



# ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณลิกนินและคลอรีนกับสมบัติของเยื่อฟางข้าวโมโนซัลไฟท์ฟอกขาว

**เรื่องย่อ** ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่สำคัญในการฟอกเยื่อ เช่น kappa number และปริมาณคลอรีนกับสมบัติด้านความขาวสว่างและความเหนียวของเยื่อ มีประโยชน์อย่างยิ่งในการกำหนดค่าของตัวแปรที่เหมาะสม และการควบคุมกระบวนการผลิต ในรายงานนี้ได้เลือกตัวแปรที่จะศึกษา ได้แก่ kappa number ของเยื่อก่อนฟอก และปริมาณคลอรีน โดยจะใช้การฟอกแบบสามขั้น (CEH) และขั้นเดียว (H) วัตถุประสงค์หลักฟางข้าวทำเป็นเยื่อโดยวิธีโมโนซัลไฟท์ แผนการทดลองสำหรับการฟอกเป็นแผนทางสถิติแบบ 3—level incomplete factorial และ  $3^2$  factorial design สำหรับการฟอกแบบสามขั้นและขั้นเดียวตามลำดับ การทดลองพบว่า quadratic model อธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง kappa number ปริมาณคลอรีน และไฮโปคลอไรท์กับสมบัติเยื่อ เช่น ความขาวสว่าง การกลบสีและความเหนียวได้ดี โดยมีสหสัมพันธ์สูง ( $r^2 = 0.80-0.99$ ) ความสัมพันธ์เหล่านี้จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการเลือกค่าตัวแปรที่เหมาะสม (optimized) ในเทอมของคุณภาพหรือราคา ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในการผลิตเช่น ความขาวสว่างของเยื่อหลังฟอกต่าง ( $R_{\infty CE}$ ) กับค่า kappa number และปริมาณคลอรีนมีสหสัมพันธ์สูงมาก ( $r^2 = 0.95$ ) จึงหวังได้ว่า เราจะสามารถนำความสัมพันธ์เหล่านี้ไปใช้เป็นแนวทางในการควบคุมการฟอกเยื่อได้

**คำนำ** ในการฟอกเยื่อเคมี ตัวแปรที่สำคัญได้แก่ ปริมาณลิกนินในเยื่อก่อนฟอก ปริมาณคลอรีน ระดับความขาวสว่างและความเหนียวของเยื่อฟอก ความขาวสว่างเป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้นตามความต้องการของตลาดมากกว่าความจำเป็นจริงในการใช้งาน การ

กำหนด cooking degree และปริมาณคลอรีนสำหรับฟอกเยื่อ จึงขึ้นอยู่กับความขาวสว่างที่ต้องการ หากประสงค์จะกำหนดค่าของตัวแปรให้เหมาะสม (optimum) ในเทอมของคุณภาพหรือค่าใช้จ่าย เราจำเป็นต้องทราบความสัมพันธ์เชิงปริมาณของตัวแปรเหล่านี้โดยละเอียด

สำหรับทางปฏิบัติของโรงงานในประเทศ การเลือก cooking degree ซึ่งส่วนใหญ่ใช้ค่า permanganate number และปริมาณคลอรีนในขั้นต่าง ๆ อาจประสบการณณ์และเหตุผลของแต่ละโรงงาน โดยทั่วไปโรงงานจะเลือกต้มเยื่อให้ได้ permanganate ค่าที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เพื่อประหยัดคลอรีน ส่วนปริมาณคลอรีน โรงงานบางรายถือตามข้อมูลที่ได้รับจากต่างประเทศหรือเอกสาร เช่น Tappi UM 206 และ UM 209 (Roe chlorine number) หรือ Tappi ts-50 (ยกเลิกแล้ว) โดยคิดปริมาณคลอรีนจากค่า permanganate number วิธีดังกล่าวอาจบอกให้ทราบถึงปริมาณคลอรีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเยื่อในสถานะที่กำหนดหรือความขาวสว่างที่คาดไว้เท่านั้น แต่ไม่อาจบอกได้ว่าค่าของตัวแปรอิสระ เช่น ปริมาณลิกนินและปริมาณคลอรีนที่ใช้นั้นเหมาะสมเพียงใด

