



วิทยานิพนธ์

ผลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของ
กระดาษkraft

**EFFECT OF MODIFIED STARCH COATING ON STRENGTH
PROPERTIES OF KRAFT PAPER**

นางสาวนวพร วรรณวิศาล

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2549



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

เทคโนโลยีการบรรจุ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์

Effect of Modified Starch Coating on Strength Properties of Kraft Paper

นามผู้วิจัย นางสาวนพพร วรรณวิศาล

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์รัชฎาภรณ์ จิณกาญจน์, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วาทินี ชนเห็นชอบ, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วาทินี ชนเห็นชอบ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อากงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษkraft

Effect of Modified Starch Coating on Strength Properties of Kraft Paper

โดย

นางสาวนพพร วรรณวิศาล

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-2678-9

นพพร วรรณวิศาล 2549: ผลของการเคลือบสตาเร็กซ์ดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของ
กระดาษคราฟท์ ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ) สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ
ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์ชัยญูรัตน์ จิณกาญจน์, Ph.D.
117 หน้า
ISBN 974-16-2678-9

สมบัติด้านความแข็งแรงเป็นลักษณะสำคัญของกระดาษคราฟท์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตกล่อง
กระดาษลูกฟูก วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาผลของการเคลือบสตาเร็กซ์ดัดแปรจากมันสำปะหลังที่มีต่อ
สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์ สมบัติด้านความแข็งแรงที่ศึกษา ได้แก่ ความต้านทานแรงดันทะลุ
ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวและความต้านทานแรงกดวงแหวน ปัจจัยที่ศึกษาคือ ชนิดของสตาเร็กซ์ดัดแปร
ความเข้มข้นของสารละลายสตาเร็กซ์ดัดแปร และอุณหภูมิของสารละลายสตาเร็กซ์ก่อนเคลือบ นอกจากนี้ได้ศึกษา
เพิ่มเติมถึงผลของสภาวะในการเก็บที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์
ภายหลังการเคลือบสตาเร็กซ์ดัดแปร โดยการจำลองสภาวะการเก็บจริงของคลังสินค้าในอุตสาหกรรมโดยทั่วไป
สตาเร็กซ์ดัดแปรที่ใช้ในการศึกษามี 2 ชนิด คือ ออกซิไคซ์สตาเร็กซ์ (Fibersize 382TM) และแคตไอออนิกสตาเร็กซ์
(Catosize 380TM) ระดับความเข้มข้นของสารละลายสตาเร็กซ์ได้กำหนดที่ร้อยละ 5, 15 และ 25 โดยน้ำหนัก
ในขณะที่อุณหภูมิของสารละลายก่อนเคลือบที่ 65 °ซ และ 75 °ซ นอกจากนี้ได้กำหนดระยะเวลาในการเก็บ
(อุณหภูมิ 25-32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) เป็นเวลา 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ ผลจากการทดสอบแสดง
ให้เห็นว่า ชนิดของสตาเร็กซ์ดัดแปรและความเข้มข้นส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงดันทะลุของ
กระดาษคราฟท์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยค่าความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.8 - 12.4 เมื่อเคลือบ
ด้วยออกซิไคซ์สตาเร็กซ์ และค่าความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.3 - 16.0 เมื่อเคลือบด้วยแคตไอออนิก
สตาเร็กซ์ อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ผลทางสถิติพบว่า อุณหภูมิของสารเคลือบไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า
ความต้านทานแรงดันทะลุ นอกจากนี้จากการจำลองสภาวะการเก็บจริงพบว่า กระดาษเคลือบสตาเร็กซ์ดัดแปรทั้ง
สองชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุสูงกว่ากระดาษคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ
อย่างมีนัยสำคัญตลอด 4 สัปดาห์ของการเก็บ ส่วนการใช้ออกซิไคซ์สตาเร็กซ์และแคตไอออนิกสตาเร็กซ์สามารถใช้
ปรับปรุงสมบัติด้านความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวและความต้านทานแรงกดวงแหวนให้กับกระดาษ
คราฟท์ได้เฉพาะความเข้มข้นของสารละลายสตาเร็กซ์ที่ร้อยละ 5 แต่เมื่อพิจารณาผลของสภาวะในการเก็บ พบว่า
กระดาษเคลือบที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิดังกล่าว มีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวและความต้านทาน
แรงกดวงแหวนต่ำกว่ากระดาษที่ไม่ได้เคลือบในช่วงของการเก็บระหว่างการจำลองสภาวะการเก็บจริง จาก
การพิจารณาผลการทดลองโดยรวมพบว่าสารเคลือบแคตไอออนิกสตาเร็กซ์สามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรง
ให้กับกระดาษเคลือบได้มากกว่าสารเคลือบออกซิไคซ์สตาเร็กซ์ที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่ำเดียวกัน

Nawaporn Wannawisan 2006: Effect of Modified Starch Coating on Strength Properties of Kraft Paper. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging Technology. Thesis Advisor: Mrs. Tunyarut Jinkarn, Ph.D. 117 pages. ISBN 974-16-2678-9

Strength properties are considered significant characteristics of the kraft paper especially one for making corrugated boxes. The main objective of this research is to examine the effect of modified cassava starch coating on the strength properties of kraft paper. Strength properties that are investigated in this research are bursting strength, tensile strength and compression strength. For the compression strength, the study focuses only on ring crush values. Factors to be considered in the research include types of modified starches, concentrations and temperatures of coating solution. In addition, storage tests are also conducted in order to investigate the change of coated papers' performances in the real storage condition of most industrial warehouses. Two types of commercial modified starches (cassava starch) included in the research are oxidized starch (Fibersize 382TM) and cationic starch (Catosize 380TM). Concentrations of starch solutions are prepared at 5, 15 and 25% by weight while starch solution temperatures before coating are prepared at 65°C and 75°C respectively. Further, storage times are set for 1, 2, 3 and 4 weeks (25 - 32°C, 65 - 74%RH). The results show that type of modified starches and starch concentrations significantly affect bursting strength ($p \leq 0.05$). Bursting strength is increased by 8.8 - 12.4% for oxidized starch coating and by 12.3 - 16.0% for cationic starch coating. However, starch solution temperatures before coating do not significantly affect bursting strength. Further, bursting strength of coated papers at all conditions is significantly higher than the uncoated one for all 4 weeks of storage test. According to the results, tensile strength and compression strength can also be improved by oxidized starch and cationic starch coatings especially at 5% concentration of starch coating solutions. However, Tensile strength and Ring crush value of papers coated at this condition are lower than the uncoated paper at some particular storage intervals. In addition, according to the results, cationic starch coating can better improve strength properties of kraft paper compared to oxidized starch coating at same coating conditions.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการที่ปรึกษา อาจารย์ธัญญรัตน์ จิฎาณจน์ ประธานกรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วณิ ชนเห็นชอบ กรรมการวิชาเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์น้ำฝน ลำดับวงศ์
กรรมการวิชาการ ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำตลอดการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไข
ข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ รวมทั้งของกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิจิตรา
จันทร์พรชัย อาจารย์ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาตรวจแก้ไขและให้คำแนะนำเพิ่มจน
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุน
การวิจัย และบริษัท สยามกราฟท์อุตสาหกรรม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กระดาษกราฟที่ใช้
ใช้ในการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุทุกท่านที่ให้ความเมตตากรุณา
อบรมสั่งสอนความรู้ตลอดการศึกษาค้นคว้าสำเร็จ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ของภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ
ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่าง ๆ ขอขอบคุณ คุณธัญญรัตน์
คำดี เจ้าหน้าที่ควบคุมเครื่องมือส่วนกลาง และคุณจิระพงษ์ เกตุเรขา เจ้าหน้าที่ควบคุมเครื่องมือ
ของภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ
สำหรับการทดสอบ ขอขอบคุณเพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ สำหรับความมี
น้ำใจและคอยให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชัยรัตน์ และคุณแม่แม่นวรัตน์ วรรณวิศาล อาจารย์กัญญา
ศิลาข้อย และคุณรัชพล ชัยวัฒน์ ที่คอยให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดัน และสนับสนุนในการทำงาน
วิจัยมาโดยตลอดจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

นวพร วรรณวิศาล

สิงหาคม 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์ คำย่อ และอักษรย่อที่ใช้ในโปรแกรม	(9)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	29
อุปกรณ์	29
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	87
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	90
ภาคผนวก	97
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ	98
ภาคผนวก ข ผลวิเคราะห์ทางสถิติ	106
ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบปริมาณสสารชดก้างของสสารชดคแปรที่มีต่อ สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาศคราฟท์	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณความชื้นของสตาร์ชดัดแปร	35
2	ความหนืดของสตาร์ชดัดแปร	36
3	ปริมาณสารเคลือบบนกระดาษกราฟท์	36
4	สมบัติเบื้องต้นของกระดาษกราฟท์	38
5	สมบัติของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ชดัดแปร	40
6	ความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช	45
7	ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช	52
8	ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช	59
9	ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช	67
10	ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช	75

ตารางผนวกที่

ข1	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบ	107
ข2	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช	107
ข3	ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	108

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของ สตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษ เคลือบ	108
ข5 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ ต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ช	109
ข6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ ต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบ แคตไอออนิกสตาร์ช	109
ข7 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของ สตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษ เคลือบ	110
ข8 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ ต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ช	110
ข9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ ต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบ แคตไอออนิกสตาร์ช	111
ข10 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของ สตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษ เคลือบ	111
ข11 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ ต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ช	112

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข12 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	112
ข13 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบ	113
ข14 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช	113
ข15 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	114
ค1 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุ	116
ค2 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD	116
ค3 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD	116
ค4 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD	117
ค5 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD	117

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 การเปลี่ยนรูปของกลุโคสพอลิเมอร์จากแบบโซ่เส้นตรงเป็นรูปแบบวงแหวน	4
2 โครงสร้างของผนังเซลล์ของเส้นใย	8
3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย	9
4 ชุดลูกกรีดยของเครื่องจักรผลิตกระดาษ	15
5 ชุดลูกกดขนาดนิ้ว (size press)	17
6 องค์ประกอบหลักภายในสตาร์ช	20
7 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชระหว่างการทำให้สุก	22
8 ออกซิไดซ์สตาร์ช	24
9 โครงสร้างของแคตไอออนิกสตาร์ช (a) Aminotertiary, (b) Quaternary	25
10 ขนาดของตัวอย่างกระดาษกราฟ	32
11 เครื่องเคลือบกระดาษ (Film Coater PI-1210)	33
12 ผิวหน้ากระดาษกราฟที่จาก SEM กำลังขยาย 200 เท่า (a) กระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ, (b) กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (c) กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (d) กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชร้อยละ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (e) กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชร้อยละ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (f) กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชร้อยละ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (g) กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชร้อยละ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ	42
13 ผิวหน้ากระดาษกราฟที่จาก SEM กำลังขยาย 200 เท่า (a) กระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ, (b) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (c) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (d) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชร้อยละ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (e) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชร้อยละ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (f) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชร้อยละ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (g) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชร้อยละ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
14	ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์ สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	47
15	ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิก สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	47
16	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของ กระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้ เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25-32 $^{\circ}$ ซ, 68-74%RH)	49
17	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของ กระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้ เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25-32 $^{\circ}$ ซ, 68-74%RH)	50
18	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของ กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษ กราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ	51
19	ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลัง การเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	54
20	ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลัง การเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	54
21	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว แนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษ กราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 $^{\circ}$ ซ, 68 - 74 %RH)	56
22	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว แนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษ กราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 $^{\circ}$ ซ, 68 - 74 %RH)	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ	58
24	ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	61
25	ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	61
26	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)	63
27	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)	64
28	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ	65
29	ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	69
30	ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	69
31	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)	72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
32	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)	73
33	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ	74
34	ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	77
35	ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ	77
36	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)	79
37	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)	80
38	ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ	81

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CD	=	Cross Machine Direction
KA	=	กระดาษกราฟที่เกรด KA
MD	=	Machine Direction
RCT	=	Ring Cruch Test
RH	=	Relative Humidity
rpm	=	Round Per Minute

ผลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์

Effect of Modified Starch Coating on Strength Properties of Kraft Paper

คำนำ

กระดาษคราฟท์ (kraft paper) เป็นกระดาษที่มีสมบัติเด่นในด้านความแข็งแรง (strength properties) และเป็นกระดาษที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานทางการบรรจุเพื่อการขนส่งอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีน้ำหนักเบา สามารถปกป้องสินค้าภายในให้ได้รับความเสียหายน้อยที่สุด จนถึงมือผู้บริโภค สามารถนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่หรือผลิตใหม่ได้ โดยสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์ที่สำคัญ ได้แก่ ความต้านทานแรงฉีกขาด (bursting strength) และความต้านทานแรงกดวงแหวน (ring crush strength) เป็นต้น

สตาร์ชและสตาร์ชดัดแปรเป็นวัตถุดิบหนึ่งที่มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษอย่างกว้างขวาง เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่ในธรรมชาติ ย่อยสลายได้ มีต้นทุนที่ต่ำ และหาได้ง่ายในประเทศไทย ในขณะที่มีผู้นำสตาร์ชดัดแปรมาใช้เคลือบกระดาษไม่มากนัก ส่วนใหญ่จะใช้ในการเติมลงไปในระหว่างกระบวนการผลิตกระดาษ (internal sizing) หรือปรับสภาพผิว (surface sizing) เพื่อให้ได้สมบัติของกระดาษที่หลากหลายและเหมาะสมแก่การนำไปใช้งาน เช่น เพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวน้ำกระดาษ เพิ่มสมบัติทางการพิมพ์ เพิ่มความสามารถในการต้านทานของเหลว เป็นต้น ตัวอย่างของสตาร์ชดัดแปรทางการค้าที่มีการนำมาใช้ในการกระบวนการผลิตกระดาษ เช่น ออกซิไดซ์สตาร์ช แคตไอออนิกสตาร์ช พรีเจลาทีไนซ์สตาร์ช สตาร์ชฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น (ปรีชา, 2543)

ออกซิไดซ์สตาร์ช (oxidized starch) เป็นสตาร์ชดัดแปรทางเคมี (chemical modified starch) โดยทั่วไปนิยมนำสตาร์ชมันสำปะหลัง (cassava starch) มาดัดแปร โดยการทำปฏิกิริยากับ โซเดียมไฮโปคลอไรท์ (sodium hypochlorite) ภายใต้สภาวะต่าง เพื่อนำมาใช้ในการเคลือบที่ผิวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับผิวน้ำกระดาษหลายชนิด สามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีลักษณะใส มีความแข็งแรง และความคงตัวที่ดี นิยมนำมาใช้สำหรับเป็นสารกันซึมและสารเคลือบกระดาษ

แคตไอออนิกสตาร์ช (cationic starch) เป็นสตาร์ชดัดแปรทางเคมีที่ต้องการให้ได้สตาร์ชที่มีประจุบวก นิยมนำมาใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ เนื่องจากแคตไอออนิกสตาร์ชสามารถเกิดพันธะไอออนิกระหว่างประจุบวกของสตาร์ชกับประจุลบของเซลลูโลสที่ใช้ทำกระดาษได้ดี โดยเฉพาะในส่วนผลิตแผ่นกระดาษ นิยมใช้แคตไอออนิกสตาร์ชมาเป็นตัวเติมเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษ และเพิ่มประสิทธิภาพในการจับกันของเยื่อระหว่างเดินแผ่นกระดาษ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลของการเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟท์ และศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของสภาวะการเก็บกระดาษภายหลังการเคลือบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟท์ อย่างไรก็ตามต้นทุนของเยื่อใยขาวหรือเยื่อใหม่ (virgin pulp) ในการผลิตกระดาษกราฟท์ค่อนข้างสูง ดังนั้นการเสริมความแข็งแรงให้กับกระดาษกราฟท์ที่ใช้เยื่อหมุนเวียนโดยการเคลือบสตาร์ชดัดแปร อาจเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยลดต้นทุนและสามารถเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับกระดาษโดยสามารถปรับสภาพให้กระดาษที่ได้มีความแข็งแรงตามต้องการ ซึ่งคาดว่าจะส่งผลให้สามารถลดการนำเข้าเยื่อกระดาษที่เป็นวัตถุดิบจากต่างประเทศได้ ทำให้ต้นทุนรวมของภาชนะบรรจุลดลง รวมทั้งกระตุ้นการใช้เศษกระดาษเก่าในกระบวนการผลิตกระดาษให้มากขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟประเภทที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเยื่อใยสั้นหรือเยื่อเวียนทำใหม่ (recycled pulp) โดยการเคลือบด้วยสตาร์ชดัดแปร
2. เพื่อศึกษาผลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรต่างชนิดที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟประเภทที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเยื่อใยสั้นหรือเยื่อเวียนทำใหม่
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมในการเก็บรักษาที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟที่มีองค์ประกอบหลักเป็นเยื่อใยสั้นหรือเยื่อเวียนทำใหม่หลังผ่านการเคลือบด้วยสตาร์ชดัดแปร

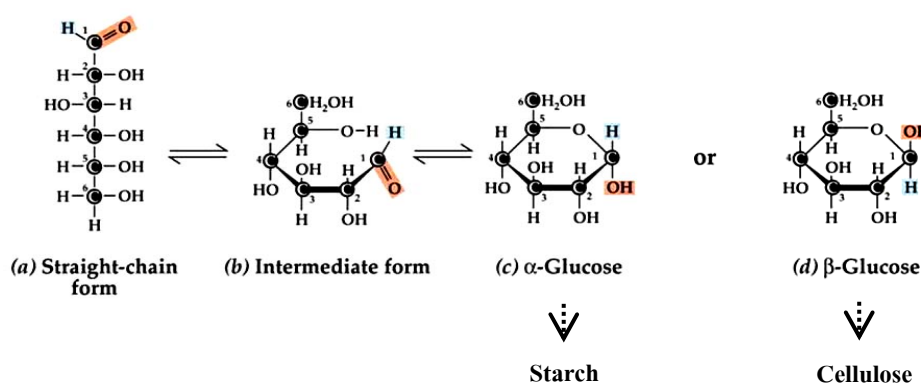
การตรวจเอกสาร

กระดาษ

1. โครงสร้างกระดาษ (paper structure)

กระดาษ คือ แผ่นวัสดุเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibers) ที่ยึดจับเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous sheet) โดยการสานตัว (interweaving) หรือเกิดพันธะ (bonding) ระหว่างเส้นใย (สมหวัง, 2546) โครงสร้างของเส้นใยประกอบด้วย ผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary wall) ผนังเส้นใย ส่วนกลาง (middle lamella) ผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary wall) และลูเมน (lumen) ซึ่งอยู่ตรงกลางของเส้นใย

เส้นใยหรือเส้นใยเซลลูโลส (cellulose fibers) เป็นพอลิเมอร์เชิงเส้น (linear polymer) เกิดจากการสังเคราะห์แสงของพืชได้เป็นน้ำตาลกลูโคสที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง จากนั้นพืชจะทำการเปลี่ยนรูปแบบโซ่เส้นตรง (straight-chain form) เป็นรูปแบบวงแหวนได้กลูโคส 2 รูปแบบ คือ แอลฟา-กลูโคส (α - glucose) และเบตา-กลูโคส (β -glucose) เมื่อทำให้เกิดพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) จะได้สตาร์ชและเซลลูโลสตามลำดับ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 การเปลี่ยนรูปของกลูโคสพอลิเมอร์จากแบบโซ่ตรงเป็นรูปแบบวงแหวน
ที่มา: Anonymous (2004)

2. สมบัติของกระดาษ (Paper properties)

สมบัติของเยื่อและกระดาษสามารถจำแนกได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ (สมหวัง, 2546) ดังนี้

2.1 สมบัติทางเคมี (chemical properties) เป็นสมบัติที่ยากต่อการรับรู้โดยตรงด้วยประสาทสัมผัสของมนุษย์ เช่น องค์ประกอบเคมี ความเป็นกรดและความเป็นด่าง เป็นต้น

2.2 สมบัติทางกายภาพ (physical properties) ของกระดาษเป็นสมบัติที่รับรู้ได้โดยตรงด้วยประสาทสัมผัสของมนุษย์ ได้แก่

2.2.1 สมบัติพื้นฐาน ได้แก่ ปริมาณความชื้น น้ำหนักพื้นฐาน ความหนา ความหนาแน่น และความฟู เป็นต้น

2.2.2 สมบัติด้านความแข็งแรง (strength properties) ได้แก่ ความแข็งแรงต่อแรงดึง (tensile strength) ความแข็งแรงต่อแรงดันทะลุ (bursting strength) ความแข็งแรงต่อแรงฉีก (tearing strength) ความแข็งแรงต่อการหักพับ (folding strength) และความแข็งแรงที่ผิวหน้า (surface strength) เป็นต้น

2.2.3 ทิศนสมบัติ (optical properties) ของกระดาษที่สำคัญส่วนใหญ่มักเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์กระดาษให้เป็นสิ่งพิมพ์ ได้แก่ ความขาว ความขาวสว่าง ความทึบแสง และความมันเงา เป็นต้น

2.2.4 สมบัติความแข็งดิ่ง (stiffness properties) ของกระดาษนิยมนำมาจากการทดสอบหาความแข็งแรงต่อแรงดิ่งของกระดาษ ซึ่งสามารถทดสอบได้จากการทดสอบการดัดสถิตย์ (static bending test) หรือจากคลื่น โซนิก (sonic wave) เป็นต้น

2.2.5 สมบัติทางโครงสร้าง (structural properties) เช่น ความพรุน (porosity) ของกระดาษ โดยวัสดุที่มีรูพรุนมากจะเกี่ยวข้องกับการยอมให้ของไหลหรืออากาศไหลผ่านกระดาษซึ่งมีอยู่ในโครงสร้างของกระดาษ นอกจากนี้ยังมีความสำคัญต่อการดูดซับหมึกหรือการดูดซับน้ำยาเคลือบผิวกระดาษ เป็นต้น

2.2.6 สมบัติของผิวหน้า (surface properties) ได้แก่ ความเรียบ (smoothness) ความเสียดทาน (friction) และความแข็งแรงของผิวหน้า เป็นต้น ซึ่งมีความสำคัญต่อกระดาษพิมพ์เขียนและการใช้งานทางการบรรจุ

2.2.7 สมบัติการดูดซึม (absorption properties) ของกระดาษที่พบได้บ่อยและมีความสำคัญต่อการนำกระดาษไปใช้ประโยชน์ได้แก่ การดูดซึมน้ำ น้ำมัน และหมึกพิมพ์ เป็นต้น ซึ่งมักวัดเป็นปริมาณของของเหลวที่ถูกดูดซึมทั้งหมดต่อพื้นที่และเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระดาษว่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากน้อยเพียงใด

2.2.8 สมบัติอื่นๆ ได้แก่ การนำไฟฟ้า (electrical conductivity) การนำความร้อน (thermal conductivity) การนำคลื่นเสียง (acoustical conductivity) ความนุ่ม (softness) และความแข็ง (hardness) เป็นต้น โดยสมบัติเหล่านี้มักมีบทบาทต่อการนำไปใช้ประโยชน์ที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมเฉพาะทาง เช่น ฉนวนไฟฟ้าในหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงหรือใช้หุ้มสายไฟฟ้าแรงสูง การทำกรวยลำโพง กระดาษชำระ กระดาษเช็ดมือ กระดาษเช็ดหน้า เป็นต้น

นอกจากนี้ เส้นใยหรือเยื่อส่วนใหญ่ที่ใช้ในการผลิตกระดาษมีสมบัติที่เรียกว่า ดูดความชื้น (hygroscopic) ได้ ซึ่งสมบัติดังกล่าวจะทำให้สมบัติทางกายภาพของเส้นใยเปลี่ยนแปลง อาจมีผลไปถึงการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพของกระดาษเช่นกัน เช่น การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของน้ำหนักพื้นฐาน และความแข็งแรงของกระดาษ เป็นต้น เมื่อกระดาษอยู่ในสถานะที่มีความชื้นของบรรยากาศมากกว่าความชื้นที่มีในกระดาษเอง กระดาษจะดูดความชื้นจากสถานะแวดล้อมเข้ามา ทำให้กระดาษสูญเสียสมบัติด้านความแข็งแรงไปโดยเฉพาะเมื่อนำไปใช้งานทางการบรรจุ เช่น กระดาษกราฟท์ นิยมนำไปใช้ผลิตเป็นกล่องลูกฟูกเพื่อการขนส่ง ถุงกระดาษ เมื่อกระดาษมีความชื้นมากขึ้นจะมีผลทำให้กล่องหรือถุงเสียหายไม่สามารถปกป้องสินค้าที่บรรจุอยู่ได้ นอกจากนี้ยังมีผลต่อการนำไปใช้เป็นภาชนะบรรจุสินค้าที่มีลักษณะแห้ง (dehydrated products) ในระยะยาวจะมีผลให้อายุการเก็บสินค้านั้นสั้นลงได้ (Loratonda *et al.*, 2003)

ดังนั้นในการทดสอบสมบัติใดๆ ของกระดาษจึงจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องกำหนดสภาวะที่ใช้ในการทดสอบอย่างชัดเจนคือ ก่อนทำการทดสอบต้องมีการปรับสภาวะของแผ่นตัวอย่างกระดาษ เช่น มาตรฐาน ISO 187 กำหนดให้หน้าแผ่นตัวอย่างปรับสภาวะที่อุณหภูมิ 23 ± 1 องศา

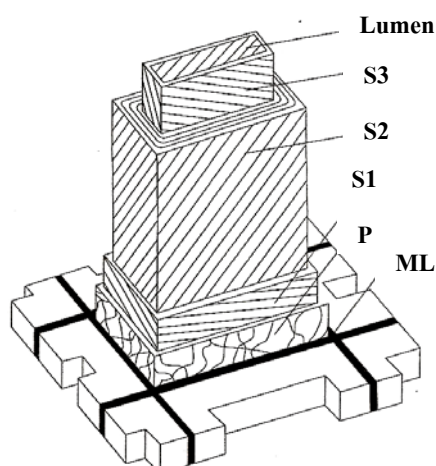
เซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 50 ± 2 ส่วนประเทศในเขตร้อนชื้นอาจมีการปรับสภาวะด้วย อุณหภูมิ 27 ± 1 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นต้น

3. ความแข็งแรงของกระดาษ

3.1 ความแข็งแรงของเส้นใย (fiber strength)

ความแข็งแรงของเส้นใย หมายถึง ความแข็งแรงต่อแรงดึง หรือ ความต้านแรงดึงของ เส้นใยแต่ละเส้นในโครงสร้างแผ่นกระดาษ ขึ้นกับชนิดและขนาดของเส้นใย โดยเส้นใยที่ได้จากไม้ เนื้ออ่อน (soft wood) เช่น ไม้สน จะได้เส้นใยที่ยาว ซึ่งทำให้กระดาษมีความแข็งแรง ในขณะที่เส้น ใยที่ได้จากไม้เนื้อแข็ง (hard wood) จะได้เส้นใยที่สั้น ซึ่งจะทำหน้าที่เติมช่องว่างในกระดาษ ทำให้ กระดาษมีความทึบแสงและผิวหน้าเรียบ ในกระบวนการเตรียมเยื่อ การตีเยื่อ (beating) ที่ระดับสูงๆ จะทำให้เส้นใยแนบสัมผัสกัน และเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้ดี แต่ในกรณีที่มีการตีเยื่อมาก เกินไปจะทำให้ผนังเซลล์ของเส้นใยเสียหายได้ และสูญเสียความแข็งแรง

ที่ผนังเซลล์ (cell wall) ของเส้นใยประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary wall) และผนังเซลล์ทุติยภูมิ (secondary wall) โดยผนังเซลล์ทุติยภูมินั้นแบ่งย่อยได้อีก 3 ชั้นคือ ชั้น S1, S2 และ S3 โดยชั้น S2 นั้นเป็นชั้นที่มีความหนามากที่สุด ซึ่งการเรียงตัวของไฟบริล (fibril) ใน ชั้น S2 จะทำมุมประมาณ 10 - 30 องศากับแกนของเส้นใย ซึ่งทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงต่อแรงดึง ตามแนวขนานกับแกนเส้นใยที่สูง ดังนั้นสมบัติทางกลและทางกายภาพต่างๆ ของเส้นใยจึงถูก ควบคุมโดยสมบัติของชั้น S2 เป็นหลัก (สมหวัง, 2546) แสดงดังภาพที่ 2



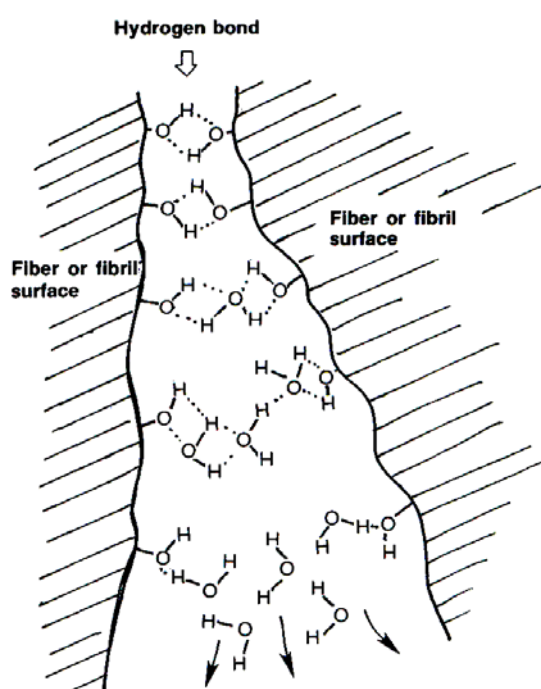
ภาพที่ 2 โครงสร้างผนังเซลล์ของเส้นใย
ที่มา: Retulainen *et al.* (1998)

3.2 ความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย (inter-fiber bonding strength)

โดยธรรมชาติพันธะระหว่างเส้นใย (inter-fiber bonding) ที่ยึดกระดาษไว้คือ พันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ซึ่งมีพลังงานการเกิดพันธะ (bonding energy) อยู่ระหว่าง 8 – 32 kJ/mol โดยพันธะไฮโดรเจน เกิดจากอะตอมไฮโดรเจนเกิดพันธะหนึ่งขวานกับอะตอมที่มีศักย์เป็นลบ เช่น ออกซิเจน ฟลูออรีน ไนโตรเจน และคลอรีน เป็นต้น เนื่องจากเส้นใยประกอบไปด้วยเซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, OH) และหมู่คาร์บอกซิล (carboxylic group, COOH) อยู่เป็นจำนวนมาก การเกิดพันธะไฮโดรเจนเนื่องจากการหนึ่งขวานระหว่างอะตอมไฮโดรเจนกับอะตอมออกซิเจนของหมู่ทั้งสองจึงเกิดขึ้น และเมื่อแผ่นกระดาษมีการดูดซึม (absorption) หรือดูดซับ (adsorption) โมเลกุลของน้ำ (H_2O) เข้าไป จะมีผลให้ความแข็งแรงของกระดาษนั้นลดลง เนื่องจากการที่โมเลกุลของน้ำเข้าไปแทรกระหว่างพันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนและออกซิเจนของเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลส ในขณะเดียวกันน้ำจะทำให้เส้นใยอ่อนตัวและมีพื้นที่สัมผัสกันมากขึ้น เมื่อถึงกระบวนการทำให้กระดาษแห้ง (drying) โมเลกุลของน้ำจะหลุดออกไปทำให้เส้นใยที่อยู่ติดกันเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกันได้โดยตรง (ภาพที่ 3) ดังนั้นในกระบวนการผลิตกระดาษจะมีน้ำเป็นตัวเชื่อมโยงพันธะระหว่างเส้นใยไว้ ซึ่งความแข็งแรงของกระดาษที่เปียกน้ำจะเกิดจากแรง van der waal ซึ่งเป็นแรงที่ช่วยยึดโมเลกุลของน้ำไว้ด้วยกัน และ

เป็นการเหนี่ยวนำให้เกิดประจุบวกและลบชั่วคราว นำไปสู่การเชื่อมกันระหว่างโมเลกุลที่มีขั้วแต่ละโมเลกุล โดยพลังงานในการเกิดพันธะอยู่ระหว่าง 2 – 8 kJ/mol เท่านั้น (สมหวัง, 2546)

Caulfield (1978) ได้เสนอว่า น้ำที่อยู่ระหว่างผิวหน้าของเซลล์โลส จะเกิดพันธะไฮโดรเจนขึ้นระหว่างผิวหน้าของเซลล์โลสทั้งสอง เมื่อน้ำถูกกำจัดออกไป สายโซ่จะอยู่ชิดกันมากขึ้น และหมู่คาร์บอกซิลบนผิวหน้าของเส้นใยที่อยู่ใกล้กันจะมาสัมผัสกันและเกิดพันธะไฮโดรเจน



ภาพที่ 3 การเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย

ที่มา: Kline (1991)

ในการปรับปรุงให้กระดาษมีความแข็งแรงขึ้นนั้น มักจะปรับปรุงความแข็งแรงของพันธะที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นใยเป็นหลัก (สมหวัง, 2546) คือ

1. เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างเส้นใยเพื่อให้เกิดพันธะได้มากขึ้น

ทำได้โดยทำให้เส้นใยมีความอ่อนตัวขณะทำการขึ้นรูปกระดาษ ทำให้เส้นใยสานตัวและแนบสัมผัสกันได้ดี เมื่อผ่านการทำให้แห้งจะมีพื้นที่ที่สามารถเกิดพันธะระหว่างเส้นใยได้มากขึ้น นอกจากนี้การทำให้ไฟบริล (fibril) ของผนังเส้นใยแตกตัว (fibrillation) ช่วยให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเส้นใยมากขึ้นด้วย วิธีการที่นิยมในการทำให้เส้นใยอ่อนตัวและไฟบริลของผนังเส้นใยแตกตัว คือ การตีหรือบดเยื่อ (beating or refining)

2. เพิ่มความแข็งแรงจำเพาะหรือความแข็งแรงต่อหน่วยพื้นที่ของพันธะระหว่างเส้นใย

ทำได้โดยการใช้สารเคมีปรับปรุงสมบัติผิวหน้าของเส้นใย หรือใช้สารพอลิเมอร์หรือสารเคมีบางประเภทเป็นตัวกลางในการทำให้เกิดพันธะอื่นๆ ที่ไม่ใช่พันธะไฮโดรเจนระหว่างเส้นใย เช่น การใช้สารเคมีหรือพอลิเมอร์ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความคงตัวในสภาวะเปียกของกระดาษ (wet strength and dimensional stability) โดยการเกิดพันธะโคเวเลนต์ระหว่างเส้นใยในโครงสร้างของแผ่นกระดาษ เป็นต้น

