้ง่ายด้วย จึงควรระมัดระวังในการควบคุมปริมาณการใช้

2.5 ผลจากการศึกษาวิจัยนี้สรุปได้ว่าสามารถฟอกเยื่อไม้ไม่ซัลเฟตให้ได้ความขาวสว่างของเยื่อที่ระดับร้อยละ 85 ISO ได้โดยใช้ C/K ratio ที่ระดับ 0.17 ซึ่งนอกจากจะสามารถช่วยลดปริมาณการใช้คลอรีนแล้วยังช่วยลดการเกิดสาร Dioxin ได้อีกด้วย





ภาพที่ 1 แสดงช่วงของ C/K ratio ที่ทำให้เกิดสาร DIOXIN



ภาพที่ 2 แสดงอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในชั้นออกซิเจนต่อการลดค่า kappa number ของเยื่อ

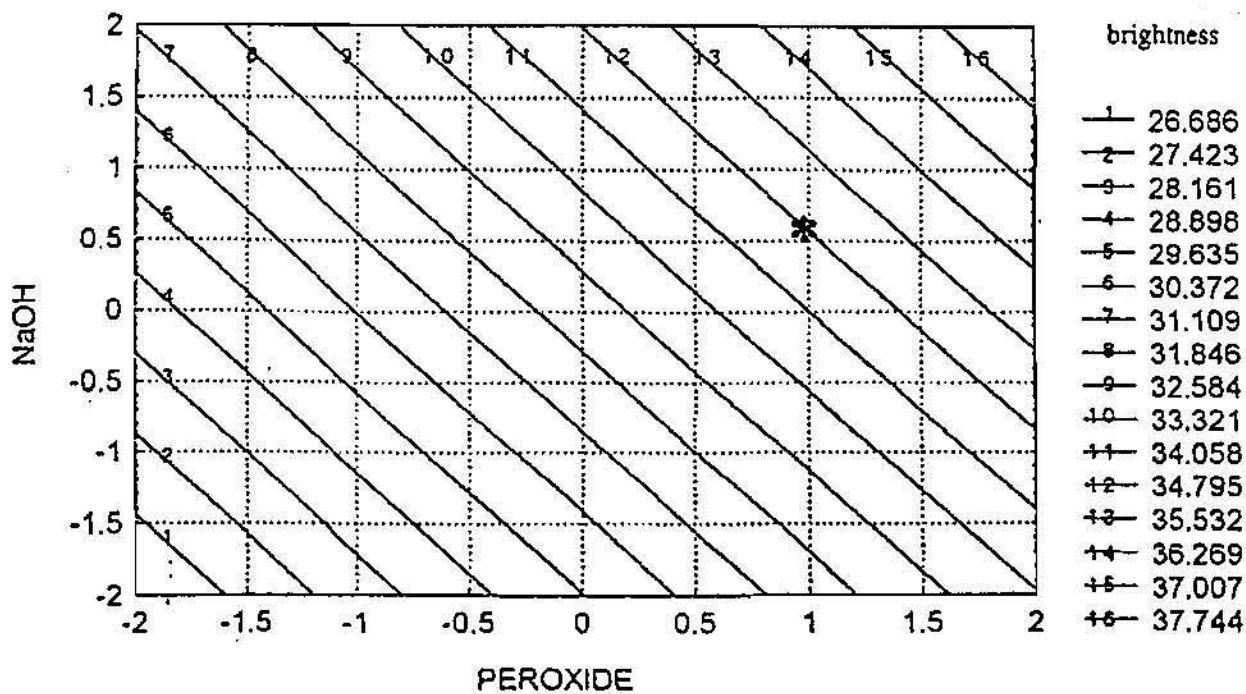
หมายเหตุ 1. เส้นที่ 1 - 16 แสดงค่า kappa number ของเยื่อในแต่ละระดับ ทุกๆ จุดของแต่ละเส้นจะมีค่า kappa number เดียวกัน เช่น

- เส้นที่ 5 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 5 จะมีค่า kappa number เท่ากับ 5.607
- เส้นที่ 11 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 11 จะมีค่า kappa number เท่ากับ 8.972

2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้

ปริมาณสารเคมี, ร้อยละ น้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ | โซเดียมไฮดรอกไซด์ |
|---------|----------------------|-------------------|
| - 1     | 0                    | 2                 |
| 0       | 0.25                 | 3                 |
| + 1     | 0.50                 | 4                 |



ภาพที่ 3 แสดงอิทธิพลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ในชั้นออกซิเจน  
ต่อค่า brightness ของเยื่อ

หมายเหตุ 1. เส้นที่ 1 - 16 แสดงค่า brightness ของเยื่อในแต่ละระดับ ทุกๆ จุดของแต่ละเส้นจะมีค่า brightness เดียวกัน เช่น

- เส้นที่ 5 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 5 จะมีค่า brightness เท่ากับ 29.635

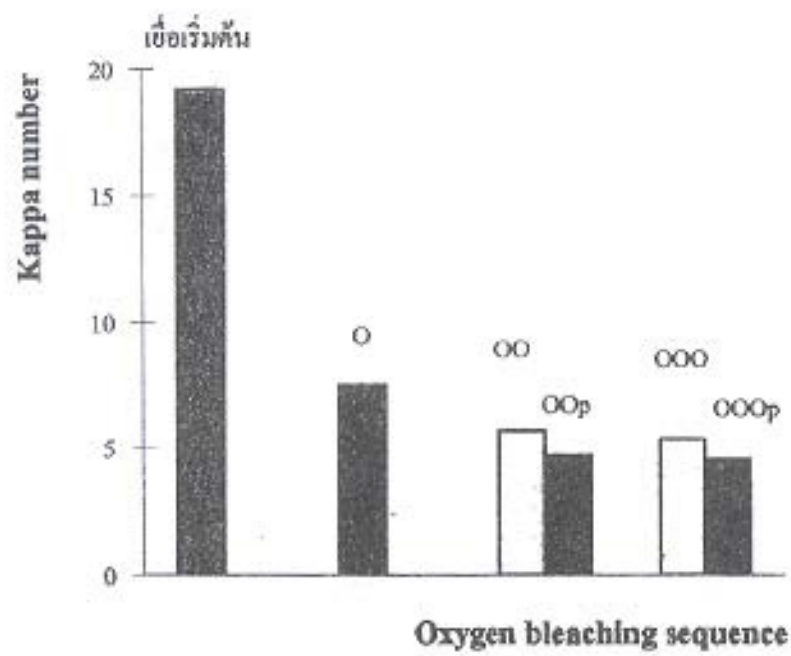
- เส้นที่ 12 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 12 จะมีค่า brightness เท่ากับ 34.795

2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้

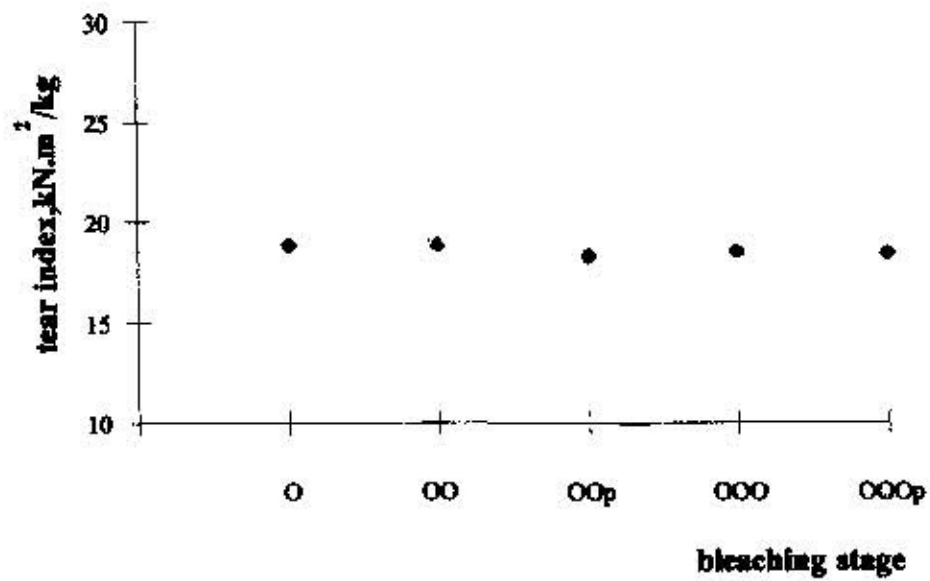
ปริมาณสารเคมี,ร้อยละน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ | โซเดียมไฮดรอกไซด์ |
|---------|----------------------|-------------------|
| - 1     | 0                    | 2                 |
| 0       | 0.25                 | 3                 |
| + 1     | 0.50                 | 4                 |

