การผลิตเยื่อกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีทางชีวภาพ
Biopulping from Banana Pseudo - Stem of Num-Wa

สุจยา ฤทธิศร*
สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
Sujaya Ritthisorn*
Department of Biology, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology

บทคัดย่อ

จากการศึกษาการผลิตเยื่อกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยการใช้เชื้อรา *Trichoderma viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ชุดการทดลองละเชื้อ ใช้ปริมาณเชื้อราที่แตกต่างกัน เพาะเลี้ยงนาน 3 4 และ 5 สัปดาห์ พบว่าปริมาณเชื้อรา *T. viride* ที่เพิ่มขึ้นไม่มีผลต่อค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน แต่ขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเพาะเลี้ยง ส่วน *T. harzianum* และ *T. hamatum* ปริมาณเชื้อและระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน เมื่อนำชุดการทดลอง *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ที่เพาะเลี้ยงนาน 5 สัปดาห์ มาเปรียบเทียบค่า Kappa number และค่า Selection factor พบว่าชุดการทดลอง *T. viride* มีค่า Kappa number น้อยที่สุด มีค่า Selection factor สูงที่สุด จากการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0 8 10 12 14 และ 16 มีค่า Kappa number น้อยกว่าเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. harzianum* และ *T. hamatum* สำหรับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* คือ ร้อยละ 8 เมื่อนำกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย T. viride T. harzianum และ T. hamatum มาเปรียบเทียบความขาวสว่าง ความต้านทานแรงดันทะลุ ความต้านทานแรงฉีกขาด และความหนา พบว่า *T. viride* มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาผลิตกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีทางชีวภาพ

คำสำคัญ : ผลิตกระดาษด้วยวิธีทางชีวภาพ รายย่อยลิกนิน เยื่อจากกล้วยน้ำว้า

***E-mail:** Ritthisorn_s@yahoo.co.th

Abstract

Study on biopulping from banana pseudo - stem of Num-wa by using *Trichoderma viride T. harzianum* and *T. hamatum* for each test set in the process of varying the amount of fungi and the cultured time, i.e, 3 4 and 5 weeks. The result showed that the incremental of *T. viride* quantity neither effect to Kappa number nor lignin degradation but related with the cultured time. Where as Kappa number and lignin degradation had been affected with varing *T. harzianum T. hamatum* and increased cultured time. Comparison in Kappa number and Selection factor for the fifth weeks treatment of *T. viride T. harzianum* and *T. hamatum* found that *T. viride* treatment presented the lowest kappa number and the highest Selection factor. Chemical properties of banana pseudo - stem of Num-wa produced by *T. viride* bleaching of varied hydrogen peroxide, i.e, 0 8 10 12 14 and 16% affect to the lower Kappa number than the product of which *T. harzianum* and *T. hamatum* made. The amount of hydrogen peroxide for bleaching the pulp of paper produced by *T. viride T. harzianum* and *T. hamatum* was appropriate at 8%. Comparison in the paper produced by *T. viride T. harzianum* and *T. hamatum* for brightness busting strength tearing resistance and single sheet thickness found that the paper produced by *T. viride* was suited for biopulping from banana pseudo - stem of Num-wa.

Keywords : biopulping, ligninolytic fungi, banana pseudo - stem of Num-wa

บทนำ

โดยทั่วไปกระบวนการผลิตกระดาษเชิงหัตถกรรมจะใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตคือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ในการแช่และต้มเยื่อกระดาษ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ในการฟอกเยื่อกระดาษ สารเคมีทั้งสองจะเป็นตัวทำให้กระดาษที่ได้มีความขาวสว่าง เนื่องจากเกิดปฏิกิริยากับลิกนิน ทำให้ปริมาณลิกนินในเยื่อกระดาษลดลง อย่างไรก็ตามแม้ว่าการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ปริมาณลิกนินในเยื่อลดลง ในทางกลับกันผลผลิตเยื่อที่ได้จะมีค่าลดลงเช่นเดียวกัน (วุฒินันท์ คงทัต, 2545) นอกจากนี้เมื่อสิ้นสุดกระบวนการต้มเยื่อ น้ำทิ้งที่ได้จะมีส่วนประกอบของโซเดียมที่อยู่ในรูปเกลือต่างๆ สารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน สารต่างๆ เหล่านี้จะส่งผลให้น้ำทิ้งมีค่าซีโอดี (COD; Chemical Oxygen Demand) สูง ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (วิชชา พิชัยณรงค์, 2545) ส่วนปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อกระดาษ เป็นเพียงการทำให้ลิกนินที่ก่อให้เกิดสีแตกตัวเท่านั้น ไม่ใช่เป็นการกำจัดลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อ เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดการออกซิไดส์กลุ่มคาร์บอนิลในคาร์โบไฮเดรตให้เปลี่ยนเป็นกลุ่มกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งเป็นการทำให้สีของลิกนินที่เหลืออยู่ขาวขึ้น แต่จะกลับเป็นสีเหลืองได้ง่าย เนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นสารที่สลายตัวง่าย แม้จะเก็บไว้โดยมิได้ทำปฏิกิริยากับสารอื่น จึงทำให้ลิกนินที่เหลืออยู่ในเยื่อรวมตัวกันได้อีกครั้ง ความขาวของกระดาษจึงลดลง (วุฒินันท์ คงทัต, 2545) นอกจากนี้การผลิตกระดาษจากกล้วยด้วยวิธีทางเคมีจากการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีผลทำให้คุณภาพของกระดาษที่ได้มีความแข็งกระด้าง หยาบ และไม่เรียบ (ทินกร อัญชลีวิทยกุล, 2546)

