

การใช้ "เฮช" แฟกเตอร์ในกรรมวิธีซัลเฟต กับไม้ใบกว้างในแถบร้อน

AN APPLICATION OF THE "H" FACTOR TO SULFATE PULPING OF TROPICAL HARDWOOD

นิยม เพชรผุด ^{๑/}

Niyom Petchpud

ABSTRACT

This study was an attempt to determine whether the "H" factor could be used with tropical hardwood of Thailand because the previous research showed that the H factor could be employed with softwood and some temperate hardwood and obtained the same result.

Kraft pulping of tropical hardwood, *Melia azedarach* Linn., was done in laboratory digester using direct electrical heating. Fifteen cooks were carried out. Pulping condition established were active alkali 25% sulfidity 25% liquor to wood ratio 4 : 1 cooking temperature 170° C. Three different times to maximum temperature, 1 : 1 : 30, 2 hours and equal H factor of 2500 were given under three conditions. The average screened yields, kappa numbers and physical characteristics-breaking length, burst factor, tear factor and folding endurance of *Melia azedarach* pulps were measured.

Results were statistical analyzed and found that there were no significant difference existed among the yields, kappa numbers and physical characteristics of tropical hardwood pulps of varying time to maximum temperatures with equal H factor.

บทคัดย่อ

ในการศึกษานี้มีเจตนาเพื่อต้องการทราบว่า "H" factor ซึ่งสามารถใช้ได้กับไม้สน (softwood) และไม้ใบกว้าง (hardwood) ในแถบหนาว ในกรรมวิธีการผลิตเยื่อกระดาษโดยกรรมวิธีซัลเฟตนั้น จะสามารถนำมาใช้กับไม้ใบกว้างในแถบร้อนอย่างประเทศไทยได้หรือไม่ ซึ่งผลจากการทดลองปรากฏว่าสามารถนำมาใช้ได้

ในการทดลองครั้งนี้ได้ทดลองใช้กับไม้สีออน (*Melia azedarach* Linn.) โดยทดลองด้วยเยื่อกระดาษในห้องทดลอง ๓ treatment treatment ที่ ๕ ตัวอย่าง ๖ condition ในการต้มเยื่อ active alkali 25% sulfidity 25% liquor to wood ratio 4 : 1 cooking temperature 170° C แต่ละ treatment time to maximum temperature ต่าง ๆ กัน คือ ๑ : ๑ : ๓๐ และ ๒ ชม. ตามลำดับ โดยให้ค่าของ H factor เท่ากันหมดคือ ๒๕๐๐ โดยไม่คำนึงถึง time at maximum temperature เมื่อได้เยื่อไปหาผลผลิต (yield) ค่า Kappa number และค่าความแข็งแรง (strength) ต่าง ๆ ของเยื่อคือ breaking length, burst factor, tear factor, folding endurance แล้วนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยวิธี analysis of variance ผลที่ได้ปรากฏว่า ผลผลิตของเยื่อ ค่า Kappa number และค่าความแข็งแรงต่าง ๆ ของเยื่อไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่า H factor นั้นสามารถนำมาใช้กับไม้สีออน ในการต้มเยื่อกระดาษโดยกรรมวิธีซัลเฟตได้ และน่าจะนำมาใช้กับไม้ชนิดอื่น ๆ อีกได้เช่นกัน

คำนำ

ในการผลิตเยื่อกระดาษโดยกรรมวิธีซัลเฟต (sulfate process) นั้น ผลผลิตของเยื่อ (yield) ส่วนประกอบทางเคมีของเยื่อ (chemical composition) ที่ได้ ตลอดจนสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของเยื่อ (physical properties) ขึ้นอยู่กับตัวแปรใหญ่ ๆ ที่สำคัญ ๒ อย่าง คือ

๑. ตัวแปรที่เกี่ยวกับไม้ที่นำมาใช้ทำเยื่อ (variable associated with wood)

๑.๑ ชนิดไม้ (wood species)

๑.๒ ความแน่นของไม้ (wood density)

๑.๓ ลักษณะการเจริญเติบโตของไม้ (growth factor) โตเร็ว โตช้า หรือเจริญเติบโตตามปกติ

