



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)

ปริญญา

เทคโนโลยีการบรรจุ

สาขา

เทคโนโลยีการบรรจุ

ภาควิชา

เรื่อง ผลของการเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติการกีดขวางและสมบัติเชิงกลของ
กระดาษแข็ง

Effects of Biopolymer Coating on Barrier and Mechanical Properties of Paperboards

นางผู้วิจัย นางสาวสลิลดา บุตรกนิรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาภรณ์ จิณกาญจน์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ธีรพงศ์ ชกส้าน, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์รัชฎาภรณ์ จิณกาญจน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของการเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติการกีดขวาง
และสมบัติเชิงกลของกระดาษแข็ง

Effects of Biopolymer Coating on Barrier and Mechanical Properties of Paperboards

โดย

นางสาวสลิศา บุตรกีนรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
พ.ศ. 2552

สลิลา บุตรกนิรี 2552: ผลของการเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติการกักความและ
สมบัติเชิงกลของกระดาษแข็ง ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการบรรจุ)
สาขาเทคโนโลยีการบรรจุ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัยญรัตน์ จิฎกานจน์, Ph.D. 134 หน้า

สมบัติการด้านการซึมผ่านของน้ำ น้ำมันและแก๊สรวมทั้งสมบัติเชิงกล เป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณา
นำกระดาษไปบรรจุผลิตภัณฑ์อาหาร ซึ่งสมบัติดังกล่าวมักปรับปรุงได้โดยการเคลือบกระดาษด้วยพลาสติกหรือ
แว็กซ์ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกล และสมบัติการด้าน
การซึมผ่านของกระดาษแข็งโดยการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพจำพวก คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน
โดยพอลิเมอร์ชีวภาพในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต ได้แก่ ไฮโดรฟิสิกส์ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในการเคลือบ
กระดาษแต่ดั้งเดิม ในงานวิจัยกำหนดระดับความเข้มข้นของสตาร์ชที่ร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) ตามลักษณะการใช้
งานในอุตสาหกรรมกระดาษ ส่วนพอลิเมอร์ชีวภาพที่เลือกศึกษาร่วมกับสตาร์ชประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริก
และโปรตีนซิน งานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 3 ส่วน ส่วนแรกคือ การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบกรดไขมัน
สเตียริกและโปรตีนซินที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-3 ร่วมกับสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ต่อสมบัติของกระดาษ
แข็งพบว่า การเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกในสารเคลือบส่งผลให้กระดาษแข็งมีความต้านทานแรงกดวงแหวน
และค่าความแข็งดิ่งลดลง แต่สามารถต้านทานน้ำและน้ำมันได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตาม
ในการเคลือบโปรตีนซินร่วมกับไฮโดรฟิสิกส์ส่งผลให้ความต้านทานแรงกดวงแหวนและความแข็งดิ่งมีค่า
เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)
เช่นกัน ส่วนอัตราการซึมผ่านของออกซิเจนนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อสารเคลือบ
ประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริก และอัตราการซึมผ่านออกซิเจนมีค่าลดลง เมื่อสารเคลือบประกอบด้วยซิน
นอกจากนี้พบว่าสมบัติด้านต่างๆของกระดาษแข็งเห็นการเปลี่ยนแปลงชัดเจนในการเคลือบกระดาษด้านหลังซึ่ง
ไม่มีอิทธิพลของการขัดผิวมาก่อน การศึกษาในส่วนที่ 2 คือ การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบกรดไขมันสเตียริก
ในสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ร่วมกับการเคลือบโปรตีนซินต่อสมบัติของกระดาษพบว่า กระดาษหลังเคลือบ
ด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพผสมของกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซินในอัตราส่วน 1:3 มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วน
อัตราส่วน 3:1 สามารถต้านทานน้ำและน้ำมันได้ดีที่สุด อย่างไรก็ตามพบว่าการเคลือบด้วยพอลิเมอร์ผสมของทั้ง
โปรตีนและไขมันให้ผลค่าสมบัติของกระดาษที่ดีกว่าการเคลือบด้วยไขมันหรือโปรตีนเพียงอย่างเดียวอย่างใดอย่างหนึ่ง
และการศึกษาในส่วนสุดท้ายคือ การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการเก็บกระดาษหลังเคลือบต่อสมบัติเชิงกล
รวมทั้งสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน พบว่า กระดาษเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพผสมของกรดไขมันสเตียริก
ณ ระดับความเข้มข้นสูงสุดภายใต้การทดลองที่ร้อยละ 3 มีค่าสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันได้ดีที่สุด ส่วน
กระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ ร่วมกับสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 มีค่า
สมบัติเชิงกลดีที่สุดตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์ของการเก็บ

Salinda Butkinaree 2009: Effects of Biopolymer Coating on Barrier and Mechanical Properties of Paperboards. Master of Science (Packaging Technology), Major Field: Packaging Technology, Department of Packaging Technology. Thesis Advisor: Assistant Professor Tunyarut Jinkarn, Ph.D. 134 pages.

Water, oil and gas barrier as well as mechanical properties are importance characteristics of paperboard for food packaging. At present, these properties can be improved by coating paperboard with plastics or waxes which will cause environmental problems. This research aims to improve mechanical and barrier properties of paperboard by coating with biopolymers derived from carbohydrate, lipid, and protein. Carbohydrate based biopolymer selected for the study was hydrophobic starch since starch is a major additive in paper industry originally. For this research, concentration of starch was set at 15 % (w/w) to be in accordance with concentration level applied in paper industry. Other biopolymers to be used with hydrophobic starch were stearic acid and zein solution. This research composed of three parts. First part was to investigate effects of coating stearic acid and zein in combination with hydrophobic starch on paperboard's properties. Results showed that compression strength and stiffness were significantly decreased ($p \leq 0.05$) where as water and oil resistance was significantly increased ($p \leq 0.05$) with the increase of stearic acid's concentration. For zein solution coating in combination with starch layer, compression strength and stiffness were significantly increased ($p \leq 0.05$) and water and oil resistance were significantly increased ($p \leq 0.05$) with the increased of zein's concentration. However, stearic acid coating resulted in significantly high oxygen transmission rate (OTR) ($p \leq 0.05$) and zein coating resulted in significantly low oxygen transmission rate (OTR) ($p \leq 0.05$). Furthermore, improvement of paperboard' properties were better detected on uncoated back surface that has no calendaring effects. The second part of the research was to study the effects of coating stearic acid in hydrophobic starch together with zein solution coating on paperboard properties. Results showed that coated paperboard with stearic acid and zein at the ratio of 1:3 had the best compression strength and stiffness while ratio of 3:1 had the best water and oil resistance. In addition, combination of both zein and stearic acid coating were less effective than coating with either zein or stearic acid individually. The last part of the study was to observe the effects of storage time. For the results, paperboard coating with starch blended stearic acid at its maximum concentration under the study at 3 % (w/w) showed the highest water and oil resistance and paperboard coating with starch in combination with zein layer at zein's maximum concentration at 3 % (w/w) showed the highest compression strength and stiffness throughout four weeks of storage time.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ รัชฎาภรณ์ จิณญาณจน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก สำหรับคำปรึกษา คำแนะนำ และความเอาใจใส่ตลอดการดำเนินงานวิจัย รวมทั้งยังสนับสนุนทุนในการวิเคราะห์ และการทดสอบต่างๆในงานวิจัย และขอกราบขอบพระคุณอาจารย์รังรอง ยกส้าน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้ความรู้ ความเอาใจใส่ และให้คำแนะนำ ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์ และสารเคมีในระหว่างดำเนินการวิจัย และขอกราบขอบพระคุณคุณครู อาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้าจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัทกระดาษสหไทย จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์กระดาษแข็งสำหรับใช้ในงานวิจัย และขอขอบพระคุณ บริษัทเนชั่นแนล สตาร์ชสำหรับความอนุเคราะห์วัตถุดิบ และสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ และติดต่อประสานงานกับหน่วยงานต่างๆ ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ควบคุมเครื่องมือส่วนกลางที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือสำหรับทดสอบ ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเทคโนโลยีการบรรจุ สำหรับความมีน้ำใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นายธนภัทร พัฒนศิริ ที่คอยให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชุมศิลป์ และคุณแม่อุบล บุตรกนิรี ที่คอยให้กำลังใจ เป็นแรงผลักดัน และสนับสนุนในการทำงานวิจัย ทั้งหมดนี้เป็นแรงผลักดันช่วยให้ข้าพเจ้ามีกำลังใจในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สลิลดา บุตรกนิรี

กันยายน 2552

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(8)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	27
อุปกรณ์	27
วิธีการ	28
ผลและวิจารณ์	37
สรุปและข้อเสนอแนะ	93
สรุป	93
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	97
ภาคผนวก	106
ภาคผนวก ก วิธีการทดสอบ	107
ภาคผนวก ข ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมัน สเตียริก และซีน	124
ภาคผนวก ค สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันของกระดาษหลัง เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซีนภาย หลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้า ทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)	129
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	134

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติทางกายภาพของกระดาษก่อนเคลือบ	37
2	สมบัติเชิงกลของกระดาษก่อนเคลือบ	38
3	สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษก่อนเคลือบ	38
4	สมบัติการต้านทานน้ำมันของกระดาษก่อนเคลือบ	38
5	สมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊สของกระดาษก่อนเคลือบ	39
6	ความหนืดของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก	39
7	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก	41
8	สีของกระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก	42
9	ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งของกระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก	44
10	มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก	46
11	มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก	47
12	อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกปริมาณต่างๆ	48
13	ความหนืดของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และสารละลายซิน	50
14	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับซิน	51
15	สีของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับซิน	52
16	ความต้านทานแรงกดวงแหวนและค่าความแข็งของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับซิน	54

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
17	มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาดหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับจีน	56
18	มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาดหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับจีน	57
19	อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของกระดาดหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับจีน	59
20	น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาดหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)	61
21	สีของกระดาดที่ผ่านการเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)	62
22	ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งของกระดาดหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)	64
23	มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาดหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)	68
24	มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาดหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)	70
25	อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของกระดาดหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)	71

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาศหลังเคลือบด้วย สารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสความเข้มข้นร้อยละ 15 ร่วมกับกรดไขมัน สเตียริก และสารละลายซินในปริมาณที่คัดเลือก	125
ข2 มุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาศหลังเคลือบด้วย สารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสความเข้มข้นร้อยละ 15 ร่วมกับกรดไขมัน สเตียริก และสารละลายซินในปริมาณที่คัดเลือก	127
ค1 สมบัติเชิงกลของกระดาศก่อนและหลังเคลือบสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัส ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซินภายหลังเก็บภายใต้ การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74%RH)	130
ค2 สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาศก่อนและหลังเคลือบสารละลาย ไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และ ซินภายหลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)	132
ค3 สมบัติด้านการต้านทานน้ำมันของกระดาศก่อนและหลังเคลือบไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัส ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ภายหลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะ การเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)	133

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กลูโคสที่สร้างพันธะกันเป็นสายโซ่	4
2	การเชื่อมกันของแต่ละสายโซ่เซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นแผ่น (sheet)	4
3	เครื่องจักรแบบตะแกรงกลม (Cylinder Mould)	7
4	แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ	12
5	กลไกการตัดโมเลกุลสตาร์ช	21
6	โครงสร้างโมเลกุลของ OSA starch	22
7	ลักษณะสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกบนกระดาษแข็ง	30
8	ตัวอย่างกระดาษ Duplex Board	31
9	เครื่องเคลือบกระดาษ (Film Coater PI-1210)	31
10	ลักษณะสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินบนกระดาษแข็ง	32
11	ลักษณะสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซินบนกระดาษแข็ง	35
12	ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก หรือซินเพียงอย่างเดียว เปรียบเทียบกับสารผสมระหว่างสารทั้งสาม (ก) ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD (ข) ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD	65
13	ค่าความแข็งดิ่งของกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก หรือซินเพียงอย่างเดียว เปรียบเทียบกับสารผสมระหว่างสารทั้งสาม (ก) ความแข็งดิ่งแนว MD (ข) ความแข็งดิ่งแนว CD	66
14	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กรดไขมันสเตียริก และซิน	73
15	การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กรดไขมันสเตียริก และซิน	74

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board ด้านหน้า และด้านหลังขยาย 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ค) HL1; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 (ง) HL2; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 2 (จ) HL3; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3	76
17	ลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board ด้านหน้า และด้านหลังขยาย 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ค) HZ1; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซีนร้อยละ 1 (ง) HZ2; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซีนร้อยละ 2 (จ) HZ3; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซีนร้อยละ 3	78
18	ลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board ด้านหลังขยาย 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ค) เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 ซีนร้อยละ 3 (ง) เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ซีนร้อยละ 1 (จ) เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ซีนร้อยละ 3	79
19	ลักษณะสารเคลือบบนกระดาษด้านหน้า และด้านหลังจากกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยเลเซอร์ กำลังขยาย 50 เท่า และใช้ acidine orange และ fuchsin acid เป็นสีย้อม (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ค) HZ1; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซีนร้อยละ 1 (ง) HZ2; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซีนร้อยละ 2 (จ) HZ3; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ซีนร้อยละ 3	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
20	ความต้านทานแรงกดวงแหวนทิส MD และ CD ของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	84
21	ความแข็งตึงทิส MD และ CD ของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	85
22	มุมสัมพัทธ์น้ำของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	87
23	การดูดซึมน้ำของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	88
24	เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	89
25	มุมสัมพัทธ์น้ำมันของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	90
26	การดูดซึมน้ำมันของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	91
27	เวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะในคลังสินค้า (25-32 °C, 68-74 %RH)	92

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	=	องศาเซลเซียส
CD	=	Cross machine direction
MD	=	Machine direction
SEM	=	Scanning electron microscopy
CLSM	=	Confocal Laser scanning microscopy
RH	=	Relative Humidity

**ผลของการเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพต่อสมบัติการกีดขวางและสมบัติเชิงกลของ
กระดาษแข็ง**

**Effects of Biopolymer Coating on Barrier and Mechanical Properties of
Paperboards**

คำนำ

ปัจจุบันกระดาษเป็นวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับผลิตเป็นภาชนะบรรจุประเภทต่างๆ การผลิตกระดาษสำหรับการบรรจุหีบห่อ เช่น ถาดหรือกล่องบรรจุอาหาร กล่องกระดาษลูกฟูก และภาชนะบรรจุอื่นๆ ได้เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีข้อดีคือ มีน้ำหนักเบา แข็งแรง ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุได้หลายรูปแบบ และนำกลับมาหมุนเวียนใช้ใหม่ได้ อย่างไรก็ตามภาชนะบรรจุที่ทำจากกระดาษมีโครงสร้างที่มีรูพรุนจำนวนมากจึงสามารถดูดซับน้ำ ความชื้น และไขมันจากอาหารหรือสิ่งแวดล้อมได้ง่าย ทำให้กระดาษมีความแข็งแรงลดลง จากปัญหาดังกล่าวจึงได้มีการปรับปรุงคุณสมบัติกระดาษ โดยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม ซึ่งสามารถรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ได้ดี แต่ยังมีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติ หรือย่อยสลายได้น้อยมาก กระบวนการรีไซเคิลทำได้ยาก (Rhim *et al.*, 2006) นอกจากนั้นสารเคลือบอาจปนเปื้อนอาหารและก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้บริโภค

ในการพัฒนาภาชนะบรรจุกระดาษ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์อาหาร จึงต้องคำนึงถึงความสามารถในการปกป้องผลิตภัณฑ์ ความปลอดภัย และความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเป็นสิ่งสำคัญ ในปัจจุบันมีการวิจัยพัฒนาวัสดุที่หลากหลาย โดยเฉพาะวัสดุประเภทฟิล์มบริโภคได้ (edible films) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ได้จากผลพลอยได้ของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรเป็นส่วนใหญ่ เช่น casein, whey protein, corn zein และ wheat โดยสามารถย่อยสลายได้ ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีอันตรายต่อผู้บริโภค ด้วยข้อดีดังกล่าวจึงควรมีการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติของวัสดุพอลิเมอร์ธรรมชาติให้สามารถทำหน้าที่ในการป้องกันการซึมผ่านของความชื้น ไขมัน กลิ่นรสชาติ สี และองค์ประกอบต่างๆ ของผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น สารต้านอนุมูลอิสระ สารต้านจุลชีพ และการปรับปรุงคุณสมบัติด้านความแข็งแรงของวัสดุดังกล่าวให้ดีขึ้น (Khwaldia *et al.*, 2005)

อย่างไรก็ตามพอลิเมอร์ธรรมชาติสามารถใช้เป็นสารเคลือบที่มีคุณสมบัติการกีดขวาง (barrier) สำหรับภาชนะบรรจุกระดาษได้ เพื่อแทนที่การใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ย่อยสลายยาก เช่น พอลิเอทิลีน พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ ลาเทกซ์ และสารฟลูออโรคาร์บอน งานวิจัยส่วนใหญ่ มักทดลองศึกษาสารเคลือบจากพอลิเมอร์ธรรมชาติในลักษณะของฟิล์มบริโกลได้ ในงานวิจัยนี้จึง เลือการศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติประเภทที่มีความไวต่อน้ำและความชื้นต่ำ ได้แก่ โปรตีนซึ่งไม่ละลายน้ำ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ดี และด้านการซึมผ่านของน้ำมัน (Parris *et al.*, 2002) และสตาร์ชดัดแปรที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ เพื่อปรับปรุงสมบัติกระดาษให้มี ประสิทธิภาพในการด้านการซึมผ่านของน้ำและน้ำมัน โดยไม่ทำให้ความแข็งแรงเชิงกลลดลง และ ศึกษาผลของการเคลือบกระดาษด้วยกรดไขมันซึ่งมีจุดหลอมเหลวสูง และมีความไม่ชอบน้ำ เพื่อ ปรับปรุงสมบัติการด้านการซึมผ่านของน้ำ และน้ำมัน การวิจัยนี้จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่ม ศักยภาพในการใช้บรรจุภัณฑ์กระดาษที่เคลือบด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติให้มีสมบัติด้านการกีดขวาง ที่ดีขึ้น สามารถป้องกันการซึมผ่านของของเหลว เช่น น้ำ หรือน้ำมัน และยังคงมีสมบัติเชิงกลที่ดี อีกทั้งการใช้วัสดุดังกล่าวยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีความปลอดภัย และสามารถเข้าสู่ระบบการ หมุนเวียน (recycle) ของภาชนะบรรจุที่ใช้แล้วโดยสามารถทดแทนการใช้ภาชนะบรรจุที่มี โครงสร้างหลายชั้นที่ทำการแยกได้ยาก ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์สำหรับ อุตสาหกรรมอาหาร และสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ

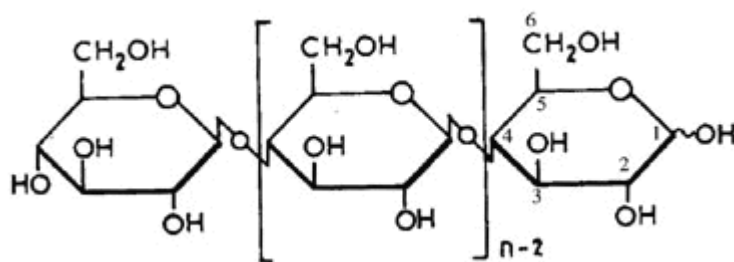
วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาสูตรสารเคลือบกระดาษแข็งที่เตรียมจากพอลิเมอร์ชีวภาพจำพวกสตาร์ช โปรตีน และไขมัน
2. เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล (physical and mechanical properties) ของกระดาษแข็งเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer coated paperboard)
3. เพื่อศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน และสมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊ส ของกระดาษเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของสภาวะการเก็บของกระดาษแข็งเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพโดยการจำลองสภาวะต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน

การตรวจเอกสาร

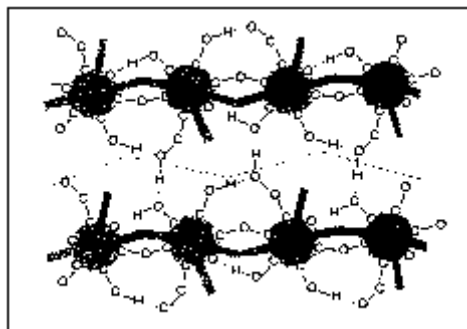
1. โครงสร้างของกระดาษ (paper structure)

กระดาษประกอบด้วยส่วนที่สำคัญที่สุดคือ เยื่อกระดาษและสารเคมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เยื่อกระดาษได้จากไม้ที่เรียกว่า เส้นใยเซลลูโลส ซึ่งเกิดจากโมเลกุลของกลูโคสสร้างพันธะโคเวเลนต์กันเป็นสายโซ่ยาวที่ประกอบด้วยกลูโคส 3000-5000 หน่วย แต่ละสายโซ่จะเชื่อมกันด้านข้างระหว่างสายโซ่ด้วยพันธะไฮโดรเจน และเส้นใยจะประกอบกันเป็นชั้นๆ โดยยึดกันด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals forces) (Conservation Resources International, n.d.) ซึ่งแสดงดังภาพที่ 1 และ 2



ภาพที่ 1 กลูโคสที่สร้างพันธะกันเป็นสายโซ่

ที่มา: Conservation Resources International (n.d.)