ด้วยเหตุนี้งานวิจัยนี้จึงได้ให้ความสนใจกับการผลิตกระดาษด้วยวิธีทางชีวภาพ ซึ่งเป็นการใช้เชื้อจุลินทรีย์หมักกับวัตถุดิบ (พืช) เพื่อย่อยสลายลิกนินในพืช โดยการใช้เชื้อรา *Trichoderma viride T. harzianum* และ *T. hamatum* เชื้อราทั้ง 3 ชนิด คัดแยกจากบริเวณนากุ้งร้าง ตำบลโคกขาม อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรสาคร และผ่านการทดสอบจนพบว่ามีความสามารถในการย่อยสลายลิกนินได้ เนื่องจากสามารถผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติก (Ligninolytic enzyme) (สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์, 2553) โดยเอนไซม์ลิกนิโนไลติกประกอบด้วยเอนไซม์แลกเคส เอนไซม์ลิกนินเพอร์ออกซิเดส และเอนไซม์แมงกานีสเพอร์ออกซิเดส (Zadrazil & Reiniger, 1988; Lei *et al*., 2011) การผลิตกระดาษด้วยวิธีทางชีวภาพเป็นวิธีการที่ทำให้ได้เยื่อกระดาษที่มีคุณภาพดี อีกทั้งยังช่วยประหยัดพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 19.6-40.0% ในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ และลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมจากกระบวนการผลิตที่ใช้สารเคมีในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ (Elisashvili *et al*., 2006; Lei *et al*., 2011) โดยในปัจจุบันผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมกำลังได้รับความนิยมทั้งในประเทศและต่างประเทศ

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

1. การเตรียมกาบกล้วยน้ำว้า สำหรับใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ

นำต้นกล้วยน้ำว้ามาตัดเอาเฉพาะส่วนลำต้นของกล้วยน้ำว้า ใช้เฉพาะส่วนกาบกล้วย หั่นกาบกล้วยให้มีขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง

2. การเพาะเลี้ยงเชื้อราบนกาบกล้วยน้ำว้า

ทำการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Trichoderma viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ลงบนอาหาร PDA (Potato Dextose Agar) บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส นาน 7 วัน เตรียมกาบกล้วยน้ำว้า 10 กรัม (น้ำหนักแห้ง) แช่น้ำกลั่น ประมาณ 3 ชั่วโมง จากนั้นนำกาบกล้วยน้ำว้าใส่ลงในขวดทดลองขนาด 500 มิลลิลิตร แล้วนำไปนึ่งฆ่าเชื้อ ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ตัดชิ้นวุ้น PDA ที่มีเชื้อรา *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* อายุ 7 วัน ด้วย cork borer เส้นผ่าศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ใส่ชิ้นวุ้นของเชื้อลงบนกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว บ่มที่อุณหภูมิ 31 องศาเซลเซียส โดยแบ่งชุดการทดลอง ดังนี้

ชุดการทดลองที่ใส่ *T. viride T. harzianum* หรือ *T. hamatum* ชุดการทดลองละเชื้อ ใส่ชิ้นวุ้นจำนวน 1 ชิ้น โดยเชื้อราแต่ละชนิดจะแบ่งชุดการทดลองตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยงออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 3 4 และ 5 สัปดาห์

ชุดการทดลองที่ใส่ *T. viride T. harzianum* หรือ *T. hamatum* ชุดการทดลองละเชื้อ ใส่ชิ้นวุ้น จำนวน 2 ชิ้น โดยเชื้อราแต่ละชนิดจะแบ่งชุดการทดลองตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยงออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 3 4 และ 5 สัปดาห์

ชุดการทดลองที่ใส่ *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ชุดการทดลองละเชื้อ ใส่ชิ้นวุ้นจำนวน 3 ชิ้น โดยเชื้อราแต่ละชนิดจะแบ่งชุดการทดลองตามระยะเวลาการเพาะเลี้ยงออกเป็น 3 ช่วงเวลา คือ 3 4 และ 5 สัปดาห์

เมื่อครบกำหนดเวลาในการเพาะเลี้ยงเชื้อราของแต่ละชุดการทดลอง นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที

3. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้า

3.1 ศึกษาค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน

นำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อของแต่ละชุดการทดลองในข้อ 2 ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง วิเคราะห์หาค่า Kappa number (ปริมานลิกนินที่เหลือ) ซึ่งเป็นการทดสอบตามมาตรฐาน TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) ที่ T236 cm-85 กำหนดโดยสถาบันมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา หรือ ANSI (American National Standard Institute) และการย่อยลิกนิน (% ลิกนินในตัวอย่างที่ไม่หมัก - % ลิกนินในตัวอย่างที่หมัก%/ลิกนินในตัวอย่างที่ไม่หมัก) (กัลยวัต พรสุรัตน์, 2546) จากนั้นเลือกชุดการทดลองของเชื้อราแต่ละชนิดที่มีค่า Kappa number น้อยและสามารถย่อยสลายลิกนินได้ดีที่สุดมาเปรียบเทียบกัน และนำไปทำการศึกษาต่อ

3.2 ศึกษาการย่อยเซลลูโลส และค่า Selection factor

นำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าจากชุดการทดลองที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.1 มาศึกษาการย่อยเซลลูโลส (% น้ำหนักแห้งของเยื่อ - % การย่อยลิกนิน) และค่า Selection factor (การย่อยลิกนิน/การย่อยเซลลูโลส) (กัลยวัต พรสุรัตน์, 2546) และเปรียบเทียบการย่อยเซลลูโลส และค่า Selection factor ของกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยเชื้อราแต่ละชนิด

4. ศึกษาปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อ

นำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่เพาะเลี้ยงด้วยเชื้อราตามที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.1 มาทำการศึกษาปริมาณสารไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ที่เหมาะสมในการฟอกเยื่อ โดยใช้ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 10 12 14 และ16 ตามลำดับ เติมแมกนีเซียมซัลเฟตร้อยละ 0.05 และโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 2 ใส่ลงในน้ำกลั่น โดยใช้อัตราส่วนน้ำกลั่นต่อกาบกล้วยเท่ากับ 10:1 ปรับความเป็นกรดด่างด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ให้อยู่ในช่วงพีเอช 10.5-11.0 หลังจากนั้นใส่เยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่จะฟอกลงไป คนให้เยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าเปียกสารละลาย ต้มที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ล้างด้วยน้ำสะอาด และนำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้ามาทุบเพื่อให้เกิดการกระจายตัว และแบ่งเยื่อกาบกล้วยน้ำว้าจากการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 10 12 14 และ 16 ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 3 ชั่วโมง เพื่อนำไปหาค่า Kappa number ส่วนเยื่อที่เหลือนำไปขึ้นเป็นแผ่นกระดาษ

5. การขึ้นแผ่นกระดาษด้วยตะแกรง

นำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการทุบจนเกิดการกระจายตัวมาขึ้นแผ่นกระดาษ โดยชั่งน้ำหนักตามแกรมกระดาษ 80 แกรม ใช้เยื่อเปียก 31.62 กรัม ตะแกรงขึ้นแผ่นขนาด 20.6 x 29.2 เซนติเมตร นำตะแกรงที่กระจายเยื่อใส่แล้วอบที่อุณหภูมิประมาณ 40-45 องศาเซลเซียส ประมาณ 8 ชั่วโมง เมื่อแห้งแล้วจึงลอกแผ่นกระดาษออกจากตะแกรง

6. การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพและด้านความเหนียวของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้า

นำกระดาษมาศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่ ความขาวสว่าง (Spectro densitometer, 500 Series, X-Rite, Incorporated 3100, U.S.A.) และด้านความเหนียว ได้แก่ ความหนา (US-22 B, Teclock, IDM Instruments, Japan) ความต้านแรงดันทะลุ (PAP2056, PAP, TECH Engineer & associates, India) และความต้านแรงฉีกขาด (53983.f 000, FRANG TEST, FRANK Prufgerate GmbH, Germany) ทำการคัดเลือกกระดาษที่ฟอกด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ส่งผลให้กระดาษมีคุณสมบัติทางกายภาพ และความเหนียวที่ดีที่สุดจากที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* มาเปรียบเทียบกัน

7. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ One – Way Analysis of Variance เพื่อหาค่าความแปรปรวนของข้อมูลและเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P<0.05$) โดยใช้วิธีของ Duncan's Multiple Range Test โปรแกรม SPSS for window Version 11.5

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้า

1.1 ค่า Kappa number การย่อยลิกนิน การย่อยเซลลูโลส และค่า Selection factor ของเยื่อกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วยวิธีทางชีวภาพ

1.1.1 ค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน

จากตารางที่ 1 พบว่าจำนวนชิ้นวุ้นที่แตกต่างกันของชุดการทดลองที่ใช้ *T. viride* ไม่มีผลต่อค่า Kappa number และการย่อยลิกนินในกาบกล้วยน้ำว้า โดยแต่ละชุดการทดลองค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนระยะเวลาพบว่าในสัปดาห์ที่ 5 ของการ

ทดลองค่า Kappa number มีค่าน้อยที่สุด และสามารถลดปริมาณลิกนินได้มากที่สุด เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า Kappa number และการย่อยลิกนินของชุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 5 มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 แต่ชุดการทดลองในสัปดาห์ที่ 3 และ 4 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับชุดการทดลองที่ใช้ *T. harzianum* และ *T. hamatum* พบว่าจำนวนชิ้นวุ้นและระยะเวลาที่ใช้ในการหมักที่ต่างกันของทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยจำนวนชิ้นวุ้นและระยะเวลาการหมักที่มากขึ้นจะส่งผลให้ค่า Kappa number มีค่าน้อยลง และสามารถลดปริมาณลิกนินที่อยู่ในกาบกล้วยได้มากขึ้น เนื่องจาก *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* เป็นเชื้อราที่ผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติก (Ligninolytic enzyme) ซึ่งเป็นเอนไซม์กลุ่มที่สามารถย่อยสลายลิกนินในเซลล์พืช ลิกนินเป็นสารประกอบโพลีเมอร์อโรมาติก ถูกเชื่อมโยงกับเซลลูโลสโดยเฮมิเซลลูโลส มีพันธะโควาเลนท์เชื่อมระหว่างเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน เมื่อเอนไซม์ลิกนิโนไลติกย่อยโครงสร้างของลิกนินในเยื่อจากกาบกล้วย ส่งผลให้ Kappa number ที่อยู่ในเส้นใยของกล้วยมีค่าน้อยลง (สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์, 2553; Gochev & Krastanov, 2007; Mohan *et al*., 2011) จากนั้นคัดเลือกชุดการทดลองที่มีค่า Kappa number น้อยที่สุดและสามารถย่อยลิกนินได้มากที่สุดของเชื้อราแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน

จากการคัดเลือกชุดการทดลองที่มีค่า Kappa number น้อยที่สุดและสามารถย่อยลิกนินได้มากที่สุดของเชื้อราแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน (ตารางที่ 2) พบว่าชุดการทดลอง *T. hamatum* มีค่า Kappa number มากที่สุด รองลงมาคือชุดการทดลอง *T. harzianum* และ *T. viride* โดยค่า Kappa number ของชุดการทดลอง *T. viride* และ *T. harzianum* ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลอง *T. hamatum* ส่วนการย่อยลิกนิน พบว่าชุดการทดลอง *T. viride* มีค่าการย่อยลิกนินมากที่สุด รองลงมาคือชุดการทดลอง *T. harzianum* และ *T. hamatum* โดยชุดการทดลอง *T. viride* และ *T. harzianum* ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) กับชุดการทดลอง *T. hamatum* จากการวิเคราะห์เยื่อกล้วยน้ำว้าธรรมชาติพบว่ามีค่า Kappa number เท่ากับ 53.80 ซึ่งชุดการทดลอง *T. viride* เชื้อราสามารถย่อยลิกนินจนทำให้ Kappa number

ตารางที่ 1 ค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน ที่ได้จากการย่อยกาบกล้วยน้ำว้าด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum*

จำนวนชิ้นวุ้น-สัปดาห์	Kappa number			การย่อยลิกนิน (% น้ำหนักแห้ง)		
	T. viride	*T. harzianum*	*T. hamatum*	*T. viride*	*T. harzianum*	*T. hamatum*
1-3	22.39^{Aa}	52.16^{Aa}	52.51^{Aa}	0.58^{Aa}	0.03^{Cc}	0.02^{Aa}
1-4	22.77^{Aa}	40.19^{Ab}	47.63^{Ab}	0.58^{Aa}	0.25^{Cb}	0.12^{Ab}
1-5	20.26^{Ab}	24.71^{Ac}	29.48^{Ac}	0.62^{Ab}	0.51^{Ca}	0.45^{Ac}
2-3	22.74^{Aa}	51.01^{Ba}	52.08^{Ba}	0.58^{Aa}	0.05^{Bc}	0.03^{Ba}
2-4	22.56^{Aa}	38.56^{Bb}	46.84^{Bb}	0.58^{Aa}	0.28^{Bb}	0.13^{Bb}
2-5	20.42^{Ab}	22.59^{Bc}	28.19^{Bc}	0.62^{Ab}	0.54^{Ba}	0.48^{Bc}
3-3	22.56^{Aa}	44.88^{Ca}	51.21^{Ca}	0.58^{Aa}	0.17^{Ac}	0.05^{Ca}
3-4	22.74^{Aa}	35.98^{Cb}	44.69^{Cb}	0.58^{Aa}	0.33^{Ab}	0.17^{Cb}
3-5	20.42^{Ab}	21.69^{Cc}	25.59^{Cc}	0.62^{Ab}	0.60^{Aa}	0.53^{Cc}
CV (%)	25.30	27.60	22.80	26.90	22.10	19.80

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง ใช้ปริมาณชิ้นวุ้นที่ต่างกัน คือ 1 2 และ 3 ชิ้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในระยะเวลาที่เท่ากัน

2. ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง ใช้เวลาในการเพาะเลี้ยงที่ต่างกัน คือ 3 4 และ 5 สัปดาห์ มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเปรียบเทียบในจำนวนชิ้นวุ้นที่เท่ากัน

มีค่าน้อยที่สุด เท่ากับ 20.26 และมีค่าการย่อยลิกนินมากที่สุด เท่ากับ 0.62% น้ำหนักแห้ง รองลงมา คือชุดการทดลอง *T. harzianum* และชุดการทดลอง *T. hamatum* ที่มีค่า Kappa number เท่ากับ 21.69 และ 25.59 ตามลำดับ ขณะที่การย่อยลิกนิน มีค่าเท่ากับ 0.60 และ 0.53% น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ จากนั้นนำทั้ง 3 ชุดการทดลองไปทดสอบหาการย่อยเซลลูโลส และค่า Selection factor ต่อไป

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบค่า Kappa number และค่าการย่อยลิกนินที่ได้จากการย่อยกาบกล้วยน้ำว้า ระหว่าง *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum*

ผลิตด้วยเชื้อรา	Kappa number	การย่อยลิกนิน (% น้ำหนักแห้ง)
T. viride	20.26[b]	0.62[a]
T. harzianum	21.69[b]	0.60[a]
T. hamatum	25.59[a]	0.53[b]
CV (%)	14.90	7.60

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

1.1.2 การย่อยเซลลูโลส และค่า Selection factor

จากตารางที่ 3 การย่อยเซลลูโลสและค่า Selection factor ของชุดการทดลอง *T. harzianum* และชุดการทดลอง *T. hamatum* ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) กับชุดการทดลอง *T. viride* โดยชุดการทดลอง *T. viride* การย่อยเซลลูโลสมีการสูญเสียเซลลูโลสน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดการทดลอง *T. harzianum* และ *T. hamatum* ซึ่งชุดการทดลองที่มีการย่อยเซลลูโลสมากแสดงว่าเส้นใยของกาบกล้วยน้ำว้าจะถูกย่อยด้วยเชื้อราได้สูง ส่งผลให้เส้นใยมีลักษณะบางลง ส่วนชุดการทดลองที่มีการย่อยเซลลูโลสน้อย เส้นใยของกาบกล้วยน้ำว้าจะถูกย่อยด้วยเชื้อราได้ต่ำ ส่งผลให้เส้นใยมีลักษณะหนา โดยถ้าเส้นใยมีลักษณะบางจะส่งผลต่อคุณสมบัติด้านความเหนียวของกระดาษ ทั้งความหนา ความต้านทานแรงดันทะลุ และความต้านทานแรงฉีกขาด (ทินกร อัญชลีวิทยกุล, 2546) ส่วนค่า Selection factor ของชุดการทดลอง *T. viride* พบว่ามีค่ามากกว่าชุดการทดลอง *T. harzianum* และชุดการทดลอง *T. hamatum* ซึ่งค่า Selection factor จะบ่งบอกถึงความสามารถในการย่อยสลายลิกนินและการย่อยสลายเซลลูโลสของเชื้อรานั้นว่าสามารถย่อยสลายลิกนินได้มากหรือน้อยกว่าการย่อยสลายเซลลูโลส โดยถ้าค่า Selection factor มีค่ามากแสดงว่าเชื้อราสามารถย่อยสลายลิกนินได้มากกว่าการย่อยเซลลูโลส (กัลยวัต พรสุรัตน์, 2546)