นอกจากการพิจารณาแนวทางค่าของตัวแปรที่เหมาะสมอย่างแท้จริงแล้ว การควบคุมคุณภาพเยื่อฟอกยังต้องอาศัยความสัมพันธ์เชิงปริมาณระหว่างตัวแปรในกระบวนการผลิต ทั้งในการควบคุมแบบอัตโนมัติและแบบใช้คนควบคุม ความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงเป็น software ที่จำเป็นและควรได้รับความสนใจนำมาใช้ประโยชน์ โดยที่ปัจจุบันยังไม่มีการศึกษาวิจัยในเชิงนี้ สำหรับอุตสาหกรรมเยื่อในประเทศ งานเยื่อและกระดาษจึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว

ข้างต้น โดยใช้ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบ ทำเป็นเยื่อโดยวิธีโมโนซัลไฟท์ และฟอกเยื่อสองวิธีคือสามชั้น (CEH) และชั้นเดียว (H) ซึ่งวัตถุดิบและวิธีทำเยื่อเป็นสิ่งที่โรงงานกระดาษบางปะอินของกระทรวงอุตสาหกรรมใช้อยู่ในขณะนี้

#### การทดลอง

๑. การออกแบบการทดลอง (experimental design) ตัวแปรที่จะศึกษาในการฟอกเยื่อแบบสามชั้นได้แก่ kappa number ของเยื่อก่อนฟอก (K) ปริมาณคลอรีนในชั้นคลอรีนชั้น (C) และปริมาณคลอรีนในชั้นไฮโปคลอไรท์ (H) ตัวแปรตามหรือสมบัติที่ต้องการทราบ ได้แก่ ความขาวสว่าง การกลับสี

ความต้านทานแรงดึงและแรงฉีกขาด จากประสบการณ์ linear model อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเหล่านี้กับความขาวสว่างและความเหนียวของเยื่อหลังฟอกได้ไม่เป็นที่พอใจนัก<sup>๑,๒</sup>) งานนี้จึงเลือกใช้แผนการทดลองแบบ incomplete 3-level factorial design ของ Box และ Behnken ซึ่งจะช่วยที่สามารถประเมินความสัมพันธ์ในแบบ quadratic model และลดปริมาณงานที่ต้องปฏิบัติลงได้มาก ส่วนการทดลองฟอกแบบขั้นตอนเดียว (single-stage hypochlorite) จะใช้การทดลองแบบ  $3^2$  factorial design ค่าของตัวแปรต่างๆ แสดงในตารางที่ ๑

ตารางที่ ๑ ค่าของตัวแปรอิสระที่ใช้ในการทดลอง (values of independent variables used in the experiment)

Coded values	CEH bleaching			Single-stage bleaching
	K	C	H	H
+ 1	18	4.00	3	5.0
0	14	3.25	2	3.5
- 1	10	2.50	1	2.0

หมายเหตุ ค่าของ C และ H คิดเป็นปริมาณร้อยละของ available chlorine ต่อน้ำหนักเยื่อ

๒. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ฟางข้าวอัดเบลได้รับจากโรงงานกระดาษบางปะอิน ก่อนใช้ตัดให้เป็นท่อนสั้นๆ ขนาด ๕-๑๐ ซม. อุปกรณ์คัมและทำความสะอาดเยื่อเป็นดั่งที่เคยรายงานไว้แล้ว<sup>๑</sup>) ค่า kappa number ที่รายงานเป็นค่าที่ได้จากเยื่อหลังผ่านเซนตริคัลลิเนอรั

การฟอกเยื่อทำในถุงพลาสติกทนความร้อน สภาวะการต้มเยื่อตามตารางที่ ๒ กำหนดขึ้นเพื่อให้สะดวกในการทำเยื่อให้มี kappa number ที่ต้องการ แต่ไม่ถือว่าเป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละระดับ สภาวะการฟอกเยื่อแสดงในตารางที่ ๓

ตารางที่ ๒ สภาวะการต้มเยื่อ (pulping conditions)

Pulping conditions	Kappa number level		
	10	14	18
sodium sulphite, %	24.0	13.5	8.0
caustic soda as buffer, %	3.0	3.0	3.0
max. temp., °C	170	170	160-165
time at max. temp., min	90	0	10
kappa number	10.2	13.5	17.7
total yield,	57.7	60.0	64.1