ภาพที่ 2 การเชื่อมกันของแต่ละสายโซ่เซลลูโลสด้วยพันธะไฮโดรเจนเป็นแผ่น (sheet)

ที่มา: Conservation Resources International (n.d.)

กระดาษประกอบไปด้วยเส้นใยเซลลูโลส ซึ่งมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก (microporous) มีขนาดตั้งแต่ 0.1-3.0 อังสตรอม โครงสร้างและสถานะของเส้นใยจะถูกดัดแปรระหว่างกระบวนการผลิต ซึ่งทำให้รูพรุนมีลักษณะเปลี่ยนแปลงไป เซลลูโลสมีความเป็น hygroscopic เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซี (OH-group) ในโมเลกุลเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) ภาชนะบรรจุกระดาษจึงสามารถดูดซับน้ำจากสิ่งแวดล้อมหรืออาหารได้ง่าย ยิ่งไปกว่านั้น กระดาษมักมีช่องว่างเล็กๆ ในโครงสร้าง ความชื้นจะซึมเข้าไปสู่กระดาษด้วยการแพร่ของไอน้ำ การแพร่ของน้ำผ่านกระดาษมักจะขึ้นอยู่กับกลไกการเคลื่อนย้ายและสถานะของน้ำ จึงมักมีการปรับปรุงกระดาษด้วยวัสดุที่ย่อยสลายได้ เช่น สตาร์ชดัดแปรเพื่อลดความเป็น hygroscopicity ของกระดาษ (Dury-Brun *et al.*, 2006)

2. กระดาษแข็ง (paperboards)

กระดาษแข็ง หมายถึง กระดาษหนาหลายชั้นที่สามารถทรงตัวอยู่ได้ในแนวดิ่ง แต่ละชั้นอาจมีสมบัติที่แตกต่างกันหรือเหมือนกันก็ได้ ผิวชั้นบนของกระดาษแข็งมีทั้งชนิดเคลือบและไม่เคลือบเพื่อให้เหมาะกับการพิมพ์หรือเพิ่มสมบัติอื่นๆ กระดาษแข็ง อาทิ เช่น แผ่นคูเพล็กซ์ กระดาษแข็งสีเทาและกระดาษแข็งสีขาว กระดาษแข็งจะมีความคงรูปสูง ความต้านทานแรงดันทะลุสูง สมบัติการพิมพ์ดีพอสมควร กระดาษแข็งเป็นวัสดุสำคัญสำหรับการบรรจุหีบห่อ ซึ่งมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในรูปแบบของถาดและกล่องเพื่อการขายปลีก นิยมใช้บรรจุสินค้าต่างๆ เช่น อาหาร ลูกกวาด สบู่ ยา เครื่องสำอาง บุหรี่ และของเล่น เป็นต้น (อัญชลี และคณะ, 2545)

2.1 วัตถุดิบที่ใช้ทำแผ่นกระดาษแข็ง

เยื่อที่นำมาใช้ในการผลิตกระดาษแข็งคือเยื่อฟอกขาว (pulp) และเยื่อเศษกระดาษ เยื่อฟอกขาว ได้แก่ เยื่อใหม่ที่มีทั้งเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ส่วนเยื่อเศษกระดาษได้มาจากกระดาษที่ใช้แล้ว เช่น กระดาษปอนด์ขาว ปรู๊ฟ หนังสือพิมพ์ หนังสือยก และกล่องกระดาษต่างๆ เป็นต้น

2.2 การเตรียมเยื่อสำหรับผลิตกระดาษแข็งโดยทั่วไปมี 4 ขั้นตอน คือ

2.2.1 เยื่อชั้นบน ประกอบด้วยเยื่อฟอกขาวที่เป็นส่วนผสมของเยื่อใยยาวและเยื่อใยสั้น ในอัตราส่วนที่พอเหมาะ ซึ่งมีการเติมสารเคมีลงไปด้วย

2.2.2 เชื้อชั้นที่สอง ส่วนมากใช้เชื้อเศษกระดาษจากกระดาษปรีฟลี ซึ่งมีการแยกสิ่งสกปรกออกไปแล้ว

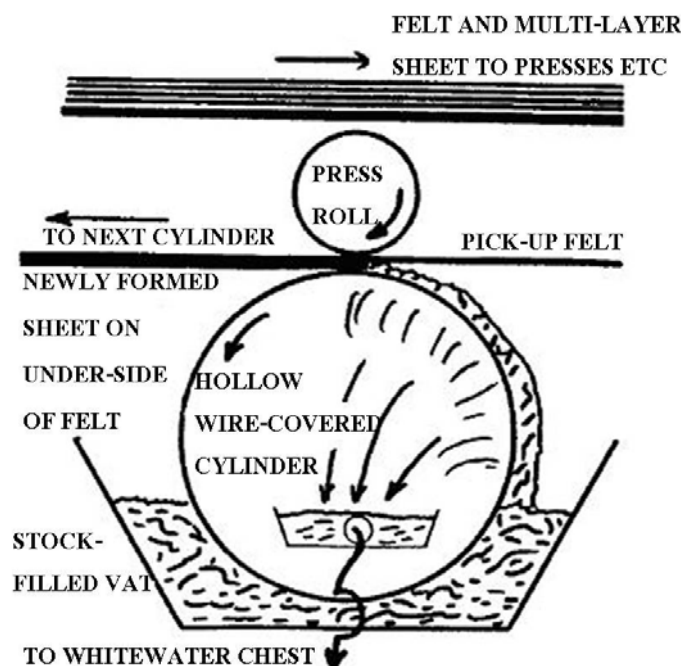
2.2.3 เชื้อชั้นกลาง ใช้เชื้อเศษกระดาษจากกระดาษกล่องหนังสือยกและหนังสือเล่ม ซึ่งแยกสิ่งสกปรกออกไปแล้ว

2.2.4 เชื้อชั้นหลัง ส่วนมากเป็นเชื้อเศษกระดาษ

2.3 การผลิตกระดาษแข็ง

การผลิตกระดาษแข็งในขั้นตอนการทำแผ่นนิยมใช้เครื่องจักรแบบตะแกรงกลม cylinder machine (สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2529) ซึ่งเป็นการทำแผ่นโดยให้เชื้อเกาะสานตัวบนตะแกรงทรงกระบอก และพาไปติดกับแผ่นสีกหลายที่หมุน ในการทำกระดาษแข็งหลายๆชั้นก็จะใช้ตะแกรงกลมเรียงกันหลายๆลูก ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ ส่วนประกอบหลักของเครื่องจักรแบบตะแกรงกลมคือ Vat และลูกกลิ้งตะแกรง (Wire Cylinder) เครื่องจักรชนิดนี้แสดงดังภาพที่ 3

Vat มีหน้าที่ปล่อยน้ำเชื้อที่เตรียมไว้แล้วให้กระจายตัวบนตะแกรงโดยลูกกลิ้งตะแกรงจะหมุนพาเชื้อให้เกาะตัวกันเป็นแผ่นบนตะแกรง ซึ่งตัวตะแกรงจะประกอบด้วยโครงสแตนเลสและมีตะแกรงหุ้ม 2 ชั้น ชั้นในมีความถี่ 8 เมช (mesh) ส่วนชั้นนอกมีความถี่ 40 เมช สำหรับเชื้อน้ำตาล และ 55 เมช สำหรับเชื้อขาว ด้านหลังตะแกรงจะถูกกดทับด้วยลูกกลิ้งยางที่เรียกว่า Couch roll ทำด้วยโลหะหุ้มยางที่นิ่ม เชื้อจะติดไปบนตะแกรง ส่วนน้ำจะไหลลอดตกลงมาทางด้านล่างและจะมีผ้าใบผืนยาววิ่งผ่านตะแกรงทุกๆลูก โดยเชื้อจะซ้อนติดกันขึ้นไปเป็นชั้นๆ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, ม.ป.ป.)



ภาพที่ 3 เครื่องจักรแบบตะแกรงกลม (Cylinder Mould)

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (ม.ป.ป.)

2.4 ประเภทของกระดาดแข็ง

กระดาดแข็งมีหลายประเภทซึ่งมีสมบัติในการใช้ และต้นทุนการผลิตแตกต่างกัน ประเภทของกระดาดแข็งทั่วไปที่พิมพ์ใช้ในประเทศ (อัญชลี และคณะ, 2545) มีดังนี้

2.4.1 กระดาดแข็งไม่เคลือบผิวหน้า เป็นกระดาดที่ไม่มีการเคลือบสารสีขาหรือวัสดุใดเป็นพิเศษ ด้านหน้าจะขาวพิมพ์รูปสอดีไม่สวย ความแข็งแรงปานกลาง ราคาถูก หาซื้อได้ไม่ยากนัก การซื้อขายคิดเป็นน้ำหนัก (กรัม) นิยมทำกล่องหลอดไฟ กล่องเข็มหมุด เป็นต้น

2.4.2 กระดาดแข็งเคลือบ เป็นการนำเอากระดาดแข็งไม่เคลือบมาฉาบด้วยสารสีขาหรือวัสดุพิเศษ แล้วผ่านการขัดมันโดยใช้ลูกกลิ้งโครเมียมสองลูกเพื่อให้ผิวหน้าเรียบ เป็นต้น มีคุณสมบัติพิมพ์สอดีได้สวยงาม นิยมทำกล่องสบู่ กล่องผ้าอนามัย เป็นต้น

2.4.3 กระดาษการ์ด เป็นกระดาษหนาชั้นเดียวหรือหลายชั้น ใช้พิมพ์ได้ทั้งสองหน้า

2.4.4 กระดาษการ์ดมานิลา เป็นกระดาษการ์ดหลายชั้น ใช้พิมพ์ได้ทั้งสองหน้า และมีความแข็งแรง จึงทำให้สามารถทรงตัวอยู่ได้ดีเป็นพิเศษในแนวดิ่ง

2.4.5 กระดาษการ์ดไอวอรี เป็นกระดาษการ์ดชั้นเดียวหรือหลายชั้น ซึ่งมีคุณสมบัติทุกๆชั้นเหมือนกัน

2.4.6 กระดาษอาร์ตมัน มีด้านหน้าและด้านหลังสีขาวและมัน ใช้เยื่อบริสุทธิ์ล้วนๆ และมีการเคลือบผิวหน้าด้วย มีราคาแพง นิยมใช้ทำกล่องยา กล่องบุหรี กล่องเครื่องสำอาง เป็นต้น

2.4.7 การ์ดแก้ว มีด้านหน้าและด้านหลังสีขาวและมันเป็นกระจก การใช้งานน้อย เพราะราคาแพงมาก และต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ หากนำกระดาษอาร์ตมาฉาบมันจะมีลักษณะคล้ายการ์ดแก้ว

2.4.8 แครีบอร์ด (carry board) มีด้านหลังเป็นสีน้ำตาล คุณสมบัติเหนียว พิมพ์สอได้ดี ผิวหน้าเรียบ มีความหนาแน่นมาก สามารถใช้ทำกล่องบรรจุสินค้าแช่เย็นได้ และป้องกันความชื้นได้ดีมาก

2.4.9 อะลูมิเนียมบอร์ด เป็นการนำกระดาษแข็งมาฉาบผิว ด้วยอะลูมิเนียมที่ผิวด้านใดด้านหนึ่งก็ได้ นิยมใช้ทำกล่องที่ต้องการความสวยงาม เช่น กล่องสบู่ กล่องซูปเปอร์ กล่องอาหาร การพิมพ์ต้องใช้ระบบทางเคมี และผิวเป็นโลหะ

2.4.10 กระดาษอาร์ตบอร์ด เป็นสีเทาทั้ง 2 ด้าน ใช้เยื่อจากเศษกระดาษ นิยมใช้ทำกล่องรองเท้า กล่องซอล์ก กระดาษประเภทนี้สามารถทำให้หนาได้ แต่จะไม่มีผิวเหนียว ส่วนมากใช้ทำกล่องคงรูป

ในบางครั้งกระดาษแข็งเหล่านี้จะได้รับการเคลือบผิวหรือประกบวัสดุอื่น เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานดีขึ้น เช่น เพิ่มความต้านทานต่อความชื้น เป็นต้น การเคลือบทำได้หลายวิธี เช่น เคลือบด้วยไวนิล พีวีดีซี ไซ น้ำมันชักเงา สารอะคริลิก และประกบด้วยฟิล์มพลาสติก เป็นต้น

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติของกระดาษ (paper properties)

คุณสมบัติของกระดาษและกระดาษแข็งเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการผลิตและการใช้งานสุดท้ายที่ต้องการ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้ (Kline, 1982)

3.1 คุณสมบัติทางด้านกายภาพ (physical properties)

3.1.1 น้ำหนักมาตรฐาน (basis weight หรือ grammage) หมายถึงน้ำหนักกระดาษเป็นกรัมต่อพื้นที่ 1 ตารางเมตร คุณสมบัตินี้ใช้กำหนดราคาซื้อขายได้และมีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงของกระดาษ

3.1.2 ความหนา (thickness) หมายถึงระยะทางตั้งฉากระหว่างผิวหน้าทั้งสองกระดาษเป็นไมครอนหรือมิลลิเมตร ความหนาของกระดาษนี้บางครั้งก็เรียกว่า คาลิเปอร์ (caliper) จะมีส่วนสัมพันธ์กับสมบัติที่เกี่ยวกับความเหนียว การโค้งงอและความคงรูป รวมทั้งราคา และกรรมวิธีต่างๆ ในการแปรรูปเป็นภาชนะบรรจุ

3.1.3 ปริมาณความชื้น (moisture content) หมายถึงปริมาณของน้ำในกระดาษคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักเดิม สมบัตินี้มีความสัมพันธ์ต่อการพิมพ์ การประกบ การเคลือบ การตัด การทากาว และกรรมวิธีอื่นๆ ในการทำเป็นภาชนะบรรจุ ซึ่งความชื้นยังคงมีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติเชิงกลของกระดาษ

3.1.4 ทิศทางของเส้นใย (directionality) หมายถึง แนวหรือทิศทางการเรียงตัวของเส้นใยเซลลูโลสในกระดาษ โดยถ้าพิจารณาจากกระบวนการผลิตกระดาษพบว่า เส้นใยเซลลูโลสส่วนมากมีการเรียงตัวไปในทิศทางการไหลและการเคลื่อนที่ของตะแกรงบนเครื่องผลิตกระดาษ ดังนั้นแนวการเรียงตัวของเส้นใย หรือแนวเส้นใยของกระดาษจึงอยู่ใน “แนวนานเครื่อง” (machine direction, MD) หรือแนวเกรน (grain direction) มากกว่า ส่วนแนวของกระดาษที่ตั้งฉากกับแนวนานเครื่องซึ่งเรียกว่า “แนวขวางเครื่อง” (cross direction, CD) หรือแนวขวางเกรน (cross-grain direction) เนื่องจากการเรียงตัวของเส้นใย ในกระดาษทั้งสองแนวมีความแตกต่างกัน จึงมีผลให้สมบัติของกระดาษทั้งสองแนวแตกต่างกันด้วย จากการที่ทิศทางของเส้นใยเรียงตัวในแนวนานเครื่องมากกว่าแนวขวางเครื่องทำให้สมบัติทางเชิงกลของกระดาษทั้งสองแนวแตกต่างกัน การตรวจสอบแนวเกรนของกระดาษมีความสำคัญมากในขั้นตอนการนำกระดาษไปสู่กระบวนการผลิต

ยกตัวอย่างเช่น การหักพับ เซาร่อง สามารถทำได้ง่ายในแนวนานเครื่อง และค่าความคงรูปในแนวนานเครื่องที่สูงกว่า ซึ่งจะมีประโยชน์ในการออกแบบแฟ้ม หรือบรรจุภัณฑ์ต่างๆ

3.1.5 ความเรียบ (smoothness) ความเรียบของกระดาษสัมพันธ์กับความเหมาะสมในการพิมพ์ กล่าวคือ ถ้ากระดาษมีผิวเรียบจะช่วยให้อุณหภูมิการพิมพ์ดีขึ้น

3.2 ทิศสมบัติ (optical properties)

3.2.1 ความสว่าง (brightness) หมายถึงค่าการสะท้อนแสงของแสงสีน้ำเงินที่มีความยาวคลื่น 457 นาโนเมตร เมื่อกระดาษที่ไม่ได้ฟอกส่วนมากจะมีสีน้ำตาลเข้มถึงเหลืองอ่อน เนื่องจากลิกนินดูดซับแสงสีน้ำเงินไว้ แต่เมื่อนำเยื่อไปฟอกแล้ว ค่าการสะท้อนแสงสีน้ำเงินจะสูงขึ้น ทำให้มองเห็นกระดาษขาวสว่างมากขึ้น ความสว่างของกระดาษมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะสำหรับกระดาษที่ต้องนำไปใช้ในกระบวนการพิมพ์

3.2.2 ความทึบแสง (opacity) ความทึบแสงของกระดาษ เป็นคุณสมบัติที่จำเป็นสำหรับกระดาษพิมพ์เขียน กระดาษจะต้องทึบแสงพอที่จะบังภาพหรืออักษรที่อยู่ด้านหลังไม่ให้ปรากฏจนเกิดปัญหาในการอ่านและความชัดเจนของสิ่งที่พิมพ์ ความทึบแสงสามารถวัดได้โดยเปรียบเทียบค่าการสะท้อนแสงสีเขียวในช่วงคลื่น 557 นาโนเมตร ระหว่างกระดาษแผ่นเดียวที่รองหลังด้วยพื้นดำสนิท กับกระดาษที่วางซ้อนกันหนาจนแสงไม่ผ่านทะลุ ความทึบแสงและความสว่างต่างขึ้นกับปัจจัยสำคัญ 2 ประการ คือ การกระเจิงแสงและการดูดซับแสง กระดาษที่ใช้เยื่อที่มีความขาวสว่างสูงมาก อาจมีปัญหาด้านความทึบแสง เพราะเยื่อจะมีความทึบแสงน้อยลง การใช้ตัวเติมจะช่วยเพิ่มการกระเจิงแสงในเนื้อกระดาษซึ่งจะช่วยปรับปรุงความทึบแสงให้ดีขึ้นได้

3.3 คุณสมบัติทางด้านความแข็งแรง (strength properties)

3.3.1 ความต้านทานการฉีกขาด (tear resistance) หมายถึง ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงซึ่งทำให้ฉีกทดสอบขาด มีหน่วยเป็นมิลลิวัตตันหรือกรัมแรง สมบัตินี้บอกถึงความแข็งแรงของกระดาษ

3.3.2 ความต้านทานแรงดึงขาดและการยืดตัว (tensile strength and elongation) หมายถึง ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงดึงซึ่งกระทำที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งของชิ้น

ทดสอบที่มีความกว้างคงที่จนขึ้นทดสอบนั้นขนาด มีหน่วยเป็นนิวตันต่อความกว้างเป็นเมตร ส่วนการยืดตัวหมายถึงระยะที่ขึ้นทดสอบยืดตัวออกจนขนาด มีหน่วยเป็นร้อยละของความยาวเดิมของขึ้นทดสอบ

3.3.3 ความต้านทานต่อการพับ (folding endurance) หมายถึงจำนวนครั้งการพับไปมา (double folds) ที่ทำให้กระดาษขาดจากกัน เมื่อใช้แรงดึงที่กำหนด สมบัตินี้มีความสำคัญกับกระดาษที่การใช้งานที่มีลักษณะต้องมีการพับไปพับมา

3.3.4 ความต้านทานการขัดสี (abrasion resistance) หมายถึงความสามารถของกระดาษที่จะทนต่อการเสียดสีระหว่างการขนส่ง หรือระหว่างแผ่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีวัสดุแปลกปลอม เช่น ทรายอยู่ระหว่างชั้นของกระดาษ ซึ่งอาจทำให้เกิดการแยกระหว่างชั้น

3.3.5 ความต้านแรงกดวงแหวน (ring crush test) หมายถึง ความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงที่มากกดทับในแนวตั้งกับกระดาษจนขอบกระดาษหักพับ มีหน่วยเป็นนิวตัน หรือ กิโลกรัมแรง ค่านี้มีความสัมพันธ์กับความแข็งแรงในการเรียงซ้อนของภาชนะบรรจุกระดาษและถึงกระดาษ เครื่องมือที่ใช้คือ crush tester หรือ compression tester ในการทดสอบมักต้องอาศัยที่จับขึ้นทดสอบ (ring crush holder)

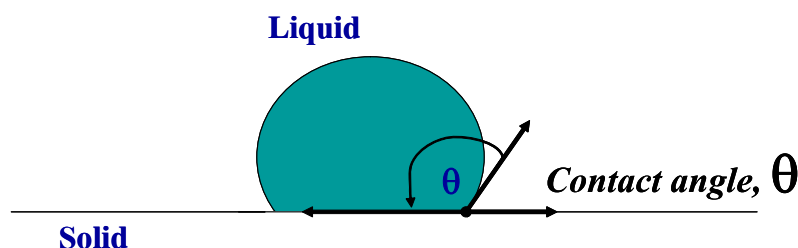
3.3.6 ความต้านแรงดันทะลุ (bursting strength) หมายถึงความสามารถของกระดาษที่จะต้านแรงดันที่กระทำบนผิวขึ้นทดสอบด้วยอัตราที่เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ จนทำให้ขึ้นทดสอบนั้นขาดทะลุ มีหน่วยเป็นกิโลปาสกาล (kPa) หรือกิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร (kgf/cm^2) หรือ ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) สมบัตินี้มีความสัมพันธ์กับความต้านแรงดึงขาดและความต้านทานการฉีกขาด

3.3.7 ความแข็งตึง (stiffness) หมายถึง ความต้านทานของกระดาษต่อการโค้งงอที่เกิดจากน้ำหนักของตัวกระดาษเอง หรือแรงอื่นที่กระทำต่อกระดาษนั้น ทั้งนี้กระดาษมีความแข็งตึงในแนวนานเครื่องมากกว่ากระดาษในแนวขวางเครื่อง ความแข็งตึงของกระดาษมีความสำคัญต่อการป้อนและรับกระดาษบนเครื่องพิมพ์ โดยปกติในการป้อนกระดาษเข้าพิมพ์มักป้อนกระดาษในแนวนานเครื่องเข้าพิมพ์โดยให้มีทิศทางเดียวกับทิศทางการเดินแผ่นของเครื่องพิมพ์ เนื่องจากกระดาษในแนวนานเครื่องมีความแข็งตึงมากกว่า ทำให้การเดินแผ่นกระดาษไม่เกิดการติดขัด

การเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษทำได้โดยเพิ่มปริมาณการบดเยื่อ แต่การบดเยื่อมากเกินไปอาจมีผลทำให้ความแข็งแรงของกระดาษลดลงเนื่องจากการบดเยื่อทำให้เส้นใยมีความยาวน้อยลง นอกจากนี้ พบว่าความแข็งแรงของกระดาษลดลงตามปริมาณของตัวเติมที่เติมในกระบวนการผลิตกระดาษ ปริมาณความชื้นในกระดาษ และปริมาณการรีดกระดาษที่เพิ่มขึ้น

3.4 คุณสมบัติด้านการกีดขวาง (barrier properties)

3.4.1 ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ (contact angle test) เป็นการทดสอบความสามารถในการต้านทานน้ำของวัสดุ โดยอาศัยหลักการที่ว่า ถ้าค่าพลังงานที่ผิว (surface energy) ของวัสดุมีค่ามากกว่าพลังงานของของเหลว วัสดุนั้นจะดูดซึมของเหลวไว้ได้ ซึ่งคำว่า contact angle จะหมายถึงมุมที่ของเหลวทำกับผิวของวัสดุ แสดงดังภาพที่ 4 โดยทั่วไปนิยมใช้น้ำกลั่นเป็นของเหลวในการทดสอบ การวัดค่ามุมนี้เป็นพื้นฐานของการวัดสมบัติการเปียก (wettability) ของผิววัสดุ โดยกระดาษที่ดูดซับน้ำได้ดีจะมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำต่ำ



ภาพที่ 4 แสดงการวัดค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำ

3.4.2 การดูดซับน้ำ (water absorption) หมายถึง ปริมาณของน้ำเป็นกรัมที่กระดาษซึ่งมีพื้นที่ 1 ตารางเมตร สามารถดูดซับได้ภายในเวลาที่กำหนดให้ สมบัตินี้สามารถใช้ในการทดสอบความสามารถในการดูดซับของเหลวในกระดาษ วิธีการทดสอบที่มักใช้ เช่น “คอบบี้ เทส” (Cobb test)

3.4.3 เวลาในการดูดซับน้ำ (absorption time) เป็นการทดสอบสมบัติการดูดซับของเหลวของวัสดุ โดยการหยดของเหลวที่มีปริมาตรคงที่ลงบนผิววัสดุ และจับเวลาในการที่หยดของเหลวหนึ่งหยดใช้ในการซึมผ่านลงไปใวัสดุนั้น ซึ่งเวลาที่ได้เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถในการดูดซับของเหลวของวัสดุ อย่างไรก็ตาม ในกรณีของน้ำ เวลาที่ใช้ในการดูดซับน้ำหนึ่งหยดจะถูก

กำหนดไว้สูงสุดที่ 200 นาติ เนื่องจากที่ระยะเวลานานกว่านี้จะพิจารณาว่าปริมาณของหยดน้ำหายไปเนื่องจากการระเหย (สตรีรัตน์, 2550)

3.4.4 การต้านการซึมผ่านของน้ำมัน และ ไขมัน (oil and grease resistance) เป็นการทดสอบที่ใช้กับกระดาษหลายประเภททั้งกระดาษที่พิมพ์ด้วยหมึกพิมพ์ที่มีส่วนประกอบของน้ำมัน และกระดาษที่ใช้สำหรับบรรจุอาหาร โดยในการทดสอบจะวัดอัตราการซึมผ่านของน้ำมันสน (turpentine) ผ่านกระดาษเคลื่อนจากด้านบนไปยังด้านล่างของแผ่นกระดาษ

3.4.5 การต้านการซึมผ่านของแก๊ส (air resistance) สามารถทดสอบได้โดยการวัดปริมาณของอากาศที่ซึมผ่านตัวอย่างกระดาษ ซึ่งค่าที่ได้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างภายใน พื้นผิวของกระดาษ องค์ประกอบของสารเคมีที่เติมลงในเยื่อกระดาษ และชนิดของสารเคลือบกระดาษ

4. การเคลือบกระดาษ (coating)

การผลิตกระดาษบางชนิดจะต้องมีขั้นตอนการเคลือบกระดาษเพื่อให้กระดาษมีสมบัติตามต้องการ เช่น การเคลือบช่วยให้กระดาษมีความขาวขึ้น ความทึบแสงสูงขึ้น สะท้อนแสงดีขึ้น ทำให้พิมพ์ได้คมชัดมากขึ้น และช่วยให้กระดาษมีความต้านทานน้ำมากขึ้น ในการเคลือบกระดาษจะต้องใช้น้ำยาเคลือบ ซึ่งประกอบไปด้วย ผงสี (pigments) กาว (binder) และตัวเติมแต่ง (additives) ส่วนที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ ผงสี ส่วนกาวเป็นตัวช่วยประสานในการเคลือบ และตัวเติมแต่งเป็นตัวช่วยในการเคลือบให้ได้คุณภาพดียิ่งขึ้น การผสมส่วนประกอบเหล่านี้เข้าด้วยกันนั้นส่วนประกอบแต่ละตัวจะต้องสามารถเข้ากันได้ และช่วยส่งเสริมคุณสมบัติซึ่งกันและกันได้

4.1 ชนิดของการเคลือบผิวกระดาษ

การเคลือบกระดาษแบ่งได้ออกเป็นหลายแบบ แต่ที่นิยมจะแบ่งตามชนิดของสารเคลือบที่ใช้มี 3 ชนิด (จิรัญญา, 2545) คือ

4.1.1 ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย (waterborne coating) เป็นการเคลือบที่ใช้สารเคมีที่มีโครงสร้างโมเลกุลไม่แข็งแรง สามารถใช้น้ำทำลายโครงสร้างของโมเลกุลได้ สารเคมีชนิดนี้จึงมีน้ำเป็นตัวทำละลายซึ่งการเคลือบโดยใช้สารเคมีชนิดนี้จะมีค่าความเงาไม่สูงนัก และสามารถนำแผ่นพิมพ์ที่เคลือบแล้วไปพิมพ์ได้อีก และข้อได้เปรียบของการเคลือบโดยใช้สารเคมีชนิดนี้คือ จะไม่

ทำลายสภาพแวดล้อมซึ่งเหมาะสมกับสภาวะในปัจจุบันที่ส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น แต่ข้อด้อยของการเคลือบชนิดนี้คือ จะป้องกันความชื้น การชุบฉีด และสารเคมีต่างๆ ได้น้อย

4.1.2 ใช้สารอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย (organic solventborne coating) เป็นการเคลือบที่ใช้สารเคมีที่มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์เป็นตัวทำละลาย เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของน้ำยาเคลือบชนิดนี้เป็นโครงสร้างที่จะถูกทำลายได้จากการเข้าแทนที่ของสารอินทรีย์ ดังนั้นจึงต้องใช้สารกลุ่มนี้เป็นตัวทำละลายซึ่งการเคลือบประเภทนี้จะมีค่าความเงาของผิวกระดาดมากขึ้น และมีความทนทานต่อแรงชุบฉีด และสารเคมี และสามารถป้องกันความชื้นได้ดี แต่การเคลือบด้วยสารเคลือบประเภทนี้มักจะมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม และสารเคมียังเป็นอันตรายไม่เหมาะที่จะนำกระดาดเคลือบประเภทนี้ไปบรรจุหีบห่ออาหาร

4.1.3 การใช้พลาสติกในการเคลือบด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) หรือการเคลือบร้อนโดยใช้สารเคมีที่หลอมละลายได้เมื่อร้อน (hot melt coating) เป็นการหลอมเหลวแผ่นเทอร์โมพลาสติกโดยใช้ความร้อน และนำมาเคลือบลงบนกระดาดผ่านลูกกลิ้งที่มีแรงกด และลูกกลิ้งที่ลดอุณหภูมิเพื่อให้พลาสติกแข็งตัว การเคลือบด้วยสารประเภทนี้จะไม่ใช้ตัวทำละลายซึ่งมีข้อดีคือ จะไม่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สามารถเคลือบผิวกระดาดด้วยสารที่มีน้ำหนักสารเคลือบน้อยได้ ในกระบวนการยังไม่ต้องอาศัยการระเหยตัวทำละลายด้วยลมร้อน เป็นการลดการใช้พลังงาน และสามารถเคลือบกระดาดได้ด้วยความเร็วมากขึ้น

5. พอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer)

พอลิเมอร์ชีวภาพ หมายถึง พอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็กๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ สารประกอบคาร์บอนที่ได้จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม พอลิเมอร์ชนิดนี้จะต้องมีโครงสร้างทางโมเลกุลที่เอื้ออำนวยให้เอนไซม์ของจุลินทรีย์ย่อยสลายได้ พอลิเมอร์ชีวภาพแบ่งตามแหล่งที่ผลิตเป็น 3 ประเภท (Doi and Fukuda, 1994) คือ

5.1 พอลิเมอร์ที่สกัดได้โดยตรงจากแหล่งชีวภาพ (biomass) ได้แก่

5.1.1 พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) เช่น แป้ง, เซลลูโลส และไคโตซาน เป็นต้น

5.1.2 โปรตีน (proteins) เช่น เคซีน (casein), เวย์ (whey) และ ซีน (zein) เป็นต้น

5.1.3 ไขมัน (lipids) ได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ที่มีโครงสร้างเป็นครอสลิง (cross-linked)

5.2 พอลิเมอร์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ที่สกัดได้จากแหล่งชีวภาพ เช่น พอลิแลคติกแอซิด (polylactic acid)

5.3 พอลิเมอร์ที่ผลิตได้จากจุลินทรีย์ เช่น polyhydroxyalkanoates, bacterial cellulose, xanthan, curdlan และ pullan เป็นต้น

6. พอลิเมอร์ชีวภาพที่ใช้ในการเคลือบกระดาษ

พอลิเมอร์ชีวภาพเป็นวัสดุที่สามารถหามาทดแทนใหม่ได้ มีแหล่งกำเนิดจากพืช หรือ สิ่งมีชีวิตต่างๆ พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถย่อยสลายทางชีวภาพ ไม่เป็นพิษ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์ม หรือใช้เป็นสารเคลือบได้ ในปัจจุบันได้มีการวิจัยการใช้พอลิเมอร์ชีวภาพในการเคลือบอาหารและ กระดาษ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติในด้านต่างๆ และยืดอายุอาหาร เช่น ลดการสูญเสีย น้ำ การแพร่ของแก๊ส การซึมผ่านของน้ำมัน ไขมัน และการสูญเสียกลิ่นรส หรือน้ำมันหอมระเหยต่างๆ ปรับปรุง คุณสมบัติด้านโครงสร้างให้เชื่อมโยงกันอย่างแข็งแรง

พอลิเมอร์ชีวภาพสามารถเติมสารเติมแต่ง เช่น pigments กลิ่น และสารเติมแต่งอาหารเป็นส่วนประกอบเพื่อปรับปรุงหรือเพิ่มเติมคุณสมบัติได้ นอกจากนั้นยังสามารถปรับปรุงคุณสมบัติใน ด้านความเงา ทำให้วัสดุที่เคลือบมีผิวที่เรียบขึ้น ที่สำคัญพอลิเมอร์ชีวภาพบางชนิดสามารถต้านทาน การเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการประยุกต์สำหรับวัสดุที่ใช้ผลิต เป็นภาชนะบรรจุอาหาร ซึ่งในปัจจุบันได้มีการศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพอย่าง กว้างขวางดังตัวอย่างงานวิจัยต่อไปนี้

6.1 ตัวอย่างงานวิจัยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็น พอลิแซคคาไรด์ (polysaccharides)

Kjellgren *et al.* (2006) ศึกษาการเคลือบกระดาษทนน้ำมัน (greaseproof paper) ด้วย ไคโตซานในระดับของน้ำหนักสารเคลือบ 0-5.2 กรัมต่อตารางเมตร พบว่า สามารถป้องกันการซึม ผ่านของแก๊สออกซิเจน เมื่อน้ำหนักของสารเคลือบเป็น 2.4 กรัมต่อตารางเมตร และป้องกันการซึม

ผ่านของแก๊สไนโตรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้ในระดับสารเคลือบ 5.2 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนการต้านทานการซึมผ่านของไขมันมีประสิทธิภาพดีมากในช่วงน้ำหนักของสารเคลือบเป็น 2.4-5.2 กรัมต่อตารางเมตร แต่ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำ และไม่มีผลต่อค่าความแข็งแรงในการต้านทานแรงดึง (tensile strength) ของกระดาษเคลือบ

Ham-Pichavant *et al.* (2005) ศึกษาความสามารถในการต้านทานไขมันของกระดาษที่เคลือบด้วยไคโตซานแทนการเคลือบด้วยสารจำพวกฟลูออโรคาร์บอน (fluorocarbon treatment) โดยศึกษาอันตรกิริยาระหว่างไคโตซานและกรดไขมัน เช่น กรดไขมันโอเลอิก (oleic acid) และกรดไขมันอื่นๆที่พบมากในอาหารพบว่า ในสภาวะที่เป็นกรด ไคโตซานจะแสดงประจุบวกที่สามารถจับกับโมเลกุลไขมันซึ่งแสดงประจุลบกลายเป็นอิมัลชัน โอเลอิกของกรดไขมันที่เสถียร ซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของความเข้มข้นกรดโอเลอิกอิสระที่เหลืออยู่ (residual free oleic acid) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงพีเอชเล็กน้อย และเนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติในการรวมตัวกับไอออน จึงได้มีการตรวจสอบอันตรกิริยาระหว่างไคโตซานและไอออน Ca^{2+} ซึ่งจะทำให้คุณค่าทางอาหารของผลิตภัณฑ์ลดลง พบว่ามีผลน้อยมาก ส่วนคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของไขมันของกระดาษที่เคลือบด้วยไคโตซานสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้แต่ค่อนข้างมีต้นทุนสูงเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยเรซินฟลูออโรคาร์บอน จึงได้มีการผสมโมเลกุลธรรมชาติอื่นๆลงไปด้วย เช่น เซลลูโลสอีเทอร์ (cellulose ethers) และ แอลจีเนต (alginates)

6.2 ตัวอย่างงานวิจัยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักเป็นโปรตีน

Han และ Krochta (2001) ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและการดูดซับไขมันของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายเวย์โปรตีน (whey protein) ความเข้มข้นร้อยละ 10 และ 11.5 โดยน้ำหนัก และเติมกลีเซอรอล 40 ส่วน ต่อ เวย์โปรตีนไอโซเลท (whey protein isolate, WPI) 60 ส่วน โดยน้ำหนักรวมของสารเคลือบถูกกำหนดเป็น 0, 10 และ 18 กรัมต่อตารางเมตร จากการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (scanning electron microscopy) พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายเวย์โปรตีนไอโซเลท มีพื้นผิวที่เรียบขึ้น มีความแวววาว เมื่อเพิ่มน้ำหนักของสารเคลือบจะทำให้ความเค้น ณ จุดที่กระดาษฉีกขาด (breaking stress) และค่า young's modulus ลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ค่าความเครียด ณ จุดที่กระดาษฉีกขาดไม่ได้ขึ้นอยู่กับน้ำหนักของสารเคลือบ ส่วนค่าความแข็งแรงต่อการฉีกขาด (tearing strength) ไม่เปลี่ยนแปลงภายหลังการเคลือบ จากการทดลอง

พบว่า การเคลือบด้วยเวย์โปรตีนไอโซเลท ช่วยเพิ่มการต้านทานต่อการซึมผ่านของไขมันได้สูงสุด เมื่อน้ำหนักของสารเคลือบเป็น 18 กรัมต่อตารางเมตร

Lin และ Krochta (2003) ได้ศึกษาคุณสมบัติในการต้านทานการซึมผ่านของไขมันของ กระดาษแข็ง (paperboard) ที่เคลือบด้วยเวย์โปรตีนเข้มข้น (whey protein concentrates) ประกอบด้วยโปรตีน 80 เปอร์เซนต์ (WPC-80) และพลาสติกไฮดรอกซี ได้แก่ กลีเซอรอล ซูโครส ซอร์บิทอล และพอลิเอทิลีนไกลคอล เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม และเปรียบเทียบผลจากการ เติมพลาสติกไฮดรอกซีแต่ละชนิดต่อการต้านทานการซึมผ่านของไขมัน พบว่าการเคลือบด้วย WPC-80 ลงบนกระดาษแข็งจะสามารถต้านทานไขมันได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการเคลือบด้วยเวย์ โปรตีน ไอโซเลท เมื่อเก็บกระดาษเคลือบที่อุณหภูมิห้องโดยใช้ซูโครสเป็นพลาสติกไฮดรอกซี จะ สามารถต้านทานการซึมผ่านของไขมันได้ดี และเกิดการแพร่ (migration) ของซูโครสน้อยที่สุดเมื่อ เทียบกับพลาสติกไฮดรอกซีชนิดอื่น

Parris *et al.* (2002) ได้ศึกษาความสามารถในการต้านทานไขมันและไอน้ำของ กระดาษที่ได้จากกระบวนการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์และแผ่นปะหน้ากระดาษลูกฟูก (linerboard) ที่เคลือบด้วยโปรตีนซีนจากข้าวโพด (corn zein) และพาราฟิน แวกซ์ (paraffin wax) พบว่า แผ่นกระดาษเคลือบด้วยโปรตีนซีนเพียงสารเดียวที่ได้จากเส้นใยจากการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์ สามารถลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำได้ร้อยละ 16 และลดการซึมผ่านของไขมันได้ทั้งหมด ความแข็งแรงของกระดาษลดลงประมาณร้อยละ 12-19 เมื่อเทียบกับกระดาษกราฟท์รีไซเคิลที่ไม่ เคลือบ ส่วนแผ่นกระดาษที่ได้จากเส้นใยจากการรีไซเคิลแผ่นปะหน้ากระดาษลูกฟูก มีอัตราการ ซึมผ่านของไอน้ำลดลงร้อยละ 8 และอัตราการซึมผ่านของไขมันลดลงร้อยละ 97 ส่วนความ แข็งแรงมีค่าใกล้เคียงกับกระดาษรีไซเคิลที่ไม่เคลือบ เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษรีไซเคิลที่เคลือบ ด้วยซีน ร่วมกับแวกซ์ พบว่ามีค่าความแข็งแรงลดลงร้อยละ 20-30 จากการรีไซเคิลกระดาษกราฟท์ ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพิ่มเติมในการเตรียมกระดาษรีไซเคิลให้มีความ แข็งแรงเพิ่มขึ้นโดยการเติม Pancreatin 8x และ sodium dodecylsulfate (SDS) เพื่อแยกสารเคลือบ อื่นที่ปนเปื้อนออกก่อนเข้าสู่กระบวนการรีไซเคิลกระดาษ

Arfa *et al.* (2007) ได้ศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยสารละลาย soy protein isolate (SPI) ความเข้มข้นร้อยละ 10 (โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) และเติม carvacrol ความเข้มข้นร้อยละ 30 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) ของ SPI ที่สภาวะอุณหภูมิ 25 °C เพื่อต้านทานจุลินทรีย์ พบว่า SPI ช่วยลด อัตราการสูญเสียของ carvacrol ได้ร้อยละ 9.6 ซึ่งกระบวนการเคลือบโดยทั่วไปจะมีการสูญเสีย

carvacrol ปริมาณร้อยละ 37 เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C ในระหว่างผ่านกระบวนการเคลือบ และการทำให้แห้ง ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของ SPI ทำหน้าที่จับสาร carvacrol ไว้ ซึ่งสามารถนำไปใช้และประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ด้านจุลินทรีย์ได้

6.3 ตัวอย่างงานวิจัยการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพผสมหลายประเภท

Khwaldia *et al.* (2005) ศึกษาผลของการเคลือบกระดาษด้วยสารผสมไมกา (mica) ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0-1.2 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) คาร์นوباแว็กซ์ (carnauba wax) ระดับความเข้มข้นร้อยละ 0-0.8 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) กลีเซอรอลระดับความเข้มข้นร้อยละ 0-6 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) และโซเดียมเคสเนต (sodium caseinate) ระดับความเข้มข้นร้อยละ 10-13 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนัก) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและการต้านการซึมผ่านของไอน้ำ โดยใช้แผนการทดลอง Doehlert matrice ในการศึกษาปัจจัยหลักและอิทธิพลร่วมของปัจจัย จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลและหาค่าความเข้มข้นของสารเคลือบที่เหมาะสมต่อการปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง (response surface methodology) พบว่าระดับความเข้มข้นของคาร์นوباแว็กซ์และกลีเซอรอลมีผลต่อความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของกระดาษเคลือบมากที่สุด โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกลีเซอรอล ค่าความแข็งแรงต่อการต้านแรงดึง (tensile strength) มีค่าลดลง และค่าร้อยละการยืดตัวเพิ่มมากขึ้น ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไฮโดรฟิลิกและมีความชอบน้ำ (hydrophilic) ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นของคาร์นوباแว็กซ์และไมกาจะทำให้ค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำลดลง

Despond *et al.* (2004) ศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยไคโตซานและคาร์นوباแว็กซ์ เพื่อป้องกันการซึมผ่านของแก๊ส โดยนำไคโตซานที่มีน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 60,000-200,000 กรัมต่อโมล และมีความเข้มข้นร้อยละ 1-8 โดยน้ำหนักมาเคลือบกระดาษ พบว่าเมื่อไคโตซานสามารถปรับปรุงคุณสมบัติด้านการต้านการซึมผ่านของแก๊สในสถานะที่ไม่มีความชื้น ได้ดีที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 8 โดยน้ำหนัก และมีน้ำหนักสารเคลือบ 7 กรัมต่อตารางเมตร อย่างไรก็ตาม ไคโตซานและกระดาษมีคุณสมบัติที่ชอบน้ำจึงไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สได้ในสถานะที่มีความชื้น จึงได้ปรับปรุงโดยการนำกระดาษที่เคลือบไคโตซานมาเคลือบด้วยคาร์นوباแว็กซ์เป็นฟิล์มสองชั้น เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่งทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความสามารถในการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สออกซิเจนลดลงกว่า 0.5 บาร์ (barer) ในสถานะที่มีความชื้นสูง

7. สตาร์ชดัดแปร (modified starch)

สตาร์ช เป็นแหล่งสะสมคาร์โบไฮเดรตของพืชที่ได้จากผลิตผลของธัญพืช ส่วนของหัวพืช และรากพืช ซึ่งสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบต่างกัน จึงทำให้สตาร์ชมีคุณสมบัติทาง โภชนาการ เคมี และกายภาพแตกต่างกันไปด้วย สตาร์ชประกอบไปด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรทั่วไปคือ $(C_6H_{10}O_5)_n$ สตาร์ชเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่น (condensation polymer) ของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic bond) โดยแบ่ง โครงสร้างออกเป็น 2 แบบ คือ อะมิโลส (amylose) และอะมิโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งสตาร์ชแต่ละชนิดจะมีปริมาณอะมิโลส และอะมิโลเพกตินในสัดส่วนที่แตกต่างกัน สตาร์ชจะสลายตัวที่ อุณหภูมิ 175 °C (รัฐภูมิ, 2544)

ในด้านวัสดุบรรจุภัณฑ์ นิยมใช้สตาร์ชในการเคลือบกระดาษ หรือการเติมลงในเยื่อกระดาษเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติ การใช้ในรูปสารตัวเติม (filler) ของพลาสติก และการนำไปผลิตเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุ ซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายได้ในธรรมชาติและเป็นการรักษาสิ่งแวดล้อม จึงมีการศึกษาและวิจัยอย่างกว้างขวางในการใช้สตาร์ชเป็นองค์ประกอบของภาชนะบรรจุประเภทต่างๆ

เนื่องจากสตาร์ชเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติชนิดหนึ่งที่หาได้ง่ายและราคาถูกจึงนิยมนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและวัสดุ อย่างไรก็ตามการใช้งานของสตาร์ชโดยตรงยังคงมีอยู่อย่างจำกัด เนื่องจากสมบัติบางประการของสตาร์ชที่ยังไม่เหมาะสม เช่น มีช่วงความหนืดที่แคบ ความคงทนต่อแรงเฉือนและแรงกระทำต่างๆต่ำ ดังนั้นจึงได้มีการนำสตาร์ชไปทำการดัดแปรให้มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานมากขึ้น เช่น คงทนต่อสภาวะการผลิตได้ดี มีความคงตัวจากการละลาย และทนต่อความชื้นได้ดีขึ้น (ศิริธร, 2549)

7.1 ประเภทของการดัดแปรสตาร์ช

การแบ่งประเภทของการดัดแปรสตาร์ชสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท (ศิริธร, 2549) คือ

7.1.1 การดัดแปรทางกายภาพ ได้แก่ การทำให้เกิดเจลสตาร์ช (gelatinization) การทำสตาร์ชละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble-starch) การลดขนาดเม็ดสตาร์ชโดยทางกล (ball milling) การอบอ่อน (annealing) และการแปรรูปด้วยความชื้น (heat moisture treatment)

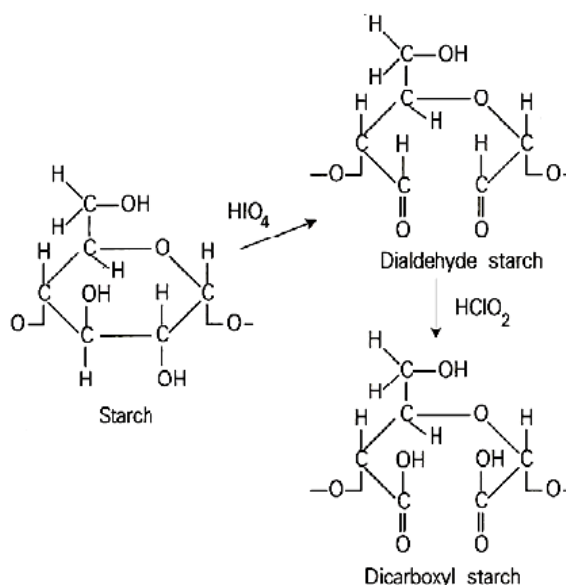
7.1.2 การตัดแปรทางเคมี ได้แก่ การเกิดอนุพันธ์ (derivatization) การลดขนาดโมเลกุลสตาร์ชด้วยกรด (acid thinning) การแตกซึ่ทรีโนแซน (dextrinization) การทำออกซิเดชัน (oxidation) และการแตกตัวด้วยน้ำ (hydrolysis)

7.1.3 การตัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ ได้แก่ การทำสตาร์ชอะมิโลเพกติน และการทำสตาร์ชที่มีส่วนประกอบของอะมิโลสสูง

ตัวอย่างของสตาร์ชตัดแปร เช่น ออกซิไดซ์สตาร์ช, แคลไออนิกสตาร์ช, ฟรีเจลาทีไนซ์สตาร์ช, สตาร์ชฟอสเฟตเอสเทอร์ เป็นต้น

8. ออกซิไดซ์สตาร์ช (oxidized starch)

การตัดแปรโดยวิธีออกซิเดชันเป็นการทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์ เช่น โซเดียมไฮโปคลอไรด์ แคลเซียมไฮโปคลอไรด์ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ในการทำปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้าง สมบัติทางเคมี และขนาดโมเลกุลเม็ดสตาร์ชเปลี่ยนแปลงไป ได้สตาร์ชตัดแปรที่เรียกว่า สตาร์ชออกซิไดซ์ (oxidized starch) หรือคลอรีเนตสตาร์ช (chlorinated starch) หรือ ออกซิสตาร์ช (oxystarch) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นการเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิลให้เป็นหมู่แอลดีไฮด์ หมู่คีโตน หรือหมู่คาร์บอกซิล และมีการตัดโมเลกุลสตาร์ชตามภาพที่ 5 คุณสมบัติของสตาร์ชออกซิไดซ์คือ สตาร์ชมีลักษณะเป็นประจุลบ เนื่องจากมีหมู่คาร์บอกซิลเข้าไปอยู่ในโมเลกุลอะมิโลส ทำให้อัตราการคืบตัวของสตาร์ชเปียกลดลง สตาร์ชเปียกที่ร้อนจะมีความหนืดต่ำลงทำให้สามารถใช้สตาร์ชเปียกที่ความเข้มข้นสูงในน้ำร้อนได้ และฟิล์มมีความใสมากขึ้น เจลมีความคงตัวสูง เม็ดสตาร์ชขาวขึ้น กลิ่นดีขึ้น มีปริมาณจุลินทรีย์ลดลง นำไปใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น ทำลูกกวาด ลูกอม ซุปกึ่งสำเร็จรูป หรืออาหารที่ต้องการความข้น ใช้เป็นสารยึดเกาะสำหรับเคลือบกระดาษ เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้แก่กระดาษ เคลือบผิวหน้ากระดาษให้เรียบและแทรกซึมเข้าไปในช่องว่างของเยื่อกระดาษสำหรับกันหมึกซึม ใช้เคลือบเส้นใย เป็นส่วนประกอบในอุปกรณ์ก่อสร้าง เช่น ฝาผนัง ฉนวน กระเบื้อง (อรศิริ, 2545)



ภาพที่ 5 กลไกการตัดโมเลกุลสตาร์ช

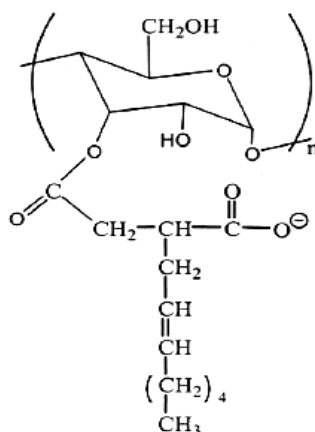
ที่มา: อรสิริ (2545)

Al-Mehbad (2004) ศึกษาการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันสตาร์ชข้าวโพดด้วยไฮโปคลอไรต์ และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 4, 6 และ 8 แล้วนำมาเติมลงในเชื้อกระดาก ในปริมาณร้อยละ 0.10-2.00 ของเชื้อเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกล พบว่า สตาร์ชที่ทำปฏิกิริยาออกซิเดชันกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์มีหมู่คาร์บอกซิลมากกว่าการทำ ปฏิกิริยากับไฮโปคลอไรต์ โดยสตาร์ชตัดแปรรูปออกซิไดซ์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลเป็นองค์ประกอบมาก ที่สุดทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ในสภาวะที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ 11 ใช้เวลา 12 ชั่วโมง และเมื่อเติมสตาร์ชตัดแปรรูปออกซิไดซ์ลงในเชื้อกระดากจะสามารถปรับปรุงสมบัติทาง กายภาพและสมบัติเชิงกลของกระดากได้ และยังทำหน้าที่เป็นสารยึดเกาะ kaolin ที่เติมลงไปในเชื้อ กระดากได้ดี

9. ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช (hydrophobic starch)

ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช หมายถึง สตาร์ชที่ถูกตัดแปรรูปทางเคมีเพื่อให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างของไฮโดรโฟบิกสตาร์ช คือ สตาร์ชที่ผลิตได้จากกระบวนการเอสเทอร์ริฟิเคชัน (esterification) ด้วยสาร octenyl succinic anhydride (OSA) เป็นต้น การแทนที่ของหมู่ไฮดรอกซิล

ด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆ จะเกิดขึ้นที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 2, 3 และ 6 ภายในโมเลกุลของกลูโคส และเกิดขึ้นในบริเวณออสเทนฐานของสตาร์ช การดัดแปรสตาร์ชด้วยการแทนที่หมู่ไฮดรอกซิลด้วยโมเลกุลของ OSA นั้นทำให้ได้สตาร์ชที่เรียกว่า octenyl succinate starch (OSA starch) ข้อดีของการมีหมู่ octenyl succinate คือช่วยรักษาสสมบัติชอบน้ำของสตาร์ชไว้ในขณะที่สามารถเพิ่มคุณสมบัติไม่ชอบน้ำให้กับสตาร์ช ทำให้ OSA starch มีคุณสมบัติเป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) ที่ดีและยังมีคุณสมบัติในการเป็นฟิล์มที่ดี โครงสร้างโมเลกุลของ OSA starch (ดวงทิพย์, 2550) แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 โครงสร้างโมเลกุลของ OSA starch

ที่มา: ดวงทิพย์ (2550)

Jansson และ Jarnstrom (2005) ได้ศึกษาการเคลือบสตาร์ชมันฝรั่งบนกระดาษและสิ่งทอ และพสมกทีเซอร์อล (greccerol) ลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ (plasticizer) โดยสตาร์ชที่ใช้ในการทดสอบเป็นสตาร์ชที่ประกอบด้วยสารอะมิเลส (amylase) ปริมาณร้อยละ 21 และ 70 ทำการดัดแปรด้วยการทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation), การทำปฏิกิริยาออกซิเดชันและการ hydroxypropylation, การทำปฏิกิริยาออกซิเดชัน และการทำให้มีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) ด้วยการทำปฏิกิริยากับหมู่ octenyl หรือ alkenyl ซึ่งถูกแทนที่ด้วย succinic acid anhydride พบว่าการเคลือบด้วยสตาร์ชที่ดัดแปรให้มีคุณสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกและมีอะมิเลส ปริมาณร้อยละ 70 มีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำที่สุด และเมื่อเติมกทีเซอร์อลปริมาณ 30 ส่วนต่อ สตาร์ช 100 ส่วน จะทำให้ glass transition temperature ของฟิล์มลดลง ซึ่งทำให้สมบัติเชิงกลของ ฟิล์มเปลี่ยนแปลงไป

10. ซีน (zein)

ซีนเป็นโปรตีนที่ได้จากข้าวโพด ประกอบไปด้วยโมเลกุล 2 ส่วน ได้แก่ แอลฟา-ซีน (α -zein) ปริมาณร้อยละ 80 ของโมเลกุลซีนทั้งหมด ซึ่งมีองค์ประกอบของโมโนเมอร์และโอลิโกเมอร์ที่เชื่อมกันด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ละลายในสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 และส่วนที่เหลือเป็นเบต้า-ซีน (β -zein) มีองค์ประกอบของโอลิโกเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า ซึ่งไม่ละลายในเอทานอล

ซีนเป็นโปรตีนที่ไม่ละลายน้ำ เนื่องจากซีนประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วปริมาณมาก ได้แก่ leucine proline และ alanine โดยสามารถละลายได้ในสารละลายผสมระหว่างน้ำและสารประกอบอินทรีย์ เช่น alcohol acetone และ acetonylacetone ซีนสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้เมื่อมีระบบของตัวทำละลายที่เหมาะสม โดยฟิล์มที่ได้จะมีความเหนียว มันวาว มีความทนทานต่อการขัดถู และต้านทานไขมัน ฟิล์มซีนจะขึ้นรูปได้โดยการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และพันธะไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bond) อย่างไรก็ตามฟิล์มที่ได้ค่อนข้างมีความเปราะ จึงต้องมีการเติมพลาสติไซเซอร์ เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม ได้แก่ glycerin, triethylene glycol, fatty acid, glyceryl monoester และ acetylated monoglycerides ส่วนการปรับปรุงประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำ และการต้านทานแรงดึง สามารถทำได้โดยเติม cross-linking agents เช่น formaldehyde (Krochta *et al.*, 1994)

Trezza and Vergano (1994) ทดสอบความต้านทานไขมันของกระดาษเคลือบด้วยซีนแปรรูป 3 ระดับคือ ปริมาณซีน 2.2, 4.4 และ 6.6 กิโลกรัมต่อรีมของกระดาษ และเติมพลาสติไซเซอร์เพื่อเพิ่มความยืดหยุ่น พบว่ากระดาษเคลือบด้วยซีนปริมาณ 2.2 กิโลกรัมต่อรีมของกระดาษมีความต้านทานน้ำมันต่ำกว่ากระดาษเคลือบด้วยซีนปริมาณ 4.4 และ 6.6 กิโลกรัมต่อรีม โดยความต้านทานน้ำมันของกระดาษเคลือบด้วยซีนปริมาณ 4.4 และ 6.6 กิโลกรัมต่อรีม และกระดาษที่ประกบด้วยพอลิเอทิลีนมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.001$) จากการส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน พบว่าการเคลือบซีนปริมาณ 2.2 กิโลกรัมต่อรีมบนกระดาษมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง แต่มีความสม่ำเสมอมากขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณซีน

Yamada *et al.* (1995) ศึกษาเตรียมทำฟิล์มจากซีน โดยละลายในสารละลายอินทรีย์ ได้แก่ สารละลายเอทานอลร่วมกับน้ำปริมาณร้อยละ 20 และ สารละลายอะซิโตนร่วมกับน้ำปริมาณร้อยละ 30 พบว่า ฟิล์มสามารถละลายได้ดีในสารละลายทั้งสอง และขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีความใสและ

ยืดหยุ่น โดยฟิล์มทั้ง 2 ทริทเมนต์ มีค่า breaking strength ใกล้เคียงกับฟิล์ม PVDC ที่ใช้สำหรับอาหาร โดยฟิล์มที่เตรียมจากสารละลายอะซีโตนมีอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำกว่า ซึ่งอัตราการซึมผ่านของน้ำจะขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ จากนั้นเติม 1,2-Epoxy-3-chloropropane (ECP) ลงในสารละลายอะซีโตนเพื่อเชื่อมกับโมเลกุลซิน อย่างไรก็ตามการเติมสารดังกล่าวส่งผลให้ความต้านทานน้ำเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีความยืดหยุ่นลดลง

Trezza et al. (1998) ได้เตรียมกระดาษเคลือบด้วยซินปริมาณ 5-15 ปอนด์ต่อรีม พบว่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเป็น 70-131 กรัมต่อ 100 ตารางนิ้วต่อวัน โดยอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิน อย่างไรก็ตามกระดาษเคลือบด้วยซินปริมาณ 10 และ 15 ปอนด์ต่อรีม มีค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.001$) และอัตราการซึมผ่านไอน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเติมพลาสติกไซเซอร์ปริมาณ 10 ปอนด์ต่อรีม ส่วนอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบมีค่าสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ใช้สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร โดยมีค่าอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนประมาณ 95,000, 35,000 และ 16,000 ลูกบาศก์เมตรต่อ 100 ตารางเมตรต่อวัน เมื่อกระดาษเคลือบด้วยซินปริมาณ 5, 10 และ 15 ปอนด์ต่อรีม ตามลำดับ

11. กรดไขมัน (fatty acid)

กรดไขมัน (fatty Acid) เป็นไฮโดรคาร์บอนแบบนอนโพลาร์ (non-polar) ที่มีจำนวนคาร์บอน 4-24 อะตอม ปลายข้างหนึ่งเป็นหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) (R-COOH) กรดไขมันที่พบในไขมันของพืชและสัตว์ชั้นสูงมีจำนวน C อะตอมเป็นเลขคู่ อยู่ระหว่าง 14-22 C อะตอม โดยเฉพาะ C16 และ C18 พบมากที่สุด โดยอาจเป็นโซ่ยาว ที่อิ่มตัว (ไม่มีพันธะคู่ (saturated fatty acid)) หรือ ไม่อิ่มตัว (มีพันธะคู่ 1 คู่ (monounsaturated fatty acid)) หรือมากกว่า (polyunsaturated fatty acid) ซึ่งแต่ละชนิดมีความยาวของสายโซ่ ตำแหน่ง และจำนวน ของพันธะเดี่ยวหรือคู่แตกต่างกันจึงมีความอิ่มตัวไม่เท่ากัน ในเซลล์จะไม่พบอยู่ในรูปอิสระแต่จะอยู่รวมกัน เป็นลิพิดด้วยพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งสามารถถูกสลายด้วยเอนไซม์หรือทางเคมี

กรดไขมันที่ใช้ในการเคลือบมักทำหน้าที่เป็นสารอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifiers) ส่วนมากได้มาจากน้ำมันพืชซึ่งสามารถสัมผัสกับอาหารได้ โดยกรดไขมันที่นิยมเคลือบเพื่อปรับปรุงสมบัติด้านการต้านทานน้ำคือ กรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ กรดไขมันสเตียริก และ กรดไขมันปาล์มติก เนื่องจากมีจุดหลอมเหลว และความไม่ชอบน้ำสูง (Krochta et al., 1994) ในขณะที่กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะมีประสิทธิภาพในการต้านการซึมผ่านของไอน้ำ และความชื้นต่ำกว่า เนื่องจากกรดไขมัน

ไม่อืดตัวมีขี้มามากกว่ากรดไขมันอิ่มตัว ซึ่งพิจารณาได้จากการทดลองของ Hagenmaier and Baker (1997) พบว่าฟิล์มที่เคลือบบนผิวส้มซึ่งประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริกมีประสิทธิภาพในการป้องกันการดูดความชื้นได้ดีกว่ากรดไขมัน โอเลอิกซึ่งเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว นอกจากนั้นยังมีความวิจัยอื่นๆที่ให้ผลสนับสนุน ดังจะกล่าวในลำดับต่อไป

Hagenmaier and Shaw (1990) ได้ทดลองเตรียมฟิล์มที่ประกอบด้วยไฮดรอกซีโพรพิล เมทิลเซลลูโลสความเข้มข้นร้อยละ 55 และกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 45 พบว่าค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มเท่ากับ 0.17 กรัมต่อตารางเมตรต่อวันต่อมิลลิเมตรปรอท ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85 โดยอัตราการซึมผ่านน้ำของฟิล์มจะไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 94 แต่จะเพิ่มขึ้นในช่วงความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 97-99 และมีค่าสูงขึ้นเมื่อฟิล์มประกอบด้วยกรดไขมันที่มีสายโซ่สั้นกว่ากรดไขมันสเตียริก ส่วนฟิล์มที่ไม่มีกรดไขมันสเตียริกเป็นองค์ประกอบจะมีอัตราการซึมผ่านไอน้ำมากกว่าเดิม 10 เท่า เมื่อทดสอบความต้านทานต่อแรงดึงพบว่ามีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อฟิล์มอยู่ในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์มากกว่าร้อยละ 90

Ayranci and Tunc (2001) ศึกษาการวัดค่าอัตราการซึมผ่านไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของฟิล์มเมทิลเซลลูโลส โดยเติมกรดมันต่างๆ ได้แก่ กรดไขมันสเตียริก กรดไขมันปาล์มติก และกรดไขมันลอริกปริมาณร้อยละ 5, 15, 25 และ 40 พบว่า กรดไขมันสเตียริกมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดเมื่อมีปริมาณร้อยละ 40 และอัตราการซึมผ่านของไอน้ำ และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมัน อัตราการซึมผ่านของไอน้ำเท่ากับ 160 กรัมต่อวันต่อตารางเมตร และอัตราการซึมผ่านของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็น 0.06 กรัมต่อวันต่อตารางเมตรต่อปาสคาล ในสภาวะความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 84.34 ที่อุณหภูมิ 25 °C

Guadalupe *et al.* (2003) ทดลองนำสารเคลือบเมทิลเซลลูโลส และเมทิลเซลลูโลส-กรดไขมันสเตียริกปริมาณร้อยละ 10 มาเคลือบบนลูกแพร์เพื่อรักษาคุณภาพที่อุณหภูมิ 4 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 78 เป็นเวลา 12 วัน พบว่าการเติมสารเติมแต่งบางชนิด ได้แก่ กรดแอสคอร์บิก แคลเซียมคลอไรด์ และกรดซอกซิก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกช่วยยืดอายุของลูกแพร์ โดยช่วยให้ลดอัตราการเกิดการ browning และลดอัตราการลดลงของน้ำหนักของลูกแพร์หลังเก็บถึงร้อยละ 12.55 ในสภาวะที่กำหนด

เนื่องจากพบว่างานวิจัยที่เกี่ยวข้องก่อนหน้านี้มักศึกษาการเคลือบกระดาศชนิดต่างๆ ในลักษณะสารเคลือบเดี่ยว และมีงานวิจัยจำนวนน้อยที่ศึกษาสารเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดผสม งานวิจัยนี้เลือกศึกษาการเคลือบกระดาศด้วยพอลิเมอร์ชีวภาพผสมเพื่อช่วยในการปรับปรุงสมบัติของกระดาศหลายด้านในขณะเดียวกัน โดยสมบัติของกระดาศที่สนใจประกอบด้วย สมบัติเชิงกล สมบัติการด้านการซึมผ่านของน้ำ และน้ำมัน รวมทั้งสมบัติการด้านการซึมผ่านแก๊ส พอลิเมอร์ชีวภาพที่เลือกศึกษาในการเคลือบกระดาศ ได้แก่ สตาร์ชดัดแปร กรดไขมันสเตียริก และโปรตีนซิน โดยสตาร์ชดัดแปรเป็นสารที่ใช้ในปัจจุบันในอุตสาหกรรมการผลิตกระดาศ เพื่อปรับปรุงสมบัติในด้านความแข็งแรง ใช้เป็นตัวเติม (filler) และตัวยึด (binder) ในกระบวนการเคลือบผิว และกระบวนการเดินแผ่นกระดาศ โดยสตาร์ชดัดแปรที่เลือกศึกษา ได้แก่ ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชซึ่งเป็นสตาร์ชดัดแปรที่มีความไม่ชอบน้ำมากกว่าสตาร์ชทั่วไป ขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ง่าย สามารถเพิ่มความแข็งแรงของกระดาศได้ ดังนั้นสตาร์ชดัดแปรจึงถูกนำมาใช้ร่วมกับพอลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นเพื่อเพิ่มคุณสมบัติที่ต้องการในกระดาศแข็ง ส่วนกรดไขมันสเตียริกมีสมบัติในการด้านการซึมผ่านของไอน้ำ เนื่องจากกรดไขมันสเตียริกเป็นกรดไขมันอิ่มตัวที่มีความไม่ชอบน้ำสูง (hydrophobic) และโปรตีนซินมีสมบัติในการต้านทานน้ำ ไขมันได้ดี ดังนั้นการใช้กรดไขมันสเตียริก หรือโปรตีน อาจจะสามารถช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกล และสมบัติในการกีดขวางให้กับกระดาศแข็งได้

ในการเคลือบกระดาศสำหรับงานวิจัยนี้จะเตรียมสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นคงที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ตามงานวิจัยของ Ketola and Hagberg (2003) ซึ่งสามารถเคลือบลงบนกระดาศได้เป็นฟิล์มที่มีผิวหน้าเรียบ และมีลักษณะต่อเนื่อง ส่วนความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกจะแปร 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก เนื่องจากสารเคลือบที่มีกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นมากกว่านี้จะมีน้ำหนักสูงจนไม่สามารถเคลือบลงบนกระดาศได้ ส่วนโปรตีนซินจะเตรียมที่ระดับความเข้มข้นเช่นเดียวกับกรดไขมันสเตียริกเพื่อเปรียบเทียบสมบัติเชิงกล การด้านการซึมผ่านของน้ำและน้ำมัน รวมทั้งอัตราการซึมผ่านของแก๊ส

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. วัสดุดิบ

- 1.1 กระดาษแข็งประเภท Duplex board ที่มีค่าน้ำหนักมาตรฐาน 300 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท กระดาษสหไทย จำกัด
- 1.2 ซี้น (zein)
- 1.3 ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช (hydrophobic starch, Filmkote 370TM)
- 1.4 กรดไขมันสเตียริก (stearic acid)
- 1.5 อิมัลซิไฟเออร์ ได้แก่ Tween 60

2 อุปกรณ์

- 2.1 เครื่องชั่งละเอียดชนิด 4 ตำแหน่ง (Sartorius BP110S, Germany)
- 2.2 เครื่องชั่งละเอียดชนิด 3 ตำแหน่ง (Shimadzu BX300, Japan)
- 2.3 ตู้อบลมร้อนแบบควบคุมอุณหภูมิ (Contherm, Contherm Scientific Limited)
- 2.4 เดซิเคเตอร์
- 2.5 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ (WTB Binder KBF 240, Germany)
- 2.6 เครื่องวัดความหนา (Mitutoyo ID-C112BS, Japan)
- 2.7 นาฬิกาจับเวลา
- 2.8 ไมโครปีเปต (Gilson, France)
- 2.9 เครื่องเคลือบกระดาษ (Film coater PI-1210, Japan)
- 2.10 เครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน (Testometric Micro 350, England)
- 2.11 ชุดทดสอบมุมสัมผัส (Contact angle test, OCA 15EC, Germany)
- 2.12 ชุดทดสอบการดูดซึมน้ำ (Cobb test)
- 2.13 เครื่องวัดความหนืด (Brookfield Viscometers DV II+, USA)
- 2.14 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Mettmert, Germany)

- 2.15 Hotplate และ Stirrer (Heidolph, Germany)
- 2.16 ชุดเครื่องแก้ว
- 2.17 เครื่องทดสอบค่าความแข็งดิ่งของกระดาษ (Taber Type Stiffness Tester)
- 2.18 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-5600LV, Japan)
- 2.19 กล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยเลเซอร์ (Confocal Laser Scanning Microscope, Axio Imager MI, Carl Zeiss PTe Ltd, Germany)
- 2.20 เครื่องทดสอบการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (Illinois 8500, USA)
- 2.21 เครื่องวัดสี (Minolta CR-310, Japan)

วิธีการ

1. การตรวจสอบสมบัติเบื้องต้นของวัตถุดิบ

- 1.1 การตรวจสอบปริมาณความชื้นของไฮโดรฟอบิกสตาร์ช (AOAC 1995)
- 1.2 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของกระดาษ Duplex Board
 - 1.2.1 ปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (Test condition, ISO 187)
 - 1.2.2 น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ (Basic weight, ASTM D646-96)
 - 1.2.3 ความหนาของกระดาษ (Thickness, ASTM D645-97)
 - 1.2.4 ปริมาณความชื้นในกระดาษ (Moisture content, ASTM D644-99)
 - 1.2.5 สี (ระบบ L*a*b*)
- 1.3 การศึกษาสมบัติเชิงกลของกระดาษ Duplex Board
 - 1.3.1 ปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (Test condition, ISO 187)
 - 1.3.2 ความต้านทานแรงกดวงแหวน (Ring crush test, TAPPI T818-om97)
 - 1.3.3 ค่าความแข็งของกระดาษ (Stiffness, TAPPI T 489 om-04)

1.4 การศึกษาสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันของกระดาษ

- 1.4.1 ปรับสภาวะกระดาษทดสอบ (Test condition, ISO 187)
- 1.4.2 การดูดซึมน้ำ และน้ำมัน (Cobb test, ดัดแปลงจาก ASTM D3285-93)
- 1.4.3 มุมสัมผัสของน้ำ และน้ำมัน (ดัดแปลงจาก ASTM D 5946-04)
- 1.4.4 เวลาในการดูดซึมน้ำ และน้ำมัน (อ้างอิงจาก สตรีรัตน์ (2551))

1.5 การศึกษาสมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊ส

- 1.5.1 อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ASTM D3985-05)

2. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกในสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ต่อสมบัติของกระดาษ Duplex board

2.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกในสารเคลือบที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน และสมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊ส โดยเติมกรดไขมันสเตียริกที่มีการผันแปรความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1, 2 และ 3 ลงไปในสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) เพียงสารเดียว วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

ในการศึกษานี้สารที่เตรียมในการเคลือบมีลักษณะเป็นอิมัลชันของกรดไขมันสเตียริกในสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ เนื่องจากอนุภาคของกรดไขมันสเตียริกสามารถกระจายตัวได้ดี และมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับสารละลายไฮโดรฟิสิกส์ ทำให้สามารถเคลือบเป็นฟิล์มบนกระดาษได้อย่างต่อเนื่อง โดยแสดงลักษณะสารเคลือบบนกระดาษดังภาพที่ 7 นอกจากนี้ในการทดลองไม่ได้นำกระดาษที่เคลือบกรดไขมันสเตียริกเพียงสารเดียวมาศึกษา เนื่องจากฟิล์มของกรดไขมันสเตียริกที่เคลือบบนกระดาษโดยไม่มีสารอื่นไม่มีความสม่ำเสมอ และมีความเปราะมาก จึงไม่สามารถนำมาทดสอบสมบัติต่างๆได้



ภาพที่ 7 แสดงลักษณะสารเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกบนกระดาษแข็ง

2.2 การเตรียมสารเคลือบและการเคลือบกระดาษ

2.2.1 การเตรียมสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์

เตรียมสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ที่ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ให้ความร้อนและกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ $90 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งสารละลายมีลักษณะใส จากนั้นลดอุณหภูมิของสารละลายสตาร์ให้เหลือ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยควบคุมไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

2.2.2 การเตรียมสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

เตรียมสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักตามวิธีในข้อ 2.2.1 จากนั้นเติมกรดไขมันสเตียริกปริมาณร้อยละ 1, 2 และ 3 และ Tween 60 ปริมาณร้อยละ 10 ของปริมาณกรดไขมันสเตียริก ลงไปในสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ที่เตรียมไว้ ให้ความร้อนและกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ $90 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งสารละลายมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นลดอุณหภูมิของสารละลายให้เหลือ $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

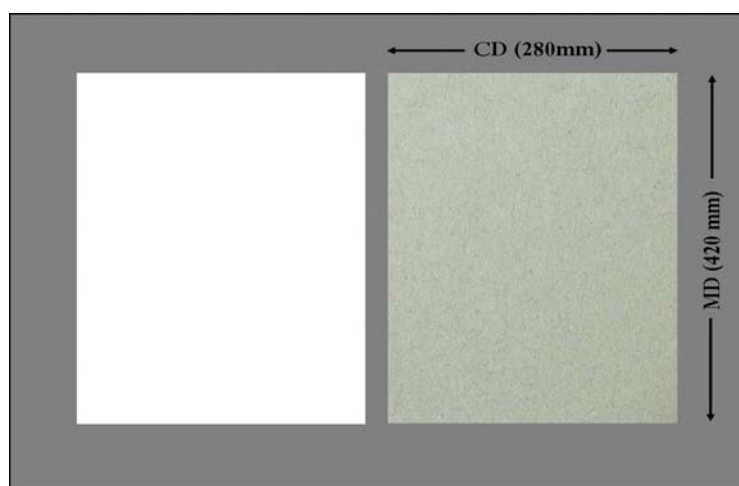
2.2.3 การวัดความหนืดของสารเคลือบ

ความหนืดของสารเคลือบที่เตรียมโดยวิธีในข้อ 2.2.1 และ 2.2.2 วัดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometers ใช้หัววัดหมายเลข 21 ความเร็ว 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 75°C

2.2.4 การเคลือบกระดาษ Duplex Board

นำกระดาษ Duplex Board ขนาด 280×420 ตารางมิลลิเมตร ดังภาพที่ 8 มาเคลือบด้วยสารเคลือบที่เตรียมไว้ ด้วยเครื่อง Film coater รุ่น PI 1210 ดังภาพที่ 9 จากนั้นเทสารเคลือบปริมาณ 10 กรัมลงบนกระดาษตลอดแนวหน้ากว้างกระดาษ (แนว CD) เมื่อเครื่องเคลือบเริ่มทำงาน แท่งเหล็กของเครื่องจะพาสารเคลือบไปบนกระดาษตามแนวความยาวของกระดาษ(แนว

MD) เคลือบด้วยอัตราเร็ว 2.1 เมตร/นาทิจากนั้นนำกระดาษที่เคลือบแล้วทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้องโดยใช้น้ำหนักกดทับที่ม้วนทิ้งไว้เพื่อป้องกันกระดาษม้วนงอ ตัดขอบกระดาษออกด้านละ 15 มิลลิเมตร ในการควบคุมความสม่ำเสมอของการเคลือบทำโดยสุ่มตัวอย่างกระดาษทุก 10 แผ่น เพื่อนำมาทดสอบความหนาในตำแหน่งต่างๆ จากนั้นจึงนำไปทดสอบในลำดับต่อไป ทั้งนี้ในการเคลือบกระดาษจะเป็นการเคลือบด้านเดียวโดยทำการเปรียบเทียบผลทดสอบกระดาษทั้งในการเคลือบกระดาษด้านหน้า และการเคลือบกระดาษด้านหลัง



(ก) ด้านหน้า

(ข) ด้านหลัง

ภาพที่ 8 ตัวอย่างกระดาษ Duplex Board (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง



ภาพที่ 9 เครื่องเคลือบกระดาษ (Film Coater PI-1210)

2.3 การทดสอบกระดาษหลังเคลือบ

นำกระดาษเคลือบที่ได้จากข้อ 2.2 มาตัดให้ได้ขนาดตามการทดสอบแต่ละวิธี นำมาเก็บไว้ในตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187) ก่อนนำมาทดสอบสมบัติเชิงกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันของกระดาษเคลือบตามข้อ 1.2, 1.3 และ 1.4 ตามลำดับ

3. การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบชั้นที่สองด้วยสารละลายซินที่มีการผันแปรความเข้มข้นบนชั้นสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชต่อสมบัติของกระดาษ Duplex board

3.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของสารละลายซินในสารเคลือบ ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านน้ำ และน้ำมันโดยเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) และเคลือบสารละลายซินเป็นชั้นที่สอง (bilayer) แปร 3 ระดับ คือ ร้อยละ 1, 2 และ 3 เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) เพียงสารเดียว วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

การเคลือบสารละลายซินในการศึกษานี้เป็นการเคลือบชั้นที่สองโดยไม่ได้นำซินมาผสมกับสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชโดยตรง เนื่องจากสารทั้งสองไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน และซินจะจับตัวเป็นก้อนในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช นอกจากนั้นการเคลือบซินลงบนกระดาษเพียงชั้นเดียวโดยไม่มีสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชจะทำให้สารละลายซินซึมออกไปโดยไม่เคลือบอยู่บนผิวหน้ากระดาษ ลักษณะของสารเคลือบแสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แสดงลักษณะสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับการเคลือบสารละลายซินเป็นชั้นที่สองบนกระดาษแข็ง

3.2 การเตรียมสารเคลือบและวิธีการเคลือบกระดาษ

3.2.1 การเตรียมสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ช

วิธีการเตรียมสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักตามวิธีในข้อ 2.2.1

3.2.2 การเตรียมสารละลายซิน

เตรียมสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนักในสารละลายเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยปริมาตร ให้ความร้อนและกวนอย่างสม่ำเสมอที่อุณหภูมิ $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$ จนกระทั่งสารละลายมีความเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นควบคุมอุณหภูมิของสารละลายให้เป็น $75 \pm 5^{\circ}\text{C}$ โดยทิ้งไว้ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ

3.2.3 การวัดความหนืดของสารเคลือบ

นำสารเคลือบที่เตรียมโดยวิธีในข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 วัดความหนืดด้วยเครื่อง Brookfield Viscometers ใช้หัววัดหมายเลข 21 ความเร็ว 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 75°C

3.2.4 การเคลือบกระดาษ Duplex Board

นำกระดาษ Duplex Board มาเคลือบตามวิธีในข้อ 2.2.4 ด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก จากนั้นนำสารละลายซินที่เตรียมไว้มาเคลือบลงไปบนกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชที่แห้งแล้วตามวิธีในข้อ 2.2.4 เช่นกัน

3.3 การทดสอบกระดาษหลังเคลือบ

ทดสอบสมบัติของกระดาษหลังเคลือบตามวิธีในข้อ 1.2, 1.3 และ 1.4

4. การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์ กรดไขมันสเตียริก และการเคลือบชั้นที่สองของชั้นต่อสมบัติของกระดาษ Duplex Board

4.1 แผนการทดลอง

ศึกษาอิทธิพลของระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก และสารละลายชั้น ในสารเคลือบ ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านน้ำ และน้ำมัน โดยเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์ความเข้มข้นร้อยละ 15 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และเคลือบสารละลายชั้นเป็นชั้นที่สอง โดยมีอัตราส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันสเตียริก และชั้นเป็น 1:3, 3:1 และ 3:3 เปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

4.2 วิธีการเคลือบกระดาษ

4.2.1 การเตรียมสารละลายไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์

วิธีการเตรียมสารละลายไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก สารละลายไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกแปร 2 ระดับ คือร้อยละ 1 และ 3 และสารละลายชั้นแปร 2 ระดับคือร้อยละ 1 และ 3 ตามวิธีในข้อ 2.2.1, 2.2.2 และ 3.2.2 ตามลำดับ

4.2.4 การเคลือบกระดาษ Duplex Board

นำกระดาษ Duplex Board มาเคลือบตามวิธีในข้อ 2.2.4 ด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่เตรียมตามวิธีในข้อ 2.2.2 จากนั้นนำสารละลายชั้นที่เตรียมไว้มาเคลือบลงไปบนกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรโพลีเมอร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่แห้งแล้วตามวิธีในข้อ 2.2.4 เช่นกัน โดยลักษณะสารเคลือบแสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 แสดงลักษณะสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และการเคลือบสารละลายขึ้นเป็นชั้นที่สองบนกระดาษแข็ง

4.3 การทดสอบกระดาษหลังเคลือบ

ทดสอบสมบัติของกระดาษหลังเคลือบตามวิธีในข้อ 1.2, 1.3 และ 1.4

5. การศึกษาลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board เคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ

5.1 การศึกษาลักษณะผิวหน้าของกระดาษด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ

ส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

นำตัวอย่างกระดาษ Duplex Board มาเก็บไว้ในตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัดตัวอย่างให้มีขนาด 5×5 ตารางมิลลิเมตร นำไปเก็บในเคซิเคเตอร์ที่มีสารดูดความชื้นเป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง จากนั้นนำไปตรวจลักษณะผิวหน้าและภาพตัดขวางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (JEOL JSM-5600LV, Japan) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า

5.2 การตรวจสอบลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบบนกระดาษด้วยกล้องจุลทรรศน์

ส่องกราดด้วยเลเซอร์ (Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)

นำตัวอย่างกระดาษ Duplex Board มาเก็บไว้ในตู้ควบคุมสภาวะที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัดตัวอย่างให้มีขนาด 0.5×0.5 ตารางมิลลิเมตร วางชิ้นตัวอย่างบนสไลด์หยดสารละลายสีย้อม acridine orange ในน้ำ ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 (ปริมาตรต่อปริมาตร) และสีย้อม fuchsin acid ความเข้มข้นร้อยละ 0.01 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ในสารละลายกรดอะซิติกความเข้มข้นร้อยละ 1 (ปริมาตรต่อปริมาตร) ให้ท่วมตัวอย่าง นำตัวอย่างไป

ศึกษาโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์ต้องกราดด้วยเลเซอร์ โดยใช้ HeNe laser ในช่วงความยาวคลื่น 488 และ 543 นาโนเมตร และใช้โปรแกรม LSM 5 PASCAL ในการประมวลผลภาพ

6. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บกระดาศเคลื่อนที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน

พิจารณาเลือกกระดาศจากทรีตเมนต์ที่ให้ผลค่าสมบัติด้านต่างๆของกระดาศเหมาะสมที่สุด มาเก็บไว้ใน jars ในการจำลองสภาวะการเก็บกระดาศเคลื่อนที่ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (อุณหภูมิ 25-32 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74) ซึ่งเป็นสภาวะการเก็บสินค้าในคลังสินค้าโดยทั่วไป เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ ในการทดลองจะนำกระดาศเคลื่อนที่ผ่านการเก็บตามระยะเวลา 1, 2, 3 และ 4 สัปดาห์ไปทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันตามวิธีข้อ 1.2, 1.3 และ 1.4 เปรียบเทียบกับกระดาศที่ไม่ผ่านการเคลื่อน วางแผนการทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (completely randomized design, CRD) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ

7. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติโดยการทดสอบความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างทรีตเมนต์ด้วยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรม SPSS version 10

ผลและวิจารณ์

1. สมบัติเบื้องต้นของวัสดุดิบ

ผลการวัดปริมาณความชื้นของสไตร์ชดัดแปรที่ใช้ ได้แก่ ไฮโดรโฟบิกสไตร์ช จะใช้เพื่อนำไปคำนวณปริมาณของสไตร์ชในการเตรียมสารละลายสไตร์ชดัดแปร พบว่าไฮโดรโฟบิกสไตร์ชมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยเริ่มต้นเท่ากับร้อยละ 11.32

กระดาษที่เลือกใช้เป็นกระดาษแข็งประเภท Duplex Board เคลือบด้านเดียว โดยกระดาษด้านหน้าเป็นด้านที่เคลือบผิว มีสีขาว ผิวเรียบ ส่วนกระดาษด้านหลังมีสีเทา และมีลักษณะผิวหยาบดังภาพที่ 7 โดยผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ สมบัติการต้านทานไขมัน และการต้านการซึมผ่านแก๊สเริ่มต้นของกระดาษก่อนเคลือบ แสดงดังตารางที่ 1, 2, 3, 4 และ 5

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษแข็งก่อนเคลือบ

สมบัติของกระดาษ	ค่าทดสอบ
น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตารางเมตร)	299.6 ± 0.6
ความหนา (มิลลิเมตร)	0.337 ± 0.002
ความชื้น (ร้อยละ)	8.18 ± 0.08
ค่าสี L* (ด้านหน้า)	88.99 ± 0.15
ค่าสี L* (ด้านหลัง)	69.31 ± 0.08
ค่าสี a* (ด้านหน้า)	-4.32 ± 0.02
ค่าสี a* (ด้านหลัง)	-3.48 ± 0.03
ค่าสี b* (ด้านหน้า)	4.10 ± 0.03
ค่าสี b* (ด้านหลัง)	7.32 ± 0.01

ตารางที่ 2 สมบัติเชิงกลของกระดาษแข็งก่อนเคลือบ

สมบัติของกระดาษ	ค่าทดสอบ
ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว MD (กิโลนิวตัน/เมตร)	3.14 ± 0.05
ความต้านทานแรงกดวงแหวนแนว CD (กิโลนิวตัน/เมตร)	2.28 ± 0.05
ความแข็งดิ่งแนว MD (มิลลินิวตัน)	175.1 ± 2.1
ความแข็งดิ่งแนว CD (มิลลินิวตัน)	69.2 ± 1.3

ตารางที่ 3 สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษแข็งก่อนเคลือบ

สมบัติของกระดาษ	ค่าทดสอบ
มูมสัมผัสด้านหน้า (องศา)	55 ± 0.5
มูมสัมผัสด้านหลัง (องศา)	48 ± 0.5
การดูดซึมน้ำด้านหน้า (กรัม/ตารางเมตร)	24.980 ± 0.642
การดูดซึมน้ำด้านหลัง (กรัม/ตารางเมตร)	277.580 ± 2.633
เวลาในการดูดซึมน้ำด้านหน้า (นาทีก)	> 200
เวลาในการดูดซึมน้ำด้านหลัง (นาทีก)	2 ± 0.0

ตารางที่ 4 สมบัติการต้านทานน้ำมันของกระดาษแข็งก่อนเคลือบ

สมบัติของกระดาษ	ค่าทดสอบ
มูมสัมผัสด้านหน้า (องศา)	23 ± 1.0
มูมสัมผัสด้านหลัง (องศา)	22 ± 1.0
การดูดซึมน้ำมันด้านหน้า (กรัม/ตารางเมตร)	29.960 ± 1.727
การดูดซึมน้ำมันด้านหลัง (กรัม/ตารางเมตร)	75.660 ± 1.286
เวลาในการดูดซึมน้ำมันด้านหน้า (นาทีก)	> 200
เวลาในการดูดซึมน้ำมันด้านหลัง (นาทีก)	> 200

ตารางที่ 5 สมบัติการด้านการซึมผ่านแก๊สของกระดาษแข็งก่อนเคลือบ

สมบัติของกระดาษ	ค่าทดสอบ
อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ซีซี/ตารางเมตร/วัน) (ด้านหน้า)	$11,654 \pm 195.5$
อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน (ซีซี/ตารางเมตร/วัน) (ด้านหลัง)	$11,555 \pm 163.7$

2. อิทธิพลของความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกในสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

2.1 ความหนืดของสารเคลือบ

ความหนืดของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และสารเคลือบที่ผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริก แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ความหนืดของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ความเข้มข้น สตาร์ช (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความหนืด (เซนติพอยด์)
15	0	104.0 ± 0.0^d
15	1	144.0 ± 0.0^c
15	2	192.0 ± 0.0^b
15	3	284.7 ± 1.2^a

หมายเหตุ ^{abcd} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

จากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมกรดไขมันสเตียริกจากปริมาณร้อยละ 1, 2 และ 3 ลงในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก มีผลให้ค่าความหนืดของสารเคลือบเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยความหนืดของสารเคลือบที่เพิ่มขึ้นนั้นจะส่งผลให้สารเคลือบซึมเข้าไปอยู่ในโครงสร้างกระดาษได้น้อยลง และสารเคลือบปกคลุมบริเวณผิวหน้ากระดาษมากขึ้น (ดวงทิพย์, 2550)

2.2 สมบัติทางกายภาพของกระดาษหลังเคลือบ

สมบัติทางกายภาพของกระดาษ ได้แก่ น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบและกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นของร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก แสดงดังตารางที่ 7 และผลการวัดสีของกระดาษหลังเคลือบแสดงดังตารางที่ 8

สำหรับการเคลือบด้านหน้า น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 1 และ 2 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักในสารเคลือบ พบว่ากระดาษหลังเคลือบมีน้ำหนักมาตรฐานลดลง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกระดาษด้านหน้าเป็นด้านที่ผ่านการขัด จึงทำให้กระดาษมีความเรียบ มีรูพรุนลดลง สารเคลือบซึ่งมีความหนืดเพิ่มขึ้นจึงซึมเข้าไปในโครงสร้างของกระดาษด้านหน้าได้น้อย อย่างไรก็ตามพบว่า ค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหลังเคลือบมีความแตกต่างกันไม่เกิน 3 กรัมต่อตารางเมตร เมื่อเคลือบด้วยกรดไขมันสเตียริกที่ความเข้มข้นร้อยละ 1-3 ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างน้อยมากในทางปฏิบัติ ส่วนการเคลือบกระดาษด้านหลังพบว่า การเพิ่มระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกส่งผลให้น้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกเป็น ร้อยละ 3 ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบมีน้ำหนักมาตรฐานเพิ่มขึ้นร้อยละ 5 เทียบกับกระดาษไม่เคลือบ ทั้งนี้การเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกบนกระดาษด้านหลังส่งผลให้ค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหลังเคลือบมากกว่าการเคลือบด้านหน้า แสดงว่าสารเคลือบสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของกระดาษด้านหลังได้ดีกว่า เนื่องจากกระดาษด้านหลังจะมีความขรุขระและมีรูพรุนมากกว่ากระดาษด้านหน้าซึ่งผ่านกระบวนการขัดเงา โดยน้ำหนักของสารเคลือบบนกระดาษที่ระดับความเข้มข้นกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 มีค่าเป็น 3.4 กรัมต่อตารางเมตรในกระดาษที่เคลือบด้านหน้า และ 14.1 กรัมต่อตารางเมตร ในกระดาษที่เคลือบด้านหลัง

ในการเคลือบกระดาษด้านหน้า เมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 1 และ 2 ในสารเคลือบ พบว่ากระดาษมีความหนาเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับค่าน้ำหนักมาตรฐาน ส่วนการเคลือบด้านหลัง ความหนาของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก ($p \leq 0.05$) โดยที่ความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 ความหนามีค่าเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 9 เทียบกับกระดาษไม่เคลือบ อย่างไรก็ตาม ความหนาของกระดาษหลังเคลือบมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกอาจทำให้ความหนืดของสารเคลือบสูงขึ้น การเคลือบจึงมีความสม่ำเสมอลดลง

ตารางที่ 7 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาบิลไรเซอร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)	ความหนา (มม.)	ความชื้น (ร้อยละ)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	299.6 ± 0.6^d	0.337 ± 0.002^d	8.18 ± 0.08^b
	0	302.3 ± 0.1^c	0.344 ± 0.002^c	7.28 ± 0.21^d
	1	304.9 ± 0.7^b	0.352 ± 0.005^b	7.91 ± 0.11^c
	2	305.8 ± 0.2^a	0.359 ± 0.003^a	8.36 ± 0.12^a
	3	303.0 ± 0.1^c	0.352 ± 0.003^b	7.85 ± 0.08^c
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	299.6 ± 0.6^c	0.337 ± 0.002^c	8.18 ± 0.08^b
	0	306.8 ± 0.1^b	0.343 ± 0.004^b	7.74 ± 0.16^d
	1	306.4 ± 1.1^b	0.346 ± 0.004^b	8.17 ± 0.06^b
	2	307.3 ± 0.2^b	0.365 ± 0.007^a	8.46 ± 0.13^a
	3	313.7 ± 0.4^a	0.368 ± 0.005^a	7.69 ± 0.24^c

หมายเหตุ ^{abcd} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ความชื้นของกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ และกระดาษเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก พบว่ามีค่าความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 7-9 ซึ่งมีค่าไม่เกินร้อยละ 10 ตามค่าความชื้นในการผลิตกระดาษแข็งโดยทั่วไป (มอก.283-2521)

ผลการวัดสีของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก แสดงดังตารางที่ 8 ในการเคลือบด้านหน้า กระดาษเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์และกระดาษเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1-3 มีผลให้กระดาษด้านหน้ามีค่าสี L^* ซึ่งแสดงถึงความสว่างมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระดาษไม่เคลือบ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 88.75-89.64 ส่วนกระดาษที่เคลือบด้านหลังมีความสว่าง (L^*) ลดลง อาจเนื่องมาจากสารเคลือบซึมลงไปในกระดาษด้านหลังมาก ทำให้สารเคลือบปกคลุมบนผิวกระดาษลดลงกว่ากระดาษด้านหน้า

ตารางที่ 8 สีของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้นกรดสเตียริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		L^*	a^*	b^*
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	88.99 ± 0.15^c	-4.32 ± 0.02^a	4.10 ± 0.03^c
	0	89.64 ± 0.03^a	-4.41 ± 0.02^b	4.27 ± 0.07^b
	1	89.37 ± 0.08^b	-4.54 ± 0.01^c	4.54 ± 0.09^a
	2	89.32 ± 0.15^b	-4.42 ± 0.01^b	4.47 ± 0.05^a
	3	88.75 ± 0.08^d	-4.41 ± 0.03^b	4.53 ± 0.05^a
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	69.31 ± 0.08^a	-3.48 ± 0.03^c	7.32 ± 0.01^c
	0	69.00 ± 0.09^b	-3.35 ± 0.02^a	7.38 ± 0.03^{ab}
	1	69.00 ± 0.11^b	-3.38 ± 0.02^b	7.43 ± 0.07^a
	2	69.01 ± 0.13^b	-3.39 ± 0.01^b	7.39 ± 0.03^a
	3	69.02 ± 0.08^b	-3.39 ± 0.02^b	7.33 ± 0.05^{bc}

หมายเหตุ ^{abcd} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่า a^* ในการเคลือบกระดาษด้านหน้าพบว่า สารเคลือบส่งผลให้ค่า a^* มีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ แสดงว่ากระดาษมีโทนสีเขียวเพิ่มขึ้น สำหรับการเคลือบกระดาษด้านหลังพบว่า กระดาษหลังเคลือบมีค่า a^* เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ กระดาษจึงมีโทนสีแดงเพิ่มขึ้น ส่วนค่า b^* ของการกระดาษหลังเคลือบทั้งในด้านหน้าและด้านหลังส่งผลให้ค่า b^* เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) กระดาษหลังเคลือบจึงมีโทนสีเหลืองเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามสารเคลือบที่ประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริกไม่ได้ส่งผลต่อค่า a^* และ b^* โดยตรง แต่ส่งผลต่อความขาวของกระดาษ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกลงในสารเคลือบ จะทำให้กระดาษมีความขาวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Semti et al. (2002)

2.3 สมบัติเชิงกลของกระดาษหลังเคลือบ

ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งดึงของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาบิลไรซ์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก แสดงดังตารางที่ 9 พบว่า สำหรับการเคลือบกระดาษด้านหน้า กระดาษเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาบิลไรซ์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก มีผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เทียบกับกระดาษไม่เคลือบ โดยที่ความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความต้านทาน แรงกดวงแหวนลดลงจากกระดาษไม่เคลือบถึงร้อยละ 14 และร้อยละ 11 ในทิส MD และในทิส CD ตามลำดับ

ส่วนการเคลือบด้านหลัง กระดาษเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาบิลไรซ์เพียงสารเดียวส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้น เนื่องจากไฮโดรฟอบิกสตาบิลไรซ์ช่วยในการเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างและช่วยในการยึดเกาะของเส้นใยกระดาษ มีผลให้กระดาษมีความแข็งแรงมากขึ้น และที่ระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 ในสารเคลือบ ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนลดลงจากกระดาษไม่เคลือบเป็นร้อยละ 4 ในทิส MD และร้อยละ 3 ในทิส CD เนื่องจากเมื่อเติมไขมันลงในสารละลายพอลิแซคคาไรด์ที่มีความชอบน้ำทำให้ฟิล์มที่ได้ขาดความสมบูรณ์และความต่อเนื่องทางโครงสร้าง เนื่องจากมีไขมันแทรกอยู่ในชั้นฟิล์มพอลิแซคคาไรด์ ดังนั้นเมื่อเติมกรดไขมันสเตียริกลงในสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาบิลไรซ์จึงมีผลให้กระดาษหลังเคลือบมีความแข็งแรงลดลง (Colla et al., 2006; Weller et al., 1998; Sebt et al., 2002)

การทดสอบค่าความแข็งดึง ซึ่งแสดงถึงความต้านทานต่อการโค้งงอของกระดาษหลังเคลือบพบว่า ในกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้านหน้า ความแข็งดึงในทิส MD มีค่าอยู่ในช่วง

170.8-228.5 มิลลินิวตัน และความแข็งดึงในทิศ CD มีค่าอยู่ในช่วง 51.0-68.3 มิลลินิวตัน อย่างไรก็ตาม การเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกในสารเคลือบไม่ได้ส่งผลให้ความแข็งดึงในกระดาดลดลง เนื่องจากการเคลือบบนกระดาดด้านหน้าสารเคลือบอาจไม่สามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของกระดาดจึงไม่มีผลกระทบชัดเจนต่อค่าความแข็งดึง สำหรับกระดาดที่ผ่านการเคลือบด้านหลัง กระดาดเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาบิลิไท์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกส่งผลให้ค่าความแข็งดึงในกระดาดลดลงเช่นเดียวกับค่าความต้านทานแรงกด วงแหวน โดยที่ความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 ค่าความแข็งดึงของกระดาดลดลงจากกระดาดไม่เคลือบถึงร้อยละ 10 ในทิศ MD และ ร้อยละ 27 ในทิศ CD

ตารางที่ 9 ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งดึงของกระดาดหลังเคลือบไฮโดร-ฟอบิกสตาบิลิไท์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้นกรดสเตียริก (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก	ค่าทดสอบ			
		ความต้านทานแรงกดวงแหวน (กิโลนิวตัน/เมตร)		ความแข็งดึง (มิลลินิวตัน)	
		ทิศ MD	ทิศ CD	ทิศ MD	ทิศ CD
ด้านหน้า	กระดาดไม่เคลือบ	3.14 ± 0.05 ^a	2.28 ± 0.05 ^b	175.1 ± 2.1 ^c	69.2 ± 1.3 ^a
	0	2.90 ± 0.05 ^b	2.61 ± 0.06 ^a	170.8 ± 1.1 ^d	51.0 ± 2.7 ^d
	1	2.88 ± 0.06 ^b	2.57 ± 0.04 ^a	228.5 ± 2.7 ^a	58.8 ± 0.9 ^c
	2	2.92 ± 0.03 ^b	2.17 ± 0.05 ^c	178.5 ± 4.4 ^c	68.3 ± 5.6 ^a
	3	2.71 ± 0.05 ^c	2.04 ± 0.05 ^d	215.7 ± 0.0 ^b	63.4 ± 0.9 ^b
ด้านหลัง	กระดาดไม่เคลือบ	3.14 ± 0.05 ^b	2.28 ± 0.05 ^b	175.1 ± 2.1 ^{ab}	69.2 ± 1.3 ^a
	0	3.34 ± 0.06 ^a	2.45 ± 0.05 ^a	186.9 ± 2.6 ^a	68.3 ± 0.9 ^a
	1	2.87 ± 0.05 ^d	2.43 ± 0.06 ^a	178.5 ± 2.7 ^b	49.6 ± 1.3 ^{bc}
	2	2.91 ± 0.05 ^d	2.20 ± 0.03 ^c	171.6 ± 4.9 ^c	49.0 ± 0.0 ^c
	3	3.00 ± 0.06 ^c	2.21 ± 0.06 ^c	157.5 ± 1.3 ^d	50.8 ± 1.6 ^b

หมายเหตุ ^{abcd} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.4 สมบัติด้านการต้านทานน้ำของกระดาษหลังเคลือบ

มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก แสดงดังตารางที่ 10 จากการทดลองพบว่า กระดาษที่เคลือบด้านหน้ามีค่ามูมสัมพัทธ์อยู่ในช่วง 56-63 องศา ส่วนกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้านหลัง พบว่ามูมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 มูมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 79 เมื่อเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ แสดงว่ากระดาษมีความต้านทานน้ำมากขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริก เนื่องจากกรดไขมันสเตียริกมีคุณสมบัติที่มีความเป็นไฮโดรโฟบิก (Coma et al., 2001) และกรดไขมันสเตียริกเป็นกรดไขมันที่ประกอบไปด้วยสายโซ่ของไฮโดรคาร์บอนยาวที่สุด แสดงว่าโมเลกุลมีแรงยึดเหนี่ยวภายในมาก และสามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่คาร์บอกซิลิกของกรดไขมันสเตียริกกับหมู่ไฮดรอกซิลของสตาร์ชได้ 2 พันธะ จึงทำให้สามารถต้านทานน้ำได้ดี และมีการต้านทานน้ำสูงกว่าแวกซ์ และกรดแอลกอฮอล์ (Ayranci and Tunc, 2001 ; Mchugh and Krochta, 1994; Yang and Paulson, 2000)

สำหรับค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ผ่านการเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกในการเคลือบด้านหน้าพบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 12.800-14.640 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนกระดาษที่เคลือบด้านหลัง ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 27.960-53.620 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่ากระดาษที่เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียว พิจารณาได้ว่า เมื่อเคลือบกระดาษด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมีผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยลดลงคิดเป็นร้อยละ 90 ในกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ ซึ่งอธิบายได้ด้วยเหตุผลเช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของค่ามูมสัมพัทธ์ของน้ำ

ส่วนเวลาในการดูดซึมน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักในกระดาษที่ผ่านการเคลือบด้านหลัง เวลาในการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นถึง 30 เท่าจากกระดาษไม่เคลือบ

ตารางที่ 10 มุมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาศหลังเคลือบไฮโดร-
ฟอบิกส์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละ) โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมพัทธ์ (องศา)	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำ (นาทีก)
ด้านหน้า	กระดาศไม่เคลือบ	55 ± 0.5^a	24.980 ± 0.642^a	200 ± 0.0^a
	0	58 ± 0.3^b	19.460 ± 1.911^b	124 ± 1.0^c
	1	63 ± 0.5^a	12.800 ± 0.995^c	101 ± 2.6^c
	2	56 ± 1.8^a	14.640 ± 1.126^c	105 ± 2.3^d
	3	58 ± 1.8^b	12.920 ± 2.033^c	148 ± 1.0^b
ด้านหลัง	กระดาศไม่เคลือบ	48 ± 0.5^c	277.580 ± 2.633^a	2 ± 0.0^c
	0	66 ± 0.3^d	177.700 ± 1.543^b	30 ± 0.6^d
	1	74 ± 0.3^c	53.620 ± 1.320^c	54 ± 1.0^c
	2	81 ± 0.5^b	35.220 ± 2.928^d	58 ± 0.6^b
	3	86 ± 0.5^a	27.960 ± 1.279^c	61 ± 0.0^a

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.5 สมบัติด้านการต้านทานน้ำมันของกระดาศหลังเคลือบ

มุมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาศที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาศหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกส์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก แสดงดังตารางที่ 11 จากผลการทดลองพบว่า ค่ามุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันของกระดาศที่เคลือบด้านหน้ามีค่ามุมสัมพัทธ์ที่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก ซึ่งอาจมีผลจากการแผ่กระจายของหยดน้ำมันบนผิวกระดาศโดยอาจไม่ได้มีผลโดยตรงจากการดูดซึมน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องจากกระดาศด้านหน้ามีการขัดผิวและมีความเรียบทำให้การซึมผ่านของของเหลวยากกว่าด้านหลัง ส่วนการเคลือบด้านหลังมุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก แสดงว่ากระดาศดูดซึมน้ำมันได้น้อย (Han and Krochta, 2001)

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำมันพบว่า กระดาษที่เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาบิลร่วมกับกรดไขมันสเตียริกในการเคลือบด้านหน้ามีค่าการดูดซึมน้ำมันอยู่ในช่วง 28.660-40.560 กรัมต่อตารางเมตร ส่วนกระดาษที่เคลือบด้านหลังมีค่าการดูดซึมน้ำมันอยู่ในช่วง 28.900-35.480 กรัมต่อตารางเมตร ซึ่งลดลงจากกระดาษไม่เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยลดลงร้อยละ 62 ที่ความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ แสดงว่าการเคลือบกระดาษอาจมีผลทำให้กระดาษสามารถต้านทานน้ำมันได้ดีขึ้น เนื่องจากสารเคลือบเข้าไปแทนที่รูพรุน และเติมเต็มช่องว่างภายในโครงสร้างของเซลลูโลส จึงสามารถต้านทานน้ำมันได้ดีขึ้น (Gallstedt *et al.*, 2002) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำมัน สำหรับการจับเวลาในการดูดซึมน้ำมันบนกระดาษทั้งการเคลือบด้านหน้าและด้านหลังมีค่ามากกว่า 200 นาที และไม่มี ความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 11 มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาบิลร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำมัน (นาที)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	23 ± 1.0^d	29.960 ± 1.727^c	> 200
	0	33 ± 0.3^c	33.020 ± 0.618^b	> 200
	1	56 ± 0.6^a	40.560 ± 1.777^a	> 200
	2	56 ± 1.9^a	30.960 ± 1.793^{bc}	> 200
	3	41 ± 2.0^b	28.660 ± 2.166^c	> 200
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	22 ± 1.0^c	75.660 ± 1.286^a	> 200
	0	30 ± 1.3^d	36.620 ± 2.924^b	> 200
	1	46 ± 1.3^c	35.480 ± 2.090^{bc}	> 200
	2	49 ± 0.5^b	33.620 ± 2.809^c	> 200
	3	53 ± 1.3^a	28.900 ± 0.883^d	> 200

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

2.6 สมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดร-ฟิสิกส์ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดร-ฟิสิกส์ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก และกระดาษไม่เคลือบ แสดงดังตารางที่ 12 จากผลการทดลองพบว่า กระดาษที่ผ่านการเคลือบด้านหน้า เมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกในสารเคลือบ อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบมีค่ามากขึ้น อย่างไรก็ตามอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนที่วัดได้มีความแปรปรวนค่อนข้างสูง

ตารางที่ 12 แสดงอัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรฟิสิกส์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ
		อัตราการซึมผ่านออกซิเจน (ซีซี/ตร.ม./วัน)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	11654 ± 195.5^d
	0	34530 ± 1485.1^c
	1	47286 ± 1195.8^b
	2	33925 ± 1060.1^c
	3	91516 ± 1434.3^a
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	11555 ± 163.7^d
	0	72374 ± 167.6^b
	1	42425 ± 164.2^c
	2	79695 ± 151.4^a
	3	79603 ± 120.0^a

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ส่วนกระดาษที่เคลือบด้านหลัง กระดาษที่เคลือบด้วยสารเคลือบทุกประเภท มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมากกว่ากระดาษไม่เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้การเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริกลงในสารเคลือบอาจส่งผลให้ในโครงสร้างของฟิล์มที่เคลือบบนกระดาษมีช่องว่างมากขึ้น ออกซิเจนจึงสามารถซึมผ่านกระดาษได้ง่าย (Colla *et al.*, 2006) ส่วนกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงสารเดียวมีอัตราการซึมผ่านออกซิเจนสูง และมีค่ามากกว่ากระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของไฮโดรโฟบิกสตาร์ชประกอบด้วยหมู่มีขั้ว จึงสามารถดูดความชื้นได้ง่ายเมื่อไม่มีกรดไขมันสเตียริกเป็นองค์ประกอบ ทำให้เส้นใยกระดาษบวม และมีปริมาตรอิสระมากขึ้น กระดาษจึงมีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูง (Krochta *et al.*, 1994) ทั้งนี้กระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกประกอบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ดูดความชื้นได้ง่ายเช่นกัน แต่เนื่องจากมีกรดไขมันสเตียริกซึ่งมีความไม่ชอบน้ำร่วมอยู่ด้วย จึงอาจทำให้กระดาษดูดความชื้นลดลง

3. การศึกษาอิทธิพลของการเคลือบชั้นที่สองด้วยสารละลายซินที่มีการผันแปรความเข้มข้นบนชั้นสารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

3.1 ความหนืดของสารเคลือบ

ค่าความหนืดของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และซิน แสดงดังตารางที่ 13 พบว่า สารเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวมีค่าความหนืด 104.0 เซนติพอยด์ ซึ่งสูงกว่าความหนืดของสารละลายซินอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และค่าความหนืดของสารละลายซินมีค่าประมาณ 18-20 เซนติพอยด์ ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นจากร้อยละ 1 เป็นร้อยละ 2 และ 3 ตามลำดับ แสดงว่าปริมาณซินที่เพิ่มขึ้นอาจไม่ได้ส่งผลต่อค่าความหนืดของสารเคลือบ

ตารางที่ 13 ความหนืดของสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ และซิน

ความเข้มข้น สตาร์ช (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น ซิน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความหนืด (เซนติพอยด์)
15	0	104.0 ± 0.0 ^a
0	1	18.7 ± 2.3 ^b
0	2	20.0 ± 0.0 ^b
0	3	20.0 ± 0.0 ^b

หมายเหตุ ^{ab} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3.2 สมบัติทางกายภาพของกระดาษหลังเคลือบ

น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ร่วมกับการเคลือบสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นของซินเป็นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยในการเคลือบกระดาษจะเคลือบไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์เป็นชั้นแรกตามด้วยสารละลายซินเป็นชั้นที่สอง แสดงดังตารางที่ 14 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ปริมาณซินส่งผลให้น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหลังเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซิน เช่น ที่ความเข้มข้นของซินเป็นร้อยละ 3 มีผลให้น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหลังเคลือบเพิ่มมากขึ้นทั้งในการเคลือบด้านหน้าและด้านหลังโดยมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2 ในกระดาษที่เคลือบด้านหน้า และร้อยละ 3 ในกระดาษที่เคลือบด้านหลัง ทั้งนี้การเคลือบไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ร่วมกับซินบนกระดาษด้านหลังส่งผลให้ค่าน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษหลังเคลือบมากกว่าการเคลือบด้านหน้าเล็กน้อย แสดงว่าสารเคลือบสามารถแทรกซึมเข้าไปในโครงสร้างของกระดาษด้านหลังได้ดีกว่า เนื่องจากกระดาษด้านหลังจะมีความขรุขระและมีรูพรุนมากกว่ากระดาษด้านหน้าซึ่งผ่านกระบวนการขัดเงา โดยน้ำหนักของสารเคลือบบนกระดาษที่ระดับความเข้มข้นซินเป็นร้อยละ 3 มีค่าเป็น 6.5 กรัมต่อตารางเมตรในกระดาษที่เคลือบด้านหน้า และ 8.8 กรัมต่อตารางเมตร ในกระดาษที่เคลือบด้านหลัง

ตารางที่ 14 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษหลังเคลือบ
ไฮโดรฟอบิกสตาซ์ และจีน

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น จีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		น้ำหนักมาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)	ความหนา (มม.)	ความชื้น (ร้อยละ)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	299.4 ± 0.6 ^d	0.336 ± 0.003 ^c	9.00 ± 0.13 ^a
	0	302.3 ± 0.1 ^c	0.344 ± 0.002 ^b	7.28 ± 0.21 ^b
	1	304.7 ± 0.7 ^b	0.350 ± 0.012 ^a	8.98 ± 0.17 ^a
	2	304.6 ± 0.7 ^b	0.346 ± 0.002 ^{ab}	8.96 ± 0.04 ^a
	3	305.9 ± 0.7 ^a	0.341 ± 0.005 ^{bc}	9.01 ± 0.09 ^a
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	299.3 ± 0.6 ^d	0.336 ± 0.003 ^c	9.00 ± 0.13 ^{ab}
	0	306.8 ± 0.1 ^b	0.343 ± 0.004 ^d	7.74 ± 0.16 ^c
	1	304.2 ± 0.6 ^c	0.346 ± 0.002 ^c	8.90 ± 0.11 ^b
	2	306.9 ± 0.3 ^b	0.350 ± 0.002 ^b	9.12 ± 0.18 ^a
	3	308.1 ± 0.5 ^a	0.355 ± 0.002 ^a	9.14 ± 0.10 ^a

หมายเหตุ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่าความหนาของกระดาษพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของจีนส่งผลให้
ความหนามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่ระดับความเข้มข้นของจีนเป็นร้อยละ 3
กระดาษมีความหนาเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 1 ในกระดาษที่เคลือบด้านหน้า และร้อยละ 6
ในกระดาษที่เคลือบด้านหลัง เมื่อเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ และความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้น
โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.005 มิลลิเมตร ในการเคลือบด้านหน้า และเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 0.019 มิลลิเมตร ในการ
เคลือบด้านหลัง

ส่วนค่าความชื้นของกระดาษหลังเคลือบพบว่า ในการเคลือบด้านหน้า สารเคลือบไฮโดรฟอบิกสสารร่วมกับจีนไม่มีอิทธิพลต่อค่าความชื้นของกระดาษ แต่ในกระดาษเคลือบด้านหลังนั้น ค่าความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของจีน ทั้งนี้อาจเป็นผลจากความสามารถในการดูดซึมสารเคลือบและของเหลวของกระดาษด้านหลังซึ่งดีกว่ากระดาษด้านหน้า

สีของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสสาร และตามด้วยการเคลือบสารละลายจีนเป็นขั้นที่สอง แสดงดังตารางที่ 15 เมื่อพิจารณาค่าความสว่าง L^* ของกระดาษเคลือบไฮโดรฟอบิกสสารเพียงสารเดียวเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบพบว่าค่า L^* เพิ่มขึ้นในการเคลือบด้านหน้า ความสว่างจึงเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 15 สีของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสสาร และจีน

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้นจีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		L^*	a^*	b^*
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	88.99 ± 0.15^b	-4.32 ± 0.02^a	4.10 ± 0.03^d
	0	89.64 ± 0.03^a	-4.41 ± 0.02^b	4.27 ± 0.07^c
	1	89.63 ± 0.14^a	-4.76 ± 0.02^d	4.89 ± 0.08^a
	2	89.53 ± 0.10^a	-4.49 ± 0.02^c	4.41 ± 0.10^b
	3	89.12 ± 0.35^b	-4.50 ± 0.04^c	4.50 ± 0.05^b
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	69.31 ± 0.08^a	-3.48 ± 0.03^c	7.32 ± 0.01^c
	0	69.00 ± 0.09^b	-3.35 ± 0.02^a	7.38 ± 0.03^b
	1	68.93 ± 0.04^b	-3.41 ± 0.02^b	7.43 ± 0.05^b
	2	68.97 ± 0.08^b	-3.48 ± 0.03^c	7.44 ± 0.04^b
	3	68.99 ± 0.11^b	-3.45 ± 0.03^c	7.64 ± 0.07^a

หมายเหตุ ^{abcd} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ส่วนการเคลือบกระดาษด้านหลัง ค่า L^* ลดลงเล็กน้อย แสดงว่าสารเคลือบส่งผลให้กระดาษด้านหลังมีความสว่างลดลงจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ เนื่องจากความสว่างของกระดาษด้านหลังไม่ได้รับอิทธิพลของสารเคลือบเดิมบนผิวกระดาษเหมือนกระดาษด้านหน้า และการเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาซ์อาจทำให้กระดาษมีความขุ่น ความสว่างจึงลดลง แต่ในการเคลือบสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 ลงไปบนกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาซ์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 ไม่มีอิทธิพลที่ทำให้ความสว่างมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาค่า a^* ในกระดาษที่เคลือบด้านหน้าด้วยไฮโดรฟอบิกสตาซ์ ร่วมกับซิน พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง -4.76 ถึง -4.41 ส่วนการเคลือบกระดาษด้านหลัง ค่า a^* มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาซ์เพียงอย่างเดียว แสดงว่ากระดาษมีการเปลี่ยนแปลงเป็นโทนีสีแดงมากขึ้น แต่เมื่อเคลือบด้วยสารละลายซินทับลงไปบนกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาซ์ พบว่าค่า a^* ลดลง แสดงว่ากระดาษมีโทนีเขียวมากขึ้น ส่วนค่า b^* ของกระดาษที่เคลือบทั้งด้านหน้าและด้านหลังมีค่าเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซินค่า b^* จะเพิ่มมากขึ้น แสดงว่ากระดาษมีสีเหลืองมากขึ้น เมื่อฟิล์มซินที่เคลือบบนกระดาษมีปริมาณและมีความหนามากขึ้น (Weller *et al.*, 1998)

3.3 สมบัติเชิงกลของกระดาษหลังเคลือบ

ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งดึงของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาซ์ร่วมกับซิน แสดงดังตารางที่ 16 จากการพิจารณาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนพบว่า กระดาษที่ผ่านการเคลือบทั้งในด้านหน้าและด้านหลังส่งผลให้มีความต้านทานแรงกดวงแหวนในทิศ MD และ CD เพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างการทดลองที่มีการเพิ่มปริมาณซินจากร้อยละ 1, 2 และ 3 พบว่า มีผลให้ความต้านทานแรงกดวงแหวนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นกัน โดยในการเคลือบด้านหลัง ที่ระดับความเข้มข้นของซินเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก กระดาษหลังเคลือบมีความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นในทิศ MD และ CD โดยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 26 ในทิศ MD และร้อยละ 19 ในทิศ CD ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Trezza and Vergano (1994) ซึ่งพบว่าการเคลือบกระดาษด้วยสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มที่เคลือบมีความคงตัว และสม่ำเสมอมากขึ้น กระดาษหลังเคลือบจึงมีความแข็งแรง

ตารางที่ 16 ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งแรงดึงของกระดาศหลังเคลือบด้วย สารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอริก และซีน

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้นซีน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ			
		ความต้านทานแรงกดวงแหวน (กิโลนิวตัน/เมตร)		ความแข็งแรงดึง (มิลลินิวตัน)	
		ทิส MD	ทิส CD	ทิส MD	ทิส CD
ด้านหน้า	กระดาศไม่เคลือบ	3.21 ± 0.06 ^c	2.30 ± 0.11 ^c	178.7 ± 2.1 ^c	68.6 ± 0.0 ^c
	0	2.90 ± 0.05 ^d	2.61 ± 0.06 ^a	170.8 ± 1.1 ^d	51.0 ± 2.7 ^d
	1	3.25 ± 0.06 ^{bc}	2.51 ± 0.06 ^b	171.8 ± 1.8 ^d	77.1 ± 2.1 ^b
	2	3.27 ± 0.05 ^b	2.57 ± 0.02 ^{ab}	201.0 ± 4.9 ^b	76.9 ± 0.9 ^b
	3	3.35 ± 0.02 ^a	2.59 ± 0.06 ^a	208.5 ± 3.6 ^a	79.6 ± 1.6 ^a
ด้านหลัง	กระดาศไม่เคลือบ	3.21 ± 0.06 ^c	2.30 ± 0.11 ^d	178.7 ± 2.1 ^c	68.6 ± 0.0 ^a
	0	3.34 ± 0.06 ^d	2.45 ± 0.05 ^c	186.9 ± 2.6 ^d	68.3 ± 0.9 ^a
	1	3.42 ± 0.05 ^c	2.59 ± 0.05 ^b	229.1 ± 2.1 ^c	35.5 ± 1.6 ^c
	2	3.90 ± 0.05 ^b	2.60 ± 0.05 ^b	269.9 ± 3.2 ^b	45.5 ± 2.1 ^b
	3	4.03 ± 0.04 ^a	2.74 ± 0.05 ^a	329.7 ± 1.6 ^a	46.7 ± 2.5 ^b

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในการวัดค่าความแข็งแรงดึงพบว่า เมื่อเคลือบสารเคลือบบนกระดาศด้านหน้า จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซีน ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาศเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ส่วนการเคลือบกระดาศด้านหลัง การเพิ่มความเข้มข้นของซีนทำให้ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาศในทิส MD เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยที่ระดับความเข้มข้นของซีนเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 84 เมื่อเทียบกับกระดาศไม่เคลือบ ส่วนในทิส CD พบว่าการเคลือบที่มีชั้นของซีนเพิ่มขึ้นจากชั้นของไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอริกส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงของกระดาศมีค่าลดลงจากกระดาศไม่เคลือบ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการเคลือบกระดาศ การที่ค่าความแข็งแรงดึงในทิส MD ของกระดาศมีค่าสูงกว่ากระดาศที่ไม่เคลือบ มีสาเหตุมาจากการที่สารเคลือบมาเกาะอยู่บนเส้นใยทำให้เส้นใยมีความแข็งแรงมากขึ้นและช่องว่างต่างๆ ภายในโครงสร้างกระดาศถูกเติมเต็ม

ด้วยสารเคลือบ แต่ในทิส CD เป็นด้านที่เส้นใยไม่ได้เรียงตัวในลักษณะที่จะสามารถช่วยในการรับแรงได้ อีกทั้งการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักของกระดาษมีลักษณะแปรและโค้งงอขึ้นในทิส CD อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงของกระดาษที่มีชั้นที่ระดับความเข้มข้นต่างกันพบว่า เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นจะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงในทิส CD มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

3.4 สมบัติด้านการต้านทานน้ำ

มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับซิน แสดงดังตารางที่ 17 เมื่อพิจารณาการดูดซึมน้ำของกระดาษ ปริมาตร 40 ไมโครลิตร บนกระดาษหลังเคลือบเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ ในการเคลือบกระดาษด้านหน้าพบว่า การเพิ่มระดับความเข้มข้นของซินในสารเคลือบ ส่งผลให้มูมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) และในการเคลือบด้านหลังมูมสัมพัทธ์ก็มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เช่นกัน เมื่อเพิ่มปริมาณซินโดยเมื่อเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ และซินที่ระดับความเข้มข้นเป็นร้อยละ 3 มูมสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบคิดเป็นร้อยละ 46 แสดงว่ากระดาษหลังเคลือบมีความเป็นไฮโดรฟอบิกมากขึ้น จึงทำให้กระดาษหลังเคลือบต้านทานน้ำได้ดี

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษหลังเคลือบเปรียบเทียบกับกระดาษก่อนเคลือบ พบว่าการเพิ่มปริมาณซินส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) จากผลการทดลองพบว่า กระดาษที่เคลือบด้านหน้า และด้านหลังด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ และซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก จะดูดซึมน้ำลดลงถึงร้อยละ 70 ในการเคลือบด้านหน้า และ ร้อยละ 32 ในการเคลือบด้านหลัง

เมื่อหยดน้ำปริมาตร 40 ไมโครลิตร แล้วจับเวลาในการดูดซึมน้ำ พบว่าการเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ร่วมกับซินบนกระดาษด้านหน้าจับเวลาในการดูดซึมน้ำได้มากกว่า 200 นาที และพบว่าระดับความเข้มข้นของซินไม่ได้ส่งผลต่อเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษ

ตารางที่ 17 มุมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาศหลังเคลือบด้วย
สารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอริก และซีน

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น ซีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมพัทธ์ (องศา)	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำ (นาทิจ)
ด้านหน้า	กระดาศไม่เคลือบ	55 ± 0.5^d	23.000 ± 1.158^a	$> 200^a$
	0	58 ± 0.3^c	19.460 ± 1.911^b	124 ± 1.0^b
	1	76 ± 0.3^b	18.560 ± 0.207^b	$> 200^a$
	2	76 ± 0.5^b	17.780 ± 1.132^b	$> 200^a$
	3	83 ± 0.3^a	6.760 ± 1.369^c	$> 200^a$
ด้านหลัง	กระดาศไม่เคลือบ	48 ± 0.3^d	275.280 ± 0.622^a	2 ± 0.0^c
	0	66 ± 0.3^b	177.700 ± 1.543^d	30 ± 0.6^a
	1	64 ± 0.5^c	225.740 ± 4.465^b	11 ± 2.1^d
	2	70 ± 0.3^a	186.880 ± 3.570^c	16 ± 0.0^c
	3	70 ± 0.6^a	186.940 ± 1.592^c	20 ± 1.5^b

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวนี้หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในการเคลือบบนกระดาศด้านหลังพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของซีนส่งผลให้เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาศหลังเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยเมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของซีนเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เวลาในการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น 10 เท่าจากกระดาศที่ไม่ผ่านการเคลือบ ดังนั้นเมื่อพิจารณาทั้งมุมสัมพัทธ์ ปริมาณการดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาศหลังเคลือบพบว่า กระดาศสามารถต้านทานน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากซีนมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยกรดอะมิโนที่ไม่มีขั้วจำนวนมากจึงทำให้มีความไม่ชอบน้ำสูง (Takahashi *et al.*, 2002)

3.5 สมบัติด้านการต้านทานน้ำมัน

มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ช และซิน

ด้านที่ เคลือบ	ความเข้มข้น ซิน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
		มูมสัมพัทธ์ (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำมัน (นาทีก)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	25 ± 0.6^c	48.380 ± 2.124^a	> 200
	0	33 ± 0.3^d	33.020 ± 0.618^c	> 200
	1	36 ± 0.3^c	37.340 ± 3.062^b	> 200
	2	43 ± 0.5^b	37.980 ± 3.065^b	> 200
	3	47 ± 0.8^a	28.620 ± 1.733^d	> 200
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	23 ± 0.5^d	100.720 ± 2.465^a	> 200
	0	30 ± 1.3^c	36.620 ± 2.924^c	> 200
	1	30 ± 0.8^c	46.080 ± 1.537^b	> 200
	2	34 ± 0.6^b	37.640 ± 2.908^c	> 200
	3	48 ± 0.5^a	37.800 ± 1.166^c	> 200

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวนี้หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณามูมสัมพัทธ์ของน้ำมันปริมาตร 40 ไมโครลิตรบนกระดาษ พบว่าความเข้มข้นซินมีอิทธิพลต่อค่ามูมสัมพัทธ์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเพิ่มความเข้มข้นซินเป็นร้อยละ 1, 2 และ 3 ส่งผลให้มูมสัมพัทธ์เพิ่มมากขึ้นทั้งการเคลือบด้านหน้าและด้านหลัง โดยเมื่อเคลือบกระดาษด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ช และซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่งผล

ให้มุมสัมผัสของหยดน้ำมันมีค่าเพิ่มขึ้นคิดเป็น 2 เท่าของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ แสดงว่าการเพิ่มปริมาณซินในสารเคลือบสามารถทำให้กระดาษด้านทานน้ำมันได้ดีขึ้น เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณซินทำให้สารเคลือบเกิดฟิล์มเคลือบบนกระดาษได้ดีขึ้น มีความเหนียว และด้านทานน้ำมันได้ดี (Trezza and Vergana, 1994 ; Lai H. *et al.*, 1997) โดยฟิล์มซินจะขึ้นรูปโดยการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจน และพันธะโคvalent ไฟด์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่จัดตัวกันแน่น กระดาษหลังเคลือบจึงดูดซึมน้ำมันต่ำลง มุมสัมผัสของหยดน้ำมันจึงมีค่ามากขึ้น (Krochta *et al.*, 1994)

สำหรับค่าการดูดซึมน้ำมันที่วัดได้เมื่อเพิ่มปริมาณซินพบว่า มีค่าการดูดซึมน้ำมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อความเข้มข้นของซินเป็นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ค่าการดูดซึมน้ำมันของกระดาษลดลงคิดเป็นร้อยละ 41 ในการเคลือบด้านหน้า และร้อยละ 62 ในการเคลือบด้านหลัง ส่วนเวลาในการดูดซึมน้ำมันพบว่าทุกการทดลองทั้งกระดาษก่อนเคลือบและหลังเคลือบมีเวลาในการดูดซึมน้ำมันมากกว่า 200 นาที

3.6 สมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 19 พบว่าในการเคลือบกระดาษด้านหน้า อัตราการซึมผ่านออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบมีค่าอยู่ในช่วง 34,530-93,682 ซีซี/ตารางเมตร/วัน ซึ่งมีค่าสูงกว่ากระดาษก่อนเคลือบ และค่าที่วัดได้มีความแปรปรวนสูง เช่นเดียวกับอัตราการซึมผ่านออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก ส่วนการเคลือบกระดาษด้านหลังด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช เพียงสารเดียว กระดาษหลังเคลือบมีอัตราการซึมผ่านออกซิเจนสูงกว่ากระดาษไม่เคลือบ และพบว่าการเพิ่มระดับความเข้มข้นของซินเป็นร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้กระดาษมีอัตราการซึมผ่านออกซิเจนต่ำลง และต่ำกว่ากระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ทั้งนี้เนื่องจากซินมีโครงสร้างที่ดูดความชื้นน้อยกว่าไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และโครงสร้างประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจนที่จัดตัวกันแน่น จึงส่งผลให้อัตราการซึมผ่านออกซิเจนลดลง (Trezza *et al.*, 1998)

ตารางที่ 19 อัตราการซึมผ่านแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ และจีน

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น จีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ
		อัตราการซึมผ่านออกซิเจน (ซีซี/ตร.ม./วัน)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ	11654 ± 195.5^c
	0	34530 ± 1485.1^d
	1	73413 ± 967.5^b
	2	43756 ± 698.0^c
	3	93682 ± 823.1^a
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ	11555 ± 163.7^c
	0	72374 ± 167.6^a
	1	20730 ± 123.8^b
	2	15661 ± 164.6^c
	3	12616 ± 155.3^d

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวนี้หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในการเลือกกระดาษความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก และสารละลายจีนที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาในขั้นต่อไปโดยใช้สารละลายไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกในชั้นแรก และการเคลือบสารละลายจีนในชั้นที่สองในการศึกษาขั้นต่อไปนั้น จะกำหนดให้สารเคลือบมีปริมาณกรดไขมันสเตียริกต่อซินคิดเป็นอัตราส่วน 1:3, 3:1 และ 3:3 ตามลำดับ เพื่อศึกษาอิทธิพลร่วมของการเคลือบกระดาษด้วยสารผสมในอัตราส่วนต่างๆ

4. อิทธิพลของการเคลือบสารเคลือบผสมระหว่างไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน กรดไขมันสเตียริก และการเคลือบชั้นที่สองของซินต่อสมบัติของกระดาษแข็ง

4.1 สมบัติทางกายภาพของกระดาษหลังเคลือบ

น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนที่ระดับความเข้มข้นคงที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกและซินที่ระดับความเข้มข้นต่างๆแสดงดังตารางที่ 20 พิจารณาได้ว่า เมื่อเคลือบกระดาษด้วยไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนที่ระดับความเข้มข้นคงที่ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ส่งผลให้น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทั้งในกระดาษที่เคลือบด้านหน้าและด้านหลัง เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ ซึ่งเมื่อเคลือบกระดาษด้วยไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษมีค่ามากที่สุด โดยเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 2 ในการเคลือบด้านหน้า และร้อยละ 4 ในการเคลือบด้านหลัง เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณสารเคลือบ สารเคลือบบางส่วนจะซึมลงไปในโครงสร้างกระดาษ และสารเคลือบส่วนที่เหลือจะปกคลุมอยู่บนผิวหน้ากระดาษ จึงทำให้น้ำหนักมาตรฐานของกระดาษมีค่ามากขึ้น

เมื่อพิจารณาความหนาของกระดาษหลังเคลือบทั้งการเคลือบด้านหน้าและด้านหลังมีอิทธิพลให้ความหนาของกระดาษเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก และซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีความหนามากที่สุดทั้งการเคลือบด้านหน้าและด้านหลังเป็นร้อยละ 15 และร้อยละ 6 ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ และค่าความชื้นของกระดาษหลังเคลือบมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 7.28-8.29 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

สีของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน กรดไขมันสเตียริก และซินที่ระดับความเข้มข้นต่างๆแสดงดังตารางที่ 21 จากผลการทดลองพบว่า ในการเคลือบกระดาษด้านหน้าด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนเพียงสารเดียวส่งผลให้ค่าความสว่าง L^* มีค่ามากที่สุด และเมื่อเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซินส่งผลให้กระดาษมีค่า L^* ลดลง ความสว่างจึงลดลง เมื่อพิจารณาการเคลือบกระดาษที่ด้านหลัง การเติมกรด

ไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 และเกลือสารละลายขึ้นความเข้มข้นร้อยละ 3 ลงไป เป็นสารเคลือบชั้นที่สองทำให้ค่า L^* มีค่ามากที่สุด แสดงว่าการใช้สารเคลือบดังกล่าวส่งผลให้ กระจกมีความสว่างมากขึ้น ส่วนค่า a^* มีค่าลดลงทั้งกระจกที่เคลือบด้านหน้าและด้านหลัง แสดงว่ากระจกมีโทนสีเขียวมากขึ้น และเมื่อพิจารณาค่า b^* พบว่า ทรีตเมนต์ที่สารเคลือบ ประกอบด้วยขึ้นความเข้มข้นร้อยละ 3 ส่งผลให้สีของกระจกมีค่า b^* เพิ่มขึ้น กระจกจึงมีสี เหลือง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดสีของกระจกที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสเฟตและ สารละลายขึ้น

ตารางที่ 20 น้ำหนักมาตรฐาน ความหนา และปริมาณความชื้นของกระจกหลังเคลือบด้วย สารผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสเฟตร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่ หนึ่ง) และชั้น (ชั้นที่สอง)

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น ขึ้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
			น้ำหนัก	ความหนา	ความชื้น
			มาตรฐาน (กรัม/ตร.ม.)	(มม.)	(ร้อยละ)
ด้านหน้า	กระจกไม่เคลือบ		301.4 ± 0.8 ^c	0.337 ± 0.002 ^c	8.25 ± 0.13 ^a
	0	0	302.3 ± 0.1 ^c	0.344 ± 0.002 ^c	7.28 ± 0.21 ^b
	1	3	304.8 ± 0.4 ^b	0.343 ± 0.003 ^c	8.16 ± 0.03 ^a
	3	1	304.6 ± 0.5 ^b	0.366 ± 0.021 ^b	8.19 ± 0.11 ^a
	3	3	307.4 ± 0.5 ^a	0.388 ± 0.002 ^a	7.45 ± 0.07 ^b
ด้านหลัง	กระจกไม่เคลือบ		299.6 ± 0.6 ^d	0.337 ± 0.002 ^b	8.25 ± 0.13 ^a
	0	0	306.8 ± 0.1 ^c	0.343 ± 0.004 ^b	7.74 ± 0.16 ^c
	1	3	307.8 ± 0.4 ^b	0.345 ± 0.003 ^{ab}	8.08 ± 0.08 ^b
	3	1	307.4 ± 0.3 ^{bc}	0.347 ± 0.004 ^{ab}	8.08 ± 0.09 ^b
	3	3	310.3 ± 0.6 ^a	0.356 ± 0.028 ^a	8.29 ± 0.08 ^a

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 21 สีของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัส กรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)

ด้านที่ เคลือบ	ความเข้มข้น สเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น จีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
			L*	a*	b*
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ		88.99 ± 0.15 ^d	-4.32 ± 0.02 ^a	4.10 ± 0.03 ^d
	0	0	89.64 ± 0.03 ^a	-4.41 ± 0.02 ^b	4.27 ± 0.07 ^{cd}
	1	3	89.47 ± 0.22 ^{ab}	-4.57 ± 0.05 ^d	4.65 ± 0.16 ^a
	3	1	89.36 ± 0.13 ^{bc}	-4.47 ± 0.01 ^c	4.43 ± 0.04 ^{bc}
	3	3	89.22 ± 0.05 ^c	-4.55 ± 0.05 ^d	4.62 ± 0.28 ^{ab}
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ		69.31 ± 0.08 ^{ab}	-3.48 ± 0.03 ^{bc}	7.32 ± 0.01 ^{cd}
	0	0	69.00 ± 0.09 ^{bc}	-3.35 ± 0.02 ^a	7.38 ± 0.03 ^c
	1	3	68.91 ± 0.12 ^c	-3.47 ± 0.04 ^{bc}	7.68 ± 0.11 ^a
	3	1	69.18 ± 0.25 ^{abc}	-3.43 ± 0.02 ^b	7.26 ± 0.04 ^d
	3	3	69.41 ± 0.52 ^a	-3.49 ± 0.07 ^c	7.49 ± 0.08 ^b

หมายเหตุ ^{abcd} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4.2 สมบัติเชิงกลของกระดาษหลังเคลือบ

ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งดึงของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และจีนที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ แสดงดังตารางที่ 22 เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนทั้งการเคลือบกระดาษด้านหน้าและด้านหลังพบว่า กระดาษหลังเคลือบไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริกและจีนมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบและกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสเพียงสารเดียว โดยการเคลือบกระดาษด้วยสารเคลือบที่ประกอบด้วยสารละลายจีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 ทั้งในการเคลือบกระดาษด้านหน้าและด้านหลังมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมากที่สุด แสดงว่าสารเคลือบที่มีสารละลายจีนปริมาณมากกว่ากรดไขมันสเตียริกส่งผลให้กระดาษมีความต้านทานแรงกดวงแหวนมากขึ้นซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยสารละลาย

ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และสารละลายซินระดับความเข้มข้นร้อยละ 1-3 โดยเมื่อเพิ่มปริมาณซินจะส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนเพิ่มขึ้นเช่นกัน

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งดิ่งของกระดาดพบว่า ในการเคลือบด้านหน้า กระดาดหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซิน ส่งผลให้ค่าความแข็งดิ่งเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาดที่ไม่ผ่านการเคลือบทั้งในทิศ MD และ CD แต่มีแนวโน้มทำให้ค่าความแข็งดิ่งลดลงในการเคลือบด้านหลัง โดยกระดาดที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซินในอัตราส่วน 1:3 มีค่าความแข็งดิ่งมากกว่ากระดาดที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซินในอัตราส่วน 3:1 และ 3:3 เช่นเดียวกับแนวโน้มของผลการวัดความต้านทานแรงกดวงแหวน

สำหรับค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาดหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาดเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซิน เปรียบเทียบกับกระดาดหลังเคลือบด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กรดไขมันสเตียริก และซิน แสดงดังภาพที่ 12 เมื่อพิจารณาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนในการเคลือบกระดาดทั้งด้านหน้าและด้านหลังพบว่า กระดาดที่เคลือบด้วยสารผสมที่มีซินความเข้มข้นร้อยละ 3 มีแนวโน้มส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมีค่าสูงกว่าสารเคลือบที่ประกอบด้วยองค์ประกอบอื่น ทั้งนี้เนื่องจากซินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาด

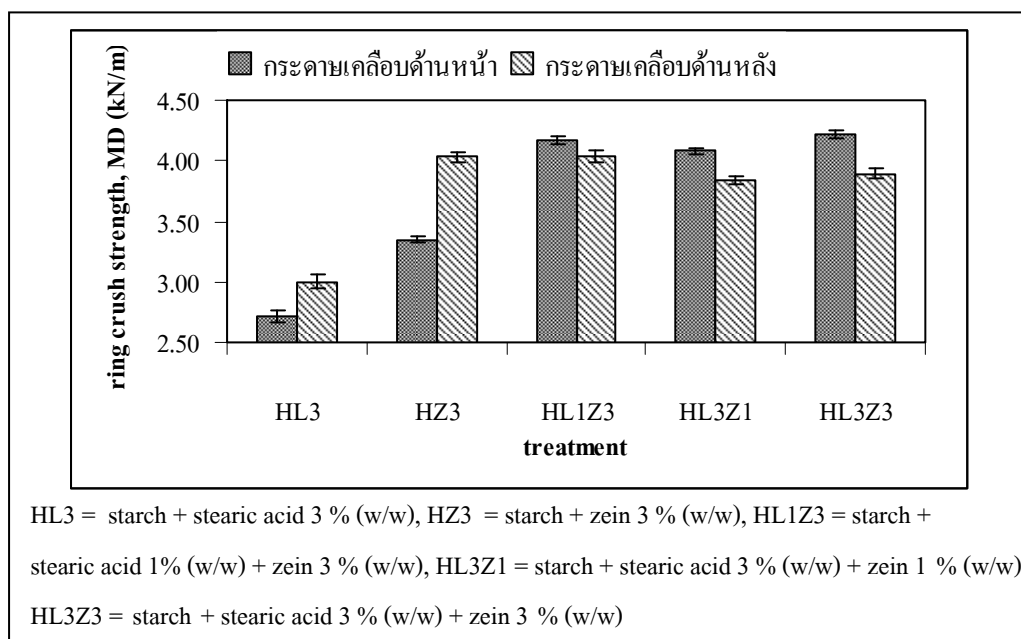
ส่วนการเปรียบเทียบค่าความแข็งดิ่งของกระดาดดังภาพที่ 13 พิจารณาได้ว่าความแข็งดิ่งของกระดาดที่เคลือบด้านหน้าด้วยสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กรดไขมันสเตียริก และซินมีค่าความแข็งดิ่งมากกว่าการเคลือบกระดาดด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาดเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซิน ส่วนค่าความแข็งดิ่งของกระดาดด้านหลัง พบว่ากระดาดเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินที่ความเข้มข้นร้อยละ 3 มีค่ามากที่สุดตามแนว MD และกระดาดเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กรดไขมันสเตียริก ความเข้มข้นร้อยละ 1 และซินความเข้มข้นร้อยละ 3 มีค่าความแข็งดิ่งในแนว CD มากที่สุด ซึ่งจะเห็นว่ากระดาดหลังเคลือบสารที่มีซินเป็นองค์ประกอบมากจะมีความแข็งดิ่งมาก

ตารางที่ 22 ความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งดิ่งของกระดาดหลังเคลือบสารผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และซิน (ชั้นที่สอง)

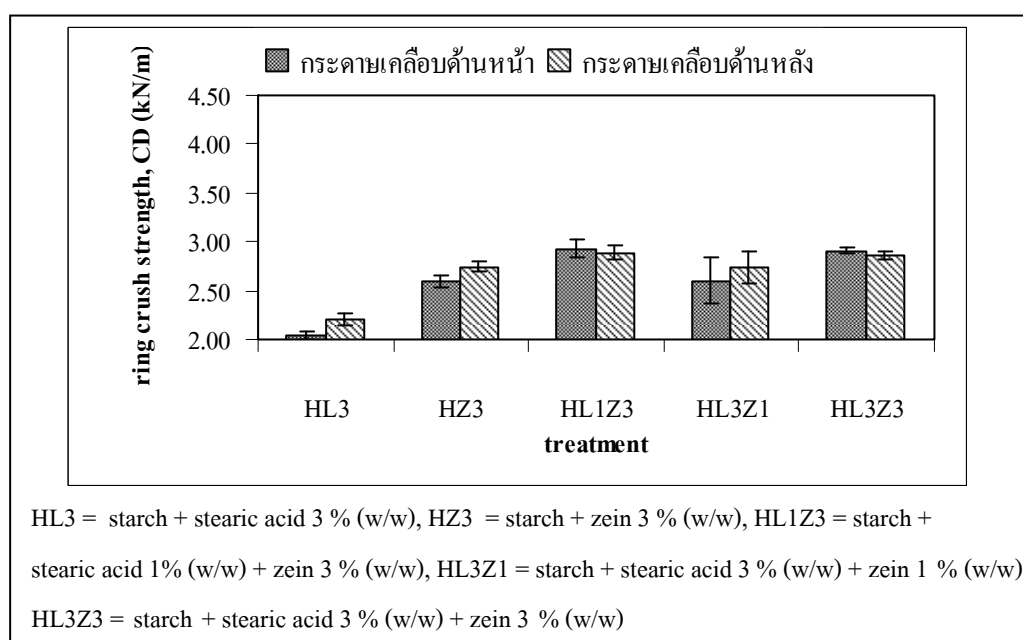
ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้นกรดสเตียริก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้นซิน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ			
			ความต้านทานแรงกดวงแหวน (กิโลนิวตัน/เมตร)		ความแข็งดิ่ง (มิลลินิวตัน)	
			ทิส MD	ทิส CD	ทิส MD	ทิส CD
ด้านหน้า	กระดาดไม่เคลือบ		3.26 ± 0.06 ^d	2.32 ± 0.05 ^c	200.1 ± 2.2 ^c	62.6 ± 1.1 ^c
	0	0	2.90 ± 0.05 ^c	2.61 ± 0.06 ^b	170.8 ± 1.1 ^d	51.0 ± 2.7 ^d
	1	3	4.17 ± 0.03 ^b	2.93 ± 0.10 ^a	261.8 ± 2.7 ^a	69.2 ± 5.5 ^b
	3	1	4.08 ± 0.03 ^c	2.60 ± 0.23 ^b	204.5 ± 6.5 ^c	83.4 ± 4.9 ^a
	3	3	4.22 ± 0.04 ^a	2.91 ± 0.03 ^a	253.2 ± 4.4 ^b	72.2 ± 2.1 ^b
ด้านหลัง	กระดาดไม่เคลือบ		3.26 ± 0.06 ^c	2.32 ± 0.05 ^d	200.1 ± 2.2 ^a	62.6 ± 1.1 ^b
	0	0	3.34 ± 0.06 ^d	2.45 ± 0.05 ^c	186.9 ± 2.6 ^b	68.3 ± 0.9 ^a
	1	3	4.03 ± 0.05 ^a	2.89 ± 0.08 ^a	149.6 ± 2.5 ^c	57.5 ± 2.1 ^c
	3	1	3.84 ± 0.04 ^c	2.74 ± 0.17 ^b	150.0 ± 2.7 ^c	50.2 ± 1.6 ^d
	3	3	3.89 ± 0.04 ^b	2.86 ± 0.04 ^a	128.5 ± 2.2 ^d	51.0 ± 2.7 ^d

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ดังนั้นเมื่อพิจารณาสมบัติเชิงกลโดยรวมของกระดาดพบว่า สมบัติเชิงกลของกระดาดที่เคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัส และมีซินเป็นองค์ประกอบมากจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าเนื่องจากซินช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกระดาดหลังเคลือบ