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบค่าการย่อยเซลลูโลส และค่า Selection factor ที่ได้จากการย่อยกาบกล้วยน้ำว้า ระหว่าง *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum*

ผลิตด้วยเชื้อรา	การย่อยเซลลูโลส (%น้ำหนักแห้ง)	ค่า Selection factor
T. viride	24.38[b]	0.03[a]
T. harzianum	29.40[a]	0.02[b]
T. hamatum	28.48[a]	0.02[b]
CV (%)	13.50	15.70

หมายเหตุ ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

1.2 ค่า Kappa number ของเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

จากตารางที่ 4 เยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0 8 10 12 14 และ 16 ค่า Kappa number มีค่าแปรผกผันกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าค่า Kappa number ที่ผลิตด้วยเชื้อราชนิดเดียวกันแต่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) เมื่อนำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยเชื้อราต่างชนิดแต่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในแต่ละร้อยละที่เท่ากันมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่า Kappa number ของเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ในทุกชุดการทดลอง โดยเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. viride* มีค่า Kappa number น้อยที่สุด รองลงมาคือเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. harzianum* ส่วนเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. hamatum* มีค่า Kappa number มากที่สุด ทั้งนี้นอกจาก *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* จะสามารถผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติกในการย่อยสลายลิกนินในเซลล์พืชได้แล้ว ยังสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูเลสและ

เฮมิเซลลูเลสในการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสด้วย ดังนั้น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยจะถูกทำลายไปด้วย โดยเฮมิเซลลูโลสจะถูกทำลายได้ง่ายกว่าเซลลูโลส เนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงเท่ากับเซลลูโลส องค์ประกอบส่วนใหญ่ในเฮมิเซลลูโลสคือไซแลน โดยไซแลนจัดเป็นโพลีเมอร์ของน้ำตาลไซโลส มีรายงานวิจัยพบว่าไซแลนสามารถย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าเซลลูโลสและลิกนิน (ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล, 2553; อรุณี ศุภสินสาธิต, 2555; Pang *et al*., 2006) ซึ่งเชื้อราในจีนัส *Trichoderma* spp. สามารถผลิตเอนไซม์ไซแลเนสย่อยสลายไซแลนในเส้นใยพืช ซึ่งเอนไซม์ไซแลเนสจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับไซแลน ทำให้พันธะระหว่างไซแลนกับลิกนินในส่วนของสารประกอบคาร์โบไฮเดรตกับลิกนินถูกทำลาย (ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล, 2553; Pang *et al*., 2006) นอกจากนี้เปอร์ไฮดรอกซิลไอออน (OOH^-) ที่เกิดจากปฏิกิริยาของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาพด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารที่ว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นมาก (นิภาพร พันทอง และ ชัชวาลย์ ศรีกำพล, 2546) ดังสมการ

$$H_2O_2 + OH^- \longrightarrow OOH^- + H_2O$$

เปอร์ไฮดรอกซิลไอออนจะทำปฏิกิริยากับลิกนินที่มีอยู่ในเส้นใย ทำให้บางหน่วยของฟีนิลโพรเพนแตกออก เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน ปริมาณลิกนินที่พบในเยื่อจึงลดลง (จิระศักดิ์ ชัยสนิท, 2541; นิภาพร พันทอง และ ชัชวาลย์ ศรีกำพล, 2546; Mohan *et al*., 2011) และเนื่องจาก *T. viride* สามารถย่อยสลายลิกนินได้มากกว่า *T. harzianum* และ *T. hamatum* ซึ่งสังเกตได้จากค่า Kappa number ที่มีค่าน้อยกว่า จึงทำให้เมื่อเยื่อกระดาษฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ค่า Kappa number ในเยื่อกระดาษจึงมีค่าน้อยที่สุด

2. คุณสมบัติทางกายภาพและความเหนียวของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วยวิธีทางชีวภาพ

2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและความเหนียวของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ฟอกด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่แตกต่างกัน

เมื่อนำกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 0 8 10 12 14 และ 16 ในแต่ละร้อยละของเชื้อราแต่ละชนิดมาเปรียบเทียบกัน พบว่าความขาวสว่างมีค่าแปรผันตรงกับปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ฟอกเยื่อ โดยทุกชุดการทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความขาวสว่างของกระดาษเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากในระหว่างการการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาพที่เป็นด่างของโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดเปอร์ไฮดรอกซิลไอออน (OOH^-) ขึ้น เปอร์ไฮดรอกซิลไอออนที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับลิกนินในเส้นใยของกาบกล้วย ทำให้บางส่วนของหน่วยฟีนิลโพรเพนแตกออก ปฏิกิริยานี้เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของลิกนิน ทำให้ค่าการสะท้อนแสงในช่วงที่

ตารางที่ 4 ค่า Kappa number ภายหลังการฟอกเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกัน

ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ)	Kappa number ของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้า			CV (%)
	T. viride	*T. harzianum*	*T. hamatum*	
0	20.42^{Ac}	21.69^{Ab}	25.59^{Aa}	2.89
8	13.84^{Bc}	14.81^{Bb}	19.72^{Ba}	2.80
10	11.21^{Cc}	12.75^{Cb}	17.52^{Ca}	2.00
12	9.45^{Dc}	11.22^{Db}	16.44^{Da}	2.89
14	8.19^{Ec}	10.59^{Eb}	14.94^{Ea}	1.99
16	7.41^{Fc}	9.85^{Fb}	13.50^{Fa}	2.85
CV (%)	0.89	2.88	9.50	-

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ที่ไม่เหมือนกัน (เป็นการเปรียบเทียบค่าทางสถิติของการผลิตด้วยเชื้อราชนิดเดียวกันแต่ฟอกด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกัน) หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

2. ตัวอักษรพิมพ์เล็กที่ไม่เหมือนกัน (เป็นการเปรียบเทียบค่าทางสถิติของการผลิตด้วยเชื้อราต่างชนิดกันแต่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่เท่ากัน) หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ตามองเห็นเพิ่มมากขึ้น (จิระศักดิ์ ชัยสนิท, 2541; วุฒินันท์ คงทัต, 2545) ส่วนความหนาของกระดาษมีค่าแปรผกผันกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอกเยื่อ เนื่องจากเส้นใยมีขนาดบางลงเมื่อฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และเส้นใยจะมีลักษณะบางขึ้นเรื่อยๆ เมื่อเพิ่มปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการฟอกเยื่อ (ทินกร อัญชลีวิทยกุล, 2546) ทั้งนี้อาจเนื่องจากสารฟอกเยื่ออย่างไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยคือเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ด้วยเช่นกัน โดยเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายได้ง่ายกว่าเนื่องจากโครงสร้างไม่แข็งแรง ด้วยเหตุนี้จึงอาจส่งผลให้การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยลดลง เส้นใยของกล้วยจึงมีการแตกออกจากกันมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (จิระศักดิ์ ชัยสนิท, 2541; สุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า, 2554) นอกจากนั้นในขณะที่นำเยื่อมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษเส้นใยที่มีลักษณะบางสามารถหลุดรอดผ่านแผ่นตะแกรงที่ใช้สำหรับขึ้นแผ่นกระดาษออกไปบางส่วน เมื่อนำค่าความหนาของกระดาษมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ยกเว้นกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. viride* ที่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 14 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกระดาษที่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 16

การศึกษาความต้านแรงดันทะลุของกระดาษ (ความสามารถของกระดาษที่ทนแรงดันได้สูงสุด เมื่อได้รับการกระทำในทิศตั้งฉากต่อผิวหน้ากระดาษ) (วิขันฑ์ อรรณพานุรักษ์, 2545) พบว่ากระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ที่ไม่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความต้านแรงดันทะลุมากกว่ากระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยกระดาษกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* แต่ไม่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีความต้านแรงดันทะลุมากที่สุด เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าทางสถิติพบว่าความต้านแรงดันทะลุของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. harzianum* และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 และ 10 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกระดาษที่ไม่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ส่วนความต้านแรงดันทะลุของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* และ *T. hamatum* และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกระดาษที่ไม่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์

ความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษ (ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงกระทำซึ่งจะทำให้ชิ้นทดสอบหนึ่งชิ้นขาดออกจากรอยฉีกเดิม) (วิขันฑ์ อรรณพานุรักษ์, 2545) ของกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 มีความต้านทานแรงฉีกขาดมากที่สุด แต่เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าทางสถิติพบว่าความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ

ตารางที่ 5 คุณสมบัติความขาวสว่างและความหนาของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้า

ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ)	ความขาวสว่าง (ร้อยละ)			ความหนา (μ)		
	ผลิตด้วยเชื้อรา			ผลิตด้วยเชื้อรา		
	T. viride	*T. harzianum*	*T. hamatum*	*T. viride*	*T. harzianum*	*T. hamatum*
0	62.34^{f}	60.40^{f}	54.51^{c}	540.10^{a}	398.40^{a}	366.20^{a}
8	87.03^{e}	85.23^{e}	80.47^{b}	379.20^{b}	375.00^{b}	340.40^{b}
10	88.32^{d}	86.54^{d}	81.35^{ab}	332.50^{c}	334.00^{c}	320.60^{c}
12	89.52^{c}	88.93^{c}	83.50^{a}	326.60^{d}	326.60^{d}	318.80^{d}
14	90.66^{b}	89.12^{b}	84.46^{a}	292.60^{e}	304.20^{e}	300.40^{e}
16	92.01^{a}	90.12^{a}	85.17^{a}	298.60^{e}	294.20^{f}	287.40^{f}
CV (%)	0.71	0.77	2.15	24.90	30.81	32.55

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

2. เป็นการเปรียบเทียบค่าทางสถิติของวิธีการผลิตเดียวกันแต่ฟอกด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกัน

T. hamatum และฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 และ 10 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