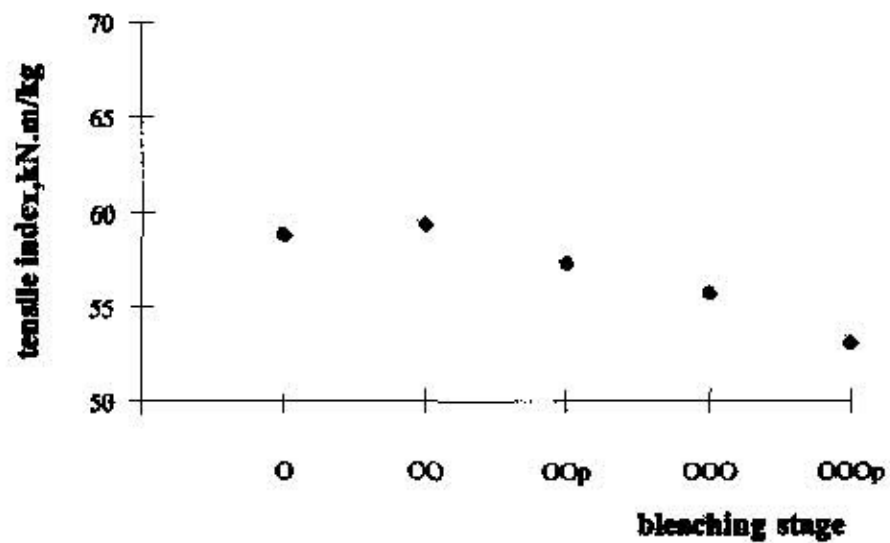




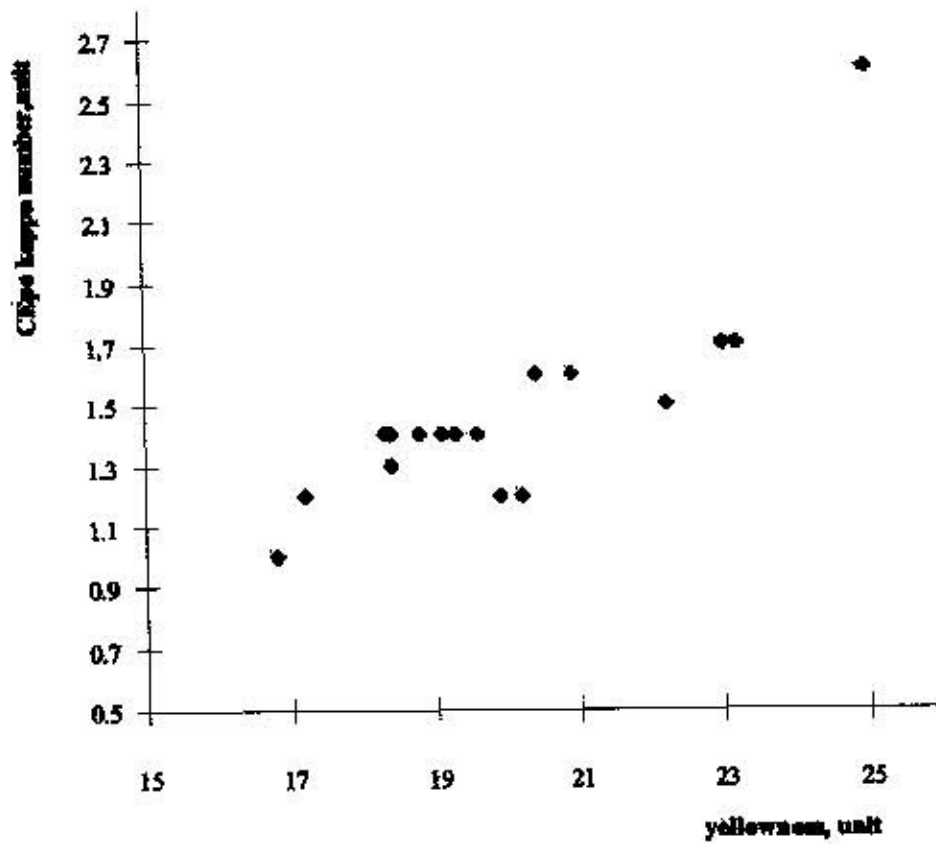
ภาพที่ 4 แสดงการลดปริมาณดิกนิทรีนในเยื่อไม้ไผ่ขัดฟอกที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 5A แสดงค่า tear index ของเยื่อไม้ไผ่จัดพลัดที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง



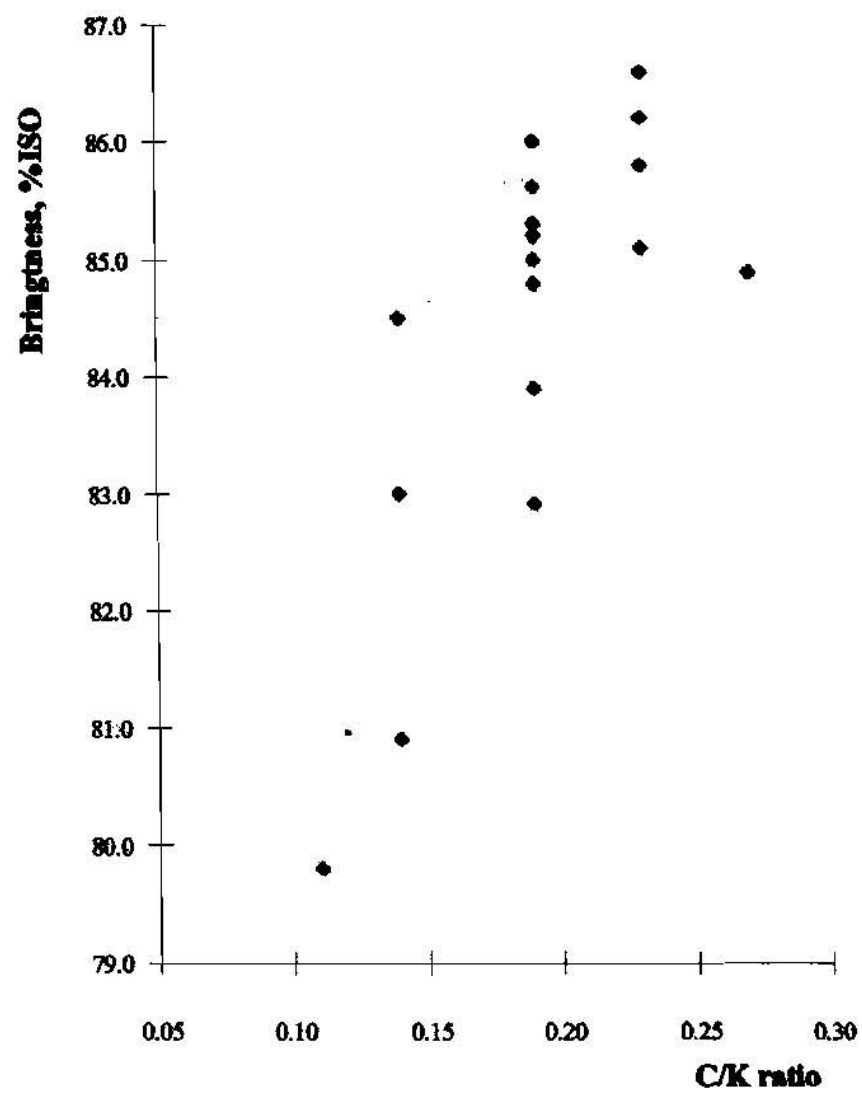
ภาพที่ 5B แสดงค่า tensile index ของเยื่อไม้ไผ่จัดพลัดที่ผ่านการฟอกด้วยออกซิเจนแบบต่อเนื่อง



ภาพที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง CE<sub>20</sub> kappa number และ yellowness ของเยื่อไม้ไผ่ชั้นเยื่อ  
หลังจากการลอกชั้นการสกัดด้วยด่าง

(ผลการทดลองตารางที่ 10)

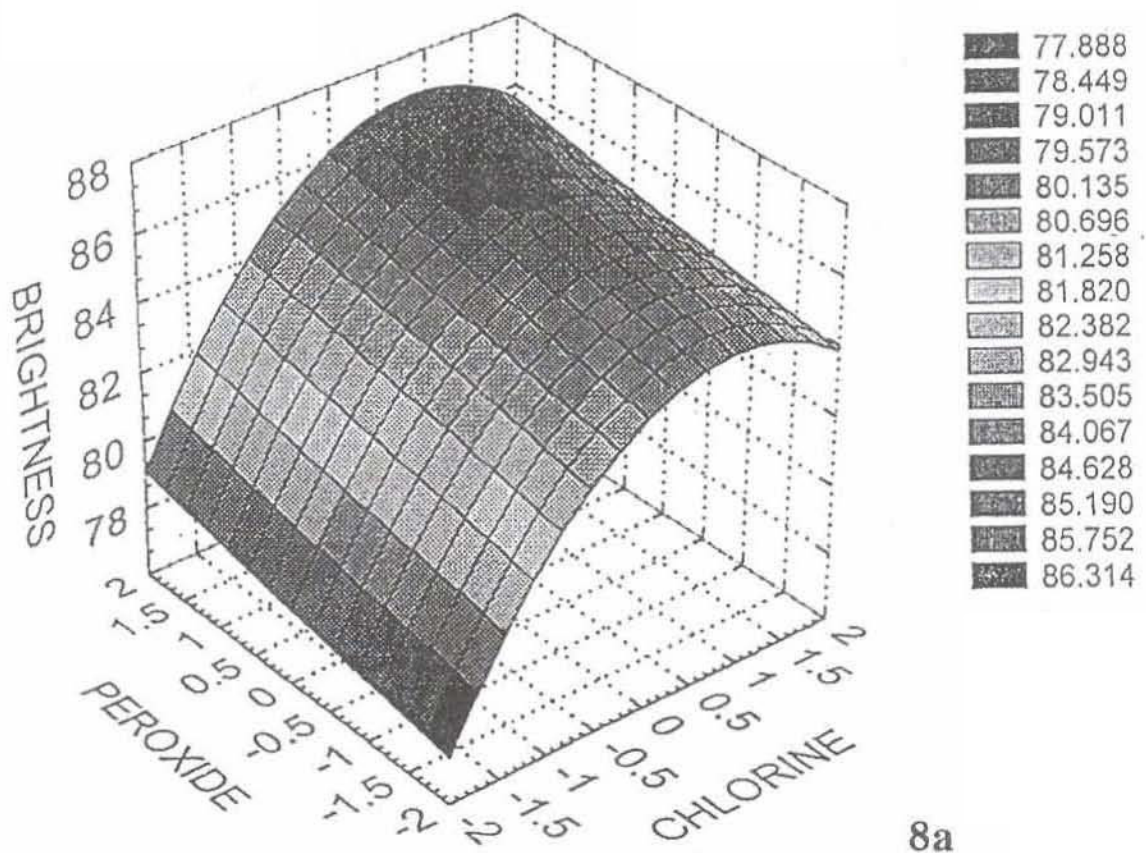




ภาพที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Brightness และ C/K ratio ของเยื่อฟอกที่ได้ (แบบ OCE<sub>m</sub>H)  
(ผลการทดลองตารางที่ 11)

## BRIGHTNESS ( BAMBOO-CE<sub>PO</sub>H PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = 0

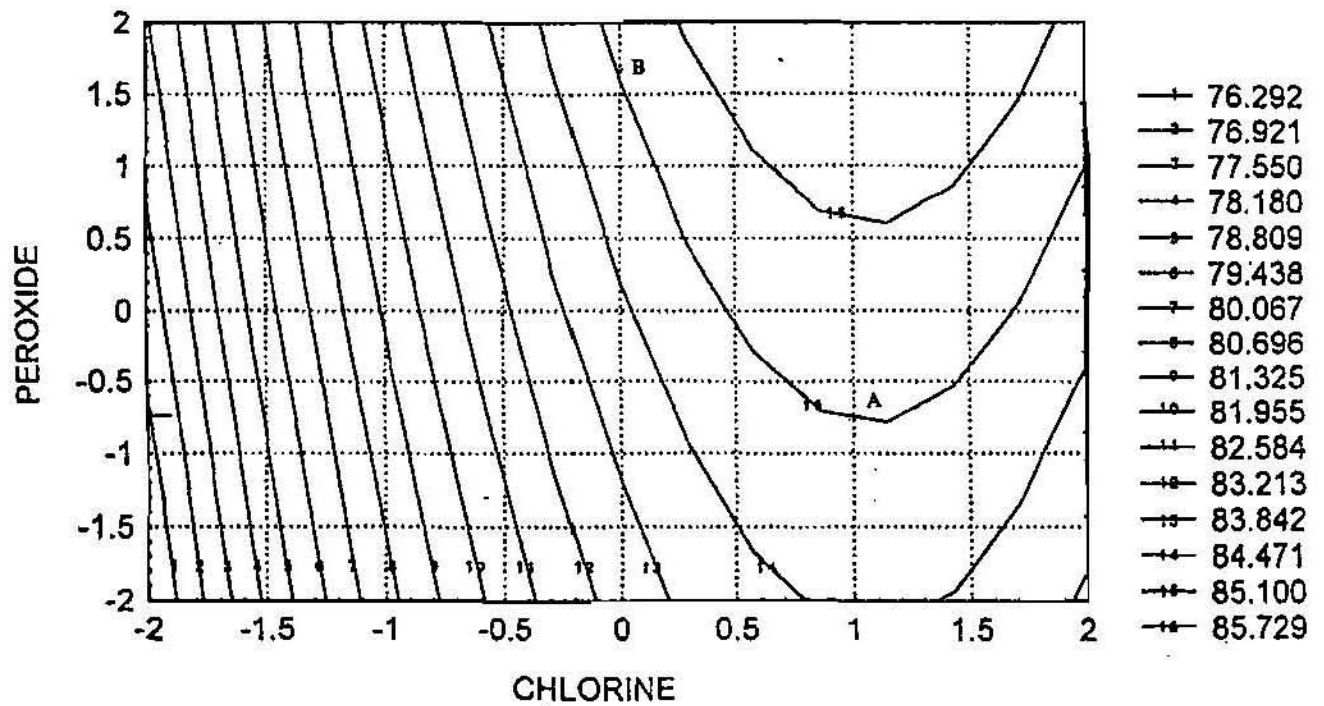


ภาพที่ 8a - 8d แสดงผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และคลอรีนต่อค่าความขาวสว่าง (brightness)

- หมายเหตุ 1. ภาพที่ 8a แสดง response surface สามมิติ ที่ระดับการใช้ไฮโปคลอไรท์ ที่เลขรหัส = 0
2. ภาพที่ 8b 8c และ 8d แสดง response surface สองมิติ ที่ระดับการใช้ไฮโปคลอไรท์ ที่เลขรหัส = -1, 0 และ +1 ตามลำดับ

# BRIGHTNESS ( BAMBOO-CE<sub>P0</sub>H PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = -1



ภาพที่ 8b .

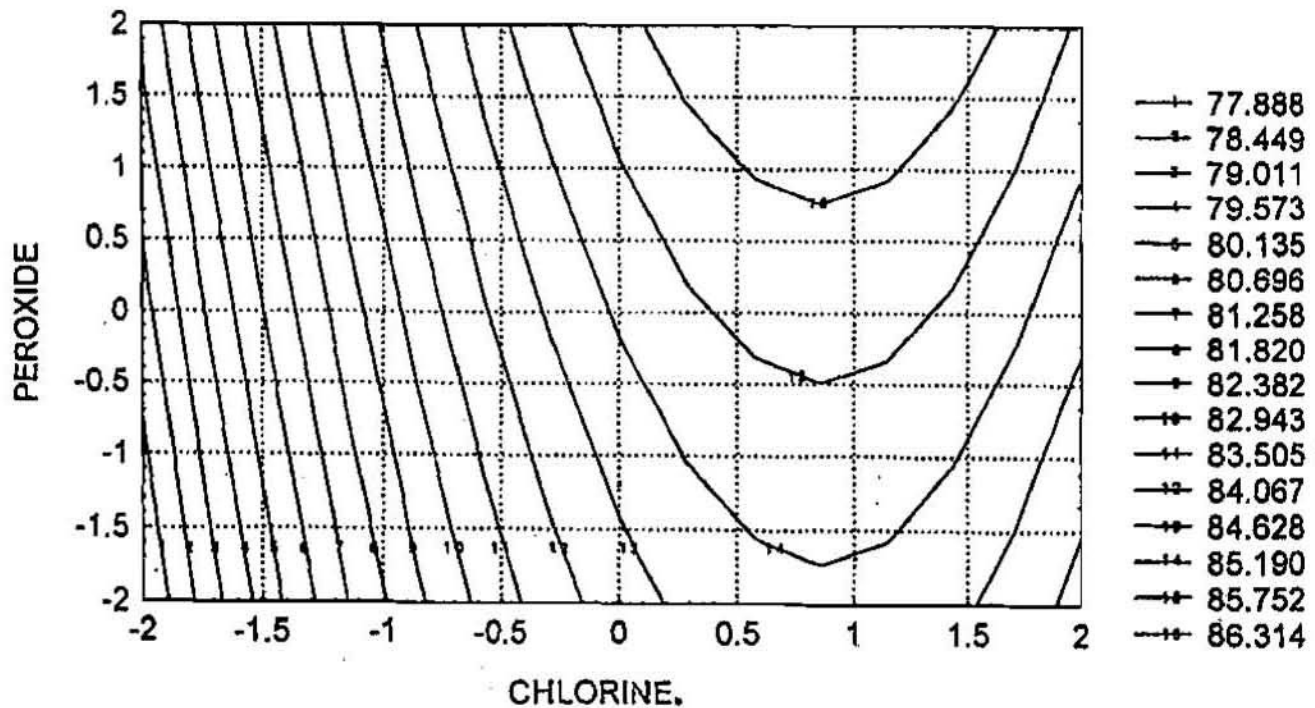
- หมายเหตุ 1. ทุกๆ จุด บนเส้นที่ 1 - 16 จะมีค่าความขาวสว่าง (brightness) เดียวกัน เช่น  
- เส้นที่ 15 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 มีค่าความขาวสว่าง เท่ากับ 85.1
2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้
- ปริมาณสารเคมี, ร้อยละน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | คลอรีน, C | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, P |
|---------|-----------|-------------------------|
| - 1     | 1.043     | 0.162                   |
| 0       | 1.4       | 0.4                     |
| + 1     | 1.757     | 0.638                   |



# BRIGHTNESS ( BAMBOO-CE<sub>P0</sub>H PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = 0



ภาพที่ 8c

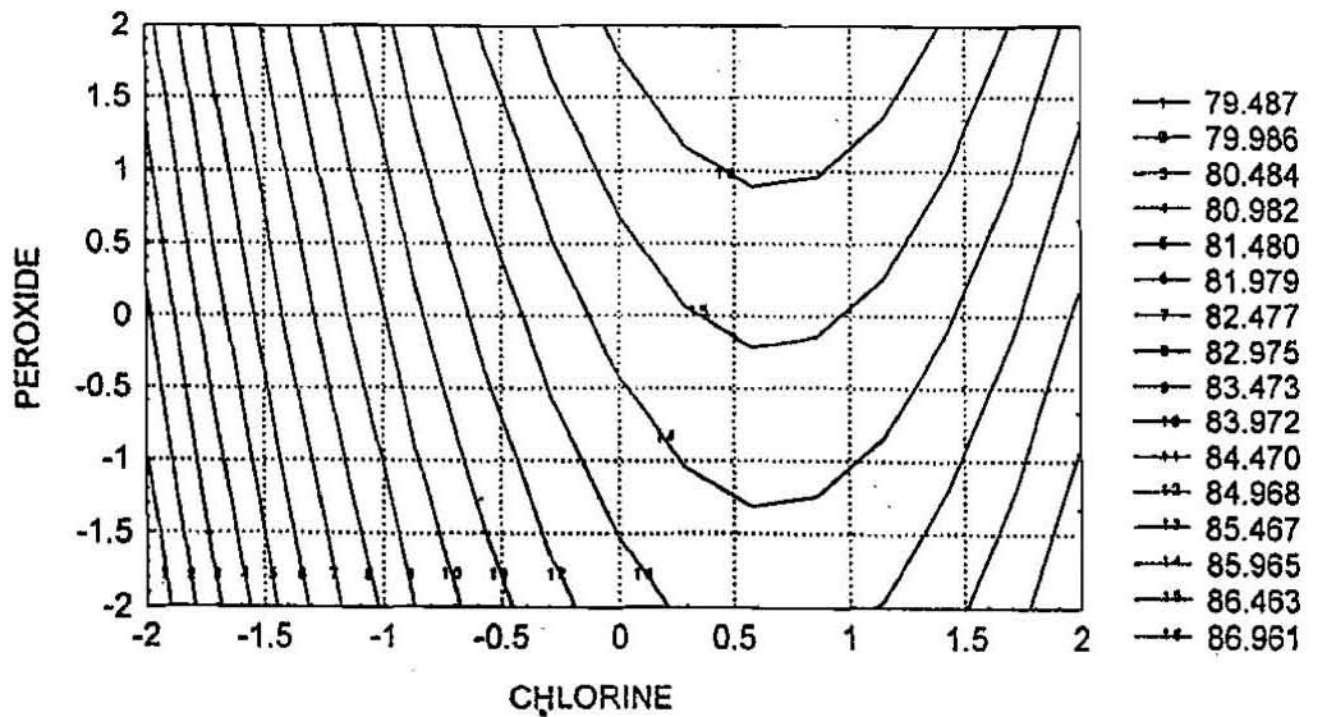
หมายเหตุ 1. ทุกๆ จุด บนเส้นที่ 1 - 16 จะมีค่าความขาวสว่าง (brightness) เดียวกัน เช่น  
- เส้นที่ 15 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 มีค่าความขาวสว่าง เท่ากับ 85.752

2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้  
ปริมาณสารเคมี, ร้อยละ น้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | คลอรีน, C | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, P |
|---------|-----------|-------------------------|
| - 1     | 1.043     | 0.162                   |
| 0       | 1.4       | 0.4                     |
| + 1     | 1.757     | 0.638                   |

# BRIGHTNESS ( BAMBOO-CE<sub>PO</sub>H PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = + 1



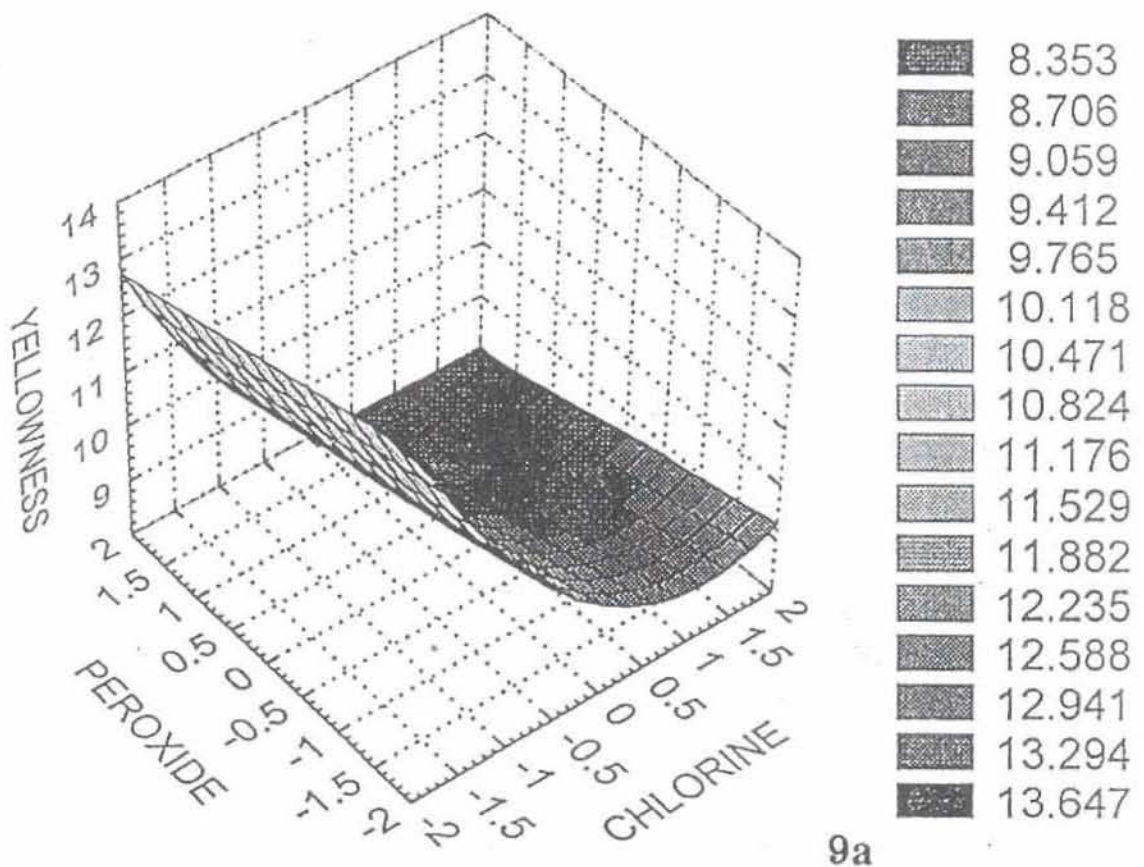
ภาพที่ 8d

หมายเหตุ 1. ทุกๆ จุด บนเส้นที่ 1 - 16 จะมีค่าความขาวสว่าง (brightness) เดียวกัน เช่น  
- เส้นที่ 15 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 มีค่าความขาวสว่าง เท่ากับ 86.463

2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้  
ปริมาณสารเคมี,ร้อยละน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | คลอรีน, C | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, P |
|---------|-----------|-------------------------|
| - 1     | 1.043     | 0.162                   |
| 0       | 1.4       | 0.4                     |
| + 1     | 1.757     | 0.638                   |

YELLOWNESS ( BAMBOO-CE<sub>P0</sub>H PULP)  
AT HYPOCHLORITE LEVEL = 0



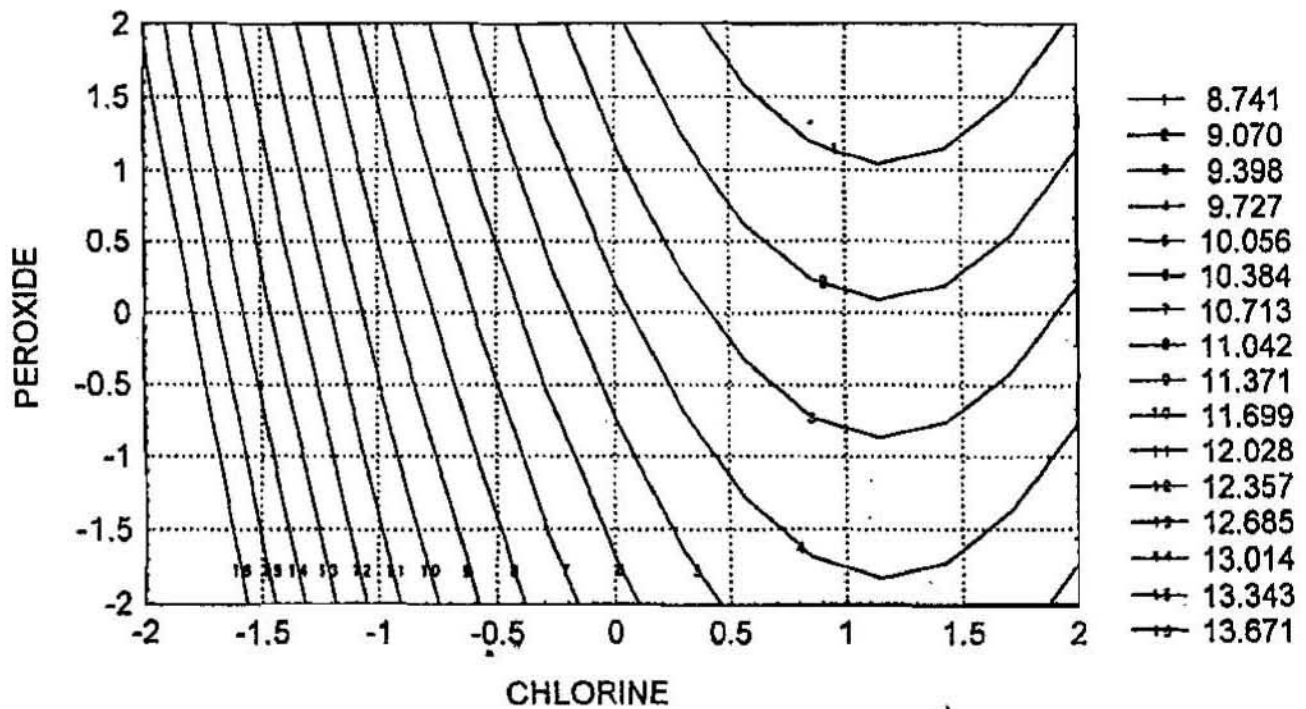
ภาพที่ 9a - 9d แสดงผลของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และคลอรีนต่อค่าความเหลือง (yellowness)

- หมายเหตุ 1. ภาพที่ 9a แสดง response surface สามมิติ ที่ระดับการใช้ไฮโปคลอไรท์ ที่เลขรหัส = 0
2. ภาพที่ 9b 9c และ 9d แสดง response surface สองมิติ ที่ระดับการใช้ไฮโปคลอไรท์ ที่เลขรหัส = -1, 0 และ +1 ตามลำดับ



# YELLOWNESS ( BAMBOO-CE<sub>P0</sub>H PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = -1



ภาพที่ 9b

หมายเหตุ 1. ทุกๆ จุด บนเส้นที่ 1 - 16 จะมีค่าความเหลือง (yellowness) เดียวกัน เช่น

- เส้นที่ 15 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 มีค่าความเหลือง เท่ากับ 13.343

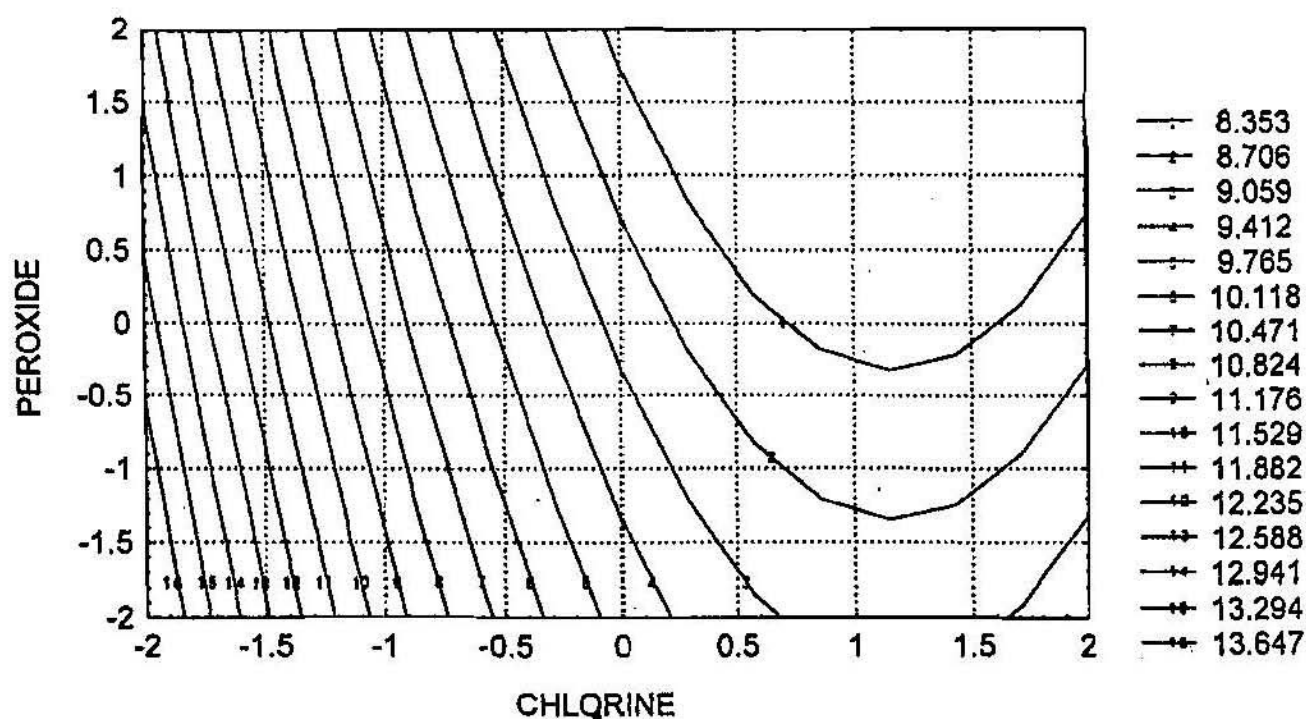
2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้

ปริมาณสารเคมี, ร้อยละ น้ำหนัก เชื้อยอบแห้ง

| เลขรหัส | คลอรีน, C | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, P |
|---------|-----------|-------------------------|
| - 1     | 1.043     | 0.162                   |
| 0       | 1.4       | 0.4                     |
| + 1     | 1.757     | 0.638                   |

## YELLOWNESS ( BAMBOO-CE<sub>P</sub>O<sub>H</sub> PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = 0



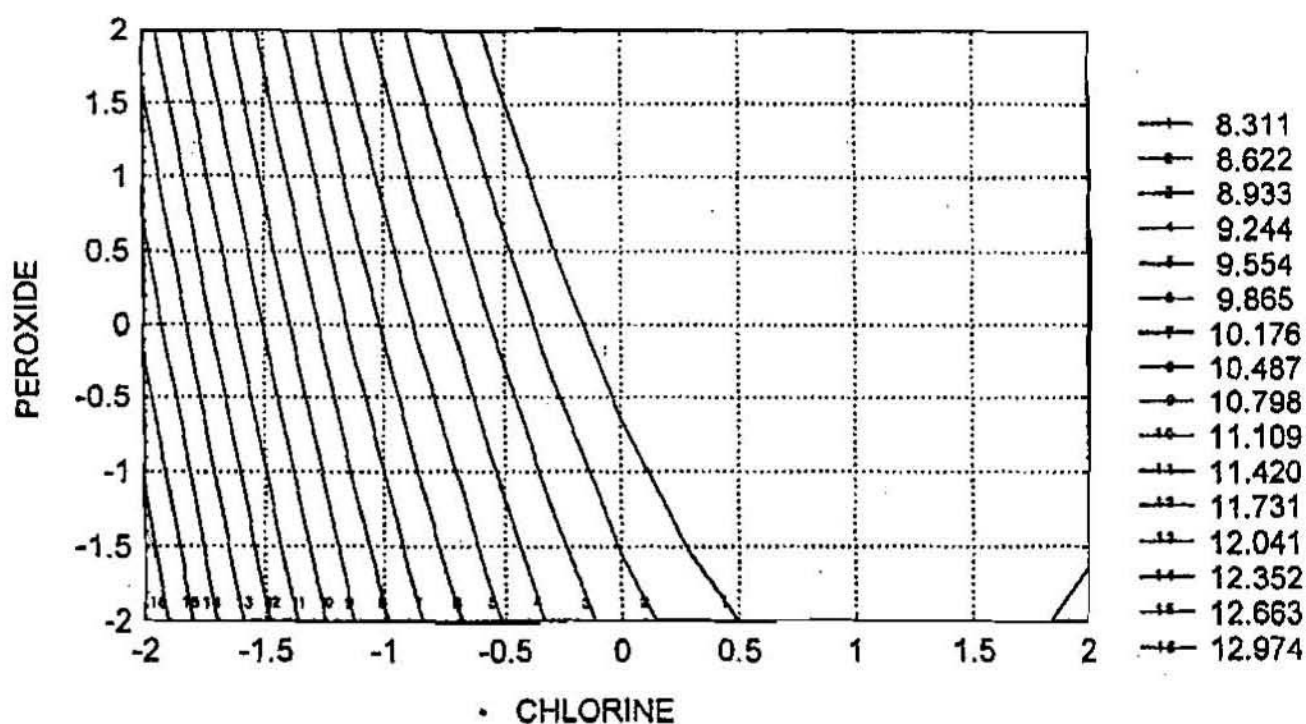
ภาพที่ 9c

- หมายเหตุ 1. ทุกๆ จุด บนเส้นที่ 1 - 16 จะมีค่าความเหลือง (yellowness) เดียวกัน เช่น  
 - เส้นที่ 15 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 มีค่าความเหลือง เท่ากับ 13.294
2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้  
 ปริมาณสารเคมี, ร้อยละ น้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | คลอรีน, C | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, P |
|---------|-----------|-------------------------|
| - 1     | 1.043     | 0.162                   |
| 0       | 1.4       | 0.4                     |
| + 1     | 1.757     | 0.638                   |

# YELLOWNESS ( BAMBOO-CE<sub>PO</sub>H PULP)

AT HYPOCHLORITE LEVEL = + 1



ภาพที่ 9d

- หมายเหตุ 1. ทุกๆ จุด บนเส้นที่ 1 - 16 จะมีค่าความเหลือง (yellowness) เดียวกัน เช่น  
- เส้นที่ 15 ทุกๆ จุดบนเส้นที่ 15 มีค่าความเหลือง เท่ากับ 12.663
2. หน่วยที่ใช้ในแกน X,Y เป็นเลขรหัส (coded value) สามารถแสดงค่าจริงได้ดังนี้
- ปริมาณสารเคมี,ร้อยละน้ำหนักเยื่ออบแห้ง

| เลขรหัส | กลอรีน, C | ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์, P |
|---------|-----------|-------------------------|
| - 1     | 1.043     | 0.162                   |
| 0       | 1.4       | 0.4                     |
| + 1     | 1.757     | 0.638                   |



### **คำขอบคุณ**

การศึกษาวิจัยเรื่องนี้ประสบความสำเร็จล่วงตรงตามวัตถุประสงค์และเจตนารมณ์เป็นอย่างดี ซึ่งความสำเร็จนี้มิได้เกิดขึ้นเนื่องจากผู้วิจัยโดยลำพังแต่เพียงผู้เดียว แต่ก่อรูปขึ้นด้วยการได้รับความอนุเคราะห์และความร่วมมือจากภาคเอกชน ผู้วิจัยจึงใคร่ขอแสดงคำขอบคุณต่อผู้มีส่วนเกี่ยวข้องดังกล่าว ดังนี้

1. บริษัทสยามเชลลูโลส จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อเอื้อไม้ไผ่ซัลเฟต
2. บริษัทเปอร์ออกไซด์ จำกัด ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และแมกนีเซียมซัลเฟต

## เอกสารอ้างอิง

1. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และสมชาติ รุ่งอินทร์ : "การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟางข้าว นาปรังและนาปีในการทำเยื่อกระดาษ" รายงานการวิจัย ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ค.ศ. 2523
2. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และคณะ : "การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อผสมฟาง และหญ้าแบบสามชั้น" รายงานการวิจัย ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ข.ศ. 2525
3. A.TEDER and A.TORNGREN .,"Reduction of the formation of AOX in DC Bleaching by Addition of Chloride Ions." jornal of pulp and paper science: vol.21 no.3 March 1995
4. C.Rappe ,S.Swanson ,B.Glas ,K.P.Kringstad ,F.De Sousa , L.Johansson and Z.Abe ., " On the formation of PCDD<sub>p</sub> and PCDD<sub>s</sub> in the bleaching of pulp." Pulp & Paper Canada 90;8 p T273-T278 (1989)
5. Giertz,S.W. & Helle,P.Norsk Skoind. vol 14 (11) ; 1960 p 455
6. J.S.Hunter " EXPERIMENTAL DESIGNS FOR THE EXPLORATION AND EXPLOITATION OF RESPONSE SURFACES." Box,Princeton University Princeton , New Jersey p 164-179
7. J.William Owens .,Human Health and Environmental Safety Procter & Gamble Paper Products " Assessing the enviromental impact of pulping and bleaching operations." Bleach Plant Operations p 269-280 (1991)
8. KIM G. McGROUTHER and ROBERTW.ALLISON., "Improved oxygen delignification with peroxyacid treatment." APPITA vol.47 no.3
9. Parthasarathy,V.R., Sundaram,V.S.M., Jameel,H., and Gratzl,J.S. " Hydrogen Peroxide Reinforced Oxygen Delignification Of Southern (Loblolly) Pine Kraft Pulp and Short Sequence Bleaching " Tappi Pulping Conference p 539-547 (1989)

10. RICHARD M. BERRY and CORINNE E. LUTHE., "A comparison of the order of addition of chlorine and chlorine dioxide in the chlorination stage Part III: Comparison at high chlorine dioxide substitution and constant CE kappa number." APPITA journal vol.47, no. 4, July 1994
11. R.M.Berry ,B.I.Fleming ,R.H.Voss ,C.E.Luthe and P.E. Wrist., "Toward preventing the formation of dioxins during chemical pulp bleaching." Pulp & Paper Canada 90:8 p T279-T289 (1989)
12. Rydholm ,S.A., "Pulping Process " ,Interscience Publications, New York (1965)
13. Tappi Standard T222 om-88
14. Tappi Standard T236 cm-85
15. Seth,R.F.,&Page,D.H. Tappi Journal vol 71 (2) ; 1988 p 103
16. Stephen E.Swanson ,Bo Glas and Christoffer Rappe " The influence of chlorine ratio and oxygen bleaching on the formation of PCDF<sub>s</sub> and PCDD<sub>s</sub> in pulp bleaching." Tappi Journal June 1989 p 163-169
17. William J.Gillespie ,Dr.Isaiah Gellman " Dioxin in pulp and paper products : occurrence and significance." Bleach Plant Operations Short Course p 233-258 (1991)

## ภาคผนวก ก

### คำอธิบายศัพท์ที่ใช้ในการวิเคราะห์และทดสอบ

- 1.. air - dry weight (AD) น้ำหนักวัสดุแห้งเป็นน้ำหนักที่ได้เมื่อวางทิ้งเป็นเวลานานพอสมควรในอากาศที่มีความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิปกติ สำหรับเยื่อกระดาษจะมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10
2. basis weight น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่มาตรฐาน มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเมตร เรียกกันว่า กรัมกระดาษ แต่ปัจจุบัน ISO และ TAPPI ใช้คำว่า grammage แทน basis weight โดยทั่วไปหมายถึง น้ำหนักต่อหน่วยพื้นที่ที่เก็บรักษาในสภาวะอุณหภูมิ และความชื้นที่ควบคุมมาตรฐานการทดสอบ สำหรับน้ำหนักมาตรฐานที่กำหนดยอมให้ค่าเฉลี่ยคลาดเคลื่อนได้ร้อยละ 5 ถ้าเป็นกระดาษแข็งมีน้ำหนักมาก ๆ อาจลดเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนเหลือเพียงร้อยละ 3
3. consistency, percent ความชื้นของน้ำเยื่อ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละของน้ำหนักเยื่อ อบแห้งในน้ำเยื่อ
$$\text{consistency, \%} = \frac{\text{น้ำหนักเยื่ออบแห้ง} \times 100}{\text{น้ำหนักเยื่อแห้ง} + \text{น้ำหนักน้ำ}}$$
เนื่องจากน้ำเยื่อ มิได้เป็นสารละลายแท้จริง (true solution) จึงควรเรียก consistency ว่า “ความชื้น” แทนคำว่า เข้มข้น ซึ่งหมายถึง concentration ของ true solution ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษแบ่งความเข้มข้นเป็นสามระดับ คือ low consistency (0 - 6%), medium consistency (6 - 20%) และ high consistency (20 - 40%)
4. grammage กรัมกระดาษ หมายถึงน้ำหนักมาตรฐาน หรือ basis weight ปัจจุบัน ISO และ TAPPI ใช้คำว่า grammage แทน basis weight
5. oven-dry weight (OD) น้ำหนักวัสดุอบแห้ง หมายถึง เมื่ออบที่อุณหภูมิ 105°C จนกระทั่งน้ำหนักวัสดุไม่ลดลงอีก ในทางปฏิบัติถือว่า หากชั่งครั้งต่อไปน้ำหนักลดลงน้อยกว่าร้อยละ 0.1 ของน้ำหนักชั่งครั้งก่อนก็ใช้ได้
6. ลิกนิน (lignin) เป็นโพลีเมอร์ (polymer) อัดแน่นประกอบด้วย phenyl propane unit เฉลี่ยประมาณ 2500 หน่วย จับตัวกันเป็นโครงร่างข่าย 3 มิติด้วย ether bond (ส่วนใหญ่เป็น phenyl-o-aryl-ether bond) และ C-C bond ลิกนินมีความเข้มสูงที่สุดในส่วนเชื่อมต่อระหว่างเส้นใย (middle lamella) โดยทำหน้าที่ยึดเส้นใยให้ติดอยู่ด้วยกัน ลิกนินมีคุณสมบัติเป็น thermo plastic อุณหภูมิที่อ่อนตัว (120 - 200°C) ขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้น
7. klason lignin ปริมาณลิกนินในพืชหรือเยื่อ หาได้โดยการแยกคาร์โบไฮเดรตออกโดยละลายในกรดกำมะถันเข้มข้น 72% klason lignin มีคุณสมบัติบางอย่างแตกต่างจากลิกนินในธรรมชาติโดยสิ้นเชิง klason lignin คือ acid insoluble lignin (Tappi T 222)



8. kappa number

เป็นดัชนีบ่งชี้ปริมาณลิกนินที่เหลือในเยื่อหมายถึง จำนวนมิลลิลิตรของค่าทั้งปมเข้มข้น 0.1 N ที่ทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับเยื่อแห้ง 1 กรัม ตามสภาวะที่กำหนดตามมาตรฐาน kappa number มีสหสัมพันธ์ที่ดีกับ klason lignin เฉพาะในช่วงที่ผลิตเยื่อต่ำกว่าร้อยละ 70 เท่านั้น

9. ความขาวสว่าง  
(brightness)

หมายถึง reflectivity ของแผ่นเยื่อหรือกระดาษวัดที่ช่วงคลื่นแสง 457 nm เปรียบเทียบกับ MgO (ISO 2469-1977 (E) ใช้ perfect reflecting diffuser โดยถือว่า MgO มี reflectivity 100% ความขาวสว่างเป็นคุณสมบัติทางกายภาพโดยแท้ไม่สามารถบ่งบอกคุณลักษณะเกี่ยวกับสีได้ ค่าที่วัดได้ขึ้นอยู่กับกระบวนการกระจายแสง (light scattering) และการดูดซับแสง (light absorption) ของเยื่อเท่านั้น ฉะนั้นความขาวสว่าง จึงเป็นค่าที่มีประโยชน์อย่างยิ่งแต่เฉพาะในการระบุคุณสมบัติของเยื่อฟอกหรืออีกนัยหนึ่งการวัดผลการฟอกเยื่อเท่านั้น แต่ยังไม่เพียงพอต่อการบ่งบอกความขาว (whiteness) ของกระดาษ การวัดความขาวสว่างขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่ใช้ ซึ่งมีหลายแบบแตกต่างกันในด้าน optical geometry เป็นสำคัญ อุปกรณ์วัดความขาวสว่างที่รู้จักกันดีได้แก่ Elrepho, G.E. และ photovolt ค่าที่วัดได้จากเครื่องมือเหล่านี้แตกต่างกันเล็กน้อย แต่ไม่สามารถระบุให้ถูกต้องแน่ชัดเป็นเกณฑ์ได้ว่ามากนักน้อยเพียงใด

10. brightness reversion

การเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อ ได้แก่ การที่เยื่อมีความขาวสว่างลดลงเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน การเสื่อมสภาพความขาวเกิดจากปัจจัยทางเคมีในตัวเยื่อเอง และปัจจัยทางกายภาพจากภายนอก เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และความร้อน

11. brightness reversion test

การทดสอบแนวโน้มในการเสื่อมสภาพความขาวของเยื่อ การทดสอบแบบธรรมชาติ ต้องใช้เวลานานมาก เช่น 1 ปี หรือกว่านั้น ในทางปฏิบัติจึงทำการเร่งการเสื่อมสภาพหรือเรียกกันว่า accelerated aging test โดยสร้างสภาวะทางกายภาพที่รุนแรงกว่าปกติ ซึ่งคาดว่าจะมีผลต่อการเสื่อมสภาพตามความเป็นจริงในธรรมชาติ เช่น ใช้ความร้อน (dry heat) ความร้อนและความชื้นสัมพัทธ์สูง (wet heat) หรือแสงอุลตราไวโอเล็ต การทดสอบแต่ละแบบเหมาะสมกับเยื่อซึ่งมีที่ใช้แตกต่างกัน

12. yellowness

เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเหลืองของเยื่อหรือกระดาษ ที่ 457 nm

13. post colour number

เรียกย่อๆ ว่า P.C. number ใช้เป็นดัชนีชี้ความเสื่อมสภาพความขาวสว่างของเยื่อคำนวณจากสูตร

$$P.C. no. = 100 [(K/S)_i - (K/S)_0] \text{ โดยที่}$$

K = light absorption coefficient (สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง)

S = light scattering coefficient (สัมประสิทธิ์การกระจายแสง)

และ subscript “t” และ “o” หมายถึง เวลาสุดท้ายและเริ่มต้น Giertz เป็นผู้นำ P.C. number มาใช้อธิบายการกลืนสีของเยื่อเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1945 ค่า P.C. number ให้ความเข้าใจเรื่องการเกิดสีในเยื่อได้ดีกว่าค่าความขาวสว่าง P.C. number ไม่มีหน่วย (dimensionless)

14. light absorption coefficient, K สัมประสิทธิ์การดูดซับแสง เป็นตัวแปรตัวหนึ่งในสมการของ Kubelka-Munk ใช้สัญลักษณ์ K มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2/\text{kg}$  การดูดซับแสงขึ้นอยู่กับ chromophores ของเยื่อ
15. light scattering coefficient, S สัมประสิทธิ์การกระจายแสง เป็นตัวแปรตัวหนึ่งในสมการของ Kubelka-Munk ใช้สัญลักษณ์ S มีหน่วยเป็น  $\text{m}^2/\text{kg}$  การกระจายแสงขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวในเยื่อที่มีส่วนในการกระจายแสง เยื่อไม้บดมีค่าสัมประสิทธิ์การกระจายแสงประมาณ 60-70 ตารางเมตรต่อกิโลกรัมเยื่อ ซึ่งสูงกว่าเยื่อเคมี 2-3 เท่า
16. tensile strength ความสามารถในการรับแรงดึงของกระดาษ ขึ้นอยู่กับการบดเยื่อและความตึงของกระดาษระหว่างที่ทำให้แห้ง ซึ่งเป็นปัจจัยที่ทำให้ความต้านแรงดึงขาดลดลง การทดสอบค่า tensile strength ตามมาตรฐานทั่วไปใช้เครื่องทดสอบแบบคัม (pendulum type) การรายงานค่าควรรายงานเป็นหน่วยแรงที่มีความหมาย คือ แรงต่อหน่วยความกว้างของกระดาษ ได้แก่ กิโลนิวตันต่อเมตร ( $\text{kN/m}$ ) หรือหน่วยกิโลกรัมแรงต่อเซนติเมตร ( $\text{kgf/cm}$ ) เนื่องจากกระดาษเป็นวัสดุที่มีพื้นที่หน้าตัดไม่สม่ำเสมอ การรายงานเป็นหน่วยแรงต่อพื้นที่หน้าตัดจึงไม่ถูกต้อง ในการทดสอบ ค่า tensile strength จะขึ้นอยู่กับระยะทดสอบ (test span) ความกว้างของชิ้นทดสอบและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ (time to rupture) การใช้ระยะทดสอบยาวมากขึ้นหรือใช้เวลาคัดสอบนานมากขึ้นจะทำให้ค่าที่ได้ลดลงถ้าระยะทดสอบเวลาเท่ากันเครื่องทดสอบแบบ pendulum และ constant straining rate จะให้ผลไม่แตกต่างกัน
17. tensile index ดัชนีความต้านแรงดึงมีหน่วยเป็น  $\text{kN.m/kg}$  โดยคำนวณจาก
- $$\text{tensile index} = \frac{\text{tensile strength}}{\text{grammage}}$$
18. tearing strength, internal ความต้านแรงดึงขาดของกระดาษเมื่อเกิดรอยฉีกขาดนำอยู่ก่อนแล้วรายงานค่าเป็นหน่วยของแรง เช่น มิลลินิวตัน (mN) คุณสมบัตินี้จำเป็นสำหรับกระดาษหลายชนิดรวมทั้งถุงบรรจุที่ปิด โดยการเย็บ วัดด้วยเครื่องทดสอบแบบ Elmendorf ซึ่งอาศัยพลังงานกลจากลูกตุ้ม ซึ่งมีหลายขนาด ขนาดของลูกตุ้มบอกหน่วยพลังงานต่อขีดแตก เช่น 68.8 g.cm/div (ขนาดกลาง) เครื่องมืออื่นก็มีแต่ไม่แพร่หลายนัก เช่น Broch-Imset

19. tear index

ดัชนีความต้านแรงฉีกขาด มีหน่วยเป็น  $\text{mN.m}^2/\text{kg}$  โดยคำนวณจาก

$$\text{tear index} = \frac{\text{tearing strength}}{\text{grammage}}$$

20. burst strength

ความต้านแรงดันทะลุ มีหน่วยเป็นแรงต่อหน่วยพื้นที่ เช่น กิโลปาสกาล (kPa) หรือ กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร เครื่องทดสอบแรงดันทะลุที่แพร่หลายที่สุด คือ Mullen ในมาตรฐาน Tappi, SCAN test และ ISO แบ่งแยกเครื่องทดสอบ Mullen สำหรับกระดาษและกระดาษแข็งออกจากกันโดยมีความแตกต่างสำคัญที่ขนาดของปากจับขึ้นทดสอบ และ pumping rate ค่าแรงดันทะลุขึ้นอยู่กับการยืดเหนียวระหว่างเส้นใยและการยึดตัวของกระดาษ ฉะนั้นโดยทั่วไปค่าแรงดันทะลุจึงสัมพันธ์โดยตรงกับค่าแรงดึง