ตารางที่ ๓ สภาวะการฟอกเยื่อ (bleaching conditions)

Bleaching conditions	CEH			Single-stage
	C	E	H	H
chemical charge, %	See table 1	2	See table 1	See table 1
reaction time, min.	≤ 60	60	240	240
temp. °C	ambient	60	40	40
pH	2-2.5	—	8.5-9.5	8.5-9.5

**ผลการทดลองและข้อวิจารณ์** ผลการทดลองแสดงในตารางที่ ๔ และที่ ๕ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับสมบัติเยื่อ ซึ่งแสดงในตารางที่ ๖ และ ๗ สรุปสาระสำคัญดังนี้

๑. การฟอกเยื่อแบบสามขั้น

๑.๑ ความขาวสว่าง ( $R_{\infty}$ ) และความเหนียวของเยื่อฟอกขาว ความขาวสว่างของเยื่อมีสหสัมพันธ์สูงมากกับ kappa number ของเยื่อก่อนฟอกและปริมาณคลอรีน ( $r^2 = 0.969$ ) ค่า tensile index และ tear index มีสหสัมพันธ์กับตัวแปรทั้งสามสูง รองลงมาจากความขาวสว่าง ( $T^2 = 0.847$  และ  $0.820$ ) การเพิ่มปริมาณคลอรีนในขั้นไฮโปคลอไรท์ มีผลต่อค่าความขาวสว่าง PC number และการสูญเสียความเหนียวของเยื่อมากกว่าการเพิ่มในขั้นคลอรีนชัน ซึ่งชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นในการควบคุมปริมาณ

คลอรีนในคลอรีนชันให้พอเหมาะตลอดเวลา เพื่อรักษาระดับของไฮโปคลอไรท์ให้เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด

๑.๒ ความต้องการคลอรีน รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเยื่อฟอกขาวกับปริมาณคลอรีน ฯลฯ ในเชิง quadratic ได้ชี้ให้เห็นว่า เราไม่อาจคาดคะเนความต้องการคลอรีนจากค่า kappa number โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้น รูปที่ ๑ เป็นการแสดงสมการ ในแบบกราฟโดยกำหนดให้ปริมาณไฮโปคลอไรท์มีค่าคงที่ และใช้อัตราส่วน C/K แทน C เพื่อเน้นให้เห็นว่า อัตราส่วน C/K เปลี่ยนแปลงตามค่า kappa number และความขาวสว่าง รูปที่ ๒ เป็นตัวอย่างการเลือกระดับ kappa number และปริมาณคลอรีนชั้นคลอรีนชัน โดยนำค่าดัชนีแรงดึงเข้ามาพิจารณาร่วมกับความขาวสว่าง ในทำนองเดียวกันเราอาจนำปัจจัยอื่นเช่น ค่าใช้จ่ายในการต้ม

เยื่อและฟลอกคลอรีนเข้ามาพิจารณาพร้อมด้วยหากมีข้อมูลเพียงพอ

๑.๓ ความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่น kappa number ของเยื่อหลังฟลอกต่าง ( $K_{CE}$ ) และความขาวสว่าง มีความสัมพันธ์แบบ non-linear เยื่อหลังฟลอกต่าง จะมีความขาวสว่างต่ำกว่าเยื่อก่อนฟลอกเมื่อเปรียบเทียบที่ kappa number เท่ากัน (รูปที่ ๓) ดังนั้นการใช้ค่าความขาวสว่างเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณเด็กนินจึงอาจใช้ได้ เฉพาะกับเยื่อที่ผ่านขั้นตอนการผลิตมาเหมือนกันเท่านั้น

อย่างไรก็ตามความขาวสว่างของเยื่อหลังฟลอกต่าง ( $R_{\infty CE}$ ) มีสหสัมพันธ์เป็นอย่างดีกับ kappa number ของเยื่อก่อนฟลอกและปริมาณคลอรีน (สมการที่ ๖.๓) ความขาวสว่างหลังฟลอกไฮโปคลอไรท์ ( $R_{\infty}$ ) สามารถคาดคะเนได้จากค่า  $R_{\infty CE}$  และปริมาณคลอรีน ในชั้นไฮโปคลอไรท์โดยอาศัยความสัมพันธ์เชิงเส้นตามสมการที่ ๖.๔ ซึ่งมีสหสัมพันธ์สูงพอ ( $r^2 = 0.855$ ) ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้มากที่จะนำค่า  $R_{\infty CE}$  มาใช้เป็นเกณฑ์ในการควบคุมปริมาณคลอรีน ในชั้นคลอรีนชั้น และไฮโปคลอไรท์เพื่อรักษาระดับความขาวสว่างที่ต้องการ

## ๒. การฟลอกเยื่อแบบชั้นเดียว

๒.๑ ความขาวสว่างของเยื่อฟลอก ( $R_{\infty}$ ) และความเหนียว ความขาวสว่างมีสหสัมพันธ์สูงมากกับค่า kappa number ของเยื่อก่อนฟลอกและปริมาณคลอรีน ( $r^2 = 0.999$ ) เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงจะสูญเสียความขาวสว่างภายหลังการเร่งอายุมากกว่าเยื่อฟลอกสามชั้นเมื่อฟลอกให้มีความขาวสว่างเท่ากัน เยื่อฟลอกชั้นเดียวจะกลับสีมากกว่า (รูปที่ ๔) แสดงว่า เราอาจใช้การฟลอกเยื่อแบบชั้นเดียวสำหรับเยื่อฟางข้าวในช่วงความขาวสว่างไม่เกินร้อยละ ๗๕ เท่านั้น ทั้งนี้เนื่องจากที่ความขาวสว่างสูง จำเป็นต้องต้มเยื่อให้มี kappa number ค่ามากแล้วใช้ไฮโปคลอไรท์ปริมาณมากในคราวเดียว ทำให้คาร์โบไฮเดรตถูกทำลายมากกว่าที่

เกิดในการฟลอกแบบสามชั้น เยื่อฟลอกชั้นเดียวจึงมีการกลับสีมากกว่า

๒.๒ ความต้องการคลอรีน เช่นเดียวกับในการฟลอกแบบสามชั้น ความต้องการคลอรีนไม่อาจคาดคะเนได้ถูกต้องจาก kappa number และความขาวสว่าง โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงดังความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วน H/K กับ Kappa number ตามรูปที่ ๕ การเลือกระดับ kappa number และปริมาณคลอรีนที่เหมาะสมในเทอมของคุณภาพและค่าใช้จ่าย ก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับการฟลอกเยื่อสามชั้น โดยจะมีความซับซ้อนน้อยกว่า

๒.๓ ความเหนียวของเยื่อฟลอกขาว ดัชนีแรงดึงมีสหสัมพันธ์ดีกับ kappa number และปริมาณคลอรีน ( $r^2 = 0.802$ ) แต่อิทธิพลของตัวแปรทั้งสองต่อดัชนีแรงดึงขาดไม่ชัดเจนนัก อย่างไรก็ตามสมการที่ ๗.๔ และ ๗.๕ ชี้ให้เห็นแนวโน้มที่ค่าดัชนีแรงดึงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเยื่อก่อนฟลอกมี kappa number สูงขึ้นและใช้คลอรีนเพิ่มขึ้น ส่วนค่าดัชนีแรงดึงขาดมีแนวโน้มในทางตรงกันข้าม

สรุป ๑. ในการฟลอกเยื่อแบบสามชั้นและชั้นเดียว ความสัมพันธ์แบบ quadratic สามารถอธิบายความเปลี่ยนแปลงของค่าความขาวสว่าง การกลับสี และความเหนียวของเยื่อฟลอกเนื่องจากตัวแปรอิสระคือ kappa number (K) และปริมาณคลอรีน (C และ / หรือ H) ได้เป็นอย่างดีถึงร้อยละ ๘๐-๘๕ ยกเว้นกรณีของค่าดัชนีแรงดึงขาดของเยื่อฟลอกชั้นเดียว ที่ช่วงของการเปลี่ยนแปลงมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับ experimental errors จึงอาจทำให้สหสัมพันธ์ต่ำ

๒. เราสามารถกำหนด ความต้องการ คลอรีน และ cooking degree ที่เหมาะสมได้ในเทอมของคุณภาพ และ ค่าใช้จ่ายโดยอาศัย รูปแบบ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่เชื่อถือได้