๑.๔ ระยะเวลาที่เก็บไม้ไว้นานหรือเร็ว (length of storage) ก่อนที่จะนำมาผลิตเป็นเยื่อ

๑.๕ ความเสียหายของชิ้นไม้ (chip) อันเกิดจากเครื่องตัดชิ้นไม้ (chipper damage) ข้อนี้สำหรับในกรณีของกรรมวิธีซัลเฟต ไม้ค่อยจะสำคัญมากนักเหมือนอย่างในกรรมวิธีซัลไฟต์ (sulfite process)

๑.๖ ขนาดของชิ้นไม้ (chip dimension)

๒. ตัวแปรที่เกี่ยวกับการต้มเยื่อ (variable associated with the pulping operation or cooking condition) อันได้แก่

๒.๑ ปริมาณของ alkali ที่ใช้ ปกติบอกค่าเป็น active alkali หรือ effective alkali โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแห้งของไม้

๒.๒ ความเข้มข้นของ alkali ในน้ำยาที่ใช้ต้มเยื่อ (cooking liquor) คือค่าของ liquor to wood ratio ที่ใช้

๒.๓ sulfidity ของน้ำยาก็คือปริมาณของ Na_2S

๒.๔ อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มเยื่อ (temperature of digestion) ปกติจะเริ่มด้วยการให้ความร้อนแก่น้ำยาดมเยื่อ โดยค่อย ๆ ให้ความร้อนแก่น้ำยา ในอัตราที่สม่ำเสมอ ภายในเวลาที่กำหนดไว้ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด จากนั้นก็คงที่อุณหภูมิสูงสุดไว้ อุณหภูมิสูงสุดปกติจะกำหนดไว้ล่วงหน้าอยู่ระหว่าง ๑๕๐-๑๘๐°ซ.

๒.๕ ระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเยื่อ (time of digestion) แบ่งออกเป็นสองระยะ คือระยะแรกเริ่มแต่ให้ความร้อนแก่น้ำยาดมเยื่อที่จากอุณหภูมิของน้ำยาที่ใช้ จนถึงอุณหภูมิสูงสุด ระยะนี้เรียกว่า time to maximum temperature หรือ rise to temperature เป็นระยะเวลาที่ต้องการให้น้ำยาดมเยื่อเข้าไปในเนื้อไม้ ซึ่งจะเร็วหรือช้า ขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายวิภาคของเนื้อไม้ และขนาดของชิ้นไม้ ปกติใช้เวลา ๑-๒ ½ ชม. ระยะที่สอง เมื่อถึงอุณหภูมิสูงสุดแล้ว ซึ่งเป็นระยะที่ต้มไม้จริง ๆ (actual cooking

period) ก็คงระดับอุณหภูมิสูงสุดไว้ เป็นระยะเวลานานตามที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า ปกติ ๑-๒ ชม. ระยะนี้เรียกว่า time at maximum temperature หรือ rise at temperature

ระยะเวลาที่ใช้ในการต้มเชื้อคราวหนึ่ง ๆ ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงยุติการต้ม เรียกว่า "Cooking cycle" ซึ่งประกอบด้วยสองช่วงระยะเวลาตามที่กล่าวแล้วคือ time to maximum temperature กับ time at maximum temperature

ตามปกติแล้วตัวแปรที่เกี่ยวกับการต้มเชื้อ จะกำหนดไว้ล่วงหน้าก่อนลงมือต้ม ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของไม้ที่ใช้ ปริมาณลิกนินที่จะให้เหลือตกค้างในเชื้อ (degree of pulping) และคุณภาพของเชื้อที่ต้องการ แม้ว่าไม้ชนิดเดียวกันหากว่าปัจจัยอย่างใดอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการต้มเชื้อแตกต่างไปจากที่กำหนดไว้ ก็อาจทำให้ผลผลิตของเชื้อ (yield) ปริมาณลิกนินที่เหลือตกค้างในเชื้อ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของเชื้อที่ได้แตกต่างกันได้

ในบรรดาตัวแปรที่เกี่ยวกับการต้มเขื่อนั้น ตัวแปรที่เกี่ยวกับอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการต้มเชื้ออาจมีปัญหาค้นได้ในทางปฏิบัติ คืออาจไม่เป็นไปตามที่ได้กำหนดไว้ล่วงหน้า เป็นต้นว่า time to maximum temperature อาจเร็วหรือช้ากว่าที่กำหนดไว้ หรือ maximum temperature อาจไม่คงที่ คืออาจสูง-ต่ำกว่าที่ได้กำหนดไว้ ซึ่งจะมี