กระดาษคราฟท์

กระดาษคราฟท์ (kraft paper) ตามความหมายสากลนั้นหมายถึงกระดาษที่ผลิตจากเยื่อซัลเฟตทั้งหมด หรืออย่างน้อยต้องมีเยื่อซัลเฟตอยู่ร้อยละ 80 และมีคุณสมบัติเด่นในเรื่องของความแข็งแรง โดยเฉพาะความทนทานต่อแรงฉีกขาด แรงดึง แรงดันทะลุ และแรงหักพับ เป็นต้น กระดาษคราฟท์ที่นำมาใช้งานส่วนมากเป็นชนิดที่ยังไม่ได้ผ่านการฟอกขาว สีธรรมชาติจะเป็นสีน้ำตาลคล้ำ (Brody and Marsh, 1997) มีน้ำหนักมาตรฐาน 120 กรัมต่อตารางเมตรหรือมากกว่า (Goyal, 2006)

สำหรับประเทศไทยนั้น ได้มีการกำหนดมาตรฐานกระดาษคราฟท์หรือกระดาษเหนียวโดยสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งให้นิยามไว้กว้างๆ ดังนี้ “กระดาษเหนียว หมายถึง กระดาษเหนียวที่เหมาะสมสำหรับห่อของ ทำถุงหรือผิวแผ่นกระดาษลูกฟูก” (มอก. 170-2529) กระดาษคราฟท์จึงเป็นกระดาษที่มีสมบัติด้านแข็งแรงมากที่สุด และเป็นกระดาษที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งานทางการบรรจุเพื่อการขนส่งอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความคงทนต่อสภาวะ

แวดล้อมต่างๆ ได้ และทำหน้าที่ปกป้องสินค้าภายในให้ได้รับความเสียหายน้อยที่สุดจนถึงมือผู้บริโภค

กระดาษทำผิวกล่อง (linerboard) หมายถึง กระดาษที่ใช้ประกบกระดาษลูกฟูก (corrugated medium) มีผิวเรียบสม่ำเสมอ โดยทั่วไปทำมาจากเส้นใยยาวโดยกรรมวิธีซัลเฟต กระดาษชนิดนี้ บางครั้งเรียกว่า “kraftliner” มีสีธรรมชาติเป็นสีน้ำตาล สามารถฟอกให้เป็นสีขาวได้ อย่างไรก็ตาม การฟอกขาวจะผลทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลงร้อยละ 5 - 10 ในบางกรณีอาจมีการผสมเยื่อกระดาษที่ใช้แล้วลงไปใยยาว ซึ่งเรียกกระดาษทำผิวกล่องชนิดนี้ว่า “testliner” กล่องกระดาษลูกฟูกที่ทำจากกระดาษชนิดนี้จะมี ความแข็งแรงต่ำกว่าที่ทำมาจาก kraftliner โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้กล่องภายใต้สภาวะอากาศแบบร้อนชื้น (อัญชลี และคณะ, 2545)

อุตสาหกรรมกระดาษกราฟที่แบ่งตามลักษณะการใช้งานในปัจจุบันได้ 4 อุตสาหกรรม คือ อุตสาหกรรมกระดาษกราฟสำหรับทำผิวกล่อง อุตสาหกรรมกระดาษกราฟสำหรับทำลอนลูกฟูก อุตสาหกรรมกระดาษกราฟสำหรับทำทำแกนกระดาษ และอุตสาหกรรมกระดาษกราฟสำหรับถุงหลายชั้น ซึ่งอุตสาหกรรมกระดาษกราฟสำหรับทำผิวกล่องมีสัดส่วนการผลิตประมาณร้อยละ 56 ของปริมาณการผลิตทั้งหมด ส่วนอุตสาหกรรมกระดาษกราฟอีก 3 ประเภทมีสัดส่วนการผลิตเป็นสัดส่วนร้อยละ 31 ร้อยละ 8 และร้อยละ 5 ตามลำดับ (วรวิทย์ชัย, 2548)

กระดาษกราฟที่ขายกันอยู่ในท้องตลาดนั้นมีสมบัติต่างกันไปแล้วแต่ความต้องการใช้งาน โดยที่สมบัติหลักยังเหมือนกันคือเป็นกระดาษที่มีความแข็งแรงมาก นอกจากนี้มีการปรับปรุงเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น เช่น ปรับปรุงลักษณะผิว การยึดตัว และความแข็งแรงเมื่อเปียก เป็นต้น (อัญชลี และคณะ, 2545) ประเภทของกระดาษกราฟที่นำมาใช้งานในปัจจุบัน เช่น กระดาษทำผิวกล่อง กระดาษทำลูกฟูก กระดาษทำถุงหลายชั้น กระดาษทำแกน กระดาษทำถุงซ้อป ปิ้ง ซองใส่เอกสาร เป็นต้น (สุนนา, 2543)

เนื่องจากกระดาษกราฟที่ผลิตจากเยื่อซัลเฟตล้วนๆ นั้นมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นจึงได้มีการผลิตกระดาษกราฟเทียม (Imitation kraft paper) ขึ้น โดยผลิตจากส่วนผสมของเยื่อซัลเฟตหรือเยื่อเคมีชนิดอื่น และเศษกระดาษ แต่ให้คุณภาพเทียบเท่ากระดาษกราฟ เมื่อนำมาใช้งานจึงต้องใช้กระดาษที่มีน้ำหนักมากกว่ากระดาษกราฟที่ทำจากเยื่อซัลเฟตล้วน ในปัจจุบันนี้จึงถือว่ากระดาษชนิดนี้เป็นกระดาษกราฟด้วย (อัญชลี และคณะ, 2545)

1. การผลิตเยื่อกระดาษ

ในการสกัดเยื่อกระดาษ นิยมใช้ kraft pulping (sulfate pulping) ซึ่งเป็นการสกัดเยื่อทางเคมี (chemical pulping process) เพื่อนำไปใช้ในการผลิตกล่องกระดาษฟอก (bleached boxboard) และกระดาษทำผิวกล่องลูกฟูกเพื่อใช้งานทางการบรรจุ การสกัดเยื่อกระดาษจะใช้สารเคมีเข้ามากระทำต่อเปลือกไม้หรือลำต้นชั้นในก่อนเพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิ-เซลลูโลส จากนั้นจึงทำการแยกและทำความสะอาดเส้นใย การกำจัดลิกนิน (delignification) ช่วยให้เส้นใยมีความอ่อนตัว (flexibility) มากขึ้น มีการสัมผัสกันระหว่างเส้นใยในกระดาษที่ผลิตเสร็จแล้วมากขึ้น กระดาษที่ได้จะมีความแข็งแรงและเก็บได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษที่ผลิตจากเยื่อที่ได้จากวิธีทางกลที่ยังมีลิกนินเหลืออยู่ แต่กระบวนการผลิตเยื่อทางเคมีนั้นให้ผลผลิตของเส้นใยประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นใยที่ผลิตได้จากกระบวนการทางกล

Kraft pulping เป็นกระบวนการที่ใช้ alkaline chemical solution ได้แก่ โซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide, Na_2S) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide, NaOH) มาต้มเปลือกไม้ภายใต้ความดันประมาณ 1-3 ชั่วโมง เพื่อให้ลิกนินและเฮมิเซลลูโลสละลายออกมา และเหลือแต่เส้นใยเซลลูโลสตามต้องการ สารละลายที่แยกออกมาจะประกอบไปด้วยลิกนินและสารสกัดอื่นๆ เรียกว่า black liquor สามารถนำกลับมาสกัดสารต่างๆ เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการหรือนำไปขายต่อได้ ลิกนินที่แยกออกมาได้สามารถนำกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการผลิตเยื่อ ดังนั้นกระบวนการสกัดเยื่อนี้จะมีการสูญเสียสารเคมีน้อยมาก

เยื่อสีน้ำตาลที่ได้จากการสกัด จะนำไปทำความสะอาดแล้วฟอกเพื่อให้ขาวขึ้นต่อไป ทั้งไม้เนื้อแข็ง (เยื่อไม้สน) และไม้เนื้ออ่อน (เยื่อไม้ยาง) สามารถนำมาใช้สกัดเยื่อด้วย kraft process ได้ ความแข็งแรงของเยื่อที่ได้จะขึ้นกับชนิดของไม้ที่นำมาสกัดเยื่อ เวลาและอุณหภูมิของการต้มเยื่อ และระดับการฟอกเยื่อด้วย เยื่อที่สกัดได้จากไม้เนื้ออ่อนที่ยังไม่ผ่านการฟอกจะได้ปริมาณเยื่อร้อยละ 47 ถ้าผ่านการฟอกแล้วจะได้ปริมาณเยื่อร้อยละ 44 สำหรับเยื่อที่ได้จากไม้เนื้อแข็งที่ยังไม่ผ่านการฟอกจะได้ปริมาณเยื่อร้อยละ 50 - 52 ถ้าผ่านการฟอกแล้วจะได้ปริมาณเยื่อร้อยละ 50 เยื่อกระดาษที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนฟอกแล้ว นิยมนำมาผสมกับเยื่อที่ได้จากกระบวนการทางกลเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาษหนังสือพิมพ์ (newsprint) และกระดาษเพื่อการพิมพ์ (printed paper) เยื่อกระดาษที่ได้จากไม้เนื้อแข็งฟอกแล้วนิยมนำมาผสมกับเยื่อกระดาษที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนฟอกแล้ว

เพื่อปรับปรุงความสามารถในการพิมพ์ของกระดาษประเภท กระดาษแมกกาซีน และกระดาษเคลือบ (U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1989)

2. การผลิตกระดาษกราฟท์

การผลิตกระดาษทางอุตสาหกรรมในปัจจุบันนี้ จะใช้เครื่องจักรผลิตแบบต่อเนื่อง โดยแบ่งเป็นขั้นตอนย่อยๆ คือ การเตรียมเยื่อ (stock preparation) การเดินแผ่น (paper making) และการทำเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (finishing) (สุมนา, 2543)

2.1 การเตรียมเยื่อ

เยื่อกราฟท์ที่ผ่านการฟอกหรือไม่ได้ฟอกจะถูกนำมาผ่านการบดเส้นใย โดยให้เส้นใยผ่านระหว่างวัตถุสองชนิดซึ่งเป็นโลหะ ซึ่งจะให้แรงกระทำต่อเส้นใยในลักษณะของแรงบีบ แรงอัด แรงเฉือน แรงกดและแรงตัด เพื่อให้เส้นใยมีสภาพและสมบัติเปลี่ยนไป วัตถุประสงค์หลักเพื่อให้เส้นใยมีสมบัติในการอมน้ำ (swelling) ยืดหยุ่น (flexible) ยุบตัว (collapse) ได้ ตัดเส้นใยให้สั้นลงทำให้เกิดฝอยหรือเศษเยื่อ (fines) ลำตัวเส้นใยแตกแขนงออกไปเป็นแขนขาที่จะทำให้เกิดการเกาะเกี่ยวกันระหว่างเส้นใย ในระหว่างการบดเยื่อจะใช้น้ำเป็นตัวหล่อลื่น เยื่อที่ถูกบดแล้วจะเกิดการผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันได้สม่ำเสมอ ในการเตรียมเยื่อจะมีการเตรียมวัตถุดิบอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นสารเคมี เพื่อปรับปรุงสมบัติอื่นๆ ของกระดาษ เช่น การดูดซับน้ำ ความขาว สี ความแข็งแรง เป็นต้น เช่น ชันสน (rosin) สารส้ม (alum) ออกซิไดซ์สตาร์ช เป็นต้น

2.2 การเดินแผ่น

การเดินแผ่นเป็นขั้นตอนต่อจากการเตรียมเยื่อ เพื่อปรับปรุงการเกิดแผ่นกระดาษและการเกิดพันธะของเส้นใยเมื่อผ่านเข้าไปในเครื่องจักรผลิตกระดาษ ก่อนนำเยื่อผ่านเข้าไปในเครื่องจักรผลิตกระดาษ จะมีการเติมน้ำเพื่อให้เยื่อที่ได้เจือจางจนมีเยื่ออยู่น้อยกว่าร้อยละ 1 การเดินแผ่นในปัจจุบันที่ผลิตเป็นจำนวนมาก ๆ มักใช้เครื่องเดินแผ่นที่ผลิตอย่างต่อเนื่อง ซึ่งแบ่งได้เป็นสองชนิด คือ Fourdrinier machine และ Cylinder machine โดยเครื่องเดินแผ่นทั้งสองชนิดจะมีส่วนประกอบของเครื่องจักรที่ทำหน้าที่คล้ายกัน 4 ส่วน คือ Wet end section, Press section, Dry section และ Finishing section

ส่วนของ Wet end section น้ำเยื่อที่เตรียมไว้จะถูกส่งไปยัง head box เพื่อทำหน้าที่ปล่อยน้ำเยื่อให้กระจายบนเครื่องเดินแผ่นซึ่งอาจเป็นตะแกรงลวดเดินแผ่น (Fourdrinier machine) หรือลูกกลิ้ง (Cylinder machine) โดยน้ำส่วนหนึ่งจะถูกกำจัดออกไป เยื่อเริ่มจับตัวกันเป็นแผ่น จากนั้นแผ่นเยื่อจะถูกส่งผ่านไปกดรีดน้ำออกในส่วน Press section โดยใช้ลูกกลิ้งสองลูกทำการกดรีด และดูดน้ำออกจากแผ่นเยื่อ เพื่อให้ความชื้นในแผ่นเยื่อน้อยลง น้ำที่ยังเหลืออยู่ในแผ่นเยื่อนั้น จะถูกกำจัดออกอีกครั้งในส่วน Dry section โดยใช้ความร้อนจากไอน้ำที่ให้ความร้อนแก่ลูกอบ ซึ่งให้ความร้อนกับแผ่นเยื่อหรือแผ่นกระดาษทั้งสองหน้าที่พันร้อยไปในระหว่างชุดลูกอบพร้อมกัน กระดาษที่ผลิตเสร็จอาจมีการปรับสภาพผิวต่อเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆ ที่ Finishing section โดยการขัดรีดที่ผิวหน้าของกระดาษให้เรียบมันขึ้น

2.3 การทำเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

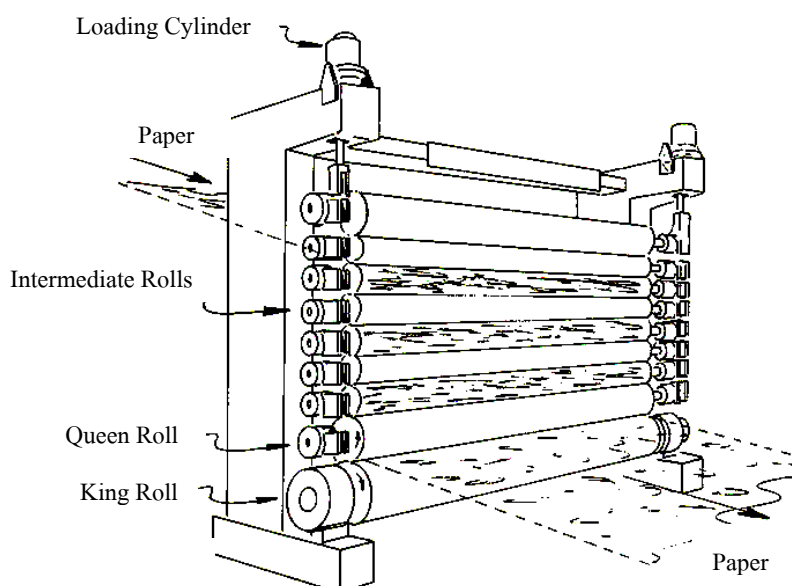
กระดาษที่ผลิตเสร็จจากเครื่องเดินแผ่นจะถูกเก็บไว้ในรูปของม้วนใหญ่ก่อนและนำไปกรอเป็นม้วนมีขนาดกว้างและเส้นผ่าศูนย์กลางที่เล็กลงตามต้องการ ในกรณีที่มีการนำไปใช้งานต่อเป็นแผ่น จะทำการตัดกระดาษจากม้วนใหญ่ให้มีหน้ากว้างและเส้นผ่าศูนย์กลางที่สามารถนำเข้าไปในเครื่องตัดต่อได้ เพื่อตัดเป็นแผ่น ในกรณีที่เครื่องเดินแผ่นมีความเร็วใกล้เคียงกับเครื่องตัดแผ่น อาจติดตั้งเครื่องตัดแผ่นไว้ต่อจากเครื่องเดินแผ่นได้

การปรับสภาพผิวกระดาษ

การปรับสภาพผิวกระดาษ (surface modification) เป็นความต้องการของอุตสาหกรรมการพิมพ์ที่จะปรับปรุงคุณภาพการพิมพ์ดีขึ้น ด้วยการทำให้ผิวกระดาษเรียบสม่ำเสมอ เพิ่มความทึบแสงและความมันวาว และลดต้นทุนในส่วนของการเยื่อกระดาษซึ่งบางครั้งอาจใช้เยื่อราคาถูก เช่น เยื่อเชิงกล เยื่อเวียนทำใหม่ และเยื่อที่ไม่ได้ฟอกสี เป็นต้น การใช้งานส่วนใหญ่ของกระดาษที่ทำการปรับสภาพผิวอยู่ในประเภทสิ่งพิมพ์โฆษณาและการศึกษา รวมทั้งงานพิมพ์สิ่งประเภทอื่นๆ เช่น การพิมพ์ภาชนะบรรจุ เป็นต้น (อรศิริ, 2545) วิธีการปรับสภาพผิวกระดาษ มี 2 แบบ คือ

1. การปรับสภาพผิวทางกายภาพ (physical modification)

การปรับสภาพผิวทางกายภาพ เป็นขั้นตอนที่กระทำกับกระดาษหลังจากกระดาษผ่านส่วนอบแห้ง (dry end) กระดาษที่ผลิตออกมาจากเครื่องจักรจะถูกรีดผ่านชุดลูกรีด (calendering) ซึ่งเป็นชุดลูกกลิ้งโลหะวางเรียงซ้อนกันในแนวตั้ง (ภาพที่ 4) โดยมีการให้แรงกดไปที่กระดาษทำให้กระดาษมีผิวหน้าที่เรียบขึ้น มีความมันวาว (gloss) มีความหนาสม่ำเสมอ ทำให้กระดาษมีความเหมาะสมในการพิมพ์มากขึ้น (Biermann, 1996)



ภาพที่ 4 ชุดลูกรีดของเครื่องจักรผลิตกระดาษ

ที่มา: Biermann (1996)

2. การปรับสภาพผิวทางเคมี (chemical modification)

การปรับสภาพผิวมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อปรับปรุงให้กระดาษมีสภาพพิมพ์ได้ ทึบสนสมบัติและความแข็งแรงที่ดีขึ้น (Fardim and Holmbom, 2005) การปรับสภาพผิวทางเคมี แบ่งได้ดังนี้

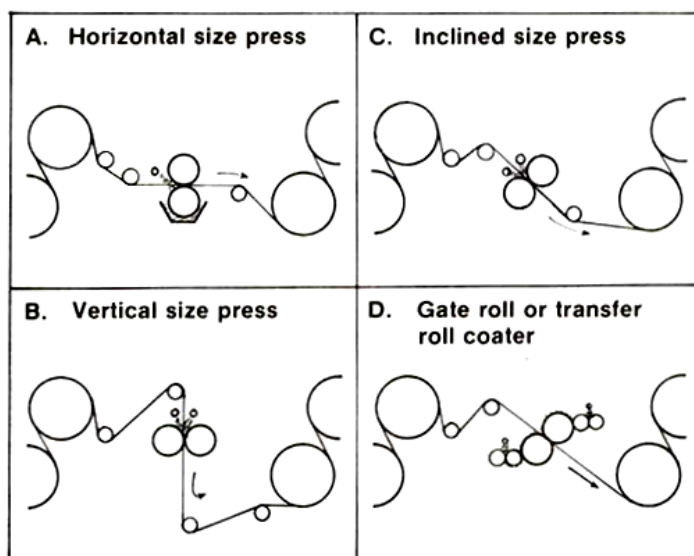
1.1 การฉาบบด้วยสารกันซึม (surface sizing)

การฉาบบด้วยสารกันซึม เป็นการทำให้กันซึมที่ผิวหน้ากระดาษภายหลังที่ผลิตกระดาษออกมาแล้วนอกเครื่องผลิตกระดาษโดยใช้ชุดลูกฉาบบผิว วัตถุประสงค์หลักเพื่อช่วยให้กระดาษมีความทนทานต่อการเปียก (wetting) การซึมผ่าน (penetration) และการดูดซับ (adsorption) ของเหลว ได้แก่ น้ำ หมึกพิมพ์ เป็นต้น

การทำให้กระดาษกันซึม (sizing) จะช่วยประสานเยื่อที่ผิวกระดาษ เพิ่มความแข็งแรง และป้องกันการถอนผิว (picking) ของกระดาษ ลดความพรุน และเพิ่มสมบัติการต้านทานน้ำมัน และสมบัติด้านความแข็งแรง (Harvey, 1992) เพิ่มความต้านทานน้ำ และความเรียบโดยสารกันซึมจะไปอุดรูเล็กๆ ที่ผิวกระดาษ (Scott and Abbott, 1995)

การฉาบบด้วยสารกันซึมจะใช้ชุดลูกฉาบบผิว (size press) สองลูกทำหน้าที่พาสารเคลือบโดยกระดาษจะดูดซับสารละลายไว้ (ภาพที่ 5) สารละลายที่เหลือจะคัดออกไปกับลูกฉาบบผิว และฉาบบอยู่ที่ผิวกระดาษทั้ง 1 ด้านหรือ 2 ด้าน จากนั้นจะผ่านกระดาษไปยังส่วนอบแห้งชุดเพื่อให้กระดาษแห้งต่อไป Smook (1994) รายงานไว้ว่า การเตรียมสารกันซึมที่ความหนืดต่ำ (อุณหภูมิต่ำ) ความเร็วของเครื่องเคลือบที่ระดับต่ำ แผ่นกระดาษมีความชื้นสูง มีความพรุนสูง และมีระดับของสารกันซึมที่เติมลงไปภายในที่ระดับต่ำ จะมีผลให้แผ่นกระดาษนั้นมีการดูดซับ (adsorption) ได้สูง

สารละลายที่ใช้ทำให้กันซึมที่ผิวหน้า นิยมใช้พอลิเมอร์ที่ละลายน้ำได้ เช่น สตาร์ช อนุพันธ์ของเซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (polyvinyl alcohol) และอัลจีเนต (alginate) (Roberts, 1996) เป็นต้น นอกจากนี้สารที่ใช้ในการเคลือบเพื่อกันซึมจะมีปริมาณของแข็ง ซึ่งได้แก่ สตาร์ช โปรตีน สารสี และสารเติมแต่งอื่นๆ น้อยกว่าร้อยละ 30 ซึ่งเป็นข้อแตกต่างจากการเคลือบผิวที่จะมีปริมาณของแข็งสูงๆ โดยทั่วไปจะสูงกว่าร้อยละ 40 (อรศิริ, 2545)



ภาพที่ 5 ชุดลูกกลานผิว (size press)

ที่มา: Kline (1991)

1.2 การเคลือบ (coating)

การเคลือบกระดาษ หมายถึง การเคลือบผิวกระดาษด้านเดียวหรือสองด้านด้วยน้ำยาเคมี มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อเพิ่มคุณภาพในการพิมพ์และเพิ่มคุณสมบัติบางประการให้เป็นไปตามความต้องการในการใช้งานมากขึ้น เนื่องจากกระดาษบางชนิดอาจมีความต้องการใช้งานในลักษณะตกแต่งผิวพิเศษกว่าที่เครื่องเดินแผ่นกระดาษจะสามารถทำได้

การเคลือบผิวกระดาษเป็นขั้นตอนสำหรับเคลือบผิวกระดาษด้วยตัวเติม โดยมีสารยึดตัวเติมให้ติดบนผิวกระดาษได้ การเคลือบด้วยสารสี การเคลือบเพื่อปรับสภาพผิว ช่วยให้กระดาษมีผิวหน้าที่เรียบขึ้น มีความขาวสว่างขึ้น มีความสามารถในการพิมพ์ที่ดีขึ้น หรือเพื่อตกแต่งลักษณะปรากฏของงานพิมพ์ การเคลือบเพื่อนำไปใช้งานด้านอื่นๆ เช่น การเคลือบด้วยพอลิเมอร์ หรือวัสดุอื่นๆ เพื่อเพิ่มสมบัติด้านการกันไขมันและไอน้ำสำหรับภาชนะบรรจุอาหารแช่แข็ง เป็นต้น กระดาษที่ผ่านการเคลือบผิวเรียกว่า กระดาษเคลือบผิว (coated paper) ซึ่งการเคลือบอาจเป็นแบบเคลือบด้านเดียวหรือเคลือบสองด้านของกระดาษ และอาจเคลือบด้านหรือเคลือบมันก็ได้ ทั้งนี้ อุปกรณ์ในการเคลือบผิวกระดาษอาจเป็นส่วนหนึ่งของเครื่องผลิตกระดาษหรือแยกออกมาต่างหากก็ได้ (Biermann, 1996)

วิธีการเคลือบสามารถแบ่งเป็น 4 ประเภท (อรศิริ, 2545) ดังนี้

1.2.1 การเคลือบโดยใช้แปรง (brush application) เป็นวิธีการที่เก่าแก่ที่สุดทำโดยการพาสารเคลือบไปเคลือบกระดาษด้วยแปรงที่หมุนต่อเนื่องหลักการคล้ายๆ การทาสี

1.2.2 การเคลือบโดยลูกกลิ้ง (roll application) ซึ่งมีทั้งแบบควบคุมปริมาณสารเคลือบ (pre-metering) เช่น metering nip, dip roll and doctor blade coater และ gravure coater เป็นต้น และวิธีที่ไม่ควบคุมปริมาณสารเคลือบได้แก่ การใช้ squeeze roll, upside - down knife และ air knife เป็นต้น

1.2.3 การเคลือบโดยการพ่นฝอย (spray application) ทำได้โดยการพ่นสารเคลือบลงบนผิวกระดาษโดยตรง

1.2.4 การเคลือบโดยวิธี casting วิธีนี้ทำโดยเทสารละลายลงบนกระดาษหรือวัสดุต่างๆ และทำให้สารเคลือบแห้งโดยใช้ความร้อน เช่น ลมร้อน หรือลูกกลิ้งร้อน เป็นต้น

สารเคลือบกระดาษ (paper coatings) ใช้เคลือบกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการพิมพ์ ทักษะสมบัติของกระดาษ ความเรียบ ความหนา ความสม่ำเสมอของกระดาษ โดยส่วนประกอบของสารเคลือบมักประกอบไปด้วย 3 ส่วน (Biermann, 1996; Kugge, 2003) คือ

ก. สารสี (pigments) เช่น แคลเซียมคาร์บอเนต (calcium carbonate) ดินขาวเคโอลิน (kaolin clay) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (titanium dioxide) ซิลิกา (silica) เป็นต้น

ข. ตัวทำให้เข้มข้น (thickener) โดยทั่วไปนิยมใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติที่ละลายน้ำได้ เช่น สตาร์ช (starch) พอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (carboxy-methylcellulose, CMC) เอทิลไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส (ethyl(hydroxy)ethylcellulose, EHEC) เป็นต้น และพอลิเมอร์สังเคราะห์ เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เป็นต้น

ค. ตัวยึด (binders) อาจเป็นตัวยึดที่ได้จากธรรมชาติ เช่น สตาร์ช โปรตีนถั่วเหลือง โปรตีนนม เป็นต้น หรือตัวยึดสังเคราะห์ เช่น สไตรีน บิวตะไดอิน (styrene butadiene) ยางสไตรีน แอคริเลต (styrene acrylate latex) เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีสารเติมแต่งอื่นๆ ที่ใช้ในปริมาณที่น้อยมาก เช่น สารลดการเกิดฟอง (defoamers) สารหล่อลื่น (lubricants) สารกันบูด สารต่อต้านจุลินทรีย์ และสารให้ความขาวสว่าง (brightening agents) เป็นต้น เพื่อปรับปรุงสมบัติโดยรวมและสมบัติที่นำไปใช้งานสุดท้าย (end-use properties)

อรสิริ (2545) ได้ศึกษาในเรื่องของการพัฒนากระดาษสาเพื่อการพิมพ์ โดยศึกษาชนิดของสารกันซึม (sizing agent) และตัวเติม (filler) ต่อคุณภาพของกระดาษ พบว่าการเติมสารกันซึมและตัวเติมช่วยเพิ่มการต้านการซึมน้ำ และความทึบแสงทางการพิมพ์อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ได้ศึกษาการเคลือบผิวกระดาษเพื่อปรับปรุงสมบัติทางการพิมพ์ด้วยแป้งดัดแปรชนิดออกซิไดซ์ แป้งดัดแปรชนิดออกซิไดซ์แคตไอออนิก และไคโตแซน พบว่าการเคลือบกระดาษสาด้วยไคโตแซน ความเข้มข้นร้อยละ 1 สามารถปรับปรุงสมบัติทางการพิมพ์ ได้แก่ ความเรียบและความแข็งแรงผิวเพิ่มขึ้น การดูดซึมน้ำและน้ำมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และการเคลือบกระดาษด้วยแป้งดัดแปรชนิดออกซิไดซ์ผสมกับไคโตแซน พบว่าเมื่อปริมาณไคโตแซนเพิ่มขึ้นกระดาษมีความแข็งแรงผิวเพิ่มขึ้น และค่าการดูดซึมน้ำและน้ำมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

สตาร์ช

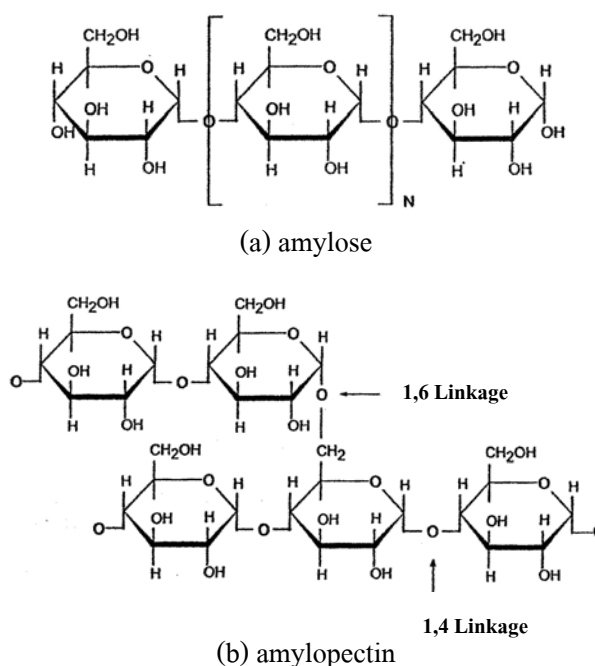
สตาร์ช (starch) หมายถึงผลิตภัณฑ์แป้งที่ผลิตจากวัตถุดิบทางการเกษตรชนิดต่างๆ โดยแยกเฉพาะส่วนที่เป็นสารอาหารคาร์โบไฮเดรต และสกัดสิ่งเจือปน คือ โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่นๆ ออกไปจนเหลือแป้งบริสุทธิ์สูงเรียกว่าสตาร์ช ซึ่งสตาร์ชที่ยังไม่ได้ถูกดัดแปรหรือแปรรูปเรียกว่า แป้งดิบ (raw starch or native starch) สตาร์ชที่ถูกดัดแปรหรือแปรรูปแล้วเรียกว่า สตาร์ชดัดแปร หรือ modified starch (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

วัตถุดิบทางการเกษตรที่นำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์จากสตาร์ช มีแหล่งต่างๆ ได้แก่ สตาร์ชที่ผลิตจากเมล็ดธัญพืชและถั่ว เช่น ข้าวเจ้า ข้าวเหนียว ข้าวโพด ข้าวสาลี ถั่วเขียว สตาร์ชที่ผลิตจากส่วนหัว เช่น มันฝรั่ง สตาร์ชที่ผลิตจากส่วนของราก เช่น มันสำปะหลัง มันเทศ ท้าวยายม่อม (arrow root) และสตาร์ชที่ผลิตจากลำต้นพืช เช่น สาอู (sago palm)

1. องค์ประกอบของสตาร์ช

สตาร์ช ประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรเคมีทั่วไป คือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส มีน้ำตาลกลูโคสมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic linkage) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ด้านปลายของสายพอลิเมอร์ที่มีหน่วยกลูโคสเป็นแอลดีไฮด์ (aldehyde group) เรียกว่า ปลายรีดิวซิง (reducing end group)

สตาร์ชประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ แอมิโลส (amylose) และแอมิโลเพกทิน (amylopectin) โดยแอมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α - 1, 4 และแอมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิด α - 1, 4 และส่วนที่เป็นกิ่งเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α - 1, 6 เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีความยาวสายโซ่ 10 - 60 หน่วย โดยสตาร์ชมาจากแหล่งที่ต่างกันอาจมีอัตราส่วนของแอมิโลสและแอมิโลเพกทินแตกต่างกันทำให้สตาร์ชแต่ละชนิดแตกต่างกัน (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) องค์ประกอบหลักภายในสตาร์ช ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 องค์ประกอบหลักภายในสตาร์ช

ที่มา: Lertsutthiwong (2002)

2. สตาร์ชดัดแปร (modified starch)

สตาร์ชดัดแปร ความหมายตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.1073-2535 หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำสตาร์ช เช่น สตาร์ชมันสำปะหลัง สตาร์ชข้าวโพด สตาร์ชมันฝรั่ง สตาร์ชสาลิ มาเปลี่ยนสมบัติทางเคมีและ/หรือทางฟิสิกส์จากเดิมด้วยความร้อนและ/หรือเอนไซม์และ/หรือสารเคมีชนิดต่างๆ เพื่อให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่างๆ (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2535)