๓. ตัวแปรอื่นในการทดลองนี้ เช่น  $R_{\infty CE}$ ,  $R_{\infty}$ ,  $K_{CE}$  และปริมาณคลอรีน (C หรือ H) มีสหสัมพันธ์สูงมาก ชี้ให้เห็นว่าเราอาจนำมาใช้เป็น พื้นฐาน

สำหรับการควบคุม กระบวนการ ผลิตได้ ไม่ว่าจะ เป็น  
แบบอัตโนมัติหรือไม่ก็ตาม

๔. ควร ทดสอบ ความสัมพันธ์เชิงปริมาณ ดัง-  
แสดงใน รายงาน นี้กับ การ ผลิตเยื่อชั้น อุตสาหกรรม  
หรือทำการ ทดลอง ในการผลิตจริง โดย อาศัย เทคนิค

การวางแผนการทดลองที่รู้จักกันดีคือ evolutionary  
operation เพื่อหารูปแบบความสัมพันธ์เชิงปริมาณ  
ที่ถูกต้องตามสภาวะของโรงงาน อันจะเป็นประโยชน์  
อย่างยิ่งต่อการควบคุมกระบวนการผลิตให้ บรรลุวัตถุประสงค์  
ทั้งในด้านคุณภาพและความประหยัด

ตารางที่ ๔ ผลการทดลองฟอกเยื่อฟางข้าวโมโนซัลไฟต์แบบสามขั้น

(Raw data from CEH bleaching of rice straw monosulphite pulps)

K	C	H	R <sub>∞</sub>	ΔR <sub>∞</sub> %	PC no	tensile index kN.m/kg	tear index N.m <sup>2</sup> /kg	K <sub>CE</sub>	R <sub>CE</sub>
+1	+1	0	74.7	2.5	0.753	55.0	5.70	5.61	42.7
+1	-1	0	67.4	1.4	0.939	47.4	4.76	9.6	39.1
-1	+1	0	84.8	9.4	2.14	36.2	5.37	0.82	72.2
-1	-1	0	83.1	9.1	2.3	35.8	5.60	1.45	65.0
+1	0	+1	76.9	3.2	0.934	48.3	4.88	7.0	41.4
+1	0	-	64.2	1.1	0.508	46.3	5.30	6.75	41.7
-1	0	-1	79.5	8.1	2.30	39.1	5.30	1.50	65.5
-1	0	+1	83.6	12.9	3.5	36.7	5.00	1.55	65.4
0	+1	+1	84.7	15.1	4.06	39.9	4.90	1.26	66.3
0	+1	-1	83.7	11.2	2.86	43.6	6.10	1.26	66.3
0	-1	+1	84.4	12.9	3.34	42.2	5.80	2.07	60.1
0	-1	-1	80.0	8.5	2.36	47.3	6.50	2.23	58.4
0	0	0	83.8	11.6	2.96	42.1	6.26	1.79	63.4
0	0	0	84.6	9.5	2.17	42.8	6.30	1.56	63.2
0	0	0	85.1	10.3	2.32	43.1	6.00	1.69	61.2

ตารางที่ ๕ ผลการทดลองฟอกเยื่อฟางข้าวโมโนซัลไฟต์แบบขั้นเดียว

(Raw data from single-stage hypochlorite bleaching of rice straw monosulphite pulps)

Coded values		Properties of bleached pulps				
K	C	$R_{\infty}$	$\Delta R_{\infty} \%$	PC.no	Tensile index kN.m/kg	tear index N.m <sup>2</sup> /kg
+1	+1	63.9	2.77	1.37	47.4	4.88
+1	0	58.2	1.68	0.98	43.5	5.36
+1	-1	49.0	0.78	0.61	44.8	5.03
0	+1	77.1	12.8	4.60	39.9	5.00
0	0	74.4	7.2	2.52	41.4	4.92
0	-1	67	4.7	2.14	39.9	5.30
-1	+1	75.5	11.3	4.11	40.8	4.71
-1	0	73.8	9.6	3.62	43.6	4.81
-1	-1	67.9	4.8	2.11	41.5	4.76

ตารางที่ ๖ สรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในการฟอกเยื่อฟางข้าวโมโนซัลไฟต์แบบ CEH  
(relationships of variables in CEH bleaching of rice straw monosulphite pulps)

Relationship	Models	$r^2$
6.1) $R_{\infty} = f(K, C, H)$	$R_{\infty} = 84.5 - 5.975 K + 1.625 C + 2.775 H - 7.075 K^2 + 0.075 C^2 - 1.250 H^2 + 1.400 KC - 0.850 CH + 2.150 KH;$	0.969
6.2) $R_{\infty CE} = f(K_{CE})$	$R_{\infty CE} = 77.104 - 9.043 K_{CE} + 0.539 K_{CE}^2;$	0.989
6.3) $R_{\infty CE} = f(K, C)$	$R_{\infty CE} = 62.127 - 12.900 K + 2.329 C - 8.383 K^2 + 0.892 C^2$	0.953
6.4) $R_{\infty} = f(R_{\infty CE}, H)$	$R_{\infty} = 50.434 + 0.504 R_{\infty CE} + 2.693 H;$	0.855
6.5) $PC, No = f(K, C, H)$	$PC.No = 2.483 - 0.888 K + 0.109 C + 0.476 H - 1.147 K^2 + 0.197 C^2 + 0.475 H^2 - 0.006 KC + 0.055 CH - 0.194 KH;$	0.935
6.6) $T.I. = f(K, C, H)$	$T.I. = 42.670 + 6.151 K + 0.250 C - 1.150 H + 0.143 K^2 + 0.790 C^2 - 0.210 H^2 + 1.800 KC + 0.353 CH + 1.100 KH;$	0.847
6.7) $Tr. I = f(K, C, H)$	$Tr. I. = 6.167 - 0.079 K - 0.074 C - 0.253 H - 0.851 K^2 - 0.021 C^2 - 0.259 H^2 + 0.293 KC - 0.125 CH - 0.030 KH;$	0.820

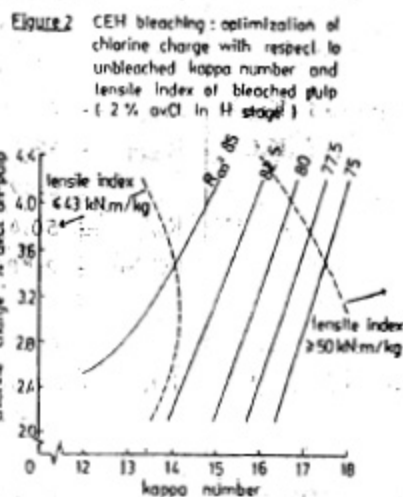
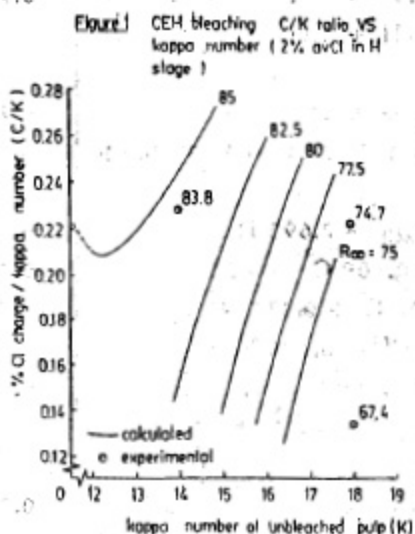
หมายเหตุ 1)  $R_{\infty}$  = brightness ;  $R_{\infty CE}$  = brightness after alkali extraction ;  
T.I. = tensile index ; Tr. I. = tear index ;  
 $r^2$  = coefficient of explanation

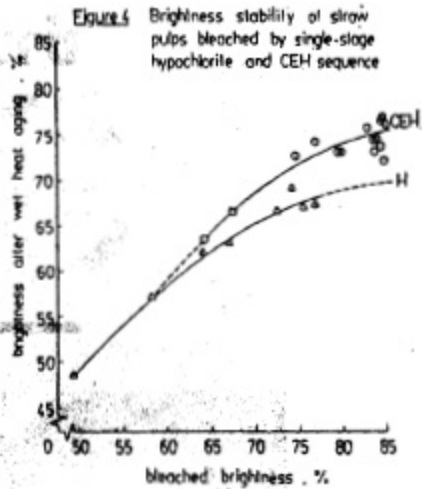
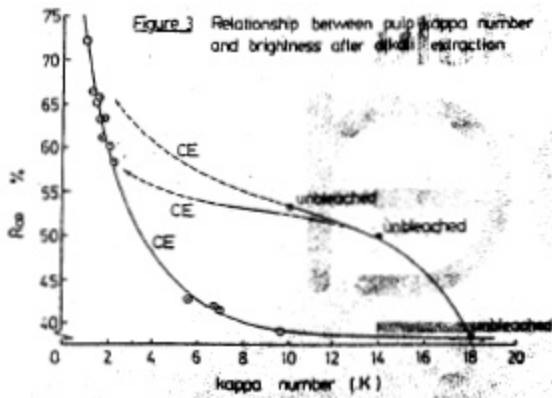
2) ค่า K, C, H เป็น coded variables

ตารางที่ ๑ สรุปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ในการฟอกเยื่อฟางข้าวโมโนซัลไฟท์ แบบไฮโปคลอไรท์  
 ชั้นเดียว (relationships of variables in single - stage hypochlorite bleaching of rice straw  
 monosulphite pulps)

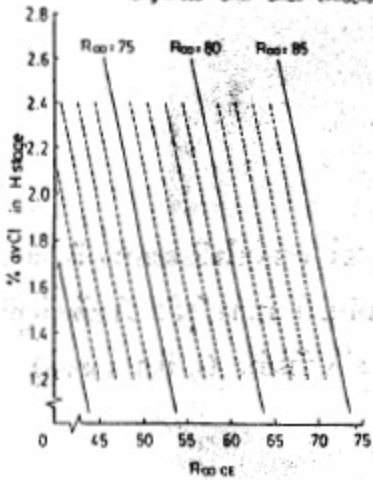
Relationships	Models	r <sup>2</sup>
7.1) $R_{\infty} = f(K, H)$	$R = 74.188 - 7.638 K + 5.417 H + 1.825 KH - 8.083 K^2 - 2.083 H^2$ ;	0.999
7.2) $\Delta R \% = f(R_{\infty})$	$\Delta R_{\infty} \% = 0.00525 e^{0.1003 R_{\infty}}$ ;	0.982
7.3) PC.No. = f(K, H)	$PC.No = 3.009 - 1.142 K + 0.870 H - 0.310 KH - 0.913 K^2 + 0.117 H^2$	0.926
7.4) T.I. = f(K, H)	$T.I. = 40.700 + 1.633 K + 0.367 H + 0.825 KH + 3.200 K^2 - 0.450 H^2$	0.802
7.5) Tr.I = f(K, H)	$Tr.I = 5.175 + 0.168 K - 0.800 H - 0.025 KH - 0.142 - 0.77 H^2$	0.624

หมายเหตุ ค่า K และ H เป็น coded variables

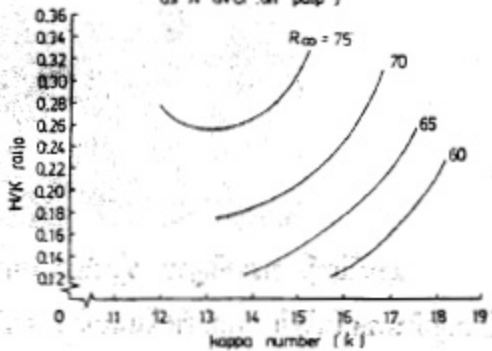




**Figure 5** Dependence of chlorine requirement in H stage on final brightness and brightness after alkali extraction



**Figure 6** Single stage bleaching: H/K ratio VS kappa number (H - hypochlorite charge expressed as % avCl on pulp)



### เอกสารอ้างอิง

๑. รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และสมชาติ รุ่งอินทร์: "การศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของฟางข้าวนาปรังและนาปี ในการทำเยื่อกระดาษ" รายงานการวิจัย ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ค.ศ. ๒๕๒๒
- ๒) รุ่งอรุณ วัฒนวงศ์ และคณะ: "การศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อผสม ฟางและหญ้าแบบ สามชั้น" รายงานการวิจัย ห้องปฏิบัติการเยื่อและกระดาษ กองการวิจัย กรมวิทยาศาสตร์บริการ ค.ศ. ๒๕๒๕
๓. Box, G.E.P. and Behnken, D.W., *Technometrics* 2 (4) 1960 : 455-475