ผลทำให้ผลผลิตของเชื้อ ปริมาณลิกนินที่ตกค้างอยู่ในเชื้อ และสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของเชื้อแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีการชดเชยในส่วนของ time at maximum temperature เพื่อให้เร็วขึ้นหรือให้นานออกไป แต่มีปัญหว่าควรจะให้เร็วหรือช้ามากน้อยเพียงใด จึงจะทำให้ผลผลิตของเชื้อปริมาณลิกนินที่ตกค้างอยู่ในเชื้อ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของเชื้อไม่เปลี่ยนแปลง K.E. Vroom จึงได้นำเอาตัวแปรทั้งสอง คืออุณหภูมิที่ใช้ต้มเชื้อ และเวลาที่ใช้ต้มเชื้อมาคำนวณร่วมกัน และปรับให้เป็นตัวแปร (variable) ตัวเดียว มีค่าออกมาเป็นตัวเลข (numerical value) และเรียกค่านีว่า "H" factor ค่า H factor นี้สามารถนำไปใช้ปรับในกรณีที่ระยะเวลาต้มเชื้อ (cooking time) และอุณหภูมิที่ใช้ต้มเชื้อ (cooking temperature) แตกต่างไปจากที่กำหนดไว้แต่เดิม โดยให้ค่า H factor ยังคงเท่าเดิม ซึ่งผลคือเชื้อที่ได้จะมีผลผลิต ปริมาณลิกนินที่ตกค้างอยู่ในเชื้อ และคุณสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของเชื้อที่ได้ยังคงเหมือนเดิม หรืออาจกล่าวเสียใหม่ว่า หากตัวแปรอื่น ๆ ในส่วนตัวแปรที่เกี่ยวกับการต้มเชื้อคงที่ เชื้อที่ต้มด้วย cooking time และ cooking temperature ต่างกัน แต่ค่า H factor เท่ากัน จะได้ผลผลิตเชื้อ ปริมาณลิกนินที่ตกค้างในเชื้อ และสมบัติทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ของเชื้อที่ได้จะไม่แตกต่างกัน

จากผลการศึกษาค้นคว้าทดลองของหลายท่านในอดีตพบว่า H factor นี้สามารถนำไปใช้ได้เฉพาะกับการผลิตเยื่อโดยกรรมวิธีซัลเฟต (sulfate process) แต่ไม่อาจนำไปใช้กับกรรมวิธีโซดา (soda process) และกรรมวิธีซัลไฟต์ (sulfite process) และสามารถนำไปใช้กับไม้หลายชนิด โดยเฉพาะพวกไม้สน (pine) หลายชนิด สำหรับไม้ใบกว้าง (hardwood) ได้มีการทดลองใช้กับไม้พ็อปลาร์ (poplar) ซึ่งเป็นไม้แถบหนาวและใช้ได้ผล สำหรับไม้ใบกว้างในแถบร้อน ซึ่งมีอยู่มากมายหลายชนิดด้วยกัน ยังไม่ปรากฏว่าได้มีการทดลองใช้กัน

ดังนั้นในการศึกษาค้นคว้าทดลองในครั้งนี้ จึงได้นำค่า H factor มาทดลองใช้กับไม้ใบกว้างในแถบร้อนบางชนิด ในที่นี้ได้ทดลองใช้ไม้เลี่ยน (*Melia azedarach* Linn.) ซึ่งเป็นไม้ขนาดกลาง เป็นไม้โตเร็ว และกำลังได้รับความสนใจสนับสนุนให้ปลูกขึ้น เพื่อใช้ประโยชน์ต่าง ๆ ในอนาคต ไม้ชนิดนี้ขึ้นอยู่ทั่วไป พบมากในท้องที่จังหวัดนครราชสีมา กำแพงเพชร อุทัยธานี นครสวรรค์ เพชรบูรณ์ กาญจนบุรี สระบุรี เจริญนครโคได้ลิในดินร่วนปนทรายที่มี