จากการศึกษาพบว่ากระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* และฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้นจะมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุและความต้านแรงฉีกขาดของกระดาษต่ำลง ทั้งนี้อาจเนื่องจากไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์สามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับคาร์โบไฮเดรตของเส้นใยคือเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้ด้วยเช่นกัน โดยเฮมิเซลลูโลสถูกทำลายได้ง่ายกว่าเนื่องจากโครงสร้างไม่แข็งแรง ด้วยเหตุนี้จึงอาจส่งผลให้การสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใยลดลง เส้นใยของกล้วยจึงมีการแตกออกจากกันมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่อมีการเพิ่มปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (จิระศักดิ์ ชัยสนิท, 2541; สุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า, 2554) นอกจากนั้นในขณะที่นำเยื่อมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษเส้นใยที่มีลักษณะบางสามารถหลุดรอดผ่านแผ่นตะแกรงที่ใช้สำหรับขึ้นแผ่นกระดาษออกไปบางส่วน ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงต่อความต้านทานแรงดันทะลุและความต้านทานแรงฉีกขาดลดลง แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าความต้านแรงฉีกขาดของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยเชื้อราทั้ง 3 ชนิด และฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 มีค่ามากกว่ากระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วยเชื้อราไม่ฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการฟอกเยื่อกระดาษด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ส่งผลให้เยื่อของกาบกล้วยมีการกระจายตัวออกจากกันดีขึ้น เมื่อนำมาขึ้นเป็นแผ่นกระดาษจึงมีความสม่ำเสมอของเยื่อทั่วแผ่นตะแกรง และมีการสานตัวของเส้นใยที่แน่นทึบทำให้สามารถต้านแรงฉีกขาดซึ่งเป็นแรงกระทำที่ทำให้กระดาษฉีกขาดออกจากกันได้ดีกว่ากระดาษที่ผ่านการผลิตจากเยื่อกระดาษที่ไม่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ซึ่งเยื่อไม่ค่อยกระจายตัวทั่วแผ่นตะแกรงและไม่ค่อยมีการสานตัวของเส้นใย

งานวิจัยนี้ได้คัดเลือกชุดการทดลองที่ดีที่สุดจากการฟอกเยื่อด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ของกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกาบกล้วยน้ำว้ามาศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและความเหนียว ได้แก่ *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ที่ฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8

2.2 เปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและความเหนียวระหว่างกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum*

จากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและความเหนียวของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* และฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 ซึ่งเป็นการคัดเลือกจากชุดการทดลองที่ดีที่สุดของเชื้อแต่ละชนิด พบว่าความขาวสว่างของกระดาษ ความหนาของกระดาษ และความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* มีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ กระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. harzianum* และ *T. hamatum* ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเนื่องจาก *T. viride* สามารถผลิตเอนไซม์ลิกนิโนไลติกย่อยสลายลิกนินได้ดีที่สุด (สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์,

ตารางที่ 6 ความต้านแรงดันทะลุและความต้านทานแรงฉีกขาดของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้า

ไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ (ร้อยละ)	ความต้านแรงดันทะลุ (kg/cm^2)			ความต้านทานแรงฉีกขาด ($mN.m^2/g$)		
	ผลิตด้วยเชื้อรา			ผลิตด้วยเชื้อรา		
	T. viride	*T. harzianum*	*T. hamatum*	*T. viride*	*T. harzianum*	*T. hamatum*
0	3.63^{a}	3.20^{a}	3.13^{a}	15.93^{d}	17.80^{d}	15.62^{d}
8	3.60^{a}	3.17^{a}	3.03^{ab}	26.31^{a}	26.49^{a}	26.57^{a}
10	3.40^{b}	3.13^{ab}	2.90^{b}	25.99^{a}	25.87^{ab}	25.78^{ab}
12	3.30^{b}	3.03^{b}	2.87^{bc}	24.33^{b}	24.85^{b}	24.80^{b}
14	3.07^{c}	2.80^{c}	2.70^{cd}	20.00^{c}	22.08^{c}	21.55^{c}
16	2.97^{c}	2.70^{c}	2.67^{d}	14.41^{e}	16.11^{e}	15.19^{e}
CV (%)	3.33	2.35	3.64	2.15	3.24	3.08

หมายเหตุ 1. ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

2. เป็นการเปรียบเทียบค่าทางสถิติของวิธีการผลิตเดียวกันแต่ฟอกด้วยปริมาณไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ต่างกัน

ตารางที่ 7 เปรียบเทียบคุณสมบัติของกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum*

ผลิตด้วยเชื้อรา	ปริมาณไฮโดรเจนเปอร์-ออกไซด์ที่ใช้ฟอกเยื่อ	ความขาวสว่าง (ร้อยละ)	ความหนา (μ)	ความต้านแรงดันทะลุ (kg/cm^2)	ความต้านทานแรงฉีกขาด ($mN.m^2/g$)
T. viride	ร้อยละ 8	87.03[a]	379.20[a]	3.60[a]	26.31[a]
T. harzianum	ร้อยละ 8	85.23[b]	375.00[b]	3.17[b]	26.49[a]
T. hamatum	ร้อยละ 8	80.47[c]	340.40[c]	3.03[c]	26.57[a]
CV (%)		1.68	26.56	1.89	2.86

หมายเหตุ ตัวอักษรที่ไม่เหมือนกัน หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