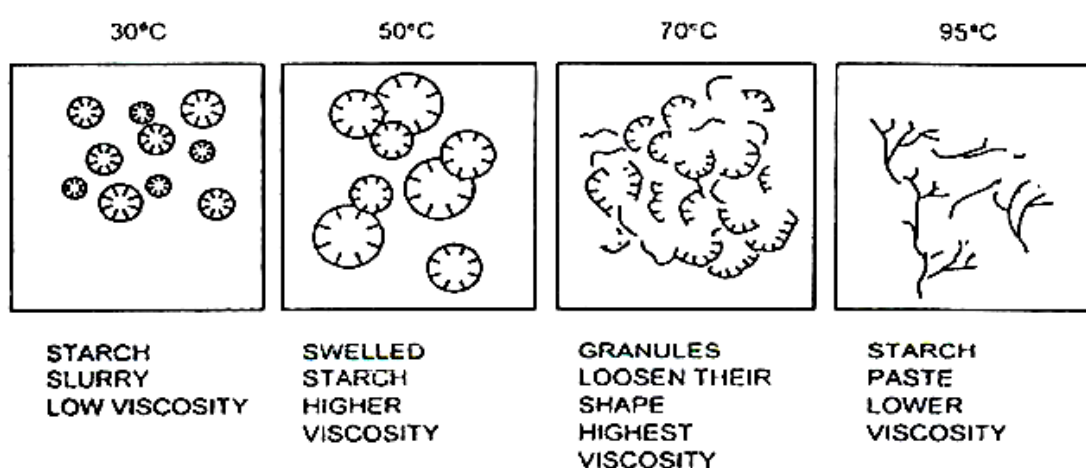
การดัดแปรสตาร์ชสามารถทำได้หลายวิธี ขึ้นกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำไปใช้งาน โดย BeMiller (1997) ได้แบ่งกลุ่มของการดัดแปรสตาร์ชไว้ดังนี้ คือ การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification) และการดัดแปรทางเคมี (chemical modification) การดัดแปรทางกายภาพนั้นเป็นการดัดแปรสตาร์ชโดยไม่ได้เข้าไปเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีของสตาร์ช เช่น การให้ความร้อน สตาร์ชจนผ่านขั้นตอนของเจลลิตีในเซชันแล้วทำแห้งทันทีได้สตาร์ชที่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น (Powell, 1967) การลดขนาดเม็ดสตาร์ชโดยทางกล การให้ความร้อนในขณะที่เม็ดสตาร์ชอยู่ในอุณหภูมิต่ำกว่าเจลลิตีในเซชัน และการแปรรูปด้วยความร้อนชื้น (heat moisture treatment) เป็นต้น ส่วนการดัดแปรทางเคมี เป็นการดัดแปรสตาร์ชโดยใช้สารเคมี เพื่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางเคมีและขนาดของโมเลกุลสตาร์ช ทำให้สตาร์ชมีสมบัติเปลี่ยนแปลงไป ขึ้นกับชนิดของปฏิกิริยาและสารเคมีที่ใช้ในการดัดแปร ซึ่งทำได้ 2 แบบ คือ การดัดแปรโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชโดยทำปฏิกิริยาเคมีกับสตาร์ชที่หมู่ไฮดรอกซิล (2-OH, 3-OH, 6-OH) ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) เอสเทอริฟิเคชัน (esterification) อีเทอร์ิฟิเคชัน (etherification) ครอสลิงกิง (crosslinking) หรือคอมบิเนชัน (combination) เป็นต้น และการดัดแปรโดยการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างโมเลกุลของสตาร์ชด้วยการทำปฏิกิริยาเคมีกับสตาร์ชที่ acetal (c-1) groups (ที่ α 1, 4 และ α 1, 6) โดยใช้เอนไซม์หรือกรด (hydrolytic cleavage) หรือ transglycosylation ทำให้เกิด glycosidic linkage ได้

นอกจากนี้ยังมีการดัดแปรสตาร์ชด้วยวิธีอื่นๆ อีก เช่น การดัดแปรทางชีวภาพ (biotechnological modification) เป็นการดัดแปรสตาร์ชโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมของพืชเพื่อให้ได้สายพันธุ์ตามต้องการ เช่น สตาร์ชที่มีเอมิโลสต่ำหรือไม่มีเลย (waxy starch) สตาร์ชที่มีเอมิโลสสูง (high-amylose starch) เป็นต้น (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

3. สตาร์ชดัดแปรในอุตสาหกรรมกระดาษ

เนื่องจากสตาร์ชผ่านกระบวนการเชื่อมต่อกันเป็นพอลิเมอร์ และมีพันธะไฮโดรเจนระหว่างสายโซ่ที่อยู่ติดกัน ทำให้สตาร์ชไม่สามารถละลายได้ในน้ำเย็น (Klass, 1990) สตาร์ชซึ่งประกอบไปด้วยแอมิโลสและแอมิโลเพกตินโดยปริมาณของแอมิโลสและแอมิโลเพกตินนั้นจะแตกต่างกันไปขึ้นกับแหล่งของสตาร์ช (Bruun, 2000) โมเลกุลของแอมิโลสที่เป็นเส้นตรงนั้นจะมีแนวโน้มที่เกาะเกี่ยวกันเกิดเป็นผลึกหรือคิรินต์ (retrogradation) ได้ง่ายกว่าแอมิโลเพกตินซึ่งเป็นกิ่ง ดังนั้นจึงนิยมนำสตาร์ชที่มีแอมิโลเพกตินสูงมาใช้ในการเติมที่ wet end มากกว่า (Scott, 1996)

สตาร์ชที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษมาจากแหล่งที่แตกต่างกันขึ้นกับพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ ในระหว่างกระบวนการต้มเป็งหรือทำให้เป็งสุก (cooking process) นั้น เม็ดแป้งจะเริ่มพองตัวที่อุณหภูมิ 45-50°C และเริ่มแตกตัว (dissolve) ที่อุณหภูมิ 60 - 70 °C หรือเสียรูปร่างไปเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 95 °C ซึ่งจะเป็นอุณหภูมิที่สตาร์ชละลายและแตกตัวอย่างสมบูรณ์ (ภาพที่ 7) โดยสตาร์ชจะมีสมบัติในการประสาน (binding properties) ได้ดีเฉพาะรูปแบบที่แตกตัว (dissolved form) (Bruun, 2000) ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปกระดาษ (paper formation process) สตาร์ชดังกล่าวจะถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มความแข็งแรงภายใน (internal strength) และยังช่วยเพิ่มการตกค้าง (retention aid) ของเส้นใยและตัวเติม (Stinebaugh *et al.*, 1993)



ภาพที่ 7 การเปลี่ยนแปลงของสตาร์ชระหว่างการทำให้สุก

ที่มา: Lertsutthiwong (2002)

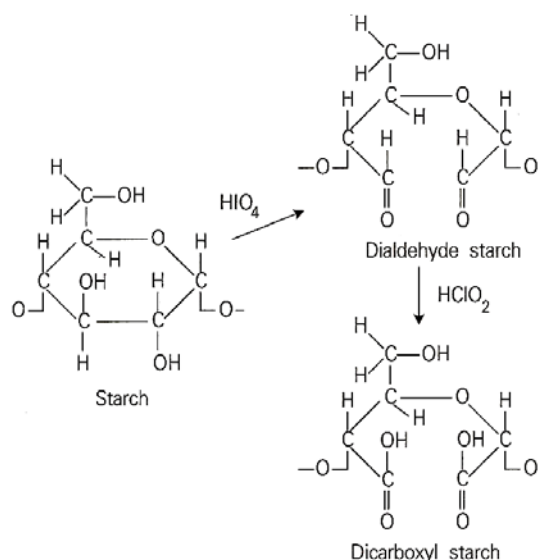
Native starch หรือ แป้งดิบนั้นมีข้อจำกัดในนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมกระดาษ เนื่องจากความหนืดและความไม่เสถียรของแป้งสุก (cooked paste) สตาร์ชที่นำมาใช้ในโรงงานผลิตกระดาษ จึงต้องมีการดัดแปรโดยใช้วิธีการต่างๆ เช่น การใช้เอนไซม์ การใช้อุณหภูมิสูง (Bramel, 1986) หรือการใช้สารเคมีในการแปรรูปหรือดัดแปรให้ได้สตาร์ชตามวัตถุประสงค์การนำไปใช้งาน เช่น การใช้สารเคมีดัดแปรสตาร์ชได้ออกซิไคซ์สตาร์ช ไฮดรอกซิล-เอทิลเลตสตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเพื่อนำไปใช้เป็นส่วนผสมของสารเคลือบ (coating formulations) เป็นต้น (Michel, 2005) ตัวอย่างของสตาร์ชดัดแปรที่นำมาใช้งานในอุตสาหกรรมกระดาษ คือ

3.1 ออกซิไคซ์สตาร์ช

ออกซิไคซ์สตาร์ช คือ สตาร์ชที่ผ่านการดัดแปรโดยวิธีออกซิเดชัน เป็นการทำปฏิกิริยากับสตาร์ชด้วยสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรด์ แคลเซียมไฮโปคลอไรท์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง สมบัติทางเคมี และขนาดโมเลกุลของเม็ดแป้งเปลี่ยนแปลงไป โดยการตัดโมเลกุลแป้งทำให้เกิดการกำจัดลิและทำลายจุลินทรีย์ ทำให้แป้งมีความขาวเพิ่มขึ้น ได้ออกซิไคซ์สตาร์ชหรือคลอรีเนตสตาร์ช (chlorinated starch) หรือ ออกซิสตาร์ช (oxystarch) ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่แอลดีไฮน์ หมู่คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล

วัตถุประสงค์ในการดัดแปรออกซิไคซ์สตาร์ช เพื่อให้สตาร์ชที่ได้มีความหนืดลดลง มีการละลายมากขึ้น ลดการคั่นตัวหรือรีโทรเกรเดชัน ได้เจลใส มีการกระจายตัวของโมเลกุล (dispersion) และมีสมบัติในการเป็นฟิล์มที่ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาโครงสร้างเอมิโลเพกทินของสตาร์ช จะเห็นได้ว่าหมู่ไฮดรอกซิลของคาร์บอนที่ 6 จะไม่เกิดปฏิกิริยา เนื่องจากมีพันธะแบบ 1, 6 การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ส่วนมากจะเกิดที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2 และ 3 และควบคุมให้มี pH 7-8 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนที่ 2 และ/หรือคาร์บอนที่ 3 จะเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิล และเมื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อ พันธะระหว่างคาร์บอนที่ 2 และ 3 จะแตกออกได้ ไดอัลดีไฮด์สตาร์ช (dialdehyde starch) จากนั้นทำปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรท์ที่เป็นด่างจะทำให้พันธะระหว่างหมู่กลูโคไพราโนสแตกออก ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วกับสตาร์ช ได้ไดคาร์บอกซิลสตาร์ช (ภาพที่ 8)



ภาพที่ 8 ออกซิไดซ์สตาร์ช

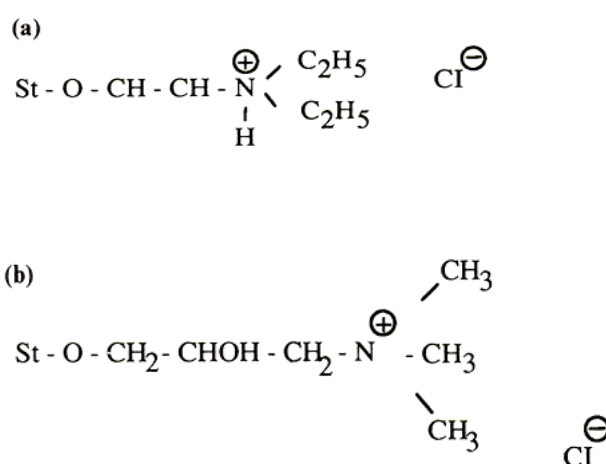
ที่มา: Knight (1969)

สมบัติที่ได้จากการดัดแปรสตาร์ชวิธีนี้คือ ได้สตาร์ชมีลักษณะเป็นประจุลบ (anionic starch) เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลเอมิโลส ทำให้อัตราการคั่นตัวของแป้งเปียก ลดลง และมีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง เนื่องจากการฟอกสีของไฮโปคลอไรท์ (Sanders, 1996) ออกซิไดซ์สตาร์ชสามารถนำมาขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดีมาก มีลักษณะใส เป็นเนื้อเดียวกัน มีความแข็งแรง และความคงตัวที่ดีมาก มีแนวโน้มในการหดตัวหรือแตกน้อยกว่าฟิล์มจากแป้งย่อยด้วยกรดหรือแป้งดิบ มีความสามารถในการละลายน้ำได้มากกว่า นิยมนำมาใช้สำหรับเป็นสารกันซึม และสารเคลือบกระดาษอย่างกว้างขวาง (Bramel, 1986) หรือใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรง เคลือบผิวกระดาษให้เรียบ และแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของเยื่อกระดาษ เป็นต้น (Wurzburg, 1986)

3.2 แคตไอออนิกสตาร์ช (cationic starch)

แคตไอออนิกสตาร์ช คือ สตาร์ชดัดแปรที่มีประจุบวก ดัดแปรโดยใช้สารเคมีที่มีหมู่ amino, imino, ammonium, sulfonate หรือ phosphonium เพื่อให้ได้สตาร์ชที่มีประจุบวก (ภาพที่ 9) นิยมนำมาใช้ประโยชน์มากในอุตสาหกรรมกระดาษ อุตสาหกรรมสิ่งทอ อุตสาหกรรมกาว ใช้ผลิตกาวสำหรับฉลากติดขวด กาวแถบซองจดหมาย กาวสำหรับบอร์ด เป็นต้น

การดัดแปรสตาร์ชวิธีนี้ จะทำปฏิกิริยากับสตาร์ชด้วยสารเคมีในสภาวะต่าง ที่อุณหภูมิ 20 -50°ซ ที่ pH 10.5 – 12.0 เป็นเวลาประมาณ 8 – 16 ชั่วโมง เติมโซเดียมซัลเฟตหรือเกลืออื่นๆ เพื่อป้องกันการพองตัวของเม็ดแป้งในระหว่างปฏิกิริยา แล้วเติมกรดเจือจาง เพื่อปรับ pH ให้ได้ 3 - 7 เป็นการเติมโปรตอนให้แก่สตาร์ช เกิดเป็นหมู่ประจุบวก ทำการกรอง ล้างและทำให้แห้ง ปฏิกิริยาการแทนที่ส่วนใหญ่เกิดตรงหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2



ภาพที่ 9 โครงสร้างของแคตไอออนิกสตาร์ช (a) Aminotertiary, (b) Quaternary
ที่มา: Georgeson (1995)

แคตไอออนิกสตาร์ชที่ได้จะมีสมบัติที่ดีคือ ได้สตาร์ชที่มีความเสถียรมากขึ้น มีอัตรา การกินตัวลดลง สามารถละลายน้ำได้สูง พองตัวได้ในน้ำเย็น และสามารถเกิดพันธะไอออนิก ระหว่างประจุบวกของสตาร์ชกับประจุลบของเซลล์ูโลสที่ใช้ทำกระดาษได้ดี จึงมีการนำมาใช้มาก ในอุตสาหกรรมกระดาษ (Solarek, 1986) ใช้งานด้านการกันซึมและการเคลือบกระดาษเพื่อด้าน ทานการแทรกซึมของหมึกหรือของเหลว ใช้เพื่อเพิ่มการดกค้ำของเยื่อ เพิ่ม sized emulsion stabilizers และ dry strength agents (Gupta and Scott, 1995) ใช้เพิ่มความเหนียวให้กับกระดาษ ใช้ เคลือบกระดาษเพื่อให้กระดาษทนต่อการขูดหรือถลอก ป้องกันฝุ่นละออง และลดค่า BOD, COD ของน้ำทิ้งในกระบวนการผลิตกระดาษ ซึ่งเป็นผลดีต่อสภาวะแวดล้อม

ในส่วนของการกระบวนการผลิตกระดาษ (wet-end section) นิยมนำแคตไอออนิกสตาร์ช มาใช้เป็นสารกันซึมในกระดาษหลายชนิด เนื่องจากความสามารถในการเป็นตัวประสาน (binding

agent) สามารถเพิ่มความแข็งแรงต่อแรงดึงของกระดาษได้ Howard and Jowsey (1989) ได้รายงานไว้ว่า การใช้แคตไอออนิกสตาร์ชเป็น dry strength additive มีผลในการเพิ่มความแข็งแรงต่อการดึงของกระดาษกราฟฟอกที่ไม่ได้ผ่านการตีเยื่อได้ถึงร้อยละ 40 - 50

เนื่องจากการดึงดูดทางเคมีไฟฟ้า (electrochemical attraction) ของแคตไอออนิกสตาร์ชกับเส้นใยเซลลูโลส ทำให้ความแข็งแรงของพันธะของสตาร์ชตัดแปรกับเส้นใยมีค่ามากกว่าความแข็งแรงของพันธะระหว่างเส้นใย ซึ่งการเพิ่มพันธะของสตาร์ชระหว่างเส้นใยนั้นมิผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของกระดาษ

Floyd *et al.* (2001) ได้นำแคตไอออนิกสตาร์ช ปริมาณ 40, 60 และ 80 ปอนด์/ตันของเยื่อกระดาษมาผสมกับ blocked glyoxal resin ร้อยละ 9 (dry resin on starch) เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ โดยเติมลงไปในช่วงกระบวนการผลิตกระดาษ (internal sizing) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแคตไอออนิกสตาร์ช สามารถเพิ่มความแข็งแรงเมื่อเปียก ความแข็งแรงเมื่อแห้ง และค่าความต้านทานต่อแรงดันทะลุของกระดาษได้

3.3 สตาร์ชดัดแปรชนิดอื่นในอุตสาหกรรมกระดาษ

สตาร์ชย่อยด้วยกรด เป็นการดัดแปรโดยการลดขนาดโมเลกุลของสตาร์ชโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับกรดเกลือหรือกำมะถันเจือจาง กรดจะตัดโมเลกุลของสตาร์ชทำให้ขนาดโมเลกุลเล็กลงจนได้ความหนืดที่ต้องการ ได้ผลิตภัณฑ์สตาร์ชย่อยด้วยกรด (acid-modified starch) หรือ thin-boiling starch หรือ แอมิโลเดกซ์ทริน (amylodextrin) (Wurzburg, 1986; Hoseneey and Lineback, 1996) โดยในอุตสาหกรรมกระดาษนำไปใช้เคลือบกระดาษเพื่อกันไม่ให้น้ำหมึกซึมผ่านกระดาษ ได้กระดาษที่มีผิวหน้าเรียบ มีคุณสมบัติในการพิมพ์ (printability) ที่ดี และใช้ผลิตกระดาษลูกฟูก (Rohwer and Klem, 1984)

ครอสลิงสตาร์ช (cross-linked starch) หรือ crossbonded starch หรือ inhibit starch เป็นสตาร์ชดัดแปรที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างสตาร์ชกับสารเคมีที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่ (multi-functional reagent) เรียกสารเคมีนั้นว่า cross-linking reagent หรือ inhibiting reagent เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันหรืออีเทอร์ฟิเคชัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารเคมีที่ใช้ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลสตาร์ชได้มากกว่า 1 หมู่ เกิดพันธะเชื่อมข้าม (crosslink or bridge)

ระหว่างโมเลกุลของสตาร์ชในสภาพแขวนลอย พันธะโควาเลนต์จะช่วยเสริมให้พันธะไฮโดรเจนที่ยึดโครงสร้างของเม็ดสตาร์ชไว้มีความแข็งแรงมากขึ้น ช่วยลดการพองตัวของเม็ดสตาร์ช เพิ่มความแข็งแรงให้แก่เม็ดสตาร์ชโดยเพิ่มความต้านทานต่อสภาวะที่เป็นกรด ความร้อน และสภาพที่มีแรงเฉือน

Wurzburg (1986) พบว่า ในอุตสาหกรรมกระดาษ สิ่งทอ และกาว ใช้โครอสลิงสตาร์ช เคลือบกระดาษและสิ่งทอ และผลิตกาวที่ทนน้ำ Quan *et al.* (1997) พบว่าในการผลิตโครอสลิงสตาร์ช ร่วมกับกระบวนการคัดแปรอื่นๆ พร้อมกันหรือต่อเนื่องกัน เช่น สตาร์ชคัดแปรโครอสลิงร่วมกับแคตไอออนในเซชัน มีคุณสมบัติเหมาะสมสำหรับใช้ผลิตกระดาษ เนื่องจากมีคุณสมบัติในการยึดติดสูง สามารถใช้ที่ระดับความเข้มข้นเจือจางได้

สตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์ ใช้เคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ ใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะ (binder) ในองค์ประกอบของสารเคลือบสำหรับผลิตกระดาษวัดความร้อน (thermal recording paper) หรือผสมสตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์กับ chelate solution ที่ประกอบด้วยสารส้ม กรดทาร์ทาริก และแอมโมเนีย ใช้เป็นสารเคลือบกระดาษที่มีความหนืดต่ำ กันน้ำได้พิมพ์ได้ดี และมีอายุการเก็บรักษาที่ดี ในอุตสาหกรรมกระดาษลูกฟูกผสมสตาร์ชฟอสเฟตโมโนเอสเทอร์กับ neoprene rubber latex ได้กาวที่ดี ติดง่าย และทนทานมากขึ้น (Waly *et al.*, 1994)

Mackewicz *et al.* (2002) นำสตาร์ชที่คัดแปรด้วย octenyl succinic anhydride (OSA) มาใช้ในลักษณะของสารเคลือบและสารกันซึม เพื่อเพิ่มสมบัติด้านการต้านการซึมผ่านของน้ำ น้ำมัน และอากาศได้ โดยปริมาณสตาร์ชที่เหมาะสมอยู่ในช่วงร้อยละ 0.25 - 15 โดยน้ำหนักแห้งของสตาร์ช เทียบกับน้ำหนักของกระดาษแห้ง (finished dry paper) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 องศาเซลเซียส

Larotonda *et al.* (2003) ได้ศึกษาการนำสตาร์ชแอซีเทตมันสำปะหลัง (cassava starch acetated, CSA) มาใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการดูดคายความชื้น สภาพให้ซึมผ่านได้ของไอน้ำ (water vapour permeability) และเพิ่มความแข็งแรงต่อแรงดึงให้กับกระดาษกราฟท์โดยการทำให้กระดาษกราฟท์อิมมิดด้วยสารละลายสตาร์ชแอซีเทตมันสำปะหลัง โดยการละลายสตาร์ชแอซีเทตด้วยตัวทำละลายคลอโรฟอร์ม อัตราส่วน 1: 5 แล้วนำกระดาษกราฟท์มาแช่ไว้ 10 นาที พบว่าสามารถปรับปรุงสมบัติด้านการดูดคายความชื้น การซึมผ่านของไอน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเหมาะกับการนำกระดาษดังกล่าวไปใช้ในลักษณะกระดาษกันน้ำ (waterproof) ในขณะที่สมบัติด้านความแข็งแรง

ของกระดาษยังไม่สามารถปรับปรุงได้อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากเกิดรอยแตกของสตาร์ชที่ผิวหน้าของกระดาษกราฟท์

Ketola and Hagberg (2003) ทำการดัดแปรสตาร์ชโดยใช้ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในการย่อยสตาร์ช เพื่อให้มีความหนืดลดลงและทำให้สตาร์ชมีความคงตัวในกระบวนการผลิตโดยการทำปฏิกิริยาต่อดัวยแอซิติลเอสเทอร์ฟิเคชัน (acetyl esterification) และครอสลิง พบว่าปริมาณของสตาร์ชร้อยละ 10 – 15 โดยน้ำหนักแห้ง สามารถใช้เป็นการทำให้เกิดการกันซึมน้ำที่ผิวหน้ากระดาษ (paper surface size compositions) ได้ และที่ปริมาณของสตาร์ชที่สูงขึ้นจนถึงร้อยละ 25 หรือมากกว่า สามารถนำมาใช้ในลักษณะของสารเคลือบสำหรับกระดาษและกระดาษแข็ง

Yeng *et al.* (2004) นำสตาร์ชจากสาकुมาดัดแปร โดยวิธีการผสม (blend) กับ acrylamide และวิธีการกราฟท์ (graft) กับ acrylamide ในสถานะที่เป็นกรดและด่าง เพื่อศึกษาผลของสตาร์ชสาकुที่ดัดแปรแล้วมาเคลือบกระดาษที่ผลิตจากเยื่อกระดาษที่ใช่แล้วเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับกระดาษดังกล่าวเทียบกับสตาร์ชที่ยังไม่ได้ดัดแปรซึ่งมีความทนทานต่อสภาวะแวดล้อมได้ต่ำ โดยใช้อุปกรณ์เคลือบกระดาษ P1-1210 Film coater ให้ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันที่ร้อยละ 5 พบว่า กระดาษจากเยื่อใช่แล้วเคลือบสตาร์ชที่ blend กับ acrylamide มีค่าความทนต่อการหักพับ (folding endurance) และค่าความแข็งแรงต่อแรงกด (crush strength) สูงที่สุด ขณะที่กระดาษจากเยื่อใช่แล้วเคลือบด้วยสตาร์ชสาकुที่ดัดแปรด้วยการกราฟท์กับ acrylamide ในสถานะที่เป็นด่างให้ค่าความแข็งแรงดึง และดัชนีการฉีกให้ปริแตก (burst index) สูงสุด และกระดาษจากเยื่อใช่แล้วเคลือบด้วยสตาร์ชสาकुที่ดัดแปรด้วยการกราฟท์กับ acrylamide ในสถานะที่เป็นกรดมีค่าดัชนีแรงดึง (tensile index) สูงที่สุดเมื่อเทียบกับกระดาษจากเยื่อใช่แล้วเคลือบสตาร์ชดัดแปรวิธีอื่นและเคลือบสตาร์ชที่ไม่ได้ดัดแปร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัตถุดิบ

1.1 กระดาษกราฟที่มีม็องคัลประกอบของเยื่อเวียนทำใหม่ร้อยละ 70 เกรด KA น้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัม/ตารางเมตร

1.2 สตาร์ชตัดแปรทางการค้า

1.2.1 ออกซิไดซ์สตาร์ชจากมันสำปะหลัง (Oxidized starch, Fibersize-382TM)

1.2.2 แคตไอออนิกสตาร์ชจากมันสำปะหลัง (Cationic starch, Catosize-380TM)

2. อุปกรณ์

2.1 เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2.2 ตู้อบไฟฟ้า

2.3 เดชิกเคเตอร์

2.4 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์

2.5 เครื่องวัดความหนา รุ่น ID-C112BS (Mitutoyo Corp, Japan)

2.6 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ Mullen Tester (BF. Perkins, USA)

2.7 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว Testometric 350 (Rochdale, England)

2.8 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน Testometric 350 (Rochdale, England)

2.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL รุ่น JSM-5600LV, Japan)

2.10 เครื่องเคลือบกระดาษ Film coater รุ่น PI-1210 (Tester Sanyo Co., Ltd.)

2.11 เครื่องวัดความหนืด Brookfield Viscometer รุ่น DV III+ (Scientific Promotion)

2.12 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ

2.13 Hotplate Stirrer (Stuart Scientific, UK)

วิธีการ

1. ตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

1.1 ตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชดัดแปร

1.1.1 ปริมาณความชื้น (AOAC 1995)

1.1.2 ความหนืด (Brookfield Viscometers, DV III+)

1.2 ตรวจสอบสมบัติของกระดาษกราฟท์

1.2.1 ปรับสภาพกระดาษทดสอบ (ISO 187)

1.2.2 น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (TAPPI T410-om88)

1.2.3 ความหนาของกระดาษ (TAPPI T411-om97)

1.2.4 ปริมาณความชื้นในกระดาษ (ASTM D644-93)

1.2.5 ความต้านทานแรงฉีกขาด (TAPPI T403-om97)

1.2.6 ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (ASTM D828-93)

1.2.7 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (TAPPI T818-om97)

รายละเอียดของวิธีการตรวจสอบสมบัติของสตาร์ชดัดแปรและวิธีการตรวจสอบสมบัติของกระดาษกราฟท์แสดงดังภาคผนวก ก

2. ศึกษาอิทธิพลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟท์

2.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของการเคลือบสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟท์ โดยใช้แผนการทดลองแบบ Completed Randomized Design (CRD) โดยจัดการทดลองแบบแฟกทอเรียล (factorial experiment) $2 \times 3 \times 2$ ปัจจัยที่ศึกษามี 3 ปัจจัยคือ

2.1.1 ชนิดของสสารสกัดแปรรูป 2 ชนิด คือ ออกซิไดซ์สสารสกัด และแคตไอออนิกสสารสกัด

2.1.2 ความเข้มข้นของสสารสกัดแปรรูป 3 ระดับ คือ ร้อยละ 5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก

2.1.3 อุณหภูมิของสารละลายก่อนเคลือบ 2 ระดับ คือ 65 และ 75 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$)

ทำการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยใช้วิธี Analysis of Variance (ANOVA) วิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 10

2.2 วิธีการเคลือบสสารสกัดแปรรูป

2.2.1 การเตรียมสารละลายสสารสกัด

เตรียมสารละลายสสารสกัดแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 25 โดยน้ำหนักแห้ง (dry basis) ในน้ำกลั่น (wt/wt) ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ $95 \pm 5^{\circ}\text{C}$ และกวนอย่างสม่ำเสมอโดยใช้ Hotplate Stirrer (Stuart Scientific, UK) ที่ความเร็วรอบระดับ 8 (ประมาณ 900 rpm) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สสารสกัดแตกตัวอย่างสมบูรณ์ นำสารละลายสสารสกัดที่ได้ไปควบคุมอุณหภูมิโดยใช้อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ $65 \pm 1^{\circ}\text{C}$ หรือ $75 \pm 1^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้สารละลายมีอุณหภูมิคงที่ตามที่กำหนดไว้ก่อนการเคลือบ

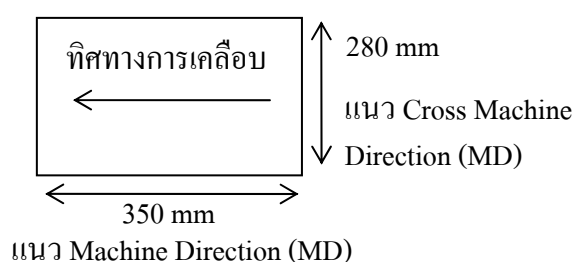
2.2.2 การวัดความหนืดของสารละลายสสารสกัด

เตรียมสารละลายสสารสกัดโดยวิธีในข้อ 2.2.1 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ปริมาณ 500 มิลลิลิตร ตรวจวัดความหนืดโดยใช้ Brookfield viscometer (Model DV III+) หัววัดหมายเลข 01 ความเร็วรอบที่ 20 รอบ/นาที

2.2.3 การเตรียมตัวอย่างกระดาษ

ตัดกระดาษกราฟทึบขนาด 280 x 350 มิลลิเมตร (แสดงดังภาพที่ 10) โดยเก็บกระดาษทั้งหมดไว้ในถุงพลาสติก PE ที่ปิดสนิทเพื่อปกป้องตัวอย่างกระดาษก่อนการเคลือบจาก

สภาวะแวดล้อม เช่น น้ำ ฝุ่นละออง หรือจากปัจจัยอื่นๆ ที่อาจทำให้กระดาษเสื่อมสภาพ โดยตัวอย่างกระดาษก่อนเคลือบจะเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25 ± 5 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 5)



ภาพที่ 10 ขนาดของตัวอย่างกระดาษกราฟท์

2.2.4 การเคลือบ

นำกระดาษที่เตรียมในข้อ 2.2.3 มาเคลือบด้วยสารละลายสตาร์ชแต่ละชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารละลายก่อนเคลือบที่ระดับต่างๆ ในการเคลือบนั้นจะเป็นการเคลือบด้านเดียวคือเฉพาะด้านผิวหน้าของกระดาษหรือด้านสักหลาด (felt side) ซึ่งเป็นด้านที่มักจะมีการขัดผิวมาแล้วบางส่วนเพื่อปรับสภาพให้มีความเรียบที่เหมาะสมต่อกระบวนการพิมพ์ ในการเคลือบจะใช้เครื่อง Film coater PI-1210 (ภาพที่ 11) ตั้งความเร็วของการเคลือบที่ระดับ 2 (1.6 เมตร/นาติ) เทสารละลายประมาณ 10 กรัมลงไปในกระดาษตามความยาวตลอดหน้ากว้าง (แนว CD) โดยแท่งเหล็กของเครื่อง Film coater จะทำหน้าที่พาสารเคลือบ เคลือบไปบนกระดาษในแนวการผลิตกระดาษ (MD) แสดงดังภาพที่ 10 นอกจากนี้แท่งเหล็กจะทำหน้าที่ปาดสารเคลือบส่วนเกินออกไป จากนั้นนำกระดาษที่เคลือบเสร็จแล้ววางทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25 ± 5 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 5) เป็นเวลา 30 นาติ ในระหว่างนี้สารเคลือบบางส่วนจะซึมลงไปในกระดาษและบางส่วนจะตกค้างอยู่ที่ผิวหน้า จากนั้นนำกระดาษเคลือบไปรีดด้วยเตารีดที่อุณหภูมิ 100 ± 5 °ซ เพื่อให้กระดาษเรียบ ตัดขอบกระดาษออกด้านละ 1.5 ซม. ก่อนนำไปทดสอบในลำดับต่อไป ในระหว่างการเคลือบจะมีการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการเคลือบโดยดูจากลักษณะปรากฏและมีการสุ่มเพื่อตรวจสอบน้ำหนักของกระดาษเคลือบตามตำแหน่งต่างๆ ของการเคลือบ



ภาพที่ 11 เครื่องเคลือบกระดาษ (Film Coater PI-1210)

2.3 ศึกษาลักษณะผิวหน้าของกระดาษกราฟที่ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

นำกระดาษที่ได้จากการเคลือบข้อ 2.2 มาเก็บไว้ที่ตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187) เตรียมตัวอย่างขนาด 1×1 ซม. นำกระดาษไปเก็บไว้ในเดซิกเคเตอร์ซึ่งมีสารดูดความชื้นอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อให้กระดาษมีความชื้นเป็นศูนย์ นำกระดาษไปเคลือบผิวด้วยทองโดยใช้ sputter-coater จากนั้นนำไปตรวจสอบลักษณะผิวหน้าของกระดาษด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL, รุ่น JSM-5600LV) ที่กำลังขยาย 200 เท่า

2.4 ศึกษาสมบัติของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบด้วยสตาโรซ์คัดแปร

นำกระดาษเคลือบที่ได้จากข้อ 2.2 มาตัดขนาดตามการทดสอบแต่ละวิธี นำมาเก็บไว้ที่ตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187) ก่อนนำมาทดสอบสมบัติของกระดาษเคลือบ ดังนี้

2.4.1 น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (TAPPI T410-om88)