การระบายน้ำดี เนื้อไม้สีน้ำตาลอ่อนมีความหนาแน่นประมาณ ๐.๔๒-๐.๔๕ กรัม/ซม.^๓ มีไฟเบอร์ยาวเฉลี่ย ๑.๒๔ มม. กว้าง ๐.๐๓ มม. ผนังเซลล์หนาประมาณ ๐.๐๐๕ มม. เยื่อซัลเฟตจากไม้เลี่ยนอาจนำไปทำกระดาษประเภทต่าง ๆ ได้ดี

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้

เพื่อต้องการเปรียบเทียบ

๑. ผลผลิตของเยื่อที่ได้ (yield)

๒. ปริมาณลิกนินที่ตกค้างเหลืออยู่ในเยื่อ (degree of pulping or degree of delignification) โดยใช้ค่า Kappa number เป็นเกณฑ์ในการเปรียบเทียบ

๓. สมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ (physical properties) ของเยื่อที่ผลิตจากไม้ในแถบร้อน (tropical hardwood) ในที่นี้คือไม้เลี่ยน (*Melia azedarach* Linn.) โดยกรรมวิธีซัลเฟตที่ใช้ cooking cycle ต่างกันคือ time to maximum temperature และ time at maximum temperature ต่างกัน แต่ให้ค่า H factor เท่ากัน

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การต้มเยื่อ

ไม้ที่นำมาใช้ในการทดลองครั้งนี้คือ ไม้เลี่ยน (*Melia azedarach* Linn.) ที่ทำการลอกเปลือกแล้ว นำมาทำเป็นชิ้นไม้สับ

ในเครื่องสับชิ้นไม้ (chipper) สำหรับทดลอง ก่อนที่จะนำมาใช้จะร้อนตัดเอาเฉพาะมีขนาดใกล้เคียงกัน คัดส่วนที่เป็นดาไม้ส่วนที่มีเปลือกติดอยู่ออกเท่าที่จะทำได้เพื่อ

ให้เกิดความสม่ำเสมอของชั้นไม้ให้ได้มากที่สุด สุ่มตัวอย่างจำนวนหนึ่งไปหาความชื้นเพื่อคำนวณหาน้ำหนักอบแห้ง จำนวน ๓๐๐ กรัม แล้วแยกชิ้นเป็นถุงย่อย ๆ ถุงละ ๓๐๐ กรัม (น.น.อบแห้ง) จำนวน ๑๕ ถุง

Cooking conditions

Wood od.wt.	300 กรัม
Sulfidity	25%
Active alkali	25%
Liquor : Wood ratio	4 : 1
Max. Temperature	170°C
H. factor	2500

Time to max. temp. แยกทดลองเป็น 3 condition คือ

- Time to max. temp. ๑ ชม. H. factor 2500

- Time to max. temp. ๑.๕ ชม. H factor 2500

- Time to max. temp. ๒ ชม. H factor 2500

ในการต้มเยื่อแต่ละ condition ต้มจำนวน ๕ ตัวอย่าง รวมเป็น ๑๕ ตัวอย่าง หม้อต้มเยื่อที่ใช้เป็นแบบ batch digester หมุนในแนวตั้ง ให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า ขนาดความจุ ๕ ลิตร

การควบคุมอุณหภูมิในช่วง time to max. temperature ต้องพยายามปรับให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นโดยสม่ำเสมอตามที่กำหนดไว้หรือให้ใกล้เคียงให้มากที่สุด โดยคอยตรวจสอบอุณหภูมิทุก ๆ ๑๐ นาที แล้ว

นำไปคำนวณหา H factor สำหรับ time at maximum temperature นั้น ไม่ได้กำหนดไว้แน่นอนตายตัว แต่จะขึ้นอยู่กับค่า H factor ที่ได้กำหนดไว้ก่อนมีค่า H factor 2500 ก็จะหยุดการต้มเยื่อทันที พร้อมด้วยบันทึก time at maximum temperature ไว้

เมื่อต้มเยื่อจนคำนวณได้ค่า H factor 2500 แล้วก็ทำการเปิดวาล์วระบายความดันออกจนหมด เปิดฝาหม้อต้มเยื่อ นำเยื่อไปล้างด้วยน้ำในตะแกรงจนหมดน้ำยา แล้วนำไปตีกระจายให้ไฟเบอร์แยกจากกันในเครื่องกระจายเยื่อ (pulp disintegrator) จากนั้นนำมากรองใน pulp screen ขนาดรูตะแกรง ๐.๑๕ มม. เยื่อที่ผ่านการกรองแล้วนำไปคำนวณหา เปรอร์เซ็นต์ผลผลิต (yield) และ reject ใช้สูตร

$$\text{yield (\%)} = \frac{\text{น.น.อบแห้งของเยื่อ} \times 100}{\text{น.น.อบแห้งของไม้ที่ใช้}}$$

การหาค่า Kappa number

ใช้ Tappi standard T236 ค่าที่ได้เป็นค่า degree of delignification แสดงถึงปริมาณเลกนินที่ตกค้างเหลืออยู่ในเยื่อกระดาษ

การตีเยื่อกระดาษ

ใช้ PFI mill ใช้ปริมาณเยื่อแห้ง ๓๐ กรัม

Consistency ๑๐% ตีในเครื่อง PFI mill ๒ นาที ๖ วินาที และ ๔ นาที ๑๒ วินาที ซึ่งเท่ากับ ๓๐๐ รอบ และ ๖๐๐ รอบ จากตัวเลขบนหน้าปัด ตามลำดับ

การหาค่า Freeness ใช้ TAPPI standard T 227

การทำแผ่นเยื่อใช้ TAPPI standard T 205

การทดสอบค่าทางฟิสิกส์ของแผ่นเยื่อ ใช้ TAPPI standard T 220

การวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลที่ได้

๑. ผลผลิตเยื่อ (yield)

๒. ปริมาณลิกนินที่ตกค้างเหลืออยู่ในเยื่อ (degree of delignification of degree

of pulping) ในรูปของค่า Kappa number

๓. สมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ของเยื่อ ได้แก่ breaking length, burst factor, folding endurance และ tear factor

นำไปหาค่าเฉลี่ย และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างเยื่อที่ต้ม (cook) ภายใต้อุณหภูมิ cooking cycle ต่างกัน (time to maximum temperature และ time at maximum temperature ต่างกัน) แต่ H factor เท่ากัน โดยวิธี analysis of variance แบบ CRD (Completely Random Design)

ผลและการวิจารณ์ผล

ตามตารางที่ ๑ จะเห็นได้ว่า

๑. ผลผลิต (yield)

ผลผลิต (yield) ของเยื่อจากไม้เลี่ยนที่ cook ภายใต้อุณหภูมิ time to maximum temperature ๑ ชม. ๑:๓๐ ชม. และ ๒:๐๐ ชม. คือ ๔๓.๕๗ ๔๒.๔๕ และ ๔๒.๕๗% ตามลำดับ ซึ่งปริมาณผลผลิตที่ได้นี้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

๒. ปริมาณลิกนินที่ตกค้างเหลืออยู่ในเยื่อ (degree of delignification or degree of pulping)

สำหรับปริมาณลิกนินที่ตกค้างเหลืออยู่ในเยื่อ พิจารณาจากค่า Kappa number ของเยื่อที่ต้มภายใต้อุณหภูมิ time to max. tem. ๑ ชม. ๑:๓๐ ชม. และ ๒:๐๐ ชม. คือ ๑๕.๑๖, ๑๓.๘๒ และ ๑๓.๗๒ ตามลำดับ ซึ่งค่า Kappa number นี้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

๓. สมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ของเยื่อ (physical properties)

ค่าสมบัติต่าง ๆ ทางฟิสิกส์ของเยื่อในที่นี้ได้แก่

๓.๑ Freeness

ค่า freeness ของเยื่อ unbeaten pulp ที่ต้มภายใต้อุณหภูมิ time to max.tem. ๑ ชม. ๑:๓๐ ชม. และ ๒ ชม. คือ ๕๗๑, ๕๗๕ และ ๕๘๑ (C.S.F.) ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับเยื่อที่ beat ในระดับเดียวกัน คือ ๒ : ๖ นาที (๓๐๐ รอบ) ค่า freeness ๔๒๐, ๔๐๖ และ ๔๑๕ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสำหรับเยื่อที่ beat ในเวลา ๔:๑๒ นาที (๖๐๐ รอบ) ค่าของ freeness คือ ๓๓๗ ๓๓๒ และ ๓๓๕ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งจะเห็นว่าเยื่อที่ต้มภายใต้อุณหภูมิ time to max.tem ๑:๐๐ ชม.