21. burst index

ดัชนีความต้านแรงดันทะลุ มีหน่วยเป็น  $\text{kPa.m}^2/\text{g}$  โดยคำนวณจาก

$$\text{burst index} = \frac{\text{bursting strength}}{\text{grammage}}$$

**ภาคผนวก ข**  
**การออกแบบการทดลอง (Experimental Design)**  
**แบบแฟคทอเรียล (Factorial)**

การทดลองที่มีประสิทธิภาพจำเป็นต้องมีการวางแผนการทดลองไว้ล่วงหน้า เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ตรงกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และสามารถนำข้อมูลที่ได้นั้นมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ เทคนิคในการวางแผนการทดลองจึงจำเป็นอย่างยิ่งสำหรับการทดลอง เพราะทำให้สามารถสรุปผลที่มีความหมายต่อการทดลองนั้นได้ ในการทดลองที่ผู้ทดลองไม่สามารถควบคุมปัจจัยบางอย่างที่มีผลต่อการทดลองได้และปัจจัยเหล่านั้นเกิดขึ้นโดยสุ่ม วิธีการทางสถิติจะเป็นวิธีเดียวที่สามารถช่วยแก้ปัญหานี้ได้ ปัญหาในการทดลองจึงอาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ ซึ่งทั้ง 2 ลักษณะมีความสัมพันธ์กันอย่างใกล้ชิด ทั้งนี้เพราะการวิเคราะห์จะขึ้นกับแผนการทดลองที่ใช้ แผนการทดลองมีหลายรูปแบบ เช่น การทดลองแบบสุ่มภายในบล็อก (Randomized Block Design) หรือการทดลองแบบแฟคทอเรียล (factorial design) ในที่นี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลเท่านั้น (แบบ  $2^k$  factorial design หรือ แบบ  $3^k$  factorial design)

แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลมีความเหมาะสมสำหรับใช้ในการทดลองซึ่งมีตัวแปรที่ต้องการศึกษามากกว่า 1 ตัวขึ้นไป แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลมีหลายรูปแบบด้วยกัน เช่น แบบ  $2^k$  factorial design หรือ แบบ  $3^k$  factorial design เป็นต้น การจะเลือกใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบใดขึ้นอยู่กับกรณีที่ต้องการศึกษา

โดยที่

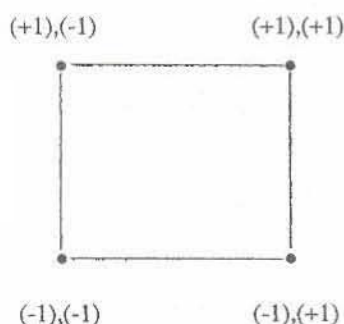
“k” หมายถึง ตัวแปรที่สนใจจะศึกษาทดลอง

“2” หมายถึง ระดับ (level) ของทรีตเมนต์ ในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาดทดลอง

ยกตัวอย่างเช่นต้องการศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณของโซดาไฟต่อความขาวสว่างของเยื่อที่ได้หลังการฟอกที่ระดับต่างๆ กัน 2 ระดับ คือ 0%, 0.50% และ 2%, 4% ตามลำดับ จะเห็นว่าการทดลองนี้มี 2 ตัวแปรในแต่ละตัวแปรแบ่งออกเป็น 2 ระดับ การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเป็น  $2^2$  factorial design โดยศึกษาไปพร้อมๆ กันทั้ง 2 ตัวแปรในแต่ละระดับ ซึ่งถ้าในการทดลองโดยใช้ตัวแปรเดียว การทดลองต้องทดลองไปที่ละตัวแปร เช่น ศึกษาปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเป็นตัวแปรตัวแรกที่ระดับการเติม 0%, 0.50% ตามด้วยการทดลองที่ตัวแปรตัวที่ 2 คือ ปริมาณของโซดาไฟที่ระดับการเติม 2%, 4% วัดค่าความขาวสว่างที่ได้ แล้วเปรียบเทียบค่าความขาวสว่างในระดับต่าง ๆ ของตัวแปรทั้งสอง ( ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณของโซดาไฟ ) ว่าระดับไหนเหมาะสมที่สุด แล้วทำการทดลองซ้ำอีกครั้งที่ระดับที่เห็นว่าเหมาะสมที่สุดแล้ว ซึ่งต้องทำการทดลองถึง 2 ครั้ง ทำให้ยุ่งยาก เสียเวลาและค่าใช้จ่าย ดังนั้นถ้าทำการทดลองเพียงครั้งเดียวแต่สามารถทดลองได้ทั้ง 2 ตัวแปรที่ระดับต่างๆ ไปพร้อมกันได้ ซึ่งทำให้การทดลองเพื่อสรุปผลแบบเดียวกันในการทดลองแบบตัวแปรเดียวง่ายขึ้น ประหยัดเวลา และยังสามารถอธิบายเกี่ยวกับตัวแปรที่ใช้ในการทดลองได้กว้างกว่าอีกด้วย และการทดลองแบบแฟคทอเรียลนี้ ใช้ได้กับแผนการทดลองพื้นฐานทุกแบบและจะใช้ทั้งตัวแปร ที่ระดับก็ได้ ขึ้นกับความเหมาะสมของสิ่งที่จะทำการทดลอง และเพื่อความสะดวกในการปฏิบัติงานจึงได้แสดงตัวแปรที่สนใจจะศึกษาทดลอง และระดับของทรีตเมนต์ ที่ใช้เป็นเลขรหัส (coded value) ตามรูปที่ 1 และตารางที่ 1



รูปที่ 1 ภาพแสดงการให้เลขรหัสของแผนการทดลองแบบ  $2^2$  factorial design



ตารางที่ 1 แสดงแผนการออกแบบการทดลอง  $2^2$  factorial design

| $X_1$                                                              | $X_2$       |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| coded value                                                        | coded value |
| * factorial points ( $n_f$ ) : $n_f = 4$ for $1^{st}$ order design |             |
| -1                                                                 | +1          |
| -1                                                                 | -1          |
| +1                                                                 | +1          |
| +1                                                                 | -1          |

การทดลองแบบ  $2^2$  factorial design หมายถึงมีตัวแปรที่สนใจศึกษา 2 ตัว แต่ละตัวมี 2 ระดับทรีตเมนต์ ดังนั้นจำนวนจุดการทดลองหรือ จุด \* factorial points จะเท่ากับ  $2 \times 2 = 4$  จุดการทดลอง ดังรูปที่ 1 ตารางที่ 1 จุด \* factorial points นี้ใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในขั้น  $1^{st}$  order design ของสมการเส้นตรง ยกตัวอย่างเช่นต้องการศึกษาอิทธิพลของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และปริมาณของโซดาไฟต่อความขาวสว่างของเยื่อที่ได้หลังการฟอกที่ระดับต่างๆ กัน 2 ระดับ คือ 0%, 0.50% และ 2%, 4% ตามลำดับ แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การทดลองแบบ  $2^2$  factorial design ของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และปริมาณของโซดาไฟ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อ

| $X_1$ : ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )                    |      | $X_2$ : ปริมาณของโซดาไฟ (NaOH) |   |
|--------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------|---|
| coded value                                                        | %    | coded value                    | % |
| * factorial points ( $n_f$ ) : $n_f = 4$ for $1^{st}$ order design |      |                                |   |
| -1                                                                 | 0    | +1                             | 4 |
| -1                                                                 | 0    | -1                             | 2 |
| +1                                                                 | 0.50 | +1                             | 4 |
| +1                                                                 | 0.50 | -1                             | 2 |

สำหรับแผนการทดลองแบบ  $2^k$  Central Composite Rotatable Design ( $2^k$  CCRD) เป็นการเพิ่มจำนวนจุดการทดลองให้มากขึ้นกว่าแผนการทดลองแบบ  $2^k$  factorial design เพื่อให้การทดลองมีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น จึงต้องมีการกำหนดจุด centre point เพื่อการ estimating errors ของการทดลอง โดยจุด \* factorial points ต้องห่างจากจุด © centre point เท่าๆ กัน โดยทำการทดลองควบคู่กันไปกับการทดลอง ณ จุด \* factorial points ทำให้มีจุดการทดลองที่ © centre point = 4 จุดการทดลอง แต่ถ้าในกรณีที่มีการทดลองให้ค่าความสัมพันธ์ไม่เป็นสมการเส้นตรงจำเป็นต้องกำหนดจุดการทดลองเพิ่มเติมเป็นจุด ⊗ augmented point ( $\pm \alpha$ ) ซึ่งเป็นจุดการทดลองที่เพิ่มเติมขึ้นมาสำหรับสมการ  $2^{nd}$  order design และต้องห่างจากจุด © centre point เท่าๆ กัน โดยมีระยะห่างเท่ากับ  $2^{1/k}$  ( $2^{1/4} = \sqrt{2} = 1.41$ ) ทำให้มีจุดการทดลองที่จุด ⊗ augmented point เท่ากับ 4 จุดการทดลอง รวมจุดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 12 จุดการทดลอง การเพิ่มจุดการทดลองนี้ทำให้สามารถหาความสัมพันธ์อันดับสอง (สมการ  $2^{nd}$  order design) ของตัวแปรที่จะศึกษาได้ จึงเรียกแผนการทดลองนี้ว่า  $2^k$  Central Composite Rotatable Design ( $2^k$  CCRD) โดยที่

“k” หมายถึง ตัวแปร ( $X_1, X_2$ ) ที่สนใจจะศึกษาทดลอง

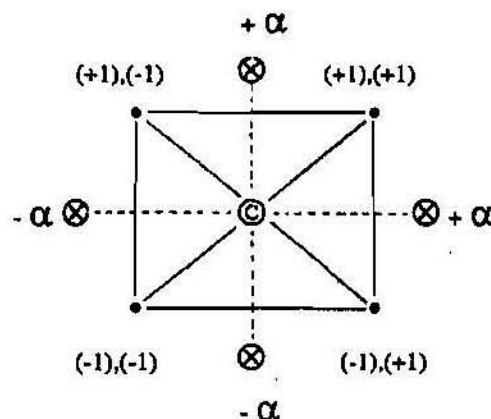
“2” หมายถึง ระดับ (level) ของทรีตเมนต์ ในแต่ละตัวแปรที่ทำการศึกษาทดลอง

“Composite” หมายถึง การประกอบจุดทดลองเพิ่มเติม

“Rotatable” หมายถึง ทุกๆ จุดของ factorial points และ augmented point จะอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง (Central - Centre points) เท่ากัน