2.4.2 ความหนาของกระดาษ (TAPPI T411-om97)

2.4.3 ความชื้นของกระดาษ (ASTM D644-93)

2.4.4 ความต้านทานแรงฉีกขาด (TAPPI T403-om97)

2.4.5 ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (ASTM D828-93)

2.4.6 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (TAPPI T818-om97)

2.5 ศึกษาอิทธิพลของสภาวะแวดล้อมในการเก็บที่มีต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟที่ผ่านการเคลือบสตาซ์คัดแปร

กล่องกระดาษลูกฟูกที่ทำจากกระดาษกราฟนั้น ต้องมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะสามารถปกป้องสินค้าระหว่างการเก็บในคลังสินค้าและระหว่างการขนส่ง สินค้าบางประเภท เช่น น้ำยาปรับผ้านุ่มชนิดเดิม ขนมอบกรอบ ต้องอาศัยกล่องกระดาษลูกฟูกเพื่อช่วยในการรับแรงกดขณะเรียงซ้อนในคลังสินค้า นอกจากนี้พบว่าสภาวะการเก็บภายในคลังสินค้าสำหรับสินค้าที่ได้ยกตัวอย่างมาข้างต้นมักไม่มีการควบคุมไม่ว่าจะเป็นอุณหภูมิหรือความชื้น โดยสินค้าจะถูกเก็บภายใต้สภาวะเปิดหรือสภาวะภายใต้อุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) ดังนั้นเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แน่ชัดถึงความเป็นไปได้ในการนำสตาซ์คัดแปรมาใช้ในการเคลือบกระดาษเพื่อเพิ่มความแข็งแรงในระดับอุตสาหกรรม ในการทดลองจึงได้จำลองสภาวะการเก็บกระดาษเคลือบที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) เป็นเวลา 1 - 4 สัปดาห์ ซึ่งเป็นระยะเวลาโดยประมาณที่ผู้ใช้กล่องกระดาษลูกฟูกเก็บสินค้าไว้ในคลังสินค้า ในการทดลองจะนำกระดาษเคลือบที่ผ่านการเก็บตามระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ไปทดสอบสมบัติด้านความแข็งแรงในข้อ 2.4.4 - 2.4.6

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

1.1 สมบัติเบื้องต้นของสสารคัดแปร

1.1.1 ปริมาณความชื้นของสสารคัดแปร

จากการทดสอบหาปริมาณความชื้น พบว่า ออกซิไดซ์สสารและแคตไอออนิกสสารมีความชื้นเริ่มต้นแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณความชื้นของสสารคัดแปร

สสารคัดแปร	ความชื้น (ร้อยละ)
ออกซิไดซ์สสาร	12.98
แคตไอออนิกสสาร	12.55

1.1.2 ความหนืดของสารละลายสสารคัดแปร

จากการทดสอบหาค่าความหนืดของสสารคัดแปรทั้งสองชนิดโดยใช้เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometer, Model DV III+) หัววัดหมายเลข 01 ความเร็วรอบที่ 20 รอบ/นาที (rpm) ผลปรากฏดังตารางที่ 2 พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารและแคตไอออนิกสสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ส่งผลให้สารละลายสสารมีความหนืดเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน การเพิ่มอุณหภูมิของสารเคลือบจาก 65 °ซ เป็น 75 °ซ ส่งผลให้ความหนืดของสารละลายสสารทั้งสองชนิดมีค่าลดลง และเมื่อพิจารณาค่าความหนืดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิระดับเดียวกันพบว่า สารละลายแคตไอออนิกสสารมีความหนืดมากกว่าสารละลายออกซิไดซ์สสารประมาณ 1.3 - 2.1 เท่า

ตารางที่ 2 ความหนืดของสารละลายสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้น ของสตาร์ช (ร้อยละ)	ความหนืด (เซนติพอยด์)			
	ออกซิไดซ์สตาร์ช		แคตไอออนิกสตาร์ช	
	65°ซ	75°ซ	65°ซ	75°ซ
5	6.5	6.0	9.0	7.5
15	30.0	23.0	38.5	36.5
25	170.5	100.0	262.5	209.0

1.2 สมบัติเบื้องต้นของกระดาษกราฟท์

กระดาษกราฟท์ที่ใช้เป็นกระดาษเกรด KA มีน้ำหนักมาตรฐาน 125 กรัมต่อตารางเมตร (กรัม/ตร.ม.) มีปริมาณเชื้อเวียนทำใหม่ผสมร้อยละ 70 และเป็นกระดาษชนิดที่ไม่มีการฉาบผิว (external sizing) จากการตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของกระดาษกราฟท์พบว่า กระดาษกราฟท์มีน้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้น แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมบัติเบื้องต้นของกระดาษกราฟท์

สมบัติ	ค่ามาตรฐาน ¹	ผลจากการตรวจสอบในห้องปฏิบัติการ
น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม)	125 ± 5	126.5
ความหนาของกระดาษ (มิลลิเมตร)	0.175 ± 0.005	0.175
ปริมาณความชื้นในกระดาษ (ร้อยละ)	6 - 9	8.69

¹ ค่ามาตรฐานจากผู้ผลิตกระดาษตัวอย่าง

2. สมบัติทางกายภาพของกระดาศคราฟท์ภายหลังการเคลือบ

2.1 ค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบ

เนื่องจากระหว่างการทดลองเคลือบกระดาศคราฟท์ที่ไม่สามารถทำการเคลือบสตาร์ชตัดแปรทั้งสองชนิดภายในช่วงระยะเวลาเดียวกันได้ จากข้อจำกัดเกี่ยวกับจำนวนตัวอย่างที่จะต้องเคลือบทั้งหมดในแต่ละวัน อีกทั้งกระดาศเป็นวัสดุที่ไวต่อความชื้น โดยสามารถดูดและคายความชื้นได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความแข็งแรง นอกจากนี้เมื่อระยะเวลาในการเก็บกระดาศนานขึ้นอาจส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาศได้ ในการวิจัยจึงได้มีการทดสอบสมบัติของกระดาศคราฟท์ก่อนเคลือบใหม่ทุกครั้งเพื่อจะได้เปรียบเทียบสมบัติของกระดาศก่อนการเคลือบและภายหลังการเคลือบได้ชัดเจนขึ้น โดยในการเปรียบเทียบผลของการเคลือบกระดาศคราฟท์ด้วยสตาร์ชตัดแปรที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิใดๆ นั้น จะใช้วิธีการนำค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบของกระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบและกระดาศคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบ (ΔE) มาใช้ในการพิจารณาโดยค่า $\Delta E = 0$ หมายถึงไม่มีความแตกต่างของค่าทดสอบระหว่างกระดาศเคลือบและกระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ $\Delta E > 0$ หมายถึงกระดาศเคลือบมีค่าทดสอบมากกว่ากระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ และ $\Delta E < 0$ หมายถึง กระดาศเคลือบมีค่าทดสอบน้อยกว่ากระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ และเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจและการเปรียบเทียบ ในการนำเสนอผลในงานวิจัยจะแปลงค่า ΔE เป็นร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดสอบของกระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาศคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบสตาร์ชตัดแปร

2.2 สมบัติพื้นฐานของกระดาศคราฟท์

2.2.1 น้ำหนักมาตรฐาน

ผลการตรวจสอบน้ำหนักมาตรฐานของกระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบและกระดาศคราฟท์หลังเคลือบสตาร์ชตัดแปรทั้งสองชนิด แสดงดังตารางที่ 4 ทั้งนี้เมื่อเปรียบเทียบกระดาศคราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบกับกระดาศคราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ พบว่ากระดาศหลังเคลือบมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่อุณหภูมิของสารเคลือบระดับเดียวกัน การเพิ่มความเข้มข้นของสตาร์ชจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ส่งผลให้กระดาศเคลือบมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ชในทุกสภาวะส่งผลให้กระดาศคราฟท์

มีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นมากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ช น้ำหนักมาตรฐานที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลโดยตรงจากปริมาณสตาร์ชดัดแปรที่เป็นองค์ประกอบหลักของสารเคลือบ โดยความเข้มข้นและความหนืดที่แตกต่างกัน ส่งผลให้น้ำหนักมาตรฐานที่เพิ่มขึ้นในแต่ละสภาวะของการเคลือบแตกต่างกัน

ตารางที่ 4 สมบัติพื้นฐานของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ชดัดแปร

ความเข้มข้น ของสตาร์ช (ร้อยละ)	อุณหภูมิ ของ สารเคลือบ (°ซ)	กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช			กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช		
		น้ำหนัก มาตรฐาน (ก./ตร.ม)	ความหนา (มม.)	ความชื้น (ร้อยละ)	น้ำหนัก มาตรฐาน (ก./ตร.ม)	ความหนา (มม.)	ความชื้น (ร้อยละ)
Control (uncoated KA)		126.5 ^c	0.175 ^d	7.63	126.5 ^f	0.174 ^d	7.57
5	65	129.6 ^d	0.183 ^c	7.72	130.8 ^c	0.186 ^c	7.98
	75	130.0 ^c	0.182 ^c	7.85	131.4 ^d	0.186 ^c	7.84
15	65	130.2 ^c	0.184 ^b	7.82	133.1 ^c	0.185 ^c	7.68
	75	130.1 ^c	0.184 ^b	7.61	133.1 ^c	0.187 ^{bc}	7.56
25	65	133.1 ^b	0.187 ^a	7.94	142.0 ^a	0.190 ^a	7.93
	75	134.3 ^a	0.185 ^b	8.37	141.3 ^b	0.189 ^{ab}	7.90

^{abcdef} ตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถว หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

2.2.2 ความหนา

เมื่อพิจารณาความหนาของกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ช (ตารางที่ 4) พบว่า มีความหนาแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชมีความหนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.0 - 6.9 และกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชมีความหนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.3 - 9.2 โดยที่ระดับความเข้มข้นเดียวกันกระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชมีความหนามากกว่ากระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช ทั้งนี้ความหนาที่เพิ่มขึ้นนั้นเป็นผลเนื่องมาจากการมีปริมาณสตาร์ชตกค้างที่ผิวหน้าของกระดาษ ซึ่งปริมาณของสตาร์ชตกค้างที่ผิวหน้าของกระดาษที่มากขึ้นนั้นเป็นผลเนื่องมาจากสารเคลือบมีความหนืดเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความเข้มข้นของสตาร์ช

ดังนั้นที่ระดับความเข้มข้นเดียวกัน สารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชมีความหนืดสูงกว่าสารเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ช 1.3 - 2.1 เท่า ทำให้มีปริมาณสตาร์ชตกค้างที่ผิวหน้าของกระดาศมากกว่า ส่งผลให้กระดาศเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชมีความหนามากกว่ากระดาศเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ช

2.2.3 ความชื้น

เมื่อพิจารณาปริมาณความชื้นของกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์หลังเคลือบด้วยออกซิไคซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ช (ตารางที่ 4) พบว่ากระดาศกราฟท์หลังเคลือบด้วยสตาร์ชดัดแปรทั้งสองชนิดมีความชื้นเพิ่มขึ้นจากกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ ยกเว้นที่ระดับความเข้มข้นของสารเคลือบร้อยละ 15 อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ ที่มีความชื้นไม่แตกต่างจากกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ โดยความชื้นของกระดาศกราฟท์หลังเคลือบที่เพิ่มขึ้นนั้น อาจเป็นผลเนื่องมาจากสตาร์ชที่สามารถดูดซับความชื้นจากสภาวะแวดล้อมได้บางส่วน และกระดาศกราฟท์ที่สามารถดูดซับความชื้นได้เช่นกันเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีความชื้นสูง ดังนั้นเมื่อมีการเคลือบกระดาศกราฟท์ด้วยสตาร์ชดัดแปร จึงส่งผลให้มีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ อย่างไรก็ตามมาตรฐานของกระดาศกราฟท์ที่ใช้ในการผลิตกล่องกระดาศลูกฟูกโดยทั่วไป จะกำหนดให้มีปริมาณความชื้นได้ระหว่างร้อยละ 6 - 9 โดยความชื้นที่อยู่ในระดับนี้จะถือว่าเป็นระดับที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต

2.2.4 ปริมาณสตาร์ชตกค้างบนกระดาศกราฟท์

ปริมาณสตาร์ชตกค้างบนกระดาศกราฟท์ ได้จากการเปรียบเทียบน้ำหนักมาตรฐานของกระดาศเคลือบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐานของกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ โดยตัดปริมาณความชื้นในกระดาศออกไปจากน้ำหนักมาตรฐานเพื่อให้ได้น้ำหนักของสตาร์ชดัดแปรที่ตกค้างบนกระดาศกราฟท์อย่างแท้จริง ปริมาณสตาร์ชตกค้างบนกระดาศกราฟท์แสดงดังตารางที่ 5 ทั้งนี้ปริมาณสตาร์ชที่ตกค้างบนกระดาศกราฟท์ เป็นผลรวมของปริมาณสตาร์ชที่ซึมลงไปในกระดาศรวมกับปริมาณสตาร์ชที่ตกค้างอยู่ที่ผิวหน้า

ตารางที่ 5 ปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศราฟท์

ความเข้มข้น ของสารสกัด (ร้อยละ)	ปริมาณออกซิไดซ์สารสกัด (กรัม/ตร.ม.)		ปริมาณแคตไอออนิกสารสกัด (กรัม/ตร.ม.)	
	65°ซ	75°ซ	65°ซ	75°ซ
5	2.70 ± 0.04	2.89 ± 0.08	3.70 ± 0.15	4.21 ± 0.10
15	3.29 ± 0.14	3.29 ± 0.01	6.39 ± 0.20	6.30 ± 0.15
25	5.63 ± 0.06	6.16 ± 0.08	13.72 ± 0.14	13.12 ± 0.12

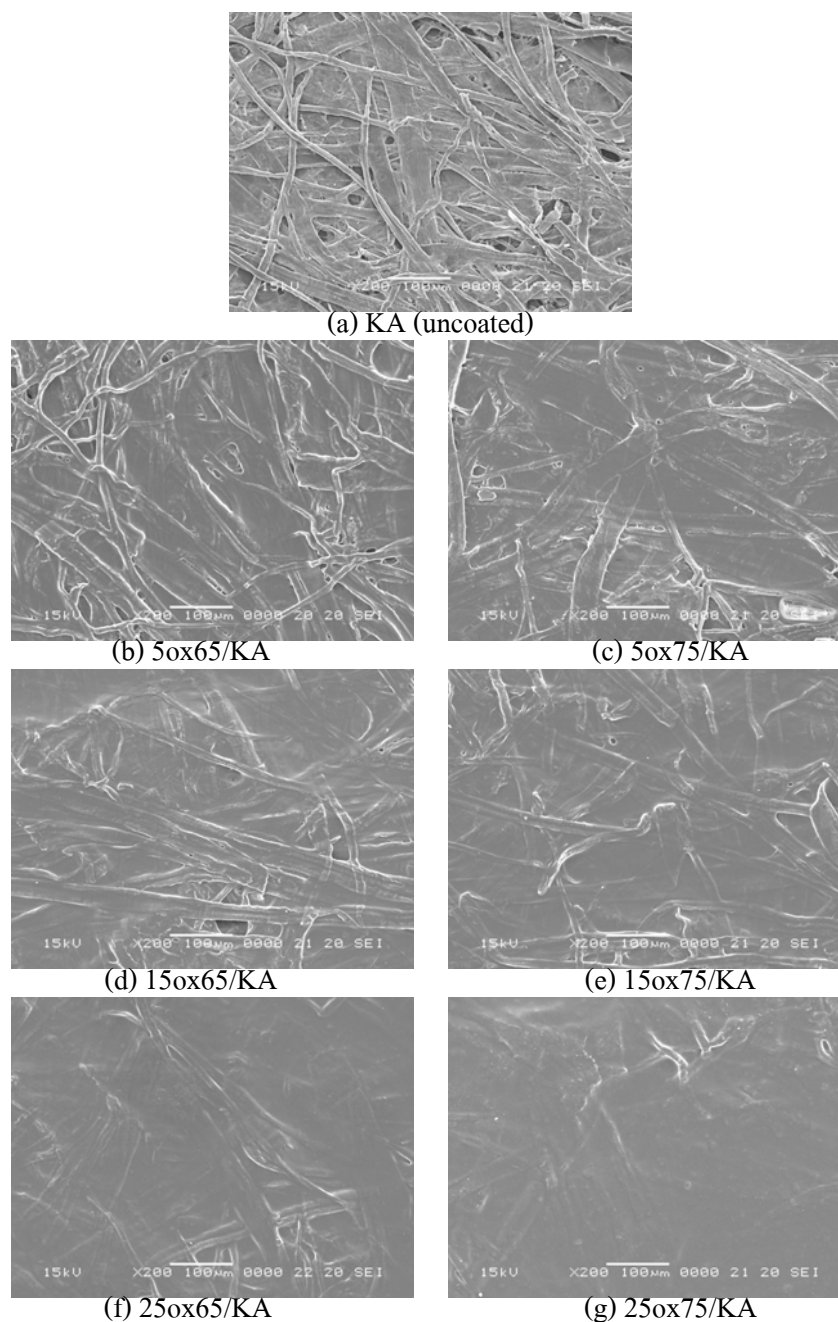
จากตารางที่ 5 พบว่าที่อุณหภูมิของสารเคลือบระดับเดียวกันการเพิ่มความเข้มข้นส่งผลให้มีปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศเพิ่มขึ้นทั้งในกรณีของออกซิไดซ์สารสกัดและแคตไอออนิกสารสกัด ขณะที่การเพิ่มอุณหภูมิไม่ได้ส่งผลชัดเจนต่อการเพิ่มปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศ อย่างไรก็ตามชนิดของสารสกัดที่แตกต่างกันส่งผลให้มีปริมาณของสารสกัดค้ำบนกระดาศแตกต่างกัน โดยปริมาณของสารสกัดค้ำบนกระดาศหลังเคลือบแคตไอออนิกสารสกัดจะมากกว่าเมื่อเทียบกับออกซิไดซ์สารสกัด ทั้งนี้เนื่องจากที่ความเข้มข้นระดับเดียวกันสารละลายแคตไอออนิกสารสกัดมีความหนืดสูงกว่าสารละลายออกซิไดซ์สารสกัดจึงอาจส่งผลให้มีปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศสูงกว่า นอกจากนี้พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิของสารเคลือบส่งผลให้ความหนืดลดลงเล็กน้อยจึงทำให้ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมีผลน้อยต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศ ในทางกลับกันการเพิ่มความเข้มข้นจะส่งผลที่ชัดเจนต่อการเพิ่มปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศ เนื่องจากความหนืดที่เพิ่มขึ้นแปรผันตามการเพิ่มความเข้มข้น

ปริมาณสารสกัดค้ำบนกระดาศในตารางที่ 5 นั้นเป็นผลรวมของปริมาณสารสกัดที่ซึมลงไปในเนื้อกระดาศและปริมาณสารสกัดค้ำบนผิวหน้า โดยงานวิจัยนี้ไม่ได้ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์กลไกการแทรกซึมของสารเคลือบลงไปในเนื้อกระดาศ ซึ่งงานวิจัยของ Lipponen (2005) นั้นได้อธิบายไว้ว่า เมื่อมีปริมาณของแข็ง (solid content) ในสารละลายสารสกัดสูงขึ้นตั้งแต่ร้อยละ 8 - 30 สารละลายที่มีความหนืดมากกว่าจะมีการซึมลงไปในแผ่นกระดาศได้น้อยลง ส่งผลให้มีปริมาณสารสกัดอยู่บนผิวหน้ากระดาศมากกว่า ซึ่งปริมาณของสารสกัดที่อยู่บนผิวหน้ากระดาศนั้นจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวหน้า (surface strength) และ bending stiffness ของกระดาศ รวมทั้งช่วยลดความพรุน (porosity) และลดการดูดซึมน้ำมัน (oil absorption) ของ

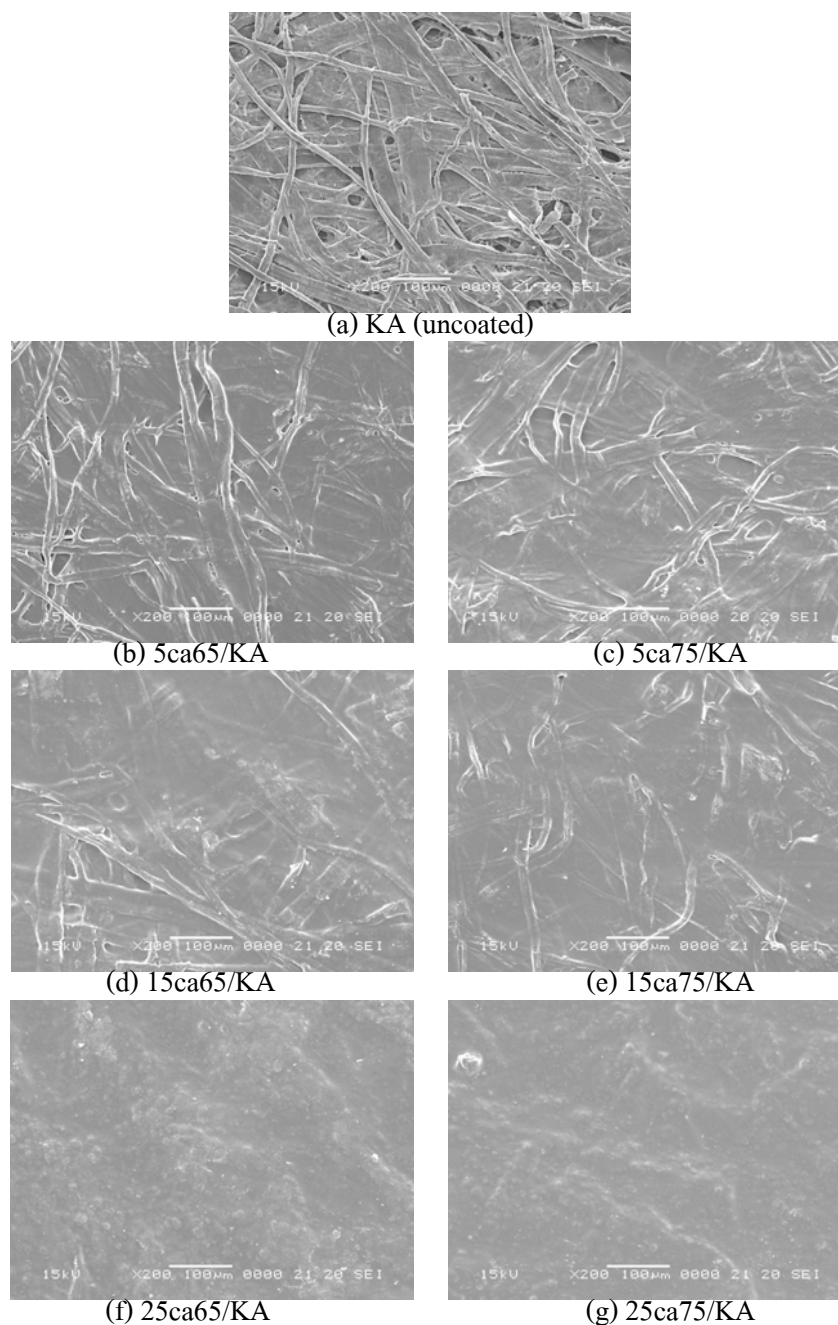
แผ่นกระดาษได้ ในขณะที่สารละลายที่มีความหนืดน้อยกว่าจะมีการซึมลงไปในกระดาษมากกว่า ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความแข็งแรงภายใน (internal strength) ของแผ่นกระดาษนั้นได้มากกว่า

2.3 ลักษณะผิวหน้าของกระดาษกราฟที่จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM)

จากการศึกษาลักษณะผิวหน้าของกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ช โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยายระดับ 200 เท่า พบว่ากระดาษกราฟที่หลังเคลือบจะมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบขึ้นเมื่อเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบซึ่งมีลักษณะพื้นผิวที่ไม่เรียบและเห็นช่องว่างระหว่างเส้นใยอย่างชัดเจน โดยความเรียบจะมากขึ้นหรือช่องว่างระหว่างเส้นใยจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสตาร์ชจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ตามลำดับ (ภาพที่ 12 และภาพที่ 13) ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มข้นที่สูงขึ้นส่งผลให้ความหนืดสูงขึ้น จึงมีปริมาณสตาร์ชตกค้างบนผิวหน้าของกระดาษมากขึ้นทำให้เห็นลักษณะของผิวหน้าที่เรียบขึ้น อย่างไรก็ตามการเพิ่มอุณหภูมิของสารเคลือบยังไม่ปรากฏให้เห็นได้ชัดเจนถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบ ทั้งนี้ในงานวิจัยไม่ได้มีการศึกษาที่ชัดเจนในส่วนของภาพตัดขวางของกระดาษภายหลังการเคลือบ ซึ่งหากมีการศึกษาเพิ่มเติมอาจได้ข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับปริมาณสตาร์ชตกค้างที่ซึมลงไปในเนื้อกระดาษและปริมาณสตาร์ชที่ตกค้างที่ผิวหน้า



ภาพที่ 12 ผิวหน้ากระดาศกราฟท์จาก SEM กำลังขยาย 200 เท่า (a) กระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ
 b) กระดาศเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ชร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (c) กระดาศ
 เคลือบออกซิไคซ์สตาร์ชร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (d)กระดาศเคลือบ
 ออกซิไคซ์สตาร์ชร้อยละ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (e) กระดาศเคลือบออกซิไคซ์
 สตาร์ชร้อยละ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (f) กระดาศเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ชร้อยละ
 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (g) กระดาศเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ชร้อยละ 25 อุณหภูมิ
 สารเคลือบ 75 °ซ



ภาพที่ 13 ผิวหน้ากระดาษกราฟที่จาก SEM กำลังขยาย 200 เท่า (a) กระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ, (b) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาบิลไรเซอร์ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (c) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาบิลไรเซอร์ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (d) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาบิลไรเซอร์ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (e) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาบิลไรเซอร์ 15 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ, (f) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาบิลไรเซอร์ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ, (g) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาบิลไรเซอร์ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 75 °ซ

เมื่อเปรียบเทียบชนิดของสสารที่ตัดแปรที่แตกต่างกันต่อลักษณะผิวหน้าของกระดาศ
 กราฟพบว่า กระดาศกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สสารและแคดไอออนิกสสารที่ความเข้มข้น
 ร้อยละ 5 และร้อยละ 15 มีลักษณะผิวหน้าที่เรียบขึ้นตามลำดับ ในขณะที่การเคลือบด้วยแคดไอ
 ออนิกสสารที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ทั้งอุณหภูมิ 65 °C และ 75 °C ส่งผลให้ลักษณะผิวหน้าของ
 กระดาศเคลือบมีลักษณะขรุขระกว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สสาร และผิวหน้าของ
 กระดาศเคลือบที่อุณหภูมิ 65 °C จะมีลักษณะขรุขระที่ชัดเจนกว่าที่ 75 °C ซึ่งลักษณะดังกล่าวไม่
 สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่า แต่จะสังเกตได้จากภาพลักษณะผิวหน้าจากกล้องจุลทรรศน์
 อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า เนื่องจากในระหว่างการเตรียมสสารละลายก่อน
 เคลือบนั้นจะต้องมีการให้ความร้อนและกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ 95 ± 5 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่
 สสารเกิดการแตกตัวและละลายอย่างสมบูรณ์ได้สารละลายสสารที่มีลักษณะใส จากนั้นจึงนำ
 สารละลายที่ได้ไปไว้ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 65 °C และ 75 °C เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้
 อุณหภูมิของสารละลายก่อนเคลือบตามที่ต้องการ จากการทดลองสังเกตเห็นว่าสารเคลือบแคดไอ
 ออนิกสสารจะมีลักษณะที่ขุ่นและมีตะกอนอยู่ในสารละลายเมื่อเทียบกับสารเคลือบออกซิไดซ์
 สสารซึ่งมีลักษณะใส โดยปริมาณตะกอนของแคดไอออนิกสสารจะเพิ่มขึ้นเมื่อทิ้งสารละลายไว้
 นานขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างโมเลกุลของแคดไอออนิกสสารที่ตัดแปรให้มี
 ประจุบวกอยู่ในสายโซ่พอลิเมอร์ ในอุตสาหกรรมกระดาศนิยมนำมาใช้เพิ่มความสามารถในการจับ
 กับเยื่อ (retention aid) (Hans *et al.*, 1998; Zhang, 2003) ดังนั้นเมื่อมีความเข้มข้นเพียงพอและมี
 อุณหภูมิที่เหมาะสม แคดไอออนิกสสารจึงมีโอกาสดับมาจัดเรียงตัวเกิดพันธะกันใหม่ได้ ส่งผล
 ให้เกิดตะกอนปนอยู่ในสารละลาย

2.4 สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบด้วยสไตรช์คัดแปร์

2.4.1 ความต้านทานแรงดันทะลุ

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สไตรช์และแคตไอออนิกสไตรช์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 25 พบว่า การเคลือบกระดาษกราฟด้วยสไตรช์คัดแปร์ต่างชนิดคือ ออกซิไดซ์สไตรช์และแคตไอออนิกสไตรช์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ ข1) โดยกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สไตรช์ทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.8 - 12.4 และกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสไตรช์ทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.3 - 16.0 เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 6) ซึ่งการเคลือบด้วยแคตไอออนิกสไตรช์ทุกความเข้มข้น ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุมากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สไตรช์

ตารางที่ 6 ความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบสไตรช์

ความเข้มข้น ของสไตรช์ (ร้อยละ)	อุณหภูมิ ของ สารเคลือบ (°C)	ความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ (kg/cm ²)			
		เคลือบออกซิไดซ์สไตรช์		เคลือบแคตไอออนิกสไตรช์	
		ค่าทดสอบ	% ΔE ¹	ค่าทดสอบ	% ΔE ¹
Control (uncoated KA)		69.1 ± 2.1 ^c	-	68.9 ± 1.4 ^d	-
5	65	75.2 ± 1.7 ^b	8.8	79.4 ± 2.4 ^{ab}	15.2
	75	77.7 ± 1.8 ^a	12.4	78.3 ± 1.5 ^{abc}	13.6
15	65	77.7 ± 2.1 ^a	12.4	79.9 ± 1.7 ^a	16.0
	75	76.9 ± 1.4 ^{ab}	11.3	78.0 ± 1.2 ^{abc}	13.2
25	65	76.0 ± 1.9 ^{ab}	10.0	77.4 ± 1.8 ^c	12.3
	75	76.5 ± 2.0 ^{ab}	10.7	77.8 ± 1.5 ^{bc}	12.9

¹ % ΔE หมายถึง ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบของกระดาษเคลือบเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ

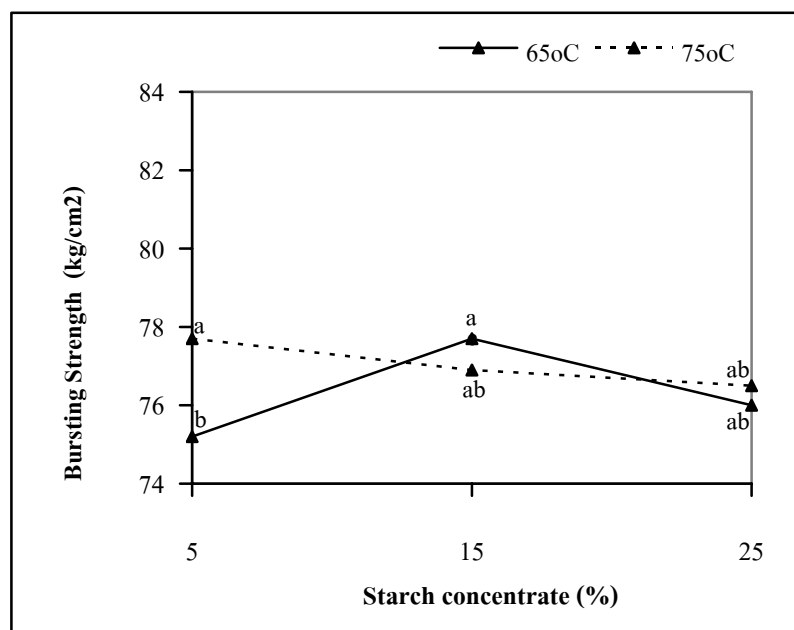
^{abcd} ตัวอักษรต่างกันในแต่ละแถว หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบ ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข2) พบว่า ในกรณีของสารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบมีปฏิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงดันทะลุ อย่างไรก็ตามสำหรับสารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชนั้นไม่พบว่าความเข้มข้นและอุณหภูมิมีปฏิริยาสัมพันธ์ต่อกันทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข3)

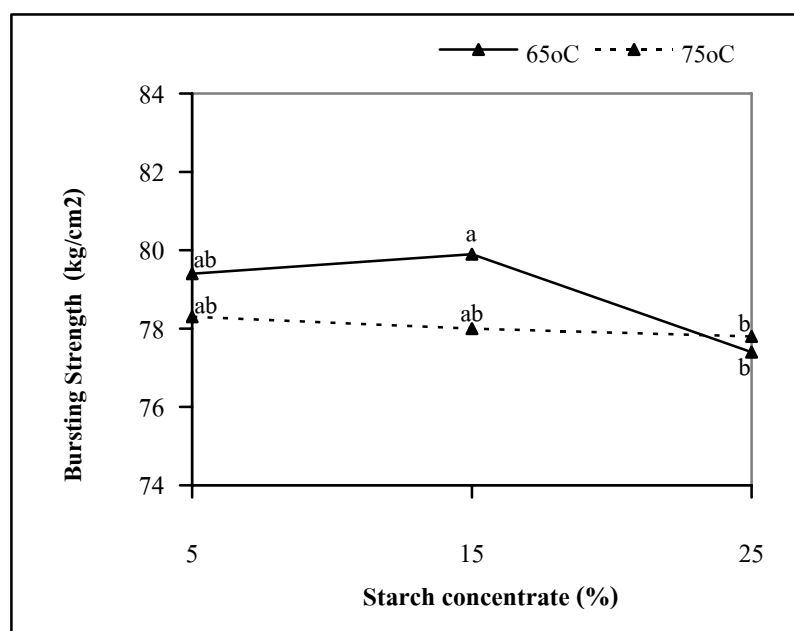
จากการพิจารณาผลของปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของ สารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช (ภาพที่ 14) พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่าเพิ่มร้อยละ 3.3 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุลดลงร้อยละ 1.5 อย่างไรก็ตามค่าความต้านทานแรงดันทะลุที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 นั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75 °ซ แม้ว่าจะมีการเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 พบว่าค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ

เมื่อศึกษาเพิ่มเติมถึงค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ ของสารเคลือบพบว่า ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และร้อยละ 15 ไม่ว่าจะเป็นที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ หรือ 75 °ซ มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุไม่แตกต่างกันในทางสถิติ (ภาพที่ 15) อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ทั้งที่อุณหภูมิ 65 °ซ และ 75 °ซ พบว่า มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุน้อยกว่าที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองพบว่า ค่าความต้านทานแรงดันทะลุจะเพิ่มขึ้นได้หากความเข้มข้นของสารเคลือบไม่สูงเกินไป ทั้งนี้อาจอธิบายได้ว่า ถ้าความเข้มข้นสูงเกินไปก็จะส่งผลให้สารละลายมีความหนืดที่สูงมากจนไม่สามารถแทรกซึมลงไปได้ในผิวกระดาษ ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษไม่สูงเท่าที่ควร ในทางกลับกันหากความเข้มข้นของสารละลายน้อยเกินไปก็จะมีปริมาณสตาร์ชที่ช่วยในการยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใย ณ บริเวณที่ผิวหน้าน้อยและจะส่งผลต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุได้เช่นกัน จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารเคลือบของออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชคือ ที่ร้อยละ 5 - 15



ภาพที่ 14 ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์
สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ



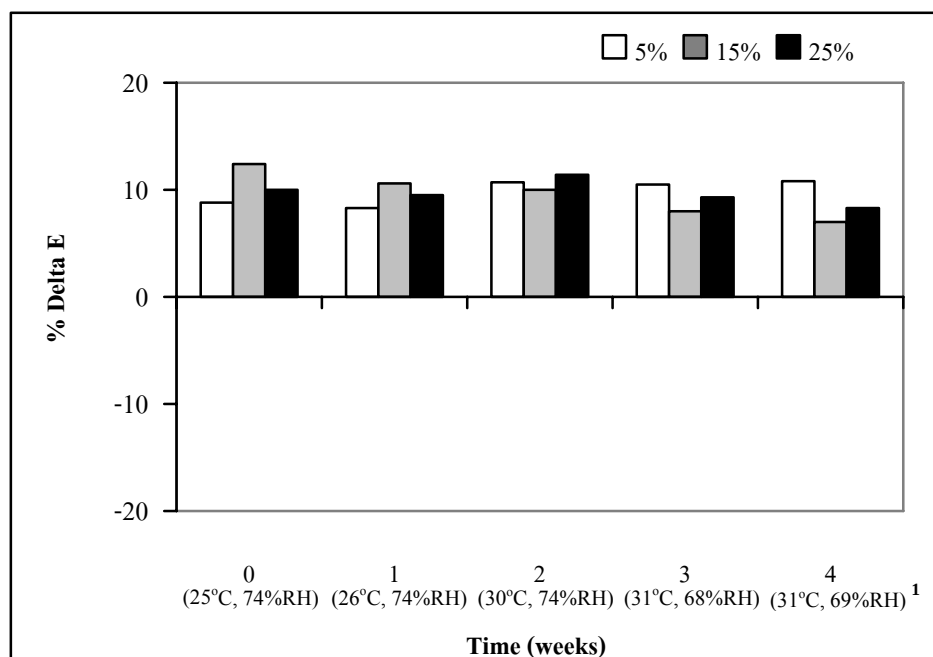
ภาพที่ 15 ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิก
สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

หมายเหตุ: ^{ab} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

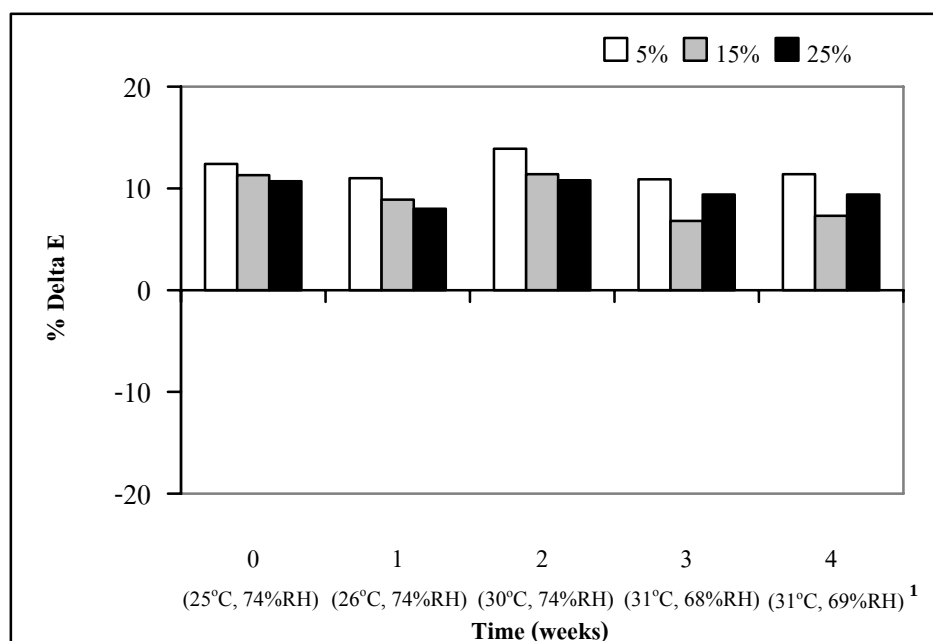
เมื่อนำกระดาศกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ กระดาศกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์ สตาร์ชและกระดาศกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชไปเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริงที่อุณหภูมิ 25 - 32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74 เป็นเวลา 1 - 4 สัปดาห์พบว่า กระดาศกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและกระดาศกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ มีค่าความต้านทานแรงดันทะลุสูงกว่ากระดาศกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบตลอดระยะเวลาในการเก็บ (ภาพที่ 16 และภาพที่ 17) จากการสังเกตพบว่า ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาศเคลือบทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ แปรตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณความชื้นในอากาศเป็นหลักโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บ อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดหรือคายความชื้นของกระดาศหลังเคลือบสตาร์ชที่สภาวะในการเคลือบต่างๆ อาจมีความแตกต่างกันซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของกระดาศกราฟที่ภายหลังการเคลือบที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ มีความแตกต่างกัน

จากการพิจารณาเปรียบเทียบค่าร้อยละของความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาศเคลือบสตาร์ชคัดแปรทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ เทียบกับกระดาศกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ จากภาพที่ 18 แสดงให้เห็นว่าการใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและสารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ ส่งผลให้กระดาศเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุที่มากกว่ากระดาศที่ที่ไม่ได้เคลือบทั้งภายหลังจากเคลือบ (ภาพที่ 18) และตลอด 4 สัปดาห์ภายใต้การจำลองสภาวะในการเก็บจริง (ภาพที่ 16 และภาพที่ 17) โดยที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบระดับเดียวกัน แคตไอออนิกสตาร์ชส่งผลให้กระดาศเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุที่มากกว่าออกซิไดซ์สตาร์ช

หากพิจารณาที่ความเข้มข้นระดับเดียวกัน ปริมาณสตาร์ชตกค้างบนกระดาศเมื่อเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ชจะมากกว่าเมื่อเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ช อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากระดาศเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่มีปริมาณสตาร์ชตกค้างใกล้เคียงกัน (ตารางผนวกที่ ค1) พบว่า กระดาศเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชยังคงมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุสูงกว่ากระดาศเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเล็กน้อย จึงอาจสรุปได้ว่าการเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ชสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดันทะลุได้มากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ช (พิจารณาจากค่า $\% \Delta E$) ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณสตาร์ชตกค้างต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาศเคลือบสตาร์ชคัดแปรทั้งสองชนิดเพื่อหาข้อสรุปที่ชัดเจน



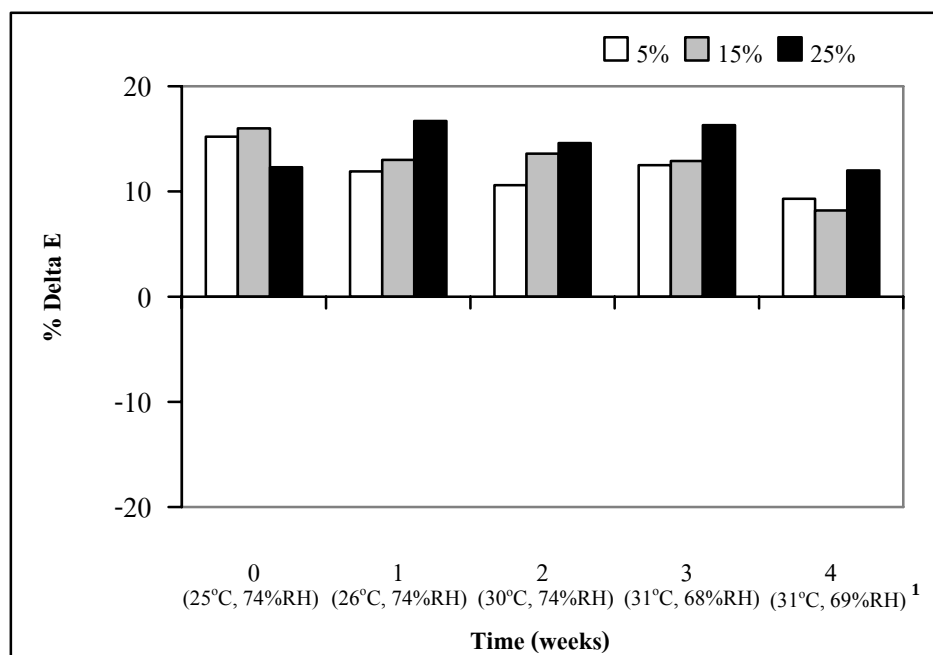
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



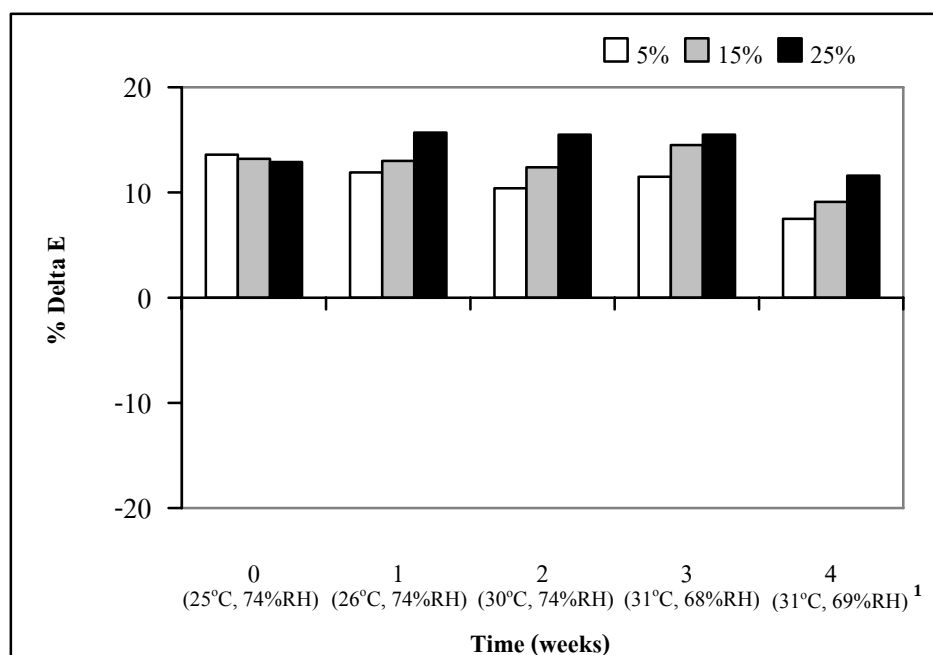
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 16 ร้อยละของค่าความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



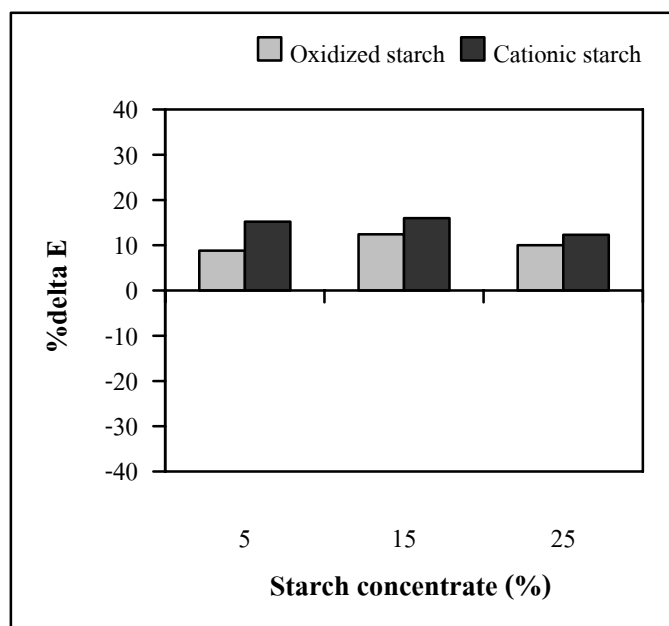
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



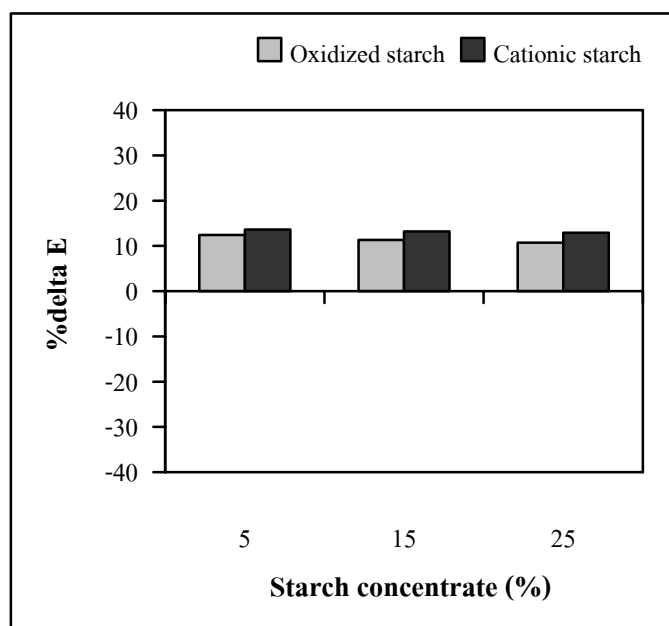
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 17 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตราซ์เทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 18 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ

2.4.2 ความต้านทานแรงดึงและการยึดตัว

ก. แนว MD

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 25 พบว่าการเคลือบกระดาศด้วยสตาร์ชต่างชนิด คือ ออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ช ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวแนว MD ของกระดาศเคลือบแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ ข4) โดยกระดาศกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.2 ส่วนกระดาศกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD เพิ่มขึ้นร้อยละ 11.2 – 14.6 เมื่อเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาศกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช

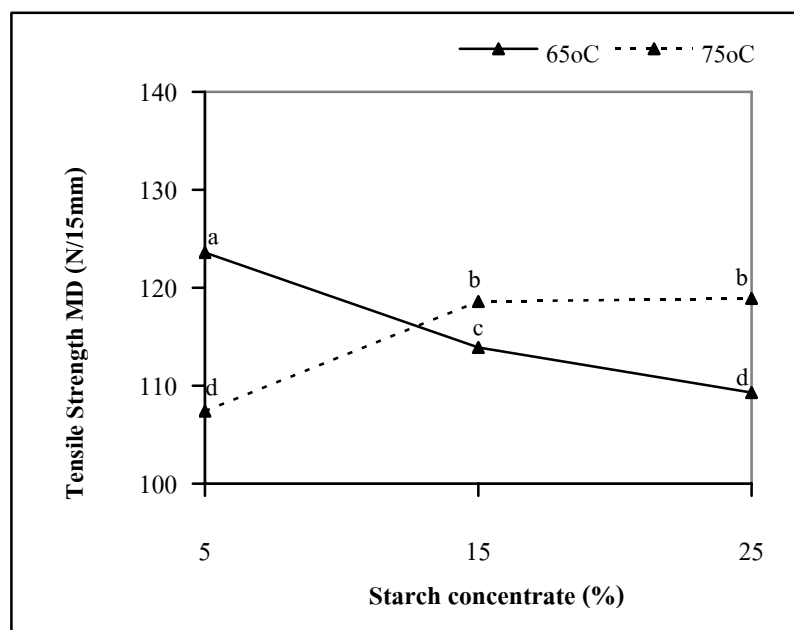
ความ เข้มข้น ของสตาร์ช (ร้อยละ)	อุณหภูมิ ของ สารเคลือบ (°ซ)	ความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาศกราฟท์ (N/15mm)			
		เคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช		เคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	
		ค่าทดสอบ	% ΔE ¹	ค่าทดสอบ ¹	% ΔE ¹
Control (uncoated KA)		119.8 ± 1.8 ^b	-	97.3 ± 1.8 ^c	-
5	65	123.6 ± 1.7 ^a	3.2	108.4 ± 1.2 ^b	11.4
	75	107.4 ± 1.9 ^d	-10.4	110.8 ± 1.9 ^a	13.9
15	65	113.9 ± 2.0 ^c	-4.9	111.5 ± 1.0 ^a	14.6
	75	118.6 ± 0.9 ^b	-1.0	108.1 ± 1.5 ^b	11.2
25	65	109.3 ± 1.6 ^d	-8.7	108.4 ± 1.5 ^b	11.4
	75	118.9 ± 1.2 ^b	-0.7	110.1 ± 1.5 ^a	13.2

¹ % ΔE หมายถึง ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบของกระดาศเคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ

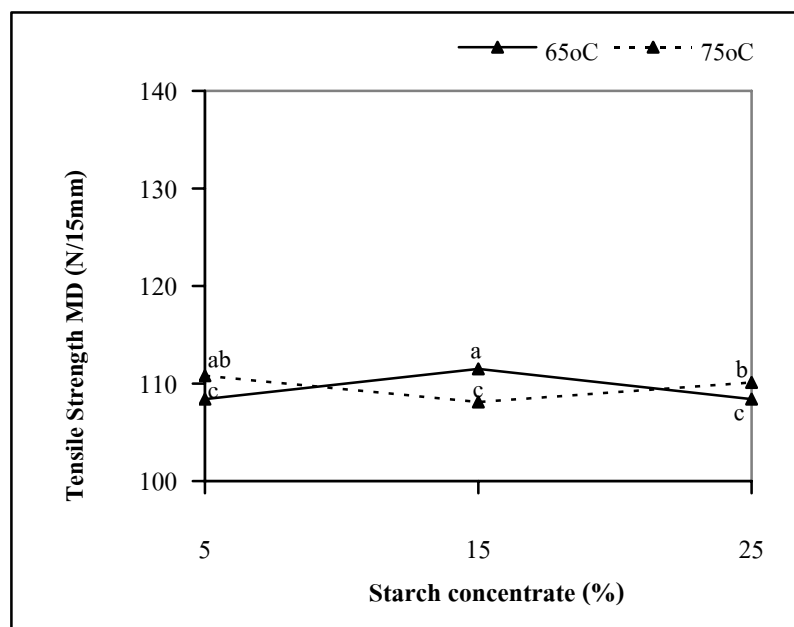
^{abcd} ตัวอักษรต่างกันแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข5) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบมีปฏิกิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 19 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สตาร์ชจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 7.8 และการเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญเช่นกันโดยมีค่าลดลงร้อยละ 4.0 เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.5 ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 นั้นพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 นั้นไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข6) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบมีปฏิกิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 20 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของแคตไอออนิกสตาร์ชจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.8 ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 2.8 และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษเคลือบมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 2.4 ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.8



ภาพที่ 19 ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ



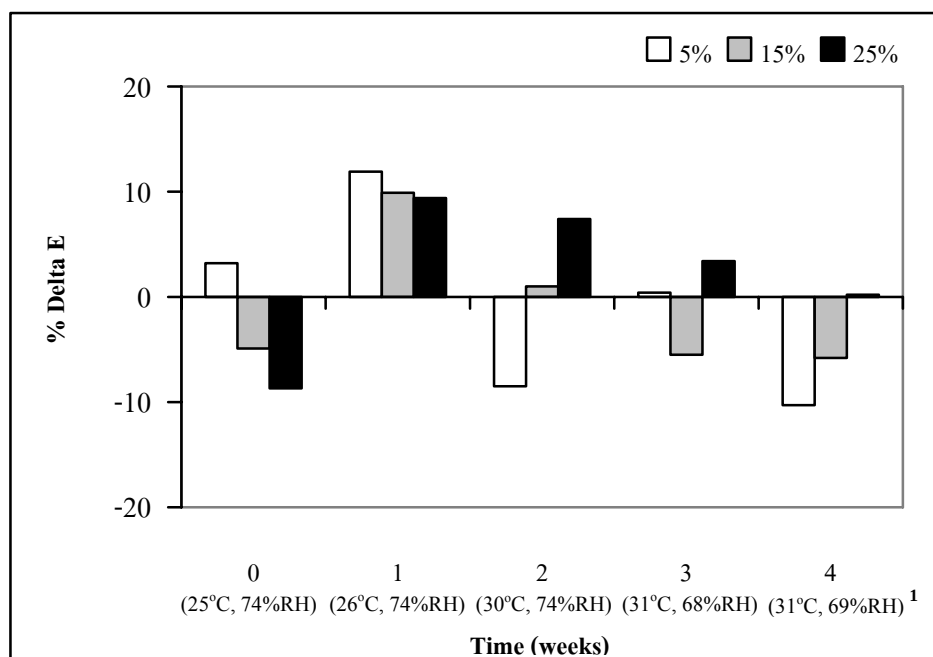
ภาพที่ 20 ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบ แคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

หมายเหตุ: ^{abc} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

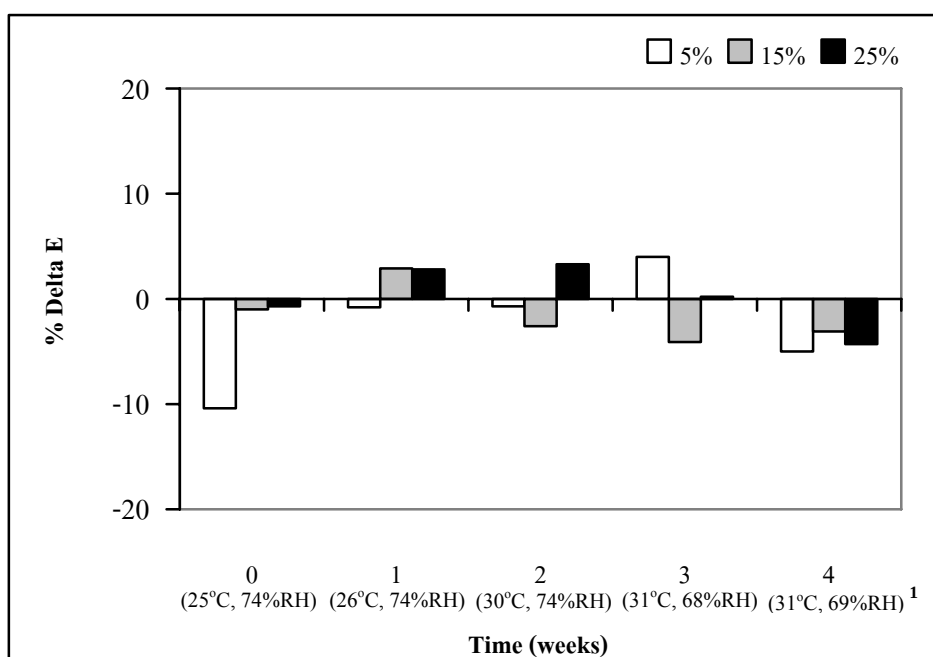
เมื่อนำกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ กระดาษกราฟที่หลังเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ชและกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช ไปเก็บภายใต้การจำลอง สภาพการเก็บจริง (อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) เป็นเวลา 1 - 4 สัปดาห์ ผลการทดสอบแสดงในภาพที่ 21 และภาพที่ 22 และพบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว แนว MD ของกระดาษเคลือบทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ แปรตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของ ความชื้นในอากาศเป็นหลักโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บ ความสามารถในการดูดหรือคาย ความชื้นของกระดาษหลังเคลือบสตาร์ชที่สภาวะในการเคลือบต่างๆ อาจมีความแตกต่างกันซึ่งอาจ ส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ มีความแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละของความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษเคลือบสตาร์ชตัดแปรทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ เทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ (ภาพที่ 23) พบว่าการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบได้ และเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ได้สูงกว่าสารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช โดยกระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ มีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD มากกว่ากระดาษที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์ ภายใต้การจำลองสภาวะในการเก็บจริง แสดงดังภาพที่ 22 อย่างไรก็ตามสารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิดังกล่าว มีความหนืดสูง การควบคุมความสม่ำเสมอของการเคลือบทำได้ยาก ในการเคลือบจึงต้องระวังเรื่องการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารเคลือบ ซึ่งอุณหภูมิที่ลดลงจะส่งผลให้สารเคลือบมีความหนืดเพิ่มขึ้น ดังนั้นอาจจะยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเคลือบจริงในเชิงอุตสาหกรรมได้ ในขณะที่การเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ชทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ (ภาพที่ 21) ยังไม่สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ได้เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์ของการเก็บในการจำลองสภาวะจริง

การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สตาร์ชนั้นพบว่า ไม่ได้ช่วยในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการแทรกซึมของสตาร์ชลงไปในเรื่องกระดาษได้น้อยเมื่อความหนืดสูงขึ้น ทำให้การช่วยยึดเหนี่ยวระหว่างเส้นใยมีน้อยกว่า ในขณะที่แคตไอออนิกสตาร์ชโดยปกติมีความสามารถในการยึดจับกับเยื่อได้ดีกว่า แม้แทรกซึมลงไปในเรื่องกระดาษได้น้อยเมื่อความหนืดสูงขึ้น แต่มีความสามารถในการยึดจับกับเยื่อได้มากกว่า จึงส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ไม่ลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเหมือนกรณีของออกซิไดซ์สตาร์ช



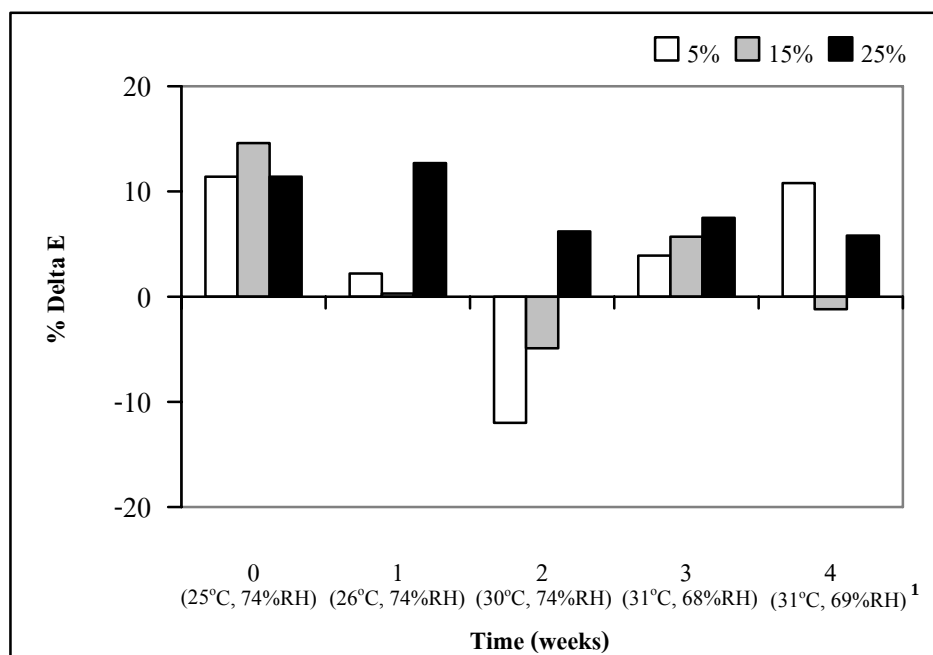
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



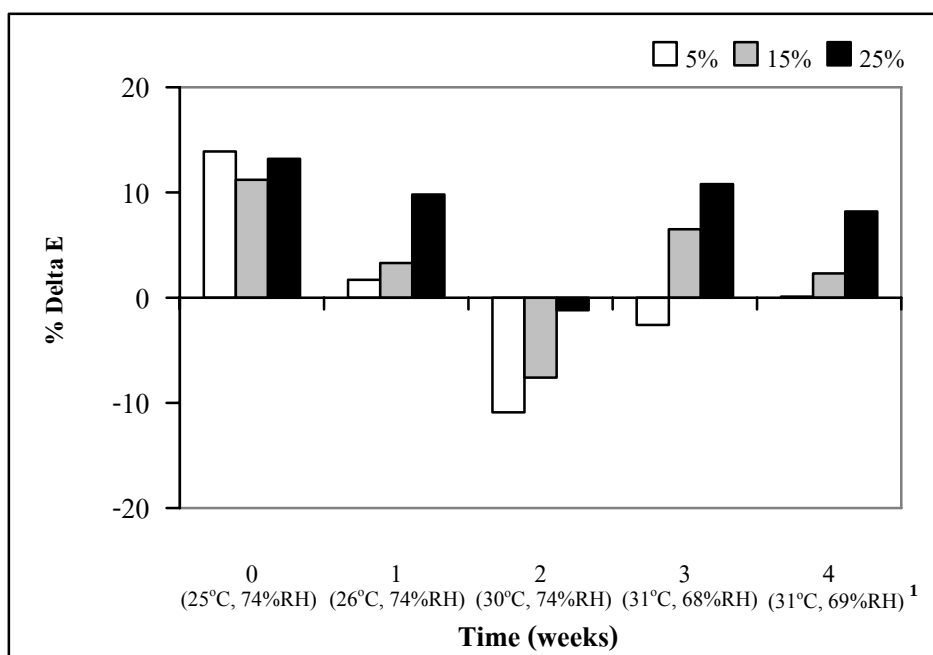
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 21 ร้อยละของค่าความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



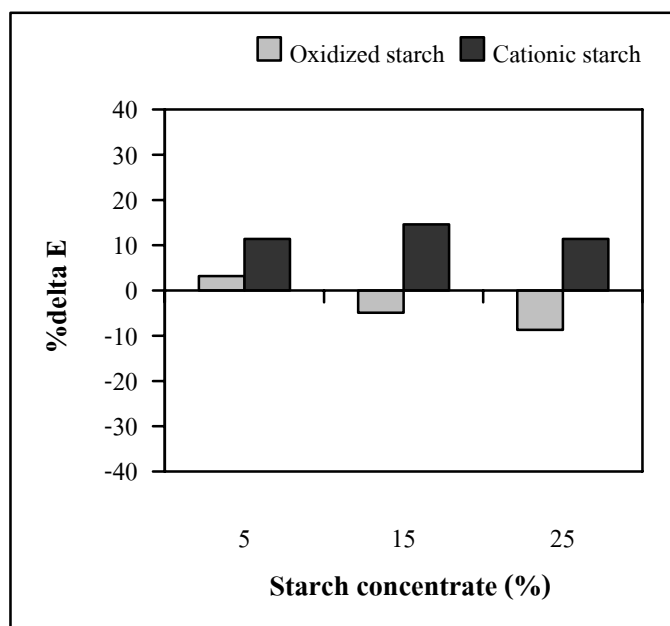
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



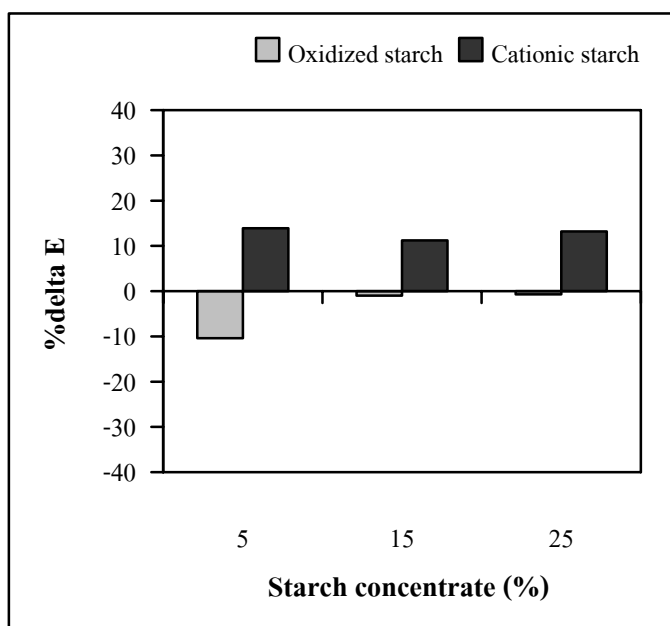
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 22 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคดไอออกไซด์สตรัทซ์เทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 23 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ

ข. แนว CD

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของ กระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 25 พบว่าชนิดของสตาร์ชดัดแปรที่ต่างกันส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวแนว CD แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ ข7) โดยกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD เพิ่มขึ้นร้อยละ 2.3 - 19.6 ในขณะที่กระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD เพิ่มขึ้นร้อยละ 7.6 - 37.5 เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 8)