Table 1. Average pulp yields, degree of delignification and physical properties of pulps

Average yield, degree of delignification and physical properties of pulp	Time to max. temperature			H factor 2500 max. tem. 170°C
	1 hr.	1 : 30 hr.	2 : 00 hrs.	
Screened yield % (mean)	43.57	42.45	42.57	
Degree of delignification (Kappa number)	15.16	13.82	13.72	
Physical properties Freeess (C. S. P.)				
unbeaten	571	575	581	
beaten (2 : 6 min)	420	406	419	
beaten (4 : 12 min)	337	332	335	
Breaking length				
unbeaten (m)	1472.72	1294.17	1470.58	
beaten (2 : 6 min)	3202.49	3349.61	3295.94	
beaten (4 : 12 min)	3745.45	3938.08	3854.45	
Burst factor				
unbeaten	6.75	4.79	5.86	
beaten (2 : 6 min)	22.00	23.08	22.84	
beaten (4 : 12 min)	28.68	27.55	28.98	
Folding				
unbeaten	0.9	0.84	0.9	
beaten (2 : 6 min)	7.0	6.6	7.0	
beaten (4 : 12 min)	11.9	11.9	12.0	
Tear factor				
unbeaten	36.24	24.51	29.7	
beaten (2 : 6 min)	62.89	58.52	65.91	
beaten (4 : 12 min)	72.65	64.45	70.91	
Time at max. tem (hr)	2:35	2:34	2:31	
cooking cycle (hr)	3:35	4:04	4:31	

๒๑.๐๐ ชม. การ beat เยื่อหุ้มง่ายพอ ๆ กัน

๓.๒ breaking length (m)

ค่า breaking length เยื่อที่ต้มภายใต้ time to max. tem. ๑:๐๐ ชม. ๑:๓๐ ชม. และ ๒:๐๐ ชม. สำหรับ unbeaten pulp คือ ๑๔๗๒.๗ ม. ๑๒๕๔.๒ ม. และ ๑๔๗๐.๖ ม. ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับค่า breaking length ของเยื่อที่ beat ๒:๖ นาที (415 C.S.F) ค่า breaking length ๓๒๐๒.๕, ๓๓๔๕.๖ และ ๓๒๕๕.๕ ม. ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และสำหรับค่า breaking length ของเยื่อที่ beat ๔:๑๒ นาที (334.7 C.S.F) มีค่า breaking length ๓๓๕๕.๕ ม. ๓๕๓๘.๐ ม. และ ๓๘๕๕.๕ ม. ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และมีแนวโน้มให้เห็นว่าค่า breaking length ของเยื่อที่ beat นานขึ้น หรือเมื่อค่า freeness (C.S.F) ลดลง ค่าของ breaking length จะสูงขึ้น

๓.๓ Burst factor

Burst factor ของเยื่อที่ต้ม ภายใต้ time to max.tem. ๑:๐๐ ชม. ๑:๓๐ ชม. ๒:๐๐ ชม. สำหรับ unbeaten pulp คือ ๖.๗๕ ๔.๗๕ และ ๕.๘๖ ตามลำดับ ซึ่งค่า burst factor นี้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เมื่อ beat ๒:๖ นาที (C.S.F. 415) ค่า burst factor ๒๒.๐, ๒๓.๑ และ ๒๒.๘ ตามลำดับ ซึ่งค่า burst factor นี้ ไม่แตกต่าง

กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

beat ๔:๑๒ นาที (C.S.F ๓๓๔.๗)

ค่า burst factor ๒๘.๗, ๒๗.๕ และ ๒๕.๐ ตามลำดับ ซึ่งค่า burst factor นี้ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า burst factor เมื่อ beat นานขึ้น หรือจำนวนรอบเพิ่มขึ้น ค่า freeness ลดลง

๓.๔ Folding endurance

ค่า folding ของเยื่อที่ cook ภายใต้ time to max.tem. ๑ ชม. ๑:๓๐ ชม. ๒:๐๐ ชม. unbeaten ๐.๕, ๐.๘ และ ๐.๕ ตามลำดับ ซึ่งค่า folding ที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ beat ๒:๖ นาที (C.S.F 415.0) ค่า folding ๗.๐, ๖.๖ และ ๗.๐ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ beat ๔:๑๒ นาที (C.S.F 334.7) ค่า folding ๑๑.๕, ๑๑.๕ และ ๑๒.๑ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า folding จะสูงขึ้นเมื่อมีการ beat นาน จำนวนรอบเพิ่มขึ้น แต่ค่า freeness จะลดลง

๓.๕ Tear factor

ค่า tear factor ของเยื่อที่ cook ภายใต้ time to max.tem. ๑:๐ ชม. ๑:๓๐ ชม. และ ๒:๐๐ ชม. unbeaten ๓๖.๒, ๒๔.๕ และ ๒๕.๘ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ระดับ ๐.๐๑ ที่ค่า tear factor ที่ cook ภายใต้ time to max.tem. ๑ ชม. จะสูงกว่าที่ cook ภายใต้ time to max.tem. ๑:๓๐ และ ๒:๐๐ ชม. แต่ค่า tear factor ที่ cook ภายใต้ time to max.

tem. ๑:๓๐ และ ๒:๐๐ ชม. จะไม่แตกต่างกัน แต่ถ้าพิจารณาจากตารางที่ ๓ จะเห็นได้ว่าค่า tear factor ของ cook no.1 และ cook no.4 ในช่วง time to max.tem. ๑:๐๐ ชม. จะมีค่าสูงต่างจาก cook no. 2, 3, 5 อย่างเด่นชัด อันนี้อาจเกิดจากความผิดพลาดบางประการของข้อมูลที่ได้น่าที่อาจเป็นได้ beat ๒:๖ นาที (freeness 415 C.S.F)

คือ ๖๒.๓, ๕๘.๒ และ ๖๕.๕ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

beat ๔:๑๒ นาที (freeness 334.7 C.S.F) ค่า tear factor ๗๒.๗, ๖๔.๕ และ ๗๐.๕ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ค่า tear factor จะสูงขึ้นเมื่อเชือกถูก beat มากขึ้น

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ไม่เลี่ยนนำมาผลิตเชือกกระดานโดยกรรมวิธีซัลเฟต โดยใช้ cooking cycle (time to maximum temperature and time at maximum temperature) ต่างกัน หากว่าค่า H factor เท่ากันแล้ว ผลผลิตเชือกที่ได้ปริมาณลิกนินที่ตกค้างเหลืออยู่ในเชือก (degree of delignification or degree of pulping) และคุณสมบัติอื่น ๆ ของเชือกที่ได้จะไม่แตกต่างกันในทางสถิติ

การต้มเชือกที่ใช้ time to maximum temperature นานนั้นไม่ได้ช่วยให้ time at maximum temperature ลดลงมากนัก แต่ทำให้ cooking cycle นานขึ้นอันหมายถึงทำให้ค่าใช้จ่ายค่าพลังงานเพื่อให้ความร้อน

เพิ่มขึ้น และเวลาที่ใช้ในการต้มเพิ่มขึ้น แม้ว่า cooking cycle จะต่างกัน แต่ถ้าหากค่า H factor เท่ากัน เชือกที่ได้จะมีคุณสมบัติต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันในทางสถิติ ดังนั้นควรจะต้มเชือกโดยใช้ time to maximum temperature ให้น้อยที่สุด ให้นานเพียงพอเท่าที่จำเป็นที่น้ำยาจะซึมซาบเข้าไปในชิ้นไม้ได้ทั่วถึงเท่านั้นก็เป็นการเพียงพอ เพราะจะเป็นการประหยัดพลังงานความร้อน และเวลาที่ใช้ในการต้ม

ควรจะได้มีการศึกษาใช้ค่า H factor กับไม้ในแถบร้อนชนิดอื่น ๆ ด้วย ตลอดจนการต้มโดยการใช้อุณหภูมิต่าง ๆ กัน โดยค่า H factor เท่ากัน

Table 2. Analysis of variances of Pulp yields, Degree of delignification and physical properties of pulps

Sov.	df.	S.S.	M.S.	F
Pulp yield :				
Treatment	2	3.72	1.86	0.94 ^{ns.}
Error	12	23.79	1.98	
Total	14	27.51		
Kappa number				
Treatment	2	6.42	3.21	2.04 ^{ns.}
Error	12	18.83	1.5	
Total	14	25.25		
Freeness (C.S.F.)				
unbeaten				
Treatment	2	253.3	126.7	0.57 ^{ns.}
Error	12	2640.0	220	
Total	14	2893.3		
Beaten 2:6 min.				
Treatment	2	610.	305	1.38 ^{ns.}
Error	12	2640.0	220	
Total	14	3250.		
Beaten 4:12 min.				
Treatment	2	63.3	31.7	0.07 ^{ns.}
Error	12	5210.0	434.2	
Total	14	5273.3		
Breaking Length (m.)				
unbeaten				
Treatment	2	105010.85	52505.4	1.38 ^{ns.}
Error	12	4370.99	38091.6	
Total	14	562110.2		
Beaten 2:6 min.				
Treatment	2	65991.07	32995.54	0.43 ^{ns.}
Error	12	921217.42	76768.12	
Total	14	987208.49		
Beaten 4:12 min.				
Treatment	2	84523.2	42261.6	0.82 ^{ns.}
Error	12	613977.39	51167.7	
Total	14	698500.59		
Burst factor				
unbeaten				
Treatment	2	9.7	4.8	1.9 ^{ns.}
Error	12	30.4	2.5	
Total	14	40.1		

Table 2. (cont.)

Sov.	d.f.	S.S.	M.S.	F ratio
Beaten 2:6 min				
Treatment	2	3.22	1.61	0.30 ^{NS}
Error	12	63.32	5.27	
Total	14	66.54		
Beaten 4:12 min.				
Treatment	2	3.01	1.51	0.28 ^{NS}
Error	12	64.29	5.36	
Total	14	67.31		
Folding				
unbeaten				
Treatment	2	0.022	0.011	0.46 ^{NS}
Error	12	0.288	0.024	
Total	14	0.024		
Beaten 2:6 min.				
Treatment	2	0.592	0.296	0.13 ^{NS}
Error	12	27.812	2.31	
Total	14	28.404		
Beaten 4:12 min.				
Treatment	2	0.134	0.067	0.013 ^{NS}
Error	12	64.256	5.35	
Total	14	64.39		
Tear factor				
unbeaten				
Treatment	2	344.86	172.43	6.30**
Error	12	308.78	25.73	
Total	14	653.64		
Beaten 2:6 min.				
Treatment	2	455.48	68.99	2.61 ^{NS}
Error	12	317.48	26.46	
Total	14	455.48		
Beaten 4:12 min.				
Treatment	2	355.14	167.5	3.2 ^{NS}
Error	12	627.31	52.27	
Total	14	962.45		

NS = non significant

** highly significant difference at 99% confident limit.

Table 3. Tear factors of unbeaten pulps

unbeaten pulps cook no.	Time to max. temperature			H factor 2500 max. tem. 170° C
	1 hr	1:30 hr	2:00 hrs	
1	40.11	24.43	29.44	
2	29.93	21.65	29.76	
3	34.68	23.38	26.09	
4	47.50	29.60	29.15	
5	28.96	29.60	34.39	
Total	181.18	122.56	148.83	
$\bar{X}$	36.24	24.51	29.77	

เอกสารอ้างอิง

สรรเสริญ เจริญศรี และ มนตรี พรหม-
โชติกุล. ๒๕๑๕. การทำเชื้อกระดาษ
จากไม้เถียนโดยกรรมวิธีซัดเฟด. กอง
วิจัยผลิตผลป่าไม้ กระทรวงเกษตร
และสหกรณ์.

Casey, J.P. 1980. Pulp and paper vol I
3rd Ed. John Wiley and Sons. New-
York.

Vroom, K.E. 1957. The "H" factor : a
means of expressing cooking times
and Temperatures as a single variable.
Pulp and Paper Magazine of Canada
58 (c) : 228-231.

Macdonald, R.G. and Franklin, J.N. 1969.
pulp and paper manufacture. The
pulping of wood. Vol 1, 2nd McGraw-
Hill Book co. New York.