แผนการทดลองแบบ  $2^3$  CCRD แสดงดังรูปที่ 2 ตารางที่ 3 และตารางที่ 4

รูปที่ 2 ภาพแสดงการให้เลขรหัสของแผนการทดลองแบบ  $2^3$  CCRD



ตารางที่ 3 แสดงแผนการออกแบบการทดลอง  $2^2$  CCRD

| $X_1$                                                                     | $X_2$       |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------|
| coded value                                                               | coded value |
| * factorial points ( $n_f$ ) : $n_f = 4$ for 1 <sup>st</sup> order design |             |
| -1                                                                        | +1          |
| -1                                                                        | -1          |
| +1                                                                        | +1          |
| +1                                                                        | -1          |
| © centre points ( $n_0$ ) : $n_0 = 4$ for estimating errors               |             |
| 0                                                                         | 0           |
| 0                                                                         | 0           |
| 0                                                                         | 0           |
| 0                                                                         | 0           |
| ⊗ augmented points ( $n_s$ ) : $n_s = 4$ for 2 <sup>nd</sup> order design |             |
| 0                                                                         | $-\alpha$   |
| 0                                                                         | $+\alpha$   |
| $-\alpha$                                                                 | 0           |
| $+\alpha$                                                                 | 0           |
| Total experimental points = 12                                            |             |

จำนวนจุดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 12 จุดการทดลอง



ตารางที่ 4 การทดลองแบบ  $2^2$  CCD ของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และ  
ปริมาณของโซดาไฟ ที่มีอิทธิพลต่อค่าความขาวสว่างของเยื่อ

| $X_1$ : ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )                           |      | $X_2$ : ปริมาณของโซดาไฟ (NaOH) |       |
|---------------------------------------------------------------------------|------|--------------------------------|-------|
| coded value                                                               | %    | coded value                    | %     |
| * factorial points ( $n_f$ ) : $n_f = 4$ for 1 <sup>st</sup> order design |      |                                |       |
| -1                                                                        | 0    | +1                             | 4     |
| -1                                                                        | 0    | -1                             | 2     |
| +1                                                                        | 0.50 | +1                             | 4     |
| +1                                                                        | 0.50 | -1                             | 2     |
| © centre points ( $n_0$ ) : $n_0 = 4$ for estimating errors               |      |                                |       |
| 0                                                                         | 0.25 | 0                              | 3     |
| 0                                                                         | 0.25 | 0                              | 3     |
| 0                                                                         | 0.25 | 0                              | 3     |
| 0                                                                         | 0.25 | 0                              | 3     |
| ⊗ augmented points ( $n_a$ ) : $n_a = 4$ for 2 <sup>nd</sup> order design |      |                                |       |
| 0                                                                         | 0.25 | - $\alpha$                     | -1.59 |
| 0                                                                         | 0.25 | + $\alpha$                     | 4.41  |
| - $\alpha$                                                                | 0.60 | 0                              | 3     |
| + $\alpha$                                                                | 0.60 | 0                              | 3     |

ในการกำหนดเลขรหัส (coded value) ที่สัมพันธ์กับการตัวแปรที่ใช้ (ปริมาณสารเคมี) จำนวนได้ดังนี้  
การคำนวณ ค่า ตัวแปรตัวที่ 1 ( $X_1$ ) โดยกำหนดให้

- $X_1$  = ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ )  
 $a$  = ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่จุด centre point  
 $b$  = ผลต่างของปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่ระยะห่างจากจุด centre point

เช่น

$$\frac{X_1 - a}{b} = +1 \quad \dots\dots\dots 1$$

$$\frac{X_1 - a}{b} = 0 \quad \dots\dots\dots 2$$



$$\frac{X_i - a}{b} = -1 \quad \dots\dots\dots 3$$

จากสมการที่ 1 แทนค่า  $X_i, a, b$  จะได้

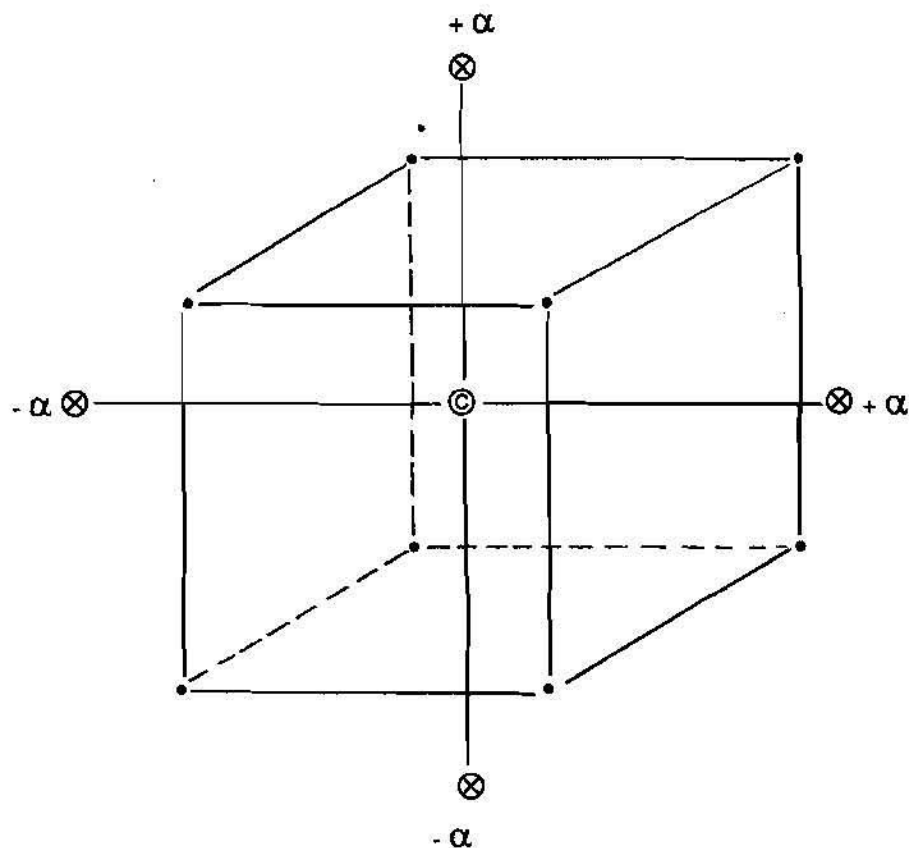
$$\frac{0.50 - 0.25}{0.25} = +1 \quad \dots\dots\dots 4$$

$$+1 = +1 \quad \dots\dots\dots 5$$

จะเห็นว่าที่เลขรหัส + 1 (coded value +1) มีการใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เท่ากับ 0.50 % ซึ่งในการคำนวณเลขรหัสที่สัมพันธ์กับตัวแปรที่กำหนดที่จุดการทดลองอื่นๆ ก็คำนวณในลักษณะเดียวกันกับสมการที่ 1, 4 และ 5 ตามลำดับ

ส่วนการวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบ  $3^k$  factorial design อธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับการวางแผนการทดลองแบบแฟคทอเรียลแบบ  $2^k$  factorial design คือ ถ้าเป็น  $3^3$  factorial design หมายถึง ตัวแปรที่จะศึกษาทดลองมี 2 ตัวแปร ในแต่ละตัวแปรมี 3 ระดับ หรือ ถ้าแผนการทดลองเป็น  $2^3$  factorial design หมายถึง ตัวแปรที่จะศึกษาทดลองมี 3 ตัวแปร ( $X_1, X_2, X_3$ ) ในแต่ละตัวแปรมี 2 ระดับ ซึ่งอธิบายให้ง่ายขึ้นโดยแสดงเป็นเลขรหัส (coded value) แสดงดัง รูปที่ 3 และตารางที่ 5

รูปที่ 3 ภาพแสดงการให้เลขรหัสของแผนการทดลองแบบ  $2^3$  factorial design (  $2^3$  CCRD )



ตารางที่ 5 แสดงแผนการออกแบบการทดลอง  $2^3$  factorial design (  $2^3$  CCRD )

| $X_1$                                                              | $X_2$       | $X_3$       |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|
| coded value                                                        | coded value | coded value |
| * factorial points ( $n_f$ ) : $n_f = 8$ for $1^{st}$ order design |             |             |
| -1                                                                 | +1          | -1          |
| -1                                                                 | -1          | -1          |
| +1                                                                 | +1          | -1          |
| +1                                                                 | -1          | -1          |
| -1                                                                 | +1          | +1          |
| -1                                                                 | -1          | +1          |
| +1                                                                 | +1          | +1          |
| +1                                                                 | -1          | +1          |
| © centre points ( $n_0$ ) : $n_0 = 6$ for estimating errors        |             |             |
| 0                                                                  | 0           | 0           |
| 0                                                                  | 0           | 0           |
| 0                                                                  | 0           | 0           |
| 0                                                                  | 0           | 0           |
| 0                                                                  | 0           | 0           |
| 0                                                                  | 0           | 0           |
| ⊗ augmented points ( $n_a$ ) : $n_a = 6$ for $2^{nd}$ order design |             |             |
| 0                                                                  | 0           | $-\alpha$   |
| 0                                                                  | 0           | $+\alpha$   |
| 0                                                                  | $-\alpha$   | 0           |
| 0                                                                  | $+\alpha$   | 0           |
| $-\alpha$                                                          | 0           | 0           |
| $+\alpha$                                                          | 0           | 0           |
| Total experimental points = 20                                     |             |             |

รวมจุดการทดลองทั้งหมดเท่ากับ 20 จุดการทดลอง

ดังนั้นในการวางแผนการทดลองแบบ  $2^3$  factorial design นี้ อธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับ  $2^3$  factorial design เพียงแต่ตัวแปรที่จะศึกษามี 3 ตัวแปร จึงได้จุดการทดลองที่  $\bullet$  factorial points เป็น  $2 \times 2 \times 2 = 8$  จุดการทดลอง ( $2^3$ ) และจุดการทดลองที่จุด  $\odot$  centre point เป็น 8 จุดการทดลองเท่ากันแต่ในทางปฏิบัติจริงทำการทดลองเพียง 6 จุดการทดลองก็สามารถ estimating errors ของการทดลองได้ และยิ่งตัวแปรที่จะศึกษามากขึ้น โอกาสที่จะเป็นสมการเส้นตรงเป็นไปได้ยากจึงจำเป็นต้องมีจุดการทดลองเพิ่มที่จุด  $\otimes$  augmented point ( $\pm \alpha$ ) โดยมีระยะห่าง  $\pm \alpha$  จากจุด  $\odot$  centre point จะมีค่าเท่ากับ  $2^{k/4}$  ( $2^{3/4} = 1.68$ ) และในการกำหนดเลขรหัส (coded value) ก็ต้องสัมพันธ์กับปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการทดลองด้วย อธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับ  $2^3$  factorial design