ตารางที่ 8 ความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบสตาร์ช

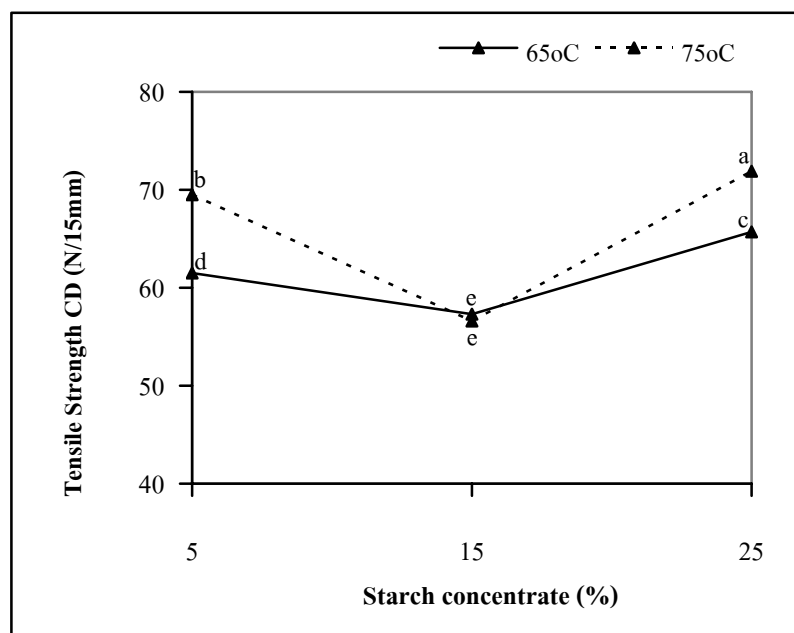
ความ เข้มข้น ของสตาร์ช (ร้อยละ)	อุณหภูมิ ของ สารเคลือบ (°ซ)	ความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟ (N/15mm)			
		เคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช		เคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	
		ค่าทดสอบ	% ΔE ¹	ค่าทดสอบ	% ΔE ¹
Control (uncoated KA)		60.1 ± 1.0 ^c	-	48.9 ± 1.5 ^c	-
5	65	61.5 ± 1.5 ^d	2.3	65.1 ± 1.0 ^b	33.2
	75	69.5 ± 2.0 ^b	15.6	52.6 ± 1.5 ^d	7.6
15	65	57.3 ± 1.2 ^f	-4.8	65.1 ± 1.2 ^b	33.3
	75	56.6 ± 0.9 ^f	-5.9	67.2 ± 1.2 ^a	37.5
25	65	65.7 ± 1.4 ^c	9.3	54.1 ± 1.0 ^c	10.6
	75	71.9 ± 1.6 ^a	19.6	52.8 ± 0.9 ^d	7.9

¹ % ΔE หมายถึง ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบของกระดาษเคลือบเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ

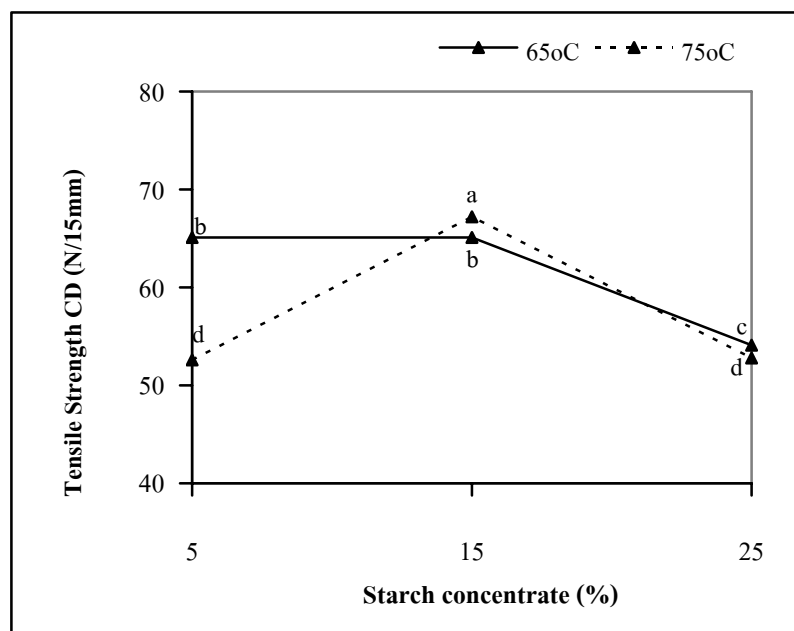
^{abcdef} ตัวอักษรต่างกันแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการพิจารณาปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สสารทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข8) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิมีปฏิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 24 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 18.6 ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.8 และที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 6.9 ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.8

จากการพิจารณาปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสสารทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข9) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิมีปฏิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 25 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของแคตไอออนิกสสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 นั้นค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 17 และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75 °ซ พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 27.9 ในขณะที่การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 21.5



ภาพที่ 24 ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ



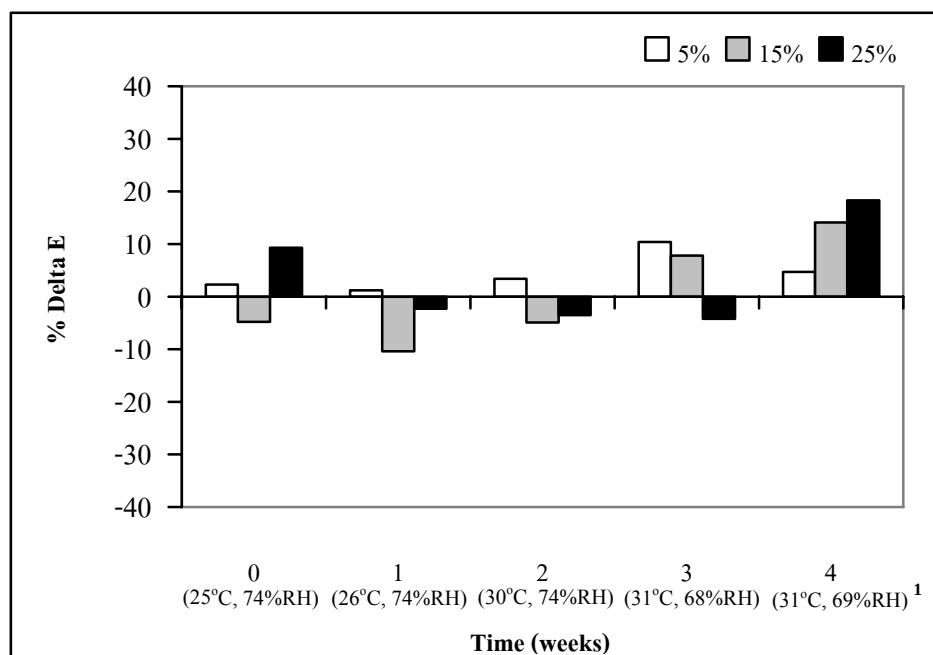
ภาพที่ 25 ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

หมายเหตุ: ^{abcd} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

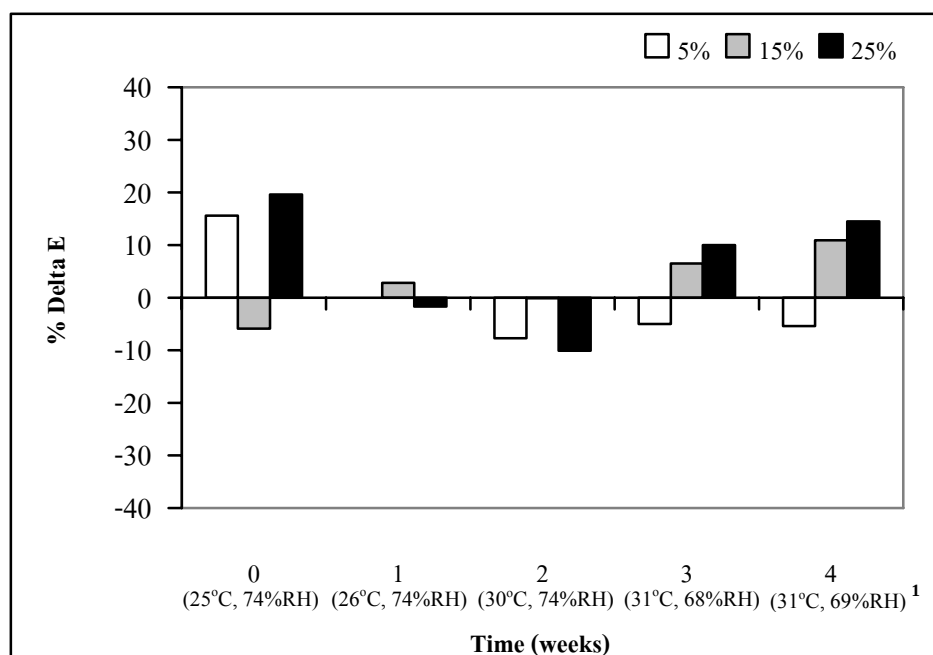
เมื่อนำกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ กระดาษกราฟที่หลังเคลือบ

ออกซิไดซ์สตาร์ชและกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชไปเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) เป็นเวลา 1- 4 สัปดาห์ จากภาพที่ 26 และภาพที่ 27 พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวแนว CD เปลี่ยนตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณความชื้นในอากาศเป็นหลักโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บ อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดหรือคายความชื้นของกระดาษหลังเคลือบสตาร์ชที่สภาวะในการเคลือบต่างๆ อาจมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ มีความแตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละของความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษเคลือบสตาร์ชคัดแปรทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ เทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ (ภาพที่ 28) พบว่าการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ ส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบ ในขณะที่สารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และร้อยละ 25 เท่านั้นที่ส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบ และเมื่อพิจารณาผลของการเก็บในการจำลองสภาวะจริงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ (ภาพที่ 27) พบว่ากระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 เท่านั้นที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD มากกว่ากระดาษที่ที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์ และกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ เท่านั้น (ภาพที่ 26) ที่ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD มากกว่ากระดาษที่ที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์



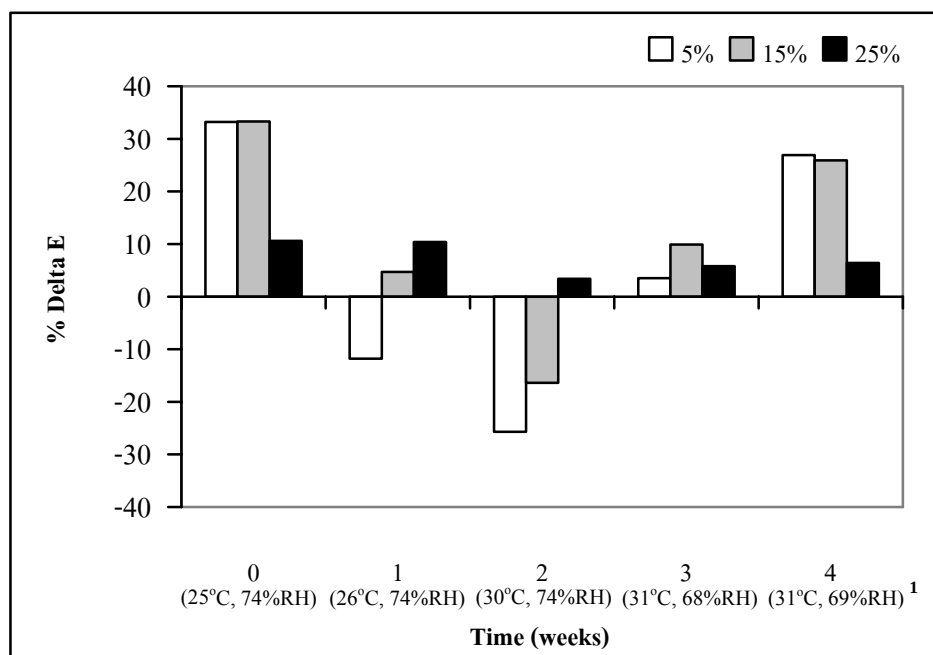
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



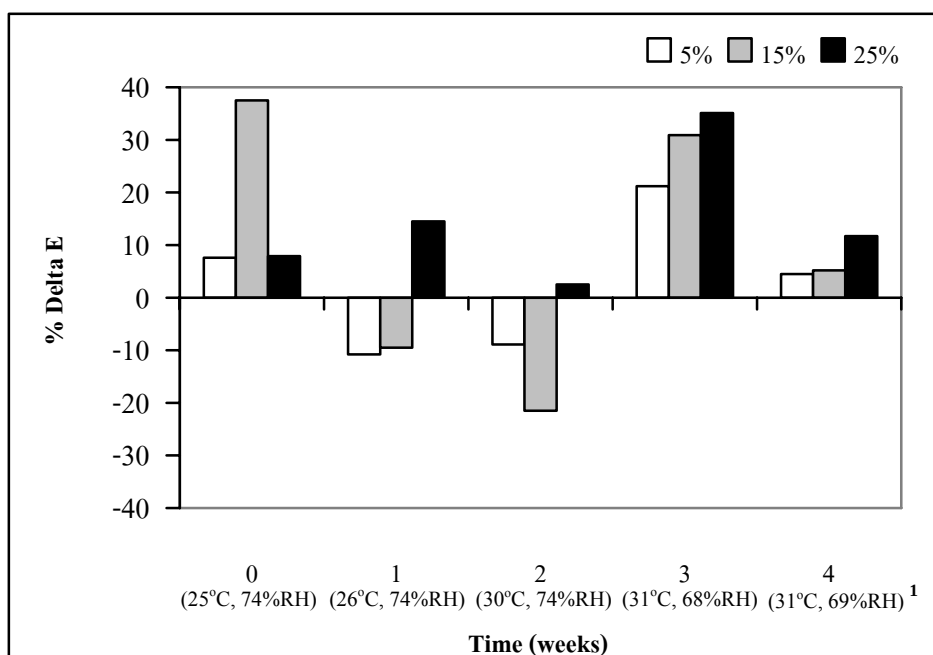
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 26 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



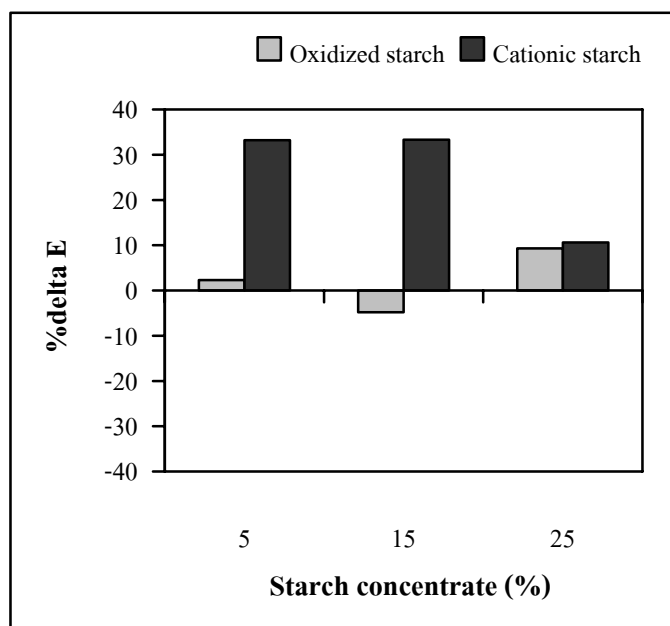
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



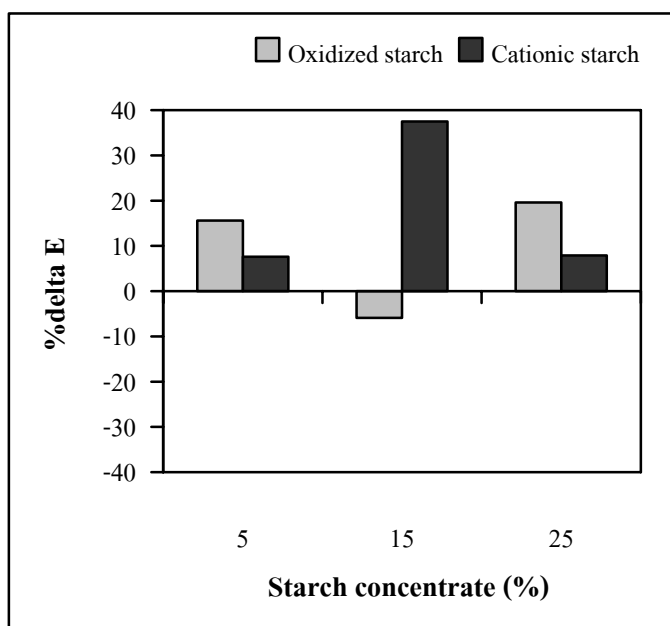
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 27 ร้อยละของความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคโตนิกสตรัทซ์เทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 28 ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่าง ($\% \Delta E$) ความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ

หากพิจารณาที่ความเข้มข้นระดับเดียวกัน ปริมาณสตาร์ชตกค้างบน กระจกาศเมื่อเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ชจะมากกว่าเมื่อเคลือบด้วยออกซิไคซ์สตาร์ช อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD และ CD ของกระจกาศเคลือบ ออกซิไคซ์สตาร์ชและกระจกาศเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่มีปริมาณสตาร์ชตกค้างใกล้เคียงกัน (ตารางผนวกที่ ค2 และ ค3) พบว่า การเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ชสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD และ CD ได้มากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไคซ์สตาร์ช (พิจารณาจากค่า $\% \Delta E$) ทั้งนี้ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับอิทธิพลของปริมาณสตาร์ชตกค้างต่อ ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวของกระจกาศเคลือบสตาร์ชดัดแปรทั้งสองชนิดเพื่อหาข้อสรุป ที่ชัดเจน

จากการทดลอง พบว่าการใช้สารเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้น ร้อยละ 5 อุณหภูมิสารเคลือบ 65 °ซ นั้นมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เคลือบเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD และ CD ภายหลังการเคลือบได้ ส่วนสารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 15 สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวทั้งในแนว MD และ CD ได้ชัดเจนภายหลังการเคลือบเช่นกัน อย่างไรก็ตามเมื่อระยะเวลาในการเก็บผ่านไป ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวของกระจกาศเคลือบมีค่าต่ำกว่ากระจกาศที่ไม่ได้เคลือบในบางช่วงระหว่างการจัดวางสถานะการเก็บ จึงยังสรุปได้ไม่ชัดเจนนักถึงระดับความเข้มข้นที่ เหมาะสมของสารเคลือบออกซิไคซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่จะสามารถช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวของกระจกาศ

จากงานวิจัยของ Han and Krochta (2001) ได้ศึกษาการนำ whey protein isolated (WPI) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) มาเคลือบกระจกาศ พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัว (tensile strength) ลดลง โดย Han and Krochta (2001) ได้อธิบายไว้ว่า การที่ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวลดลงนั้นเกิดจากสาเหตุหลักคือ เส้นใยเซลลูโลสเกิดการบวม (swelling) เนื่องจากการซึมผ่านของตัวทำละลายในระหว่างการเคลือบ นอกจากนี้ อาจเกิดจากสารเคลือบบางส่วนเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของเส้นใยเซลลูโลสในกระจกาศและไปรบกวนการเกิดพันธะระหว่างเส้นใย โดยการรบกวนของสารเคลือบดังกล่าวจะส่งผลในการลดการเกิดปฏิกิริยาระหว่างเส้นใยทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวของกระจกาศเคลือบลดลง

2.4.3 ความต้านทานแรงกดวงแหวน

ก. แนว MD

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและเคลือบไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 25 พบว่าชนิดของสตาร์ชดัดแปรที่ต่างกันส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาศเคลือบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ ข10) โดยกระดาศกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD เพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 - 16.4 และกระดาศกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD เพิ่มขึ้นร้อยละ 10.4 - 57.2 เมื่อเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 9)

ตารางที่ 9 ความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาศกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช

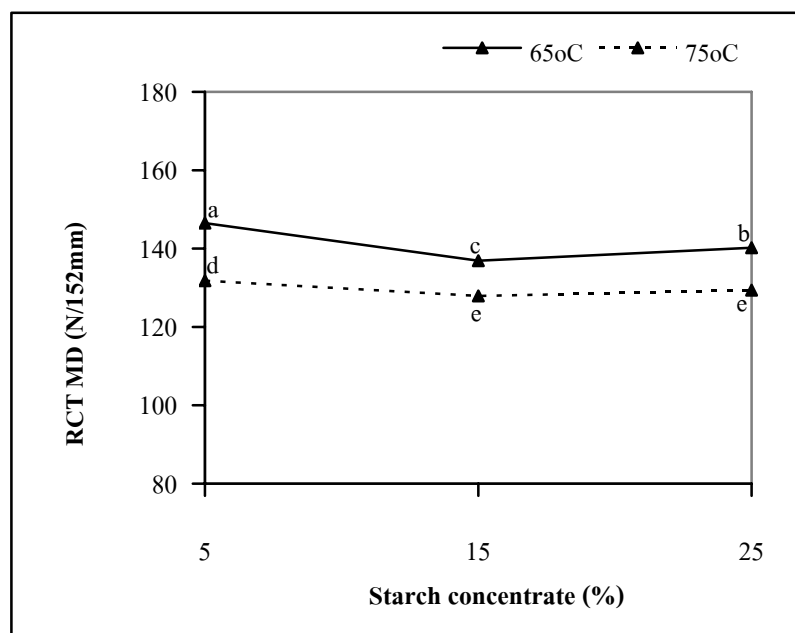
ความ เข้มข้น ของสตาร์ช (ร้อยละ)	อุณหภูมิ ของ สารเคลือบ (°ซ)	ความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาศกราฟท์ (N/152mm)			
		เคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช		เคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	
		ค่าทดสอบ	% ΔE ¹	ค่าทดสอบ	% ΔE ¹
Control (uncoated KA)		125.9 ± 1.0 ^f	-	111.4 ± 1.9 ^d	-
5	65	146.5 ± 1.8 ^a	16.4	175.1 ± 2.3 ^c	57.2
	75	131.8 ± 1.2 ^d	4.6	159.2 ± 2.0 ^f	42.9
15	65	136.9 ± 1.8 ^c	8.7	126.9 ± 1.4 ^g	13.9
	75	127.9 ± 2.0 ^c	1.5	141.4 ± 2.2 ^b	26.9
25	65	140.2 ± 1.7 ^b	11.3	128.4 ± 2.3 ^a	15.2
	75	129.4 ± 2.4 ^c	2.7	123.0 ± 2.5 ^c	10.4

¹ % ΔE หมายถึง ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบของกระดาศเคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ

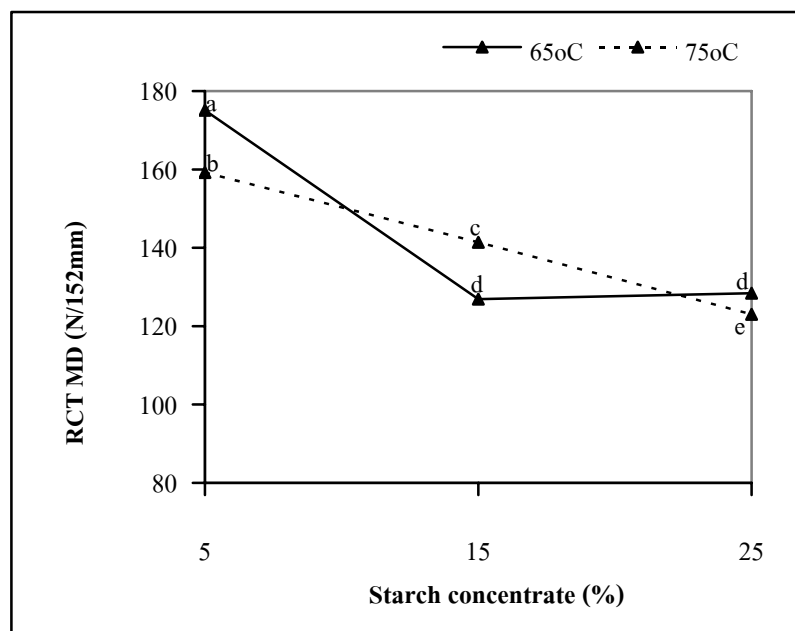
abcdefg ตัวอักษรต่างกันแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สแตร์ทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข11) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบมีปฏิกิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 29 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สแตร์จากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 6.6 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.4 และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 3.3 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ในทางสถิติ

เมื่อพิจารณาปฏิกิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสแตร์ทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข12) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบมีปฏิกิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 30 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของแคตไอออนิกสแตร์จากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 27.5 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 11.2 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 13.0



ภาพที่ 29 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ



ภาพที่ 30 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

หมายเหตุ: ^{abcd} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

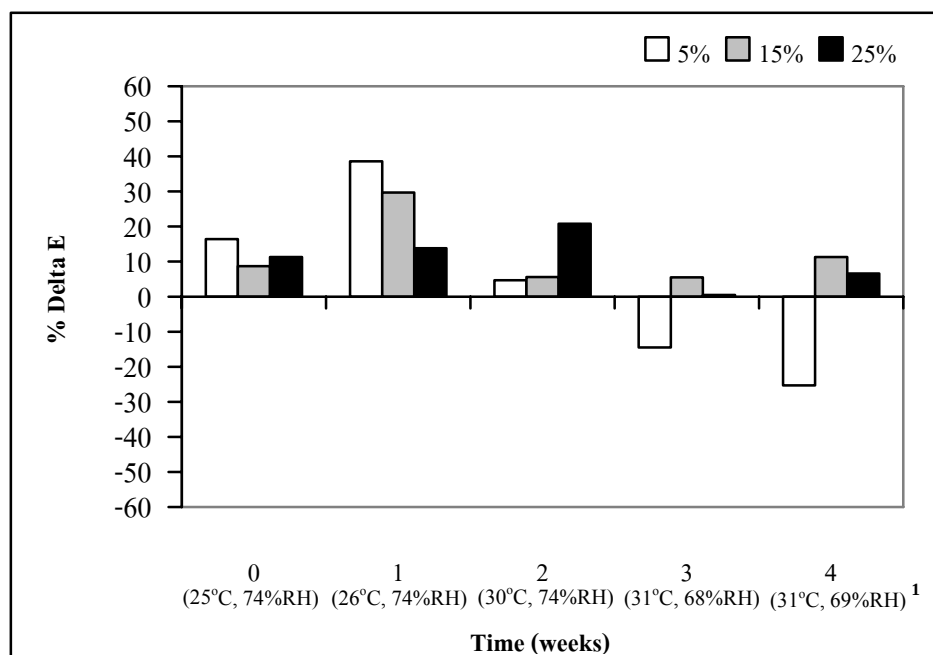
จากผลการทดลองอาจอธิบายได้ว่า ความหนืดและความเข้มข้นของสารเคลือบมีอิทธิพลมากต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของค่าความต้านทานแรงกดวงแหวน โดยเมื่อความหนืดของสารเคลือบเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนลดลงได้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการที่มีปริมาณสารที่จะสามารถแทรกซึมลงไปในเรื่องกระดาษลึกลงไปกว่าที่ระดับผิวหน้ามีน้อย จึงอาจส่งผลให้ความสามารถในการยึดเกาะระหว่างเส้นใยภายในเนื้อกระดาษ และความสามารถในการรับแรงกดในแนวตั้งมีค่าไม่สูงเท่าที่ควร เมื่อพิจารณาที่ระดับความเข้มข้นเท่ากันหากมีการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งส่งผลให้ความหนืดลดลงเล็กน้อย แต่กลับส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเกิดการบวมตัวของเส้นใยหรือการรบกวนการเกิดพันธะระหว่างเส้นใยจากการแทรกซึมลงไปในน้ำที่มากเกินไป ซึ่งในทีมนำทำหน้าที่เป็นตัวทำละลาย หากพิจารณาจากผลการทดลอง พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับสารละลายสารทั้งสองชนิดที่จะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD คือ ที่ร้อยละ 5 และอุณหภูมิของสารละลายก่อนเคลือบ 65 °C การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลของการทำ internal sizing และการศึกษากลไกการแทรกซึมของสารเคลือบต่อสมบัติด้านความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษจะทำให้ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนขึ้น

เมื่อนำกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ กระดาษกราฟที่หลังเคลือบ ออกซิไดซ์สารและกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคดไอออนิกสสารไปเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (อุณหภูมิ 25 - 32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) เป็นเวลา 1- 4 สัปดาห์ จากภาพที่ 31 และภาพที่ 32 พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ แปรตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณความชื้นในอากาศเป็นหลักโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บ อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดหรือคายความชื้นของกระดาษหลังเคลือบสารที่สภาวะในการเคลือบต่างๆ อาจมีความแตกต่างกันซึ่งอาจส่งผลให้สมบัติทางกายภาพของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ มีความแตกต่างกัน

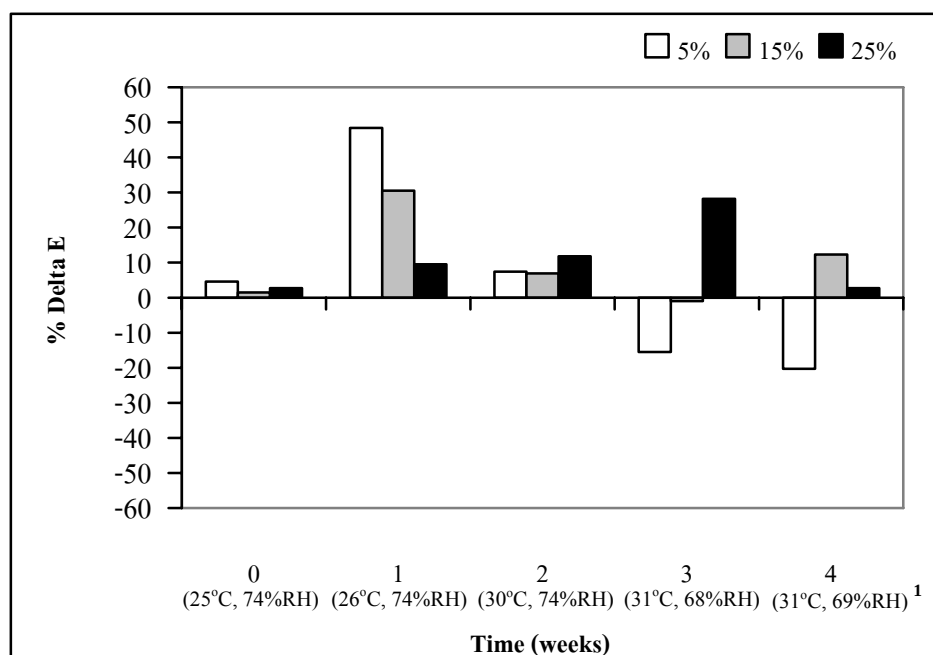
เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละของความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบสารคัดแปรทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ เทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ (แสดงดังภาพที่ 33) พบว่า การใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สารและแคดไอออนิกสสารทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ให้กับกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบได้ โดยการใช้

สารเคลือบแคตไอออนิกสเต็มทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD สูงกว่าเมื่อเทียบกับการใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สเต็ม

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบด้วยแคตไอออนิกสเต็ม (ภาพที่ 33) พบว่า กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสเต็มที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 นั้นมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD มากกว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 แต่เมื่อพิจารณาผลของการเก็บกระดาษเคลือบไว้ภายใต้การจำลองสภาวะจริงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ (ภาพที่ 32) พบว่า กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสเต็มเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 เท่านั้น ที่มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD มากกว่ากระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง อย่างไรก็ตามพบว่าที่ความเข้มข้นดังกล่าวของสารเคลือบแคตไอออนิกสเต็มมีความหนืดสูง อาจจะยังไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเคลือบจริงในเชิงอุตสาหกรรมได้ ส่วนค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สเต็ม (ภาพที่ 31) พบว่า กระดาษเคลือบออกซิไดซ์สเต็มเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 เท่านั้นที่มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD มากกว่ากระดาษที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง



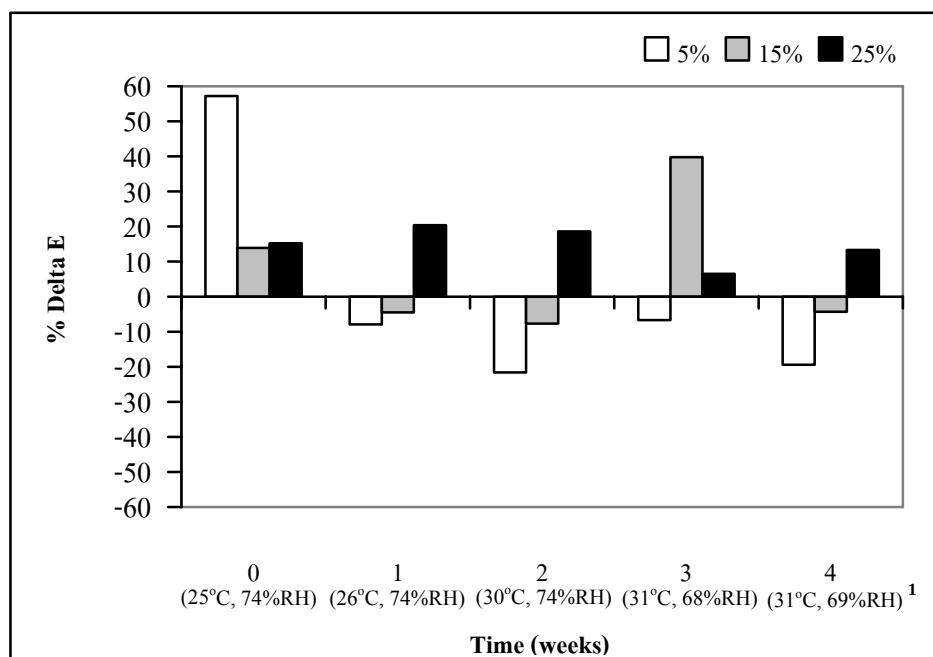
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



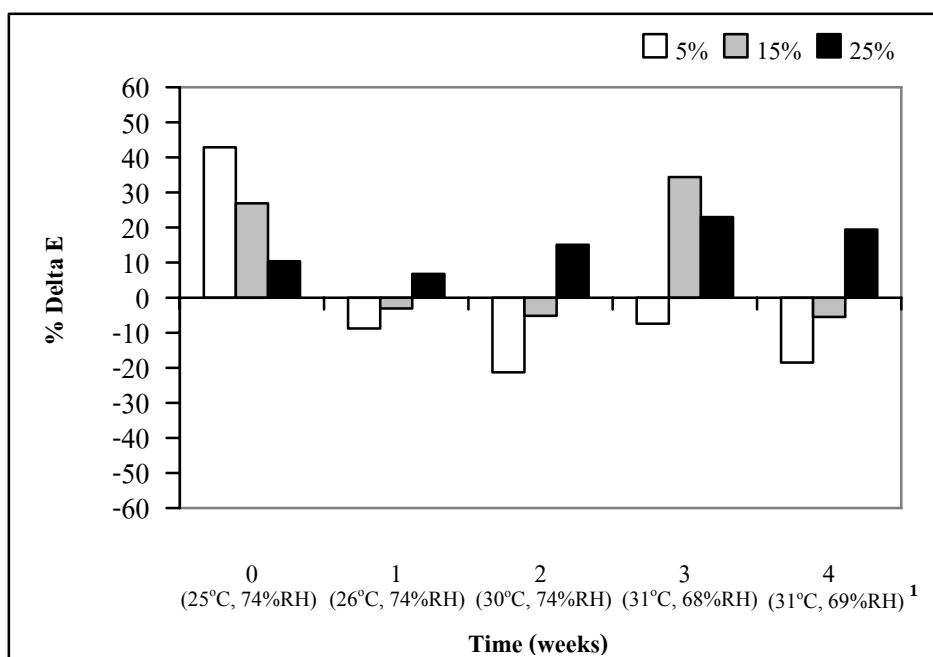
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 31 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



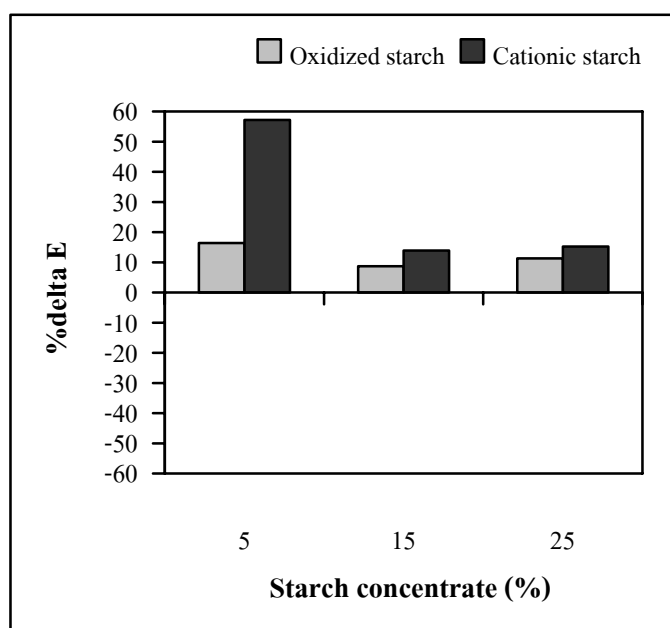
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



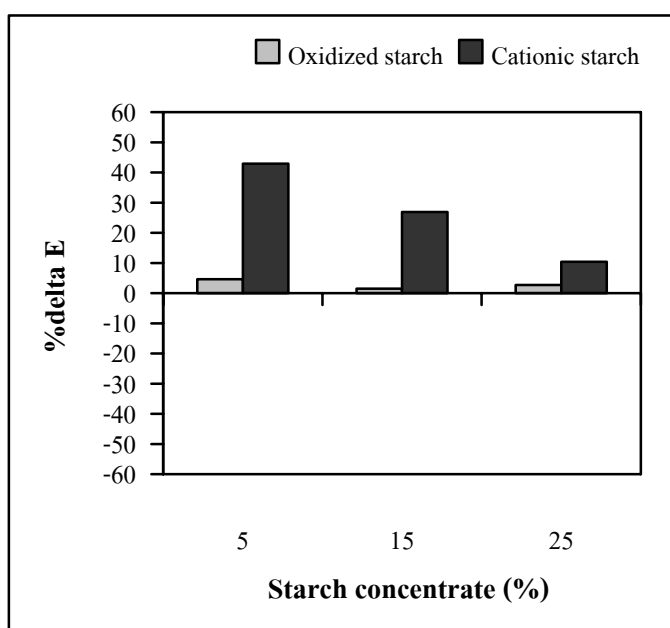
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 32 ร้อยละของค่าความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟหลังเคลือบแคตไอออนิกสตาโรซ์เทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 33 ร้อยละของค่าความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ

ข. แนว CD

เมื่อเปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 25 พบว่าชนิดของสตาร์ชดัดแปรที่ต่างกันส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาศเคลือบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) (ตารางผนวกที่ ข13) โดยกระดาศกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD เพิ่มขึ้นร้อยละ 9.4 และที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ เพิ่มขึ้นร้อยละ 3.1 ตามลำดับ และกระดาศกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD เพิ่มขึ้นร้อยละ 10.7 - 48.5 เมื่อเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ (ตารางที่ 10)

ตารางที่ 10 ความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาศกราฟท์หลังเคลือบสตาร์ช

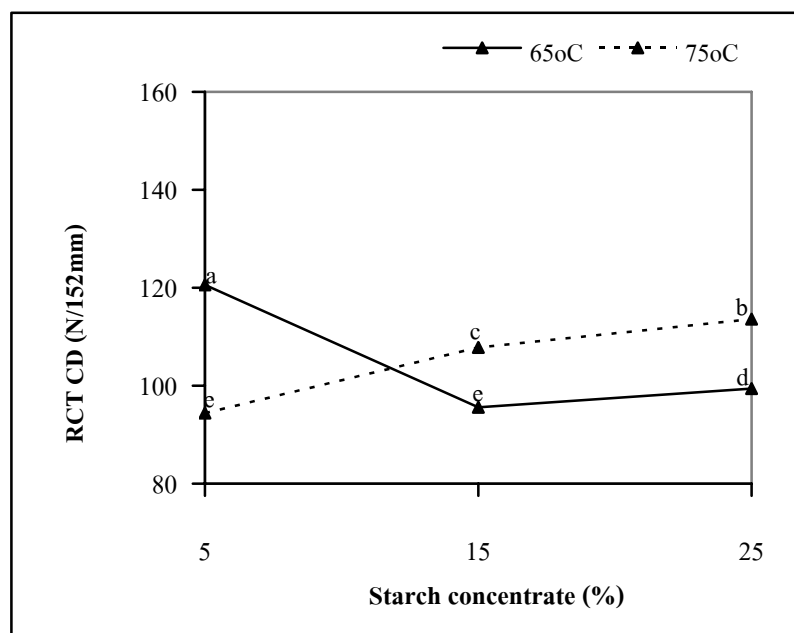
ความ เข้มข้น ของสตาร์ช (ร้อยละ)	อุณหภูมิ ของ สารเคลือบ (°ซ)	ความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาศกราฟท์ (N/152mm)			
		เคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช		เคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช	
		ค่าทดสอบ	% ΔE ¹	ค่าทดสอบ	% ΔE ¹
Control (uncoated KA)		110.0 ± 1.1 ^c	-	89.2 ± 2.0 ^f	-
5	65	120.6 ± 1.3 ^a	9.6	132.5 ± 1.7 ^a	48.5
	75	94.4 ± 1.0 ^f	-14.2	129.6 ± 1.3 ^b	45.3
15	65	95.6 ± 1.8 ^f	-13.1	98.8 ± 2.5 ^e	10.7
	75	107.8 ± 1.8 ^d	-2.1	111.5 ± 1.7 ^d	25.0
25	65	99.4 ± 1.6 ^e	-9.7	115.1 ± 1.7 ^c	29.0
	75	113.6 ± 0.9 ^b	3.2	98.7 ± 1.7 ^e	10.6

¹ % ΔE หมายถึง ร้อยละของค่าความแตกต่างระหว่างค่าทดสอบของกระดาศเคลือบเทียบกับกระดาศกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบ

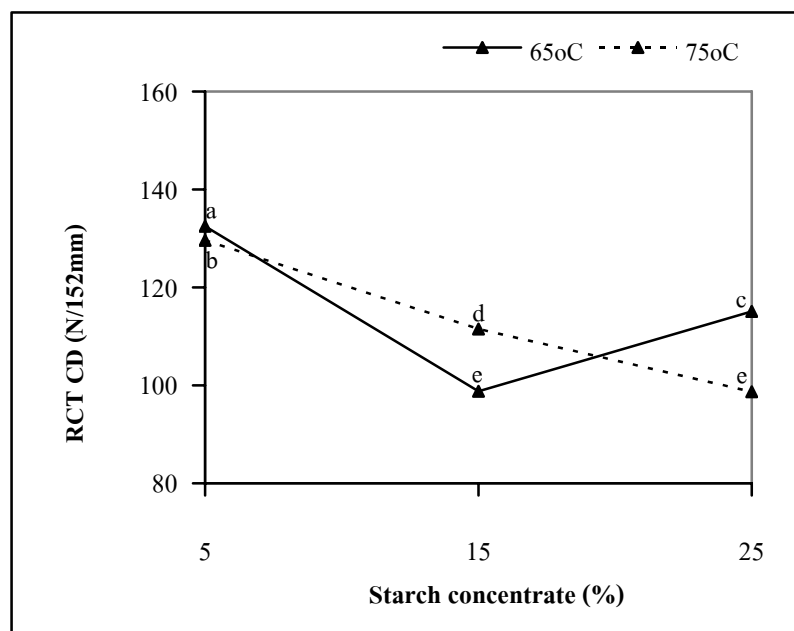
^{abcdef} ตัวอักษรต่างกันแนวตั้ง หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

จากการพิจารณาปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สสารทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข14) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบมีปฏิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 34 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 20.7 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.0 และที่อุณหภูมิ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 14.2 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.4

จากการพิจารณาปฏิริยาสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิของสารเคลือบที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสสารทางสถิติ (ตารางผนวกที่ ข15) พบว่า ความเข้มข้นและอุณหภูมิมีปฏิริยาสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากภาพที่ 35 พบว่า ที่อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของแคตไอออนิกสสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 25.4 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 16.5 และที่อุณหภูมิ 75 °ซ การเพิ่มความเข้มข้นของแคตไอออนิกสสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 14.0 และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจากร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 25 ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญโดยมีค่าลดลงร้อยละ 11.5



ภาพที่ 34 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ



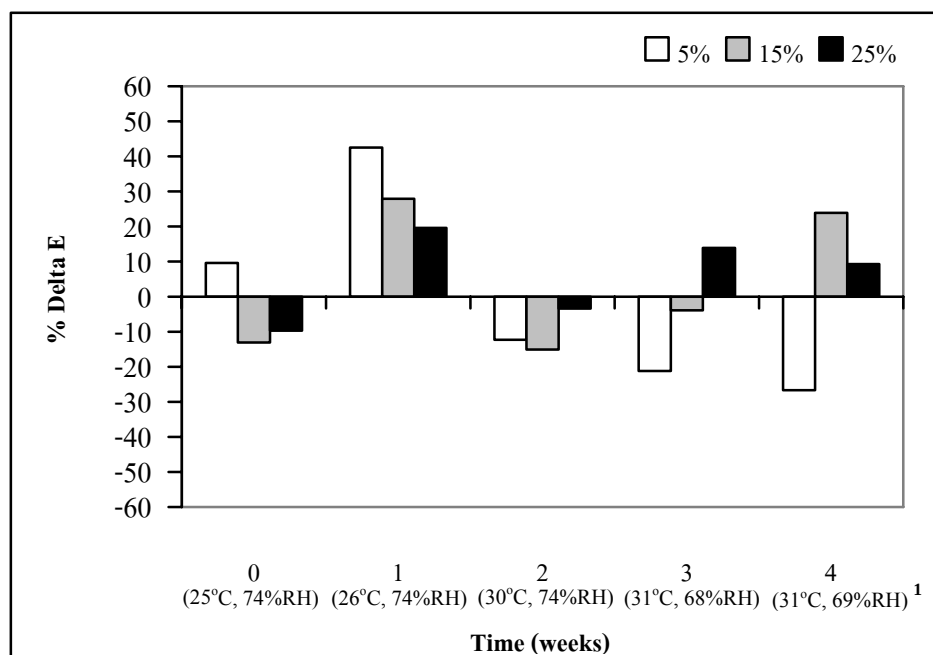
ภาพที่ 35 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบ แคตไอออนิกสตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ

หมายเหตุ: ^{abcde} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในภาพหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

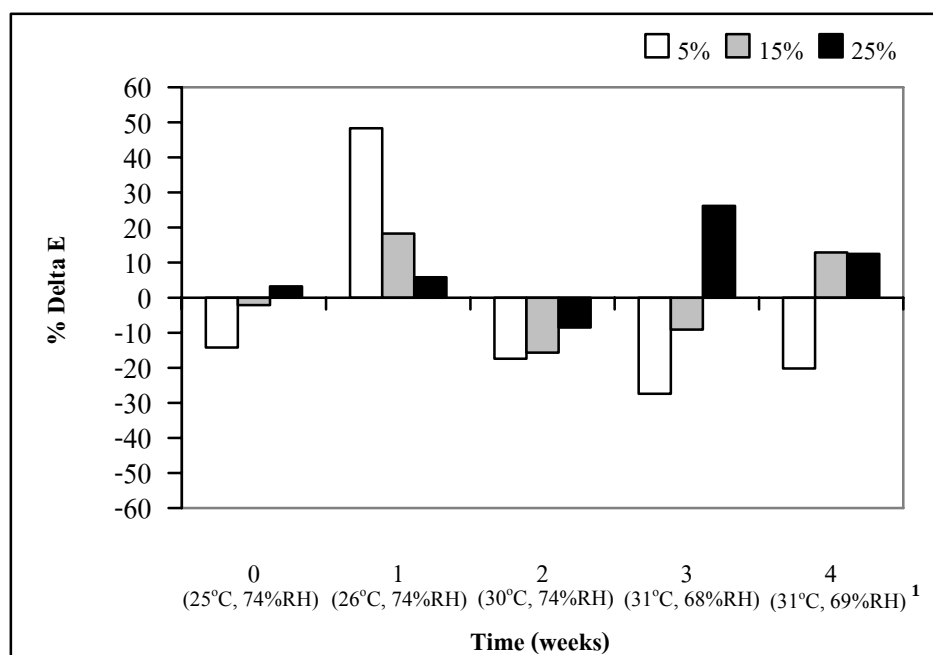
เมื่อนำกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ กระดาษกราฟที่หลังเคลือบ ออกซิไดซ์สตาร์ชและกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชไปเก็บภายใต้การจำลอง สภาพการเก็บจริงที่อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ จากภาพที่ 36 และภาพที่ 37 พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษ เคลือบทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ แปรตามการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณความชื้นในอากาศ เป็นหลักโดยไม่ขึ้นกับระยะเวลาในการเก็บ อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดหรือคายความชื้น ของกระดาษหลังเคลือบสตาร์ชที่สภาวะในการเคลือบต่างๆ อาจมีความแตกต่างกันซึ่งอาจส่งผลให้ สมบัติทางกายภาพของกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบที่ระยะเวลาในการเก็บต่างๆ มีความ แตกต่างกัน

เมื่อเปรียบเทียบค่าร้อยละของความแตกต่าง ($\% \Delta E$) ระหว่างความ ต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบสตาร์ชดัดแปรทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิต่างๆ เทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบ (แสดงดังภาพที่ 38) ซึ่งพบว่าการใช้สาร เคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นและอุณหภูมิ สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวง แหวนในแนว CD ให้กับกระดาษกราฟที่ภายหลังการเคลือบได้ และส่งผลในการเพิ่มค่าความ ต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD มากกว่าการใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช

เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษ กราฟที่ภายหลังการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช (ภาพที่ 38) พบว่า กระดาษเคลือบแคตไอออนิก สตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD มากกว่ากระดาษเคลือบ ที่ความเข้มข้นอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาผลในการเก็บกระดาษเคลือบไว้ภายใต้การจำลองสภาวะจริง เป็นเวลา 4 สัปดาห์ (ภาพที่ 37) พบว่า การใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ช นั้น พบว่า ยังไม่สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD ได้ (ภาพที่ 35 และ 36) เมื่อ พิจารณาเทียบกับกระดาษกราฟที่ที่ไม่ได้เคลือบตลอด 4 สัปดาห์ของการเก็บภายใต้การจำลอง สภาวะจริง



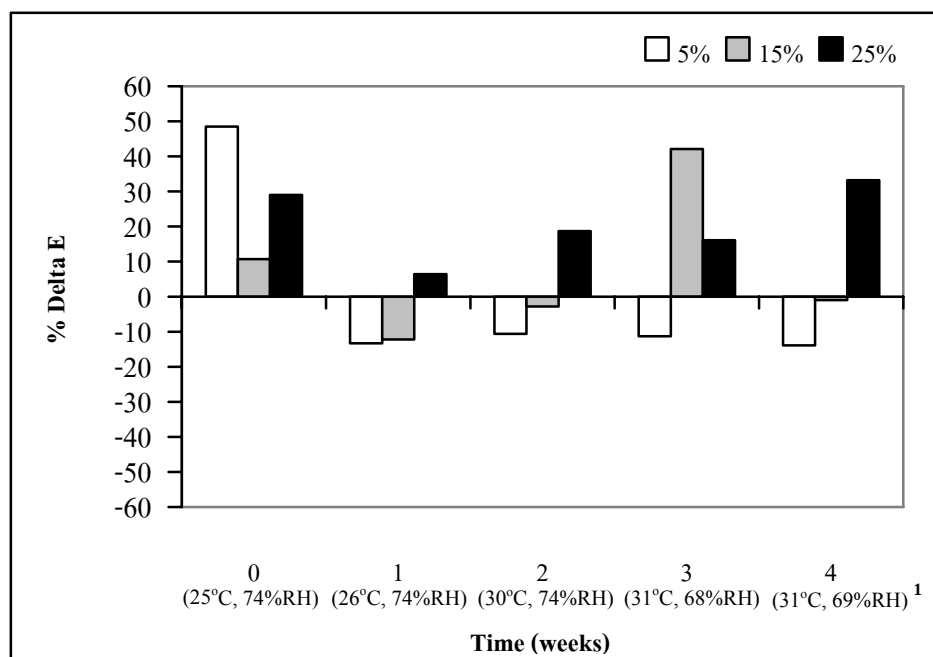
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



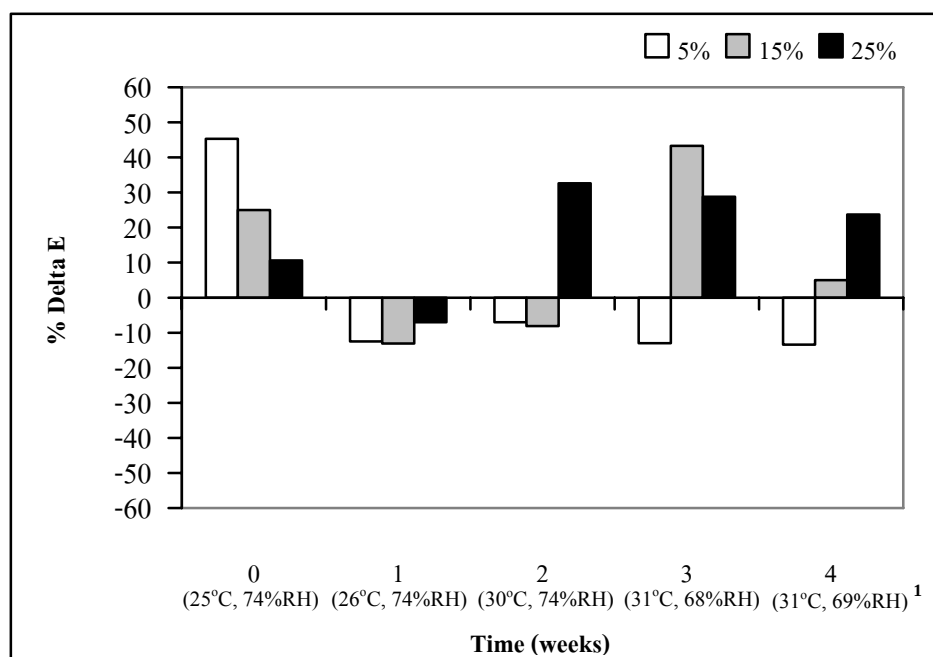
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 36 ร้อยละของค่าความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32 °ซ, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



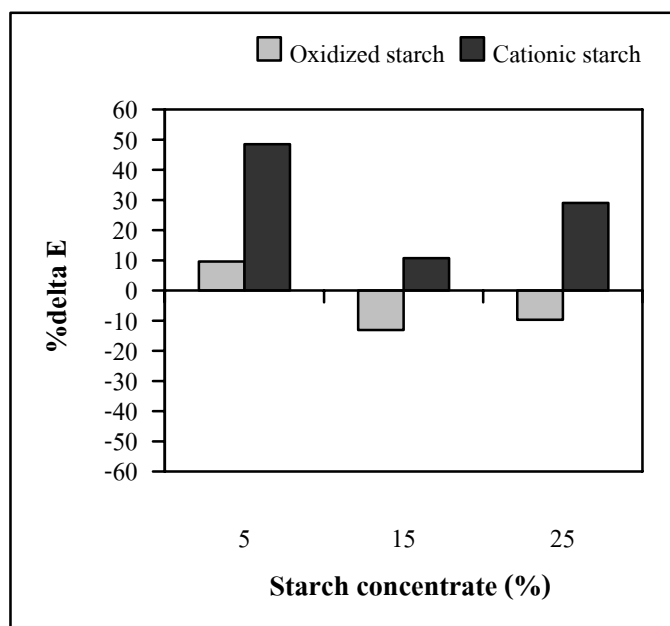
(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



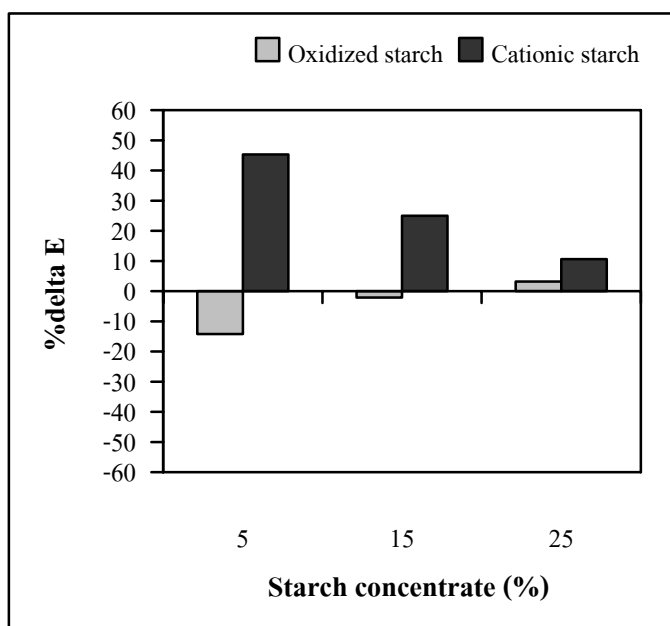
(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 37 ร้อยละของค่าความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟหลังเคลือบแคตไอออนิกสไตรซ์เทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บจริง (25 - 32°C, 68 - 74 %RH)

¹ ค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของสภาวะบรรยากาศในห้องเก็บตัวอย่าง ณ วันที่ตรวจสอบ



(a) อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ



(b) อุณหภูมิของสารเคลือบ 75 °ซ

ภาพที่ 38 ร้อยละของค่าความแตกต่าง (% ΔE) ระหว่างความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบ

หากพิจารณาที่ความเข้มข้นระดับเดียวกัน ปริมาณสตาร์ชตกค้างบนกระดาษเมื่อเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ชจะมากกว่าเมื่อเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ช เมื่อพิจารณาเพิ่มเติมถึงค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD และ CD ของกระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชเฉพาะที่มีปริมาณสตาร์ชตกค้างบนกระดาษที่ใกล้เคียงกัน (ตารางผนวกที่ ค4 และ ค5) พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD และ CD (เมื่อพิจารณาที่ค่า $\% \Delta E$) กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชยังคงมีค่ามากกว่ากระดาษเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปริมาณสตาร์ชตกค้างในระดับที่เท่ากันระหว่างสตาร์ชตัดแปรทั้งสองชนิด ที่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพื่อใช้ในการอธิบายผลให้ชัดเจนยิ่งขึ้น

Rhim *et al.* (2006) พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแข็ง (paperboard) ที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer coating) มีค่าไม่แตกต่างจากกระดาษที่ไม่ได้เคลือบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพไม่ได้ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแต่เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณความชื้นในกระดาษแข็ง และระดับการดูดความชื้นจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับชนิดของสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพซึ่งมีอิทธิพลโดยตรงต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแข็ง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. สมบัติเบื้องต้นของสสารที่ตัดแปร

1.1 การเตรียมสารละลายออกซิไดซ์สสารที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเข้มข้นร้อยละ 5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ส่งผลให้สสารมีความหนืดเท่ากับ 6.5, 30.0 และ 170.5 เซนติพอยด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 75 °ซ ส่งผลให้สสารมีความหนืดเท่ากับ 6.0, 23.0 และ 100.0 เซนติพอยด์ตามลำดับ โดยการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้สสารมีความหนืดลดลงประมาณ 1.1 - 1.7 เท่า

1.2 การเตรียมสารละลายแคตไอออนิกสสารที่อุณหภูมิ 65 °ซ ความเข้มข้นร้อยละ 5 ร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ส่งผลให้สสารมีความหนืดเท่ากับ 9.0, 38.5 และ 262.5 เซนติพอยด์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 75 °ซ ส่งผลให้สสารมีความหนืดเท่ากับ 7.5, 36.5 และ 209.0 เซนติพอยด์ตามลำดับ โดยการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้สสารมีความหนืดลดลงประมาณ 1.1 - 1.3 เท่า และความเข้มข้นและอุณหภูมิระดับเดียวกัน สารละลายแคตไอออนิกสสารมีความหนืดมากกว่าออกซิไดซ์สสารประมาณ 1.3 - 2.1 เท่า

2. สมบัติพื้นฐานของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบสสารที่ตัดแปร

2.1 การเพิ่มความเข้มข้นของสสาร ส่งผลให้กระดาษกราฟที่หลังเคลือบมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้น โดยการเคลือบด้วยแคตไอออนิกสสารทุกความเข้มข้นส่งผลให้กระดาษกราฟที่มีน้ำหนักมาตรฐานมากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สสาร

2.2 กระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สสารมีความหนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.0 - 6.9 และกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสสารมีความหนาเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.3 - 9.2 และที่ระดับความเข้มข้นเท่ากัน สารเคลือบแคตไอออนิกสสารมีความหนืดสูงกว่าสารเคลือบออกซิไดซ์สสาร ส่งผลให้สสารมีการซึมลงไปในเนื้อกระดาษได้น้อยและตกค้างที่ผิวหน้ามากกว่า ทำให้กระดาษเคลือบแคตไอออนิกสสารมีความหนามากกว่ากระดาษเคลือบออกซิไดซ์สสาร

2.3 การเพิ่มความเข้มข้นส่งผลให้มีปริมาณสสารตกค้างบนกระดาษคราฟท์มากขึ้น ทั้งนี้ ปริมาณสสารตกค้างเป็นปริมาณรวมของสสารที่ซึมลงไปบนเนื้อกระดาษกับปริมาณของสสารที่ตกค้างที่ผิวหน้าของกระดาษ โดยที่ความเข้มข้นระดับเดียวกัน การเคลือบด้วยแคตไอออนิกสสาร ส่งผลให้มีปริมาณสสารตกค้างบนกระดาษมากกว่าออกซิไดซ์สสาร

3. ลักษณะผิวหน้าของกระดาษคราฟท์จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

3.1 กระดาษคราฟท์ที่ผ่านการเคลือบด้วยสสารคัดแปรมีลักษณะผิวหน้าที่เรียบขึ้นและมีช่องว่างระหว่างเส้นใยลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสสารจากร้อยละ 5 เป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 25 ตามลำดับ โดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิยังไม่ส่งผลชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบ (กำลังขยาย 200 เท่า)

3.2 การเคลือบกระดาษคราฟท์ด้วยแคตไอออนิกสสารที่ความเข้มข้นร้อยละ 25 ที่อุณหภูมิ 65 และ 75 °C ส่งผลให้ลักษณะผิวหน้าของกระดาษเคลือบจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด มีลักษณะผิวหน้าที่ขรุขระกว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สสาร

4. สมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษคราฟท์ภายหลังการเคลือบด้วยสสารคัดแปร

4.1 ค่าความต้านทานแรงดันทะลุ

4.1.1 การใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สสารทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษคราฟท์ภายหลังการเคลือบเพิ่มขึ้นร้อยละ 8.8 - 12.4 และ การใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสสารทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษคราฟท์ภายหลังการเคลือบเพิ่มขึ้นร้อยละ 12.3 - 16.0

4.1.2 ความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารและแคตไอออนิกสสารที่เหมาะสมในการเคลือบกระดาษคราฟท์เพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงดันทะลุคือ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 15 โดยสารเคลือบแคตไอออนิกสสารทุกความเข้มข้นส่งผลให้กระดาษเคลือบมีค่าความต้านทานแรงดันทะลุมากกว่าสารเคลือบออกซิไดซ์สสารทั้งภายหลังการเคลือบและตลอด 4 สัปดาห์ภายใต้การจำลองสภาวะในการเก็บจริง (อุณหภูมิ 25 - 32 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74)

4.2 ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD

4.2.1 การเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ชเฉพาะที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์ภายหลังการเคลือบได้ ส่วนการเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกสภาวะสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์ภายหลังการเคลือบได้

4.2.2 การเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ช ส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ได้มากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิเดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาผลตลอด 4 สัปดาห์ภายใต้การจำลองสภาวะในการเก็บจริง (อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) พบว่า ทั้งออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ช ยังไม่สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ได้เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบตลอดระยะเวลาในการเก็บ

4.3 ค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD

4.3.1 การเคลือบด้วยออกซิไดซ์สตาร์ชที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 และที่ร้อยละ 25 สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์ภายหลังการเคลือบได้ ส่วนการเคลือบด้วยแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้น สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์ภายหลังการเคลือบได้ร้อยละ 7.6 - 37.5

4.3.2 เมื่อพิจารณาผลตลอด 4 สัปดาห์ภายใต้การจำลองสภาวะในการเก็บจริง (อุณหภูมิ 25 - 32 °ซ, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 - 74) พบว่า ทั้งออกซิไดซ์สตาร์ชและแคตไอออนิกสตาร์ชยังไม่สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยึดตัวในแนว MD ได้เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟท์ที่ไม่ได้เคลือบตลอดระยะเวลาในการเก็บ

4.4 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD

4.4.1 การใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟท์ภายหลังการเคลือบเพิ่มขึ้นร้อยละ 1.5 - 16.4 และสารเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ชทุกความเข้มข้นส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว

MD ของกระดาศกราฟที่ภายหลังการเคลื่อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 10.4 - 57.2 โดยการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสไตรซ์ส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD มากกว่าสารเคลือบออกซิไดซ์สไตรซ์

4.4.2 การใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สไตรซ์และแคตไอออนิกสไตรซ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ มีความเหมาะสมในการใช้เพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาศภายหลังการเคลื่อนได้มากกว่าเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นอื่นๆ แต่เมื่อพิจารณาผลในการเก็บกระดาศเคลื่อนไว้ภายใต้การจำลองสภาวะจริงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าทั้งออกซิไดซ์สไตรซ์และแคตไอออนิกสไตรซ์ยังไม่สามารถส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ได้ตลอดระยะเวลาในการเก็บ

4.5 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD

4.5.1 การใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สไตรซ์และแคตไอออนิกสไตรซ์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 อุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาศกราฟที่ภายหลังการเคลื่อนมีค่ามากกว่าที่ความเข้มข้นอื่นๆ โดยการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสไตรซ์ทุกความเข้มข้นและทุกอุณหภูมิ ส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ได้มากกว่าสารเคลือบออกซิไดซ์สไตรซ์

4.5.2 เมื่อพิจารณาผลในการเก็บกระดาศเคลื่อนไว้ภายใต้การจำลองสภาวะจริงเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า ทั้งออกซิไดซ์สไตรซ์และแคตไอออนิกสไตรซ์ยังไม่สามารถส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ได้ตลอดระยะเวลาในการเก็บ

ข้อเสนอแนะ

การนำออกซิไดซ์สสารและแคตไอออนิกสสารที่มีความเข้มข้นร้อยละ 5 - 25 มาใช้เคลือบเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับกระดาษกราฟ พบว่าสสารดัดแปรทั้งสองชนิดสามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบได้อย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟที่ไม่ได้เคลือบตลอดระยะเวลาในการเก็บ 4 สัปดาห์ โดยการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสสารส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบเพิ่มขึ้นมากกว่าการใช้สารเคลือบออกซิไดซ์สสาร ในขณะที่การเคลือบด้วยสสารดัดแปรทั้งสองชนิดนั้นยังไม่สามารถส่งผลในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว และค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษเคลือบได้อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามการใช้แคตไอออนิกสสารมาเคลือบเพื่อเพิ่มสมบัติด้านความแข็งแรงให้กับกระดาษกราฟนั้นมีแนวโน้มที่จะช่วยให้ได้กระดาษที่มีสมบัติด้านความแข็งแรงมากกว่าการเคลือบด้วยออกซิไดซ์สสาร

ความเข้มข้นของออกซิไดซ์สสารและแคตไอออนิกสสารที่เหมาะสมในการนำไปใช้งานในระดับอุตสาหกรรมเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อแรงดันทะลุ คือ ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 15 และอุณหภูมิของสารเคลือบ 65 °ซ ซึ่งการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสสารนั้นส่งผลให้ค่าความต้านทานต่อแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบมีค่ามากกว่าสารเคลือบออกซิไดซ์สสาร อย่างไรก็ตามการใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสสารจะมีราคาแพงกว่าออกซิไดซ์สสารประมาณร้อยละ 17.65 โดยต้นทุนของออกซิไดซ์สสารประมาณ 17 บาท/กิโลกรัม และต้นทุนของแคตไอออนิกสสารประมาณ 20 บาท/กิโลกรัม

จากงานวิจัยของ Han and Krochta (2001) ซึ่งอธิบายไว้ว่า การลดค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของกระดาษเคลือบเป็นผลเนื่องมาจากการบวมตัวของเส้นใยในกระดาษเนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้ในสารเคลือบและการแทรกซึมของสารเคลือบเข้าไปในโครงสร้างของเส้นใยซึ่งไปรบกวนการเกิดพันธะระหว่างเส้นใยของกระดาษ ดังนั้นควรศึกษาเพิ่มเติมถึงสัดส่วนของปริมาณสารเคลือบที่ซึมลงไปเนื้อกระดาษและปริมาณสารเคลือบที่ตกค้างที่ผิวหน้ากระดาษซึ่งอาจจะมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของกระดาษเคลือบ ทั้งนี้การใช้ Scanning Electron Microscope ดูลักษณะภาพตัดขวางของกระดาษเคลือบสสารทั้งสองชนิดที่ความเข้มข้นและอุณหภูมิต่างๆ อาจเป็นแนวทางในการศึกษาได้

จากงานวิจัยของ Rhim *et al.* (2006) ซึ่งอธิบายไว้ว่า การลดลงของค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษแข็งที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในกระดาษแข็ง ไม่ได้เกิดจากจากสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ ซึ่งควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ศึกษาถึงกลไกในการดูดหรือคายความชื้นของกระดาษกราฟท์ภายหลังการเคลือบสไตรซ์คัดแปรทั้งสองชนิด โดยใช้วิธีการทำ sorption isotherm

การใช้สารเคลือบแคตไอออนิกสไตรซ์ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 25 อุณหภูมิ 65 °ซ มีแนวโน้มในการเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว และความต้านทานแรงกดวงแหวนได้มากกว่ากระดาษที่ไม่ได้เคลือบตลอดระยะเวลาในการเก็บ 4 สัปดาห์ แต่เนื่องจากแคตไอออนิกสไตรซ์ที่มีความเข้มข้นและอุณหภูมิดังกล่าวส่งผลให้สารเคลือบมีความหนืดสูง หากสารเคลือบมีอุณหภูมิลดลงระหว่างการเคลือบ สารเคลือบจะมีความหนืดเพิ่มขึ้น อาจส่งผลให้ไม่สามารถเคลือบกระดาษได้สม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่นเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นร้อยละ 5 - 15 ซึ่งจากงานวิจัยของ Michel (2005) ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อสารเคลือบมีความหนืดสูง ของไหล (fluid) จะไม่สามารถเปลี่ยนรูปได้เร็วเพียงพอที่จะแผ่กระจายไปทั่วผิวหน้าของกระดาษระหว่างการเคลือบส่งผลให้เคลือบกระดาษได้ไม่ทั่วทั้งแผ่น กระดาษเกิดความเสียหาย และความเร็วในการเคลือบลดลง ซึ่งจะมีผลกระทบในกระบวนการผลิตได้

สิ่งที่ควรพิจารณาและระมัดระวังระหว่างการเคลือบคือ อุณหภูมิของสารเคลือบในช่วงเตรียมสารเคลือบและระหว่างการเคลือบ เนื่องจากออกซิไดซ์สไตรซ์และแคตไอออนิกสไตรซ์ที่นำมาใช้ในการทดลองจะมีความหนืดเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง โดยแคตไอออนิกสไตรซ์ที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ร้อยละ 25 จะได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิมาก เช่น มีความหนืดเพิ่มขึ้น เกิดตะกอนสีขาวปนอยู่ในสารเคลือบ เป็นต้น ดังนั้นในการปรับปรุงสมบัติของแคตไอออนิกสไตรซ์ให้มีความหนืดลดลงหรือลดการตกตะกอนเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมินั้น อาจนำการคัดแปรสไตรซ์วิธีอื่นมาช่วย เช่น การคัดแปรแคตไอออนิกสไตรซ์แล้วคัดแปรต่อด้วยวิธีครอสลิง (crosslink) เป็นต้น ซึ่งอาจจะช่วยแก้ปัญหาในเรื่องความหนืดของสารเคลือบได้และน่าจะช่วยเพิ่มความสามารถในการนำไปใช้เคลือบปรับปรุงสมบัติต่างๆ ของกระดาษกราฟท์ในระดับอุตสาหกรรมได้

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้เครื่อง Film Coater PI 1210 ในการเคลือบกระดาษซึ่งจะควบคุมเกี่ยวกับความหนาของสารเคลือบบนกระดาษได้ค่อนข้างยาก อาจมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับการ

เคลือบสตร้าซ์ตัดแปรโดยใช้อุปกรณ์หรือเทคนิคอื่น เช่น การเคลือบด้วย nip, dip roll และ doctor blade coater เป็นต้น

กระดาษเป็นวัสดุที่มีสมบัติที่ไวต่อการดูดและคายความชื้น เพราะฉะนั้นสภาวะบรรยากาศที่กระดาษกองเก็บอยู่ รวมทั้งระยะเวลาในการเก็บก่อนการทดสอบ อาจมีผล กระทบต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นและความแข็งแรงของกระดาษภายหลังการเคลือบ เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของผลการทดสอบควรใช้กระดาษที่ผลิตใหม่ในการทดสอบ นอกจากนี้ควรมีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สำหรับสภาวะในการเก็บกระดาษคราฟท์ก่อนการเคลือบ นอกจากนี้สิ่งที่ควรศึกษาเพิ่มเติม เช่น การศึกษาผลของสภาวะการเก็บต่อสมบัติของกระดาษคราฟท์ภายหลังการเคลือบสตร้าซ์ตัดแปรแต่ละชนิด รวมทั้งอาจมีการศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษคราฟท์ก่อนเคลือบที่มีต่อคุณภาพของกระดาษเคลือบ เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. ครั้งที่ 3.
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ขวัญใจ สุชินพงศ์พันธ์. 2543. การนำโคโคแซนไปใช้ประโยชน์ทางด้านการบรรจุ. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปรีชา เต็มพร้อม. 2543. ประโยชน์ของมันสำปะหลัง. สมาคมแป้งมันสำปะหลังไทย. แหล่งที่มา:
<http://www.tapiocathai.org/ttsa/index.htm>, 28 พฤษภาคม 2549.

วริทธิ์ชัย วัชรประภา. 2548. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการตัดสินใจซื้อกระดาดกราฟท์เพื่อทำถั่วงอก
ลูกฟูก. การศึกษาค้นคว้าอิสระ, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สมหวัง ขันตยานวงศ์. 2546. เอกสารประกอบการสอนวิชาโครงสร้างและสมบัติของกระดาด.
ภาควิชาวนผลิตภัณฑ์ คณะวนศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุมนา เตชะผาติกุล. 2543. กระดาดสำหรับทำถั่วงอกลูกฟูก, น. 1-3. ใน เอกสารประกอบการ
สัมมนาเรื่องถั่วงอกกระดาดลูกฟูก 7 – 8 มีนาคม 2543. ศูนย์บรรจุหีบห่อไทย. สถาบันวิจัย
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2529. มาตรฐานผลิตภัณฑ์กระดาดเหนียว. มอก.
170-2529.

_____. 2535. มาตรฐานผลิตภัณฑ์แป้งดัดแปรสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร. มอก. 1073-2535.

อัญชลี กมลรัตนกุล, ไพศาล อนันต์นุกุล, อมรรัตน์ สวัสดิ์ทิต และ มยุรี ภาคคำเจียก. 2545. **คู่มือการใช้กระดาษเพื่อการหีบห่อ**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

อรสิริ เสมรสุด. 2545. **การพัฒนากระดาษสำหรับการพิมพ์และการนำไปใช้ประโยชน์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Anonymous. 2004. **Glucose polymer**. Available Source:
<http://www.esb.utexas.edu/mabrybio211/chapter05/ch5.htm>, November 05, 2004.

BeMiller, J.N. 1997. Starch modification: challenges and prospects. **Starch/Stärke** 49: 127-131.

Biermann, C.J. 1996. **Handbook of Pulping and Papermaking**. 2 ed. Academic Press, Inc., California.

Bramel, G.F. 1986. Modified starch for surface sizing and coating of paper. **Tappi Journal** 69 (1): 54-56. Cited P. Lertsutthiwong. 2002. **The Use of Chitosan in the Production of High Quality Printing Paper**. Dissertation, Asian Institute of Technology, School of Environment, Resources and Development, Thailand.

Brody, A.L. and K.S. Marsh. 1997. **The Wiley Encyclopaedia of Packaging Technology**. 2 ed. John Wiley and Sons, Inc.

Bruun, S.E. 2002. Starch, In J. Gullichsen and H. Paulapuro, comps. **Papermaking Science and Technology: pigment Coating and Surface Sizing of Paper, Series 11**. Fapet Oy, Helsinki, Finland.

- Caulfield, D.F. 1978. **Fiber-water Interactions in Paper Making**. B.P.B.I.F., London. *Cited*
- E. Retulainen, K. Niskanen and N. Nilsen. 1998. **Chapter 2 Fibers and bonds in Paper Physics**. TAPPI Press, Finland.
- Dale, R.D. and A.P. Kenneth. 1989. Surface sizing. pp. 63-78. *In The sizing of paper*. 2 ed. TAPPI Press, Atlanta.
- Fardim, P. and B. Holmbom. 2005. ToF-SIMS imaging: a valuable chemical microscopy technique for paper and paper coatings. **Applied Surface Science** xxx: xxx-xxx.
- Floyd, W.C., N. Thompson and L.R. Dragner. 2001. **Paper making process utilizing a reactive cationic starch composition**. US Patent 6,303,000.
- Georgeson, M. 1995. Starch in Papermaking, p. 76. *In* C.O. Au, ed. *In* C.O. Au and I. Thorn, comps. **Application of Wet-End Paper Chemistry**. Blackie Academic & Professional, an imprint of Chapman & Hall, Glasgow.
- Goyal, H. 2006. **PULP AND PAPER DICTIONARY**. PULP AND PAPER DICTIONARY. Available Source: <http://www.paperonweb.com/dict.htm>, February 23, 2006.
- Gupta, B. and W. Scott. 1995. Interaction between Cationic Starches and Papermaking fiber: the effect of starch characteristics on fiber surface charge and starch retention, pp. 85-95. *In Proceedings of Papermakers Conference*.
- Han, J.H. and J.M. Krochta. 2001. Physical properties and oil absorption of whey/protein-coated paper. **Journal of Food Science** 66: 294-299.
- Hans, W., M.D. Laurel and L.R. Kearney. 1998. Opportunities and Challenges for Starch in the Paper Industry. **Starch/Stärke** 50 (9): 396-402.

- Harvey, R.D. 1992. **Chemical Processing Aids in Papermaking: A Practical Guide.** Tappi Press, Atlanta.
- Howard R. C. and C. J. Jowsay. 1989. The Effect of Cationic Starch on the Tensile Strength of Paper. **J. Pulp Paper Sci.** 15 (6): 225.
- International Organization for Standardization. 1990. **Paper, board and pulps -- Standard atmosphere for conditioning and testing and procedure for monitoring the atmosphere and conditioning of samples.** ISO 187.
- Ketola, H. and P. Hagberg. 2003. **Modified starch.** US Patent 6,670,470.
- Klass, C.P. 1990. Trends and Developments in Size Press Technology. **Tappi Journal** 73: 69-75.
- Kline, J.E. 1991. **Paper and Paperboard Manufacturing and Converting Fundamentals.** 2 ed. Miller Freeman Publications, Inc., California.
- Knight, J.W. 1969. **The Starch Industry.** Pergamon Press Ltd., Oxford.
- Kugge, C. 2003. **Consolidation and Structure of Paper Coating and Fibre Systems.** Ytkemiska Institutet Institute for Surface Chemistry, Stockholm..
- Larotonda, F. D. S., K. S. Matsui, S. S. Paes and J. B. Laurindo. 2003. Impregnation of Kraft Paper with Cassava-Starch Acetate – Analysis of the Tensile Strength, Water Absorption and Water Vapor Permeability. **Starch/Starke** 55 (11): 504–510.
- Lertsutthiwong, P. 2002. **The Use of Chitosan in the Production of High Quality Printing Paper.** Dissertation thesis, Asian Institute of Technology, School of Environment, Resources and Development.

Michel, S.E. 2005. **Impact of Particle Morphology on the Rheology of PCC-Based Coatings.**

Master thesis, the School of Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology.

Powell, E.L. 1967. Production and use of pregelatinized starch, pp. 523-536. *In* E.F. Paschall, ed. **Starch: Chemistry and technology Vol. II.** Academic Press Inc., New York.

Quan, Y., M.R. Kweon and F.W. Sosulski. 1997. Effect of crosslinking on functional properties of cationic corn starch. **Starch/Stärke** 49 (11): 458-464.

Retulainen, E., K. Niskanen and N. Nilsen. 1998. Fibers and bonds, pp. 54 - 84. *In* K. Niskanen, ed. **Paper Physics.** TAPPI PRESS, Finland.

Rhim, J.W., J.H. Lee, and S.I. Hong. 2006. Water resistance and mechanical properties of biopolymer (alginate and soy protein) coated paperboards. **Food Science and Technology** 39 (7): 806-813.

Roberts, J.C. 1996. **The Chemistry of Paper.** The Royal Society of Chemistry, UK.

Rohwer, R.G. and R.E. Klem. 1984. Acid-modified starch: production and uses, pp. 529-547. *In* R.L. Whistler, J.N. BeMiller and E.F. Paschall, comps. **Starch: Chemistry and Technology.** Academic Press Inc., Florida.

Sanders, J.P.M. 1996. Chemical modified of starch, *In* **Advanced Post-Academic Course on Tapioca Starch Technology (I).** Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.

Scott, W.E. and H.C. Abbott. 1995. **Surface Modification.** TAPPI Press, Atlanta.

Scott, W.E. 1996. **Principles of Wet End Chemistry.** Tappi Press, Atlanta.

Smook, G.A. 1994. **Surface Treatment: Handbook for Pulp and Paper Technologists**. 2 ed.
Angus Wilde Publications Inc, Vancouver.

Solarek, D.B. 1986. Cationic starch, pp. 113-124. *In* O.B. Wurzburg, ed. **Modified Starches: Properties and Uses**. CRC Press, Inc., Florida.

Stinebaugh, D.K., L.A. Gasper, L.E. Deters and L.E. Fitt. 1993. Preparation of Starch for
Pigmented Coating, *In* J.C. Walter, comp. **The Coating Process**. Tappi Press,
Atlanta.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2004. **Bursting strength of paper**.
TAPPI T403-om97.

_____. 2004. **Ring crush of paperboard**. TAPPI T818-om97.

_____. 2004. **Grammage of paper and paperboard (weight per unit area)**. TAPPI T410-
om88.

_____. 2004. **Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board**. TAPPI
T411-om97.

U.S. Congress, Office of Technology Assessment. 1989. **The Pulp and Paper Making Processes**. Technologies for Reducing Dioxin in the Manufacture of Bleached Wood
Pulp. Available Source: http://govinfo.library.unt.edu/ota/Ota_2/DATA/1989/8931.PDF,
February 12, 2006.

Waly, A., F.A. Abdel-Mohdy, A. Higazy and A. Hebeish. 1994. Synthesis and properties of
starch phosphate monoesters. **Starch/Stärke**. 46 (2): 59-63.

Wurzburg, O.B. 1986. **Modified Starches: Properties and Uses**. CRC Press, Inc., Florida.

- Yeng, S.W., M.T. Paridah, L.K. Chiang, W.Z.W. Yunus and S. Zakaria. 2004. Sago starch and its acrylamide modified products as coating material on handsheets made from recycled pulp fibers. **Journal of Applied Polymer Science** 94 (1): 154-158.
- Zhang, M. 2003. **WOOD AND PAPER SCIENCE**. Doctor thesis, North Carolina State University.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการทดสอบ

การทดสอบหาปริมาณความชื้นของสตาร์ช

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง AOAC 1995

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบไฟฟ้า
3. ภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)
4. เครื่องเคเตอร์บรรจุมารวัดความชื้น

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมด้วยฝาปิด ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแน่นอน
2. ชั่งน้ำหนักสตาร์ชก่อนอบประมาณ 2 กรัม จำนวน 2 ชุด ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก เข้าให้ตัวอย่างเสมอกัน นำไปใส่ตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นาน 3 ชั่วโมง
3. ปิดฝาแล้วนำถ้วยอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างออกจากตู้อบไฟฟ้า ปล่อยให้เย็นในเครื่องเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง นานประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักหลังอบ และนำไปอบซ้ำอีกครั้งละ 1 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักที่คงที่ โดยผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้ 2 ครั้งติดต่อกันต้องต่างกันไม่มากกว่า 0.0003 กรัม ถึงเป็นน้ำหนักสุดท้าย รายงานปริมาณความชื้นเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่าง 2 ชุด เป็นร้อยละ

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักสตาร์ชก่อนอบ} - \text{น้ำหนักสตาร์ชหลังอบ}) \times 100}{(\text{น้ำหนักสตาร์ชก่อนอบ})}$$

การทดสอบหาน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง TAPPI T410-om88

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่ง ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาดไม่ต่ำกว่า 500 ตร.ซม. (20 x 25 ซม.) จำนวน 10 แผ่น นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO187)
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกระดาษครั้งละ 1 แผ่น รายงานค่าน้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ยเป็นกรัม/ตารางเมตร

การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร)} = \frac{\text{น้ำหนักของกระดาษ (กรัม)} \times 10000}{\text{พื้นที่ของกระดาษ (ตร.ซม.)}}$$

การทดสอบหาความหนาของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลง TAPPI T411-om97

เครื่องมือ

1. ไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, Japan)
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมกระดาษขนาด 40 x 120 มิลลิเมตร อย่างน้อย 10 แผ่น เก็บในสภาวะทดสอบอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ (Mitutoyo, Japan) แผ่นละ 5 จุด โดยให้ห่างจากขอบของกระดาษอย่างน้อย 6 มม. รายงานค่าความหนาเฉลี่ยเป็นมิลลิเมตร

การทดสอบหาปริมาณความชื้นในกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลง ASTM D644-93

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียด ทศนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ตู้อบไฟฟ้า
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. ภาชนะอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)
5. เครื่องเคเตอร์บรรจุมวลความชื้น

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 1 x 1 ซม. นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (ISO187)
2. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมด้วยฝาปิด ในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นาน 1 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนักแน่นอน
3. ชั่งตัวอย่างกระดาษก่อนอบประมาณ 2 กรัม จำนวน 2 ชุด ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนัก เหย้าให้ตัวอย่างเสมอกัน นำไปใส่ตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ นาน 3 ชั่วโมง
4. ปิดฝาแล้วนำถ้วยอลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างออกจากตู้อบไฟฟ้า ปล่อยให้เย็นในเครื่องเคเตอร์ที่อุณหภูมิห้อง นานประมาณ 30 นาที ชั่งน้ำหนักหลังอบ และนำไปอบซ้ำอีกครั้งละ 1 ชั่วโมง จนได้น้ำหนักที่คงที่ โดยผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งได้ 2 ครั้งติดต่อกันต้องต่างกันไม่มากกว่า 0.0003 กรัม ถึงเป็นน้ำหนักสุดท้าย รายงานปริมาณความชื้นเฉลี่ยจากการทดสอบตัวอย่าง 2 ชุด เป็นร้อยละ

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณความชื้น(ร้อยละ)} = \frac{(\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ} - \text{น้ำหนักกระดาษหลังอบ}) \times 100}{(\text{น้ำหนักกระดาษก่อนอบ})}$$

การทดสอบความต้านทานต่อแรงดันทะลุ

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลง TAPPI T403-om97

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ (Mullen Tester, BF Perkins, USA)
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 15 x 15 ซม. อย่างน้อย 10 ตัวอย่าง นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (ISO187)
2. ทำการทดสอบโดยใช้เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดันทะลุ โดยกดยึดแผ่นกระดาษให้อยู่กับที่ด้วย Clamping device ด้วยแรงไม่ต่ำกว่า 8 กิโลกรัม/เซนติเมตร
3. เลือก gauge โดยให้ผลการทดสอบอยู่ในช่วงร้อยละ 20 - 80 ของสเกล
4. อ่านค่าแรงดันทะลุให้ละเอียดถึง 0.2 กิโลกรัม/เซนติเมตร รายงานค่าเฉลี่ยเป็นกิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร

การทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลง ASTM D828-93

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงดึงและการยืดตัว (Testometric 350, Rochdale, England)
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 15 x 100 มม. ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดขึ้นทดสอบ 10 ชิ้นต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (ISO187)
2. นำชิ้นทดสอบเข้าที่ยึดทั้งสองของเครื่องทดสอบ โดยให้ได้ความยาวระหว่างที่ยึดตัวอย่างเท่ากับ 50 ± 0.5 มม.
3. ทำการทดสอบโดยตั้งเวลาให้ชิ้นทดสอบขาดจากแรงดึง 12.7 มม./นาที โดยใช้ Load cell 5000 นิวตัน
4. อ่านค่าความต้านทานแรงดึงขาดจากสเกล รายงานค่าเฉลี่ยของความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวของกระดาษทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงดึงต่อความกว้างของชิ้นทดสอบ (นิวตันต่อ 15 มม.)

การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

มาตรฐานการทดสอบ คัดแปลง TAPPI T 818-om97

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน (Testometric 350, Rochdale, England)
3. Specimen Holder
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 12.7 x 152 มม. (0.5 x 6 นิ้ว) ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดขึ้นทดสอบ 10 ชิ้นต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (ISO187)
2. นำกระดาษสอดเข้าไปใน Specimen Holder ที่มีลักษณะเป็นวงกลม
3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน จนขอบขึ้นทดสอบเสียรูปจากแรงกด รายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงกดต่อความยาวของกระดาษที่รับแรงกด (นิวตันต่อ 152 มม.)

ภาคผนวก ข
ผลวิเคราะห์ทางสถิติ

ตารางผนวกที่ ข1 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ช
ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษเคลือบ

Dependent Variable: Bursting

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	192.456 ^a	11	17.496	5.627	.000
Intercept	721912.969	1	721912.969	232164.373	.000
CONC	28.663	2	14.331	4.609	.012
TEMP	.169	1	.169	.054	.816
STARCH	96.302	1	96.302	30.970	.000
CONC * TEMP	25.663	2	12.831	4.126	.019
CONC * TEMP * STARCH	41.660	5	8.332	2.680	.025
Error	335.825	108	3.109		
Total	722441.250	120			
Corrected Total	528.281	119			

a R Squared = .364 (Adjusted R Squared = .300)

ตารางผนวกที่ ข2 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ
ต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช

Dependent Variable: Bursting

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	48.133 ^a	5	9.627	2.901	.022
Intercept	352666.667	1	352666.667	106272.321	.000
CONC	12.433	2	6.217	1.873	.163
TEMP	8.067	1	8.067	2.431	.125
CONC * TEMP	27.633	2	13.817	4.164	.021
Error	179.200	54	3.319		
Total	352894.000	60			
Corrected Total	227.333	59			

a R Squared = .212 (Adjusted R Squared = .139)

ตารางผนวกที่ ข3 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช

Dependent Variable: Bursting

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	48.021 ^a	5	9.604	3.311	.011
Intercept	369342.604	1	369342.604	127339.190	.000
CONC	22.158	2	11.079	3.820	.028
TEMP	11.704	1	11.704	4.035	.050
CONC * TEMP	14.158	2	7.079	2.441	.097
Error	156.625	54	2.900		
Total	369547.250	60			
Corrected Total	204.646	59			

a R Squared = .235 (Adjusted R Squared = .164)

ตารางผนวกที่ ข4 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษเคลือบ

Dependent Variable: Tensile MD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2977.873 ^a	11	270.716	116.101	.000
Intercept	1502028.632	1	1502028.632	644169.764	.000
CONC	36.548	2	18.274	7.837	.001
TEMP	1.019	1	1.019	.437	.510
STARCH	974.185	1	974.185	417.795	.000
CONC * TEMP	787.782	2	393.891	168.927	.000
CONC * TEMP * STARCH	1199.420	5	239.884	102.878	.000
Error	249.495	107	2.332		
Total	1505071.620	119			
Corrected Total	3227.368	118			

a R Squared = .923 (Adjusted R Squared = .915)

ตารางผนวกที่ ข5 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช

Dependent Variable: Tensile MD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	1920.564 ^a	5	384.113	148.496	.000
Intercept	782574.326	1	782574.326	302538.188	.000
CONC	44.800	2	22.400	8.660	.001
TEMP	6.102	1	6.102	2.359	.131
CONC * TEMP	1853.457	2	926.729	358.267	.000
Error	137.095	53	2.587		
Total	785002.940	59			
Corrected Total	2057.659	58			

a R Squared = .933 (Adjusted R Squared = .927)

ตารางผนวกที่ ข6 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช

Dependent Variable: Tensile MD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	103.213 ^a	5	20.643	9.917	.000
Intercept	719853.067	1	719853.067	345836.883	.000
CONC	3.306	2	1.653	.794	.457
TEMP	1.121	1	1.121	.538	.466
CONC * TEMP	98.786	2	49.393	23.730	.000
Error	112.400	54	2.081		
Total	720068.680	60			
Corrected Total	215.613	59			

a R Squared = .479 (Adjusted R Squared = .430)

ตารางผนวกที่ ข7 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ช
ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษเคลือบ

Dependent Variable: Tensile CD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5020.283 ^a	11	456.389	260.114	.000
Intercept	455421.123	1	455421.123	259562.209	.000
CONC	23.240	2	11.620	6.623	.002
TEMP	2.408	1	2.408	1.373	.244
STARCH	541.025	1	541.025	308.351	.000
CONC * TEMP	113.227	2	56.614	32.266	.000
CONC * TEMP * STARCH	4340.383	5	868.077	494.751	.000
Error	189.494	108	1.755		
Total	460630.900	120			
Corrected Total	5209.777	119			

a R Squared = .964 (Adjusted R Squared = .960)

ตารางผนวกที่ ข8 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ
ต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบ
ออกซิไดซ์สตาร์ช

Dependent Variable: Tensile CD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2018.733 ^a	5	403.747	182.922	.000
Intercept	243678.028	1	243678.028	110401.241	.000
CONC	1507.354	2	753.677	341.462	.000
TEMP	301.504	1	301.504	136.600	.000
CONC * TEMP	209.874	2	104.937	47.543	.000
Error	119.189	54	2.207		
Total	245815.950	60			
Corrected Total	2137.922	59			

a R Squared = .944 (Adjusted R Squared = .939)

ตารางผนวกที่ ข9 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD ของกระดาษกราฟท์หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช

Dependent Variable: Tensile CD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	2460.525 ^a	5	492.105	377.977	.000
Intercept	212284.120	1	212284.120	163051.596	.000
CONC	1643.976	2	821.988	631.354	.000
TEMP	230.104	1	230.104	176.739	.000
CONC * TEMP	586.444	2	293.222	225.219	.000
Error	70.305	54	1.302		
Total	214814.950	60			
Corrected Total	2530.830	59			

a R Squared = .972 (Adjusted R Squared = .970)

ตารางผนวกที่ ข10 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ชที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษเคลือบ

Dependent Variable: RCT MD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	22666.106 ^a	11	2060.555	517.408	.000
Intercept	2163885.325	1	2163885.325	543354.297	.000
CONC	11526.427	2	5763.214	1447.150	.000
TEMP	1320.167	1	1320.167	331.496	.000
STARCH	1333.278	1	1333.278	334.788	.000
CONC * TEMP	1511.570	2	755.785	189.779	.000
CONC * TEMP * STARCH	8254.845	5	1650.969	414.560	.000
Error	402.228	101	3.982		
Total	2184628.190	113			
Corrected Total	23068.334	112			

a R Squared = .983 (Adjusted R Squared = .981)

ตารางผนวกที่ ข11 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบออกซิไดซ์สตาร์ช

Dependent Variable: RCT MD

Source	Type III	df	Mean Square	F	Sig.
Sum of Squares					
Corrected Model	2353.415 ^a	5	470.683	137.657	.000
Intercept	1061049.555	1	1061049.555	310316.072	.000
CONC	444.620	2	222.310	65.017	.000
TEMP	1908.346	1	1908.346	558.117	.000
CONC * TEMP	80.208	2	40.104	11.729	.000
Error	177.801	52	3.419		
Total	1065258.820	58			
Corrected Total	2531.217	57			

a R Squared = .930 (Adjusted R Squared = .923)

ตารางผนวกที่ ข12 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช

Dependent Variable: RCT MD

Source	Type III Sum of	df	Mean Square	F	Sig.
Squares					
Corrected Model	19279.174 ^a	5	3855.835	841.859	.000
Intercept	1102900.828	1	1102900.828	240800.560	.000
CONC	17396.961	2	8698.481	1899.173	.000
TEMP	67.940	1	67.940	14.834	.000
CONC * TEMP	2116.327	2	1058.163	231.033	.000
Error	224.427	49	4.580		
Total	1119369.370	55			
Corrected Total	19503.601	54			

a R Squared = .988 (Adjusted R Squared = .987)

ตารางผนวกที่ ข13 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้น อุณหภูมิและชนิดของสตาร์ช
ที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษเคลือบ

Dependent Variable: RCT CD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	17972.330	11	1633.848	622.792	.000
Intercept	1364394.370	1	1364394.370	520081.635	.000
CONC	5317.898	2	2658.949	1013.542	.000
TEMP	30.937	1	30.937	11.792	.001
STARCH	2364.131	1	2364.131	901.162	.000
CONC * TEMP	3376.345	2	1688.173	643.500	.000
CONC * TEMP * STARCH	6634.861	5	1326.972	505.817	.000
Error	267.589	102	2.623		
Total	1391003.920	114			
Corrected Total	18239.920	113			

a. R Squared = .985 (Adjusted R Squared = .984)

ตารางผนวกที่ ข14 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความ
ต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบ
ออกซิไดซ์สตาร์ช

Dependent Variable: RCT CD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	5562.081 ^a	5	1112.416	524.262	.000
Intercept	664295.948	1	664295.948	313070.938	.000
CONC	386.202	2	193.101	91.005	.000
TEMP	2.817E-02	1	2.817E-02	.013	.909
CONC * TEMP	5175.850	2	2587.925	1219.643	.000
Error	114.581	54	2.122		
Total	669972.610	60			
Corrected Total	5676.662	59			

a. R Squared = .980 (Adjusted R Squared = .978)

ตารางผนวกที่ ข15 ผลวิเคราะห์ความแปรปรวนระหว่างความเข้มข้นและอุณหภูมิที่มีต่อค่าความต้านทานต่อแรงกดวงแหวนในแนว CD ของกระดาษกราฟที่หลังเคลือบแคตไอออนิกสตาร์ช

Dependent Variable: RCT CD

Source	Type III Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Corrected Model	9829.927 ^a	5	1965.985	616.747	.000
Intercept	700412.281	1	700412.281	219725.418	.000
CONC	7686.423	2	3843.211	1205.649	.000
TEMP	61.001	1	61.001	19.137	.000
CONC * TEMP	1830.644	2	915.322	287.145	.000
Error	153.008	48	3.188		
Total	721031.310	54			
Corrected Total	9982.935	53			

a. R Squared = .985 (Adjusted R Squared = .983)

ภาคผนวก ค

การเปรียบเทียบปริมาณสสารชดก้างของสสารชดคแปรต่อสมบัติด้านความแข็งแรงของกระดาษ
คราฟท์

ตารางผนวกที่ ค 1 ปริมาณสสารตกค้างของสสารคัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดันทะลุ

สสารคัดแปร	ความเข้มข้น (อุณหภูมิ)	ปริมาณสสาร ตกค้าง (g/m^2)	ความต้านทานแรงดันทะลุ (kg/cm^2)	% ΔE
ออกซิไดซ์สสาร	15% (65°ซ)	3.29 ± 0.14	77.7 ± 2.1	12.4
แคตไอออนิกสสาร	5% (65°ซ)	3.70 ± 0.15	79.4 ± 2.4	15.2
ออกซิไดซ์สสาร	25% (75°ซ)	6.16 ± 0.08	76.5 ± 2.0	10.7
แคตไอออนิกสสาร	15% (75°ซ)	6.30 ± 0.15	78.0 ± 1.2	13.2

ตารางผนวกที่ ค 2 ปริมาณสสารตกค้างของสสารคัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว MD

สสารคัดแปร	ความเข้มข้น (อุณหภูมิ) ของสารเคลือบ	ปริมาณสสาร ตกค้าง (g/m^2)	ความต้านทานแรงดึงและ การยืดตัวในแนว MD (N/15mm)	% ΔE
ออกซิไดซ์สสาร	15% (65°ซ)	3.29 ± 0.14	113.9 ± 2.0	-4.9
แคตไอออนิกสสาร	5% (65°ซ)	3.70 ± 0.15	108.4 ± 1.2	11.4
ออกซิไดซ์สสาร	25% (75°ซ)	6.16 ± 0.08	118.9 ± 1.2	-0.7
แคตไอออนิกสสาร	15% (75°ซ)	6.30 ± 0.15	108.1 ± 1.5	11.2

ตารางผนวกที่ ค 3 ปริมาณสสารตกค้างของสสารคัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงดึงและการยืดตัวในแนว CD

สสารคัดแปร	ความเข้มข้น (อุณหภูมิ) ของสารเคลือบ	ปริมาณสสาร ตกค้าง (g/m^2)	ความต้านทานแรงดึงและ การยืดตัวในแนว CD (N/15mm)	% ΔE
ออกซิไดซ์สสาร	15% (65°ซ)	3.29 ± 0.14	57.3 ± 1.2	-4.8
แคตไอออนิกสสาร	5% (65°ซ)	3.70 ± 0.15	65.1 ± 1.0	33.2
ออกซิไดซ์สสาร	25% (75°ซ)	6.16 ± 0.08	71.9 ± 1.6	19.6
แคตไอออนิกสสาร	15% (75°ซ)	6.30 ± 0.15	67.2 ± 1.2	37.5

ตารางผนวกที่ ค4 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในแนว MD

สตาร์ชดัดแปร	ความเข้มข้น (อุณหภูมิ) ของสารเคลือบ	ปริมาณสตาร์ช ตกค้าง (g/m^2)	ความต้านทานแรงกด วงแหวนในแนว MD (N/152mm)	% ΔE
ออกซิไดซ์สตาร์ช	15% (65°C)	3.29 ± 0.14	136.9 ± 1.8	8.7
แคตไอออนิกสตาร์ช	5% (65°C)	3.70 ± 0.15	175.1 ± 2.3	57.2
ออกซิไดซ์สตาร์ช	25% (75°C)	6.16 ± 0.08	129.4 ± 2.4	2.7
แคตไอออนิกสตาร์ช	15% (75°C)	6.30 ± 0.15	141.4 ± 2.2	26.9

ตารางผนวกที่ ค5 ปริมาณสตาร์ชตกค้างของสตาร์ชดัดแปรที่มีต่อค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD

สตาร์ชดัดแปร	ความเข้มข้น (อุณหภูมิ) ของสารเคลือบ	ปริมาณสตาร์ช ตกค้าง (g/m^2)	ความต้านทานแรงกดวง แหวนในแนว CD (N/152mm)	% ΔE
ออกซิไดซ์สตาร์ช	15% (65°C)	3.29 ± 0.14	95.6 ± 1.8	-13.1
แคตไอออนิกสตาร์ช	5% (65°C)	3.70 ± 0.15	132.5 ± 1.7	48.5
ออกซิไดซ์สตาร์ช	25% (75°C)	6.16 ± 0.08	113.6 ± 0.9	3.2
แคตไอออนิกสตาร์ช	15% (75°C)	6.30 ± 0.15	111.5 ± 1.7	25.0

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวนวพร วรรณวิศาล
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 25 กุมภาพันธ์ 2521
สถานที่เกิด	จังหวัดตาก
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี คณะอุตสาหกรรมเกษตร วิชาเอกเทคโนโลยีการบรรจุ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์