2553) ส่งผลให้กระดาษ ที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* มีความขาวสว่างมากที่สุด ส่วนสาเหตุที่ความหนาของกระดาษและความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* มีค่ามากที่สุด อาจเป็นเพราะ *T. viride* สามารถผลิตเอนไซม์ไซแลเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่สามารถทำลายเฮมิเซลลูโลสในส่วนที่เป็นไซแลน และผลิตเอนไซม์เซลลูเลสที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสในเส้นใยของกาบกล้วยน้อยกว่ากระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. harzianum* และ *T. hamatum* ส่วนความต้านทานแรงฉีกขาดพบว่ากระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. hamatum* มีค่ามากที่สุด รองลงมาได้แก่ กระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วย *T. harzianum* และ *T. viride* ตามลำดับ เมื่อนำมาเปรียบเทียบค่าทางสถิติพบว่าความขาวสว่างของกระดาษ ความหนาของกระดาษ และความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษที่ผลิตด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ส่วนความต้านทานแรงฉีกขาด พบว่ากระดาษที่ผลิตด้วยเชื้อราทั้ง 3 ชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาการผลิตเยื่อกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยการใช้เชื้อรา *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* ชุดการทดลองละเชื้อ พบว่าปริมาณเชื้อราเริ่มต้นที่แตกต่างกันไม่มีผลต่อค่า Kappa number และการย่อยลิกนิน แต่จะขึ้นอยู่กับระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงเชื้อรา โดยเมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นค่า Kappa number จะน้อยลงเรื่อยๆ และการย่อยลิกนินจะมากขึ้น ซึ่งชุดการทดลองที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* มีค่า Kappa number น้อยที่สุด การย่อยลิกนินมากที่สุดในการย่อยเซลลูโลสพบว่าชุดการทดลองที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* มีการสูญเสียเซลลูโลสน้อยที่สุด ส่วนค่า Selection factor พบว่าชุดการทดลองที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride* มีค่ามากที่สุด จากการนำเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้ามาฟอกด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่าค่า Kappa number ของเยื่อจากกาบกล้วยน้ำว้าที่ผลิตด้วยเชื้อราทั้ง 3 ชนิด จะแปรผกผันกับปริมาณของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ที่ใช้ในการฟอก เมื่อเปรียบเทียบความขาวสว่าง ความต้านทานแรงดันทะลุ ความ ต้านทานแรงฉีกขาด และความหนาของกระดาษที่ผ่านการเพาะเลี้ยงด้วย *T. viride T. harzianum* และ *T. hamatum* พบว่า *T. viride* มีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาผลิตกระดาษจากกาบกล้วยน้ำว้าด้วยวิธีทางชีวภาพ

เอกสารอ้างอิง

กัลยวัต พรสุรัตน์. (2546). *การใช้รา่ย่อยสลายลิกนินในการผลิตเยื่อกระดาษจากชานอ้อย ใบสับปะรด และปอสาโดยวิธีทางชีวภาพ*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาพฤกษเศรษฐกิจ, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิระศักดิ์ ชัยสนิท. (2541). การฟอกเยื่อกระดาษด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์. *วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ. 46*(147), 26-28.

ทินกร อัญชลีวิทยกุล. (2546). *การผลิตกระดาษจากต้นกล้วยและการใช้ประโยชน์*. วิทยานิพนธ์ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์เพื่อการพัฒนาชุมชน, คณะคหกรรม, มหาวิทยาลัยรามคำแหง.

นิภาพร พันทอง และ ชัชวาลย์ ศรีกำพล. (2546). *การผลิตกระดาษจากต้นข้าวโพด เปลือกข้าวโพด และซังข้าวโพด*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเคมี, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม.

วิขัณฑ์ อรรณพานุรักษ์. (2545). การตรวจสอบและควบคุมคุณภาพเยื่อและกระดาษสา. ใน. *เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ*. (หน้า 126-132). กรุงเทพฯ: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

วิชชา พิชัยณรงค์. (2545). *การแยกลิกนินออกจากน้ำดำในกระบวนการทำเยื่อกระดาษจากยูคาลิปตัส*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วุฒินันท์ คงทัต. (2545). กระดาษทำด้วยมือ. ใน. *เอกสารประกอบการอบรมเชิงปฏิบัติการ*. (หน้า 18-20). กรุงเทพฯ: สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศิริรัตน์ ศิริพรวิศาล. (2553). เทคโนโลยีเอนไซม์ในอุตสาหกรรมกระดาษ. *วารสารพลังงานและเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม, 37*, 69-73.

สุกาญจน์ รัตนเลิศนุสรณ์. (2553). ความหลากหลายทางชีวภาพเชื้อราดินเลนนากุ้งร้างและการย่อยสลายฟางข้าวด้วยเชื้อรา. ใน. *การประชุมทางวิชาการนเรศวรวิจัย ครั้งที่ 6*. (หน้า 331-345). พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

สุภาภรณ์ ฤทธิ์กล้า. (2554). *ผลของไซแลนร่วมกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ต่อสภาพฟอกได้ของเยื่อต้นข้าวโพด*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาเทคโนโลยีเยื่อและกระดาษ, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อรุณี ศุภสินสาธิต. (2555). พลังงานจากชีวมวลที่มีลิกโนเซลลูโลสสูง. *วารสารสิ่งแวดล้อม. 16*(2), 36-43.

Elisashvili, V., Penninckx, M., Kachlishvili, E., Asatiani, M. and Kvesitadze, G. (2006). Use of *Pleurotusdryinus* for lignocellulolytic enzymes production in submerged fermentation of mandarin peels and tree leaves. *Enzyme Microbiology Technology, 38*, 998-1004.

Lei, Wang, Wangui, Wang, Xiang, Ji and Lu, Cai. (2011). Biodegradation of lignin by the white rot fungus *Polyporus varius* and its promising potential for biopulping. *China Journal of Bioengineering and Technology. 1*, 464-468.

Mohan, Gaanappriya, Guhankumar, P. and Balakrishnan, V. (2011). Isolation of xylan degrading enzyme from *Trichoderma* spp.. *Research in Plant Biology, 1*, 15-20

Pang, P.K., Darah.I., Poppe, L. Szakacs, G. and Ibrahim, C.O. (2006). Xylanase production by a local isolate, *Trichoderma* spp. FETL c3-2 via solid state fermentation using agricultural wastes as substrates. *Malaysia Journal of Microbiology, 2*, 7-14.

Gochve, V.K. and Krastanov, A.I. (2007). Isolation of laccase producing *Trichoderma* spp. Bulgaria. *Journal of Agricultural Science. 13*, 171-176.

Zadrazil, F and Reiniger, P. (1988). *Treatment of lignocellulosics with white rot fungi*. London. Elsevier Applied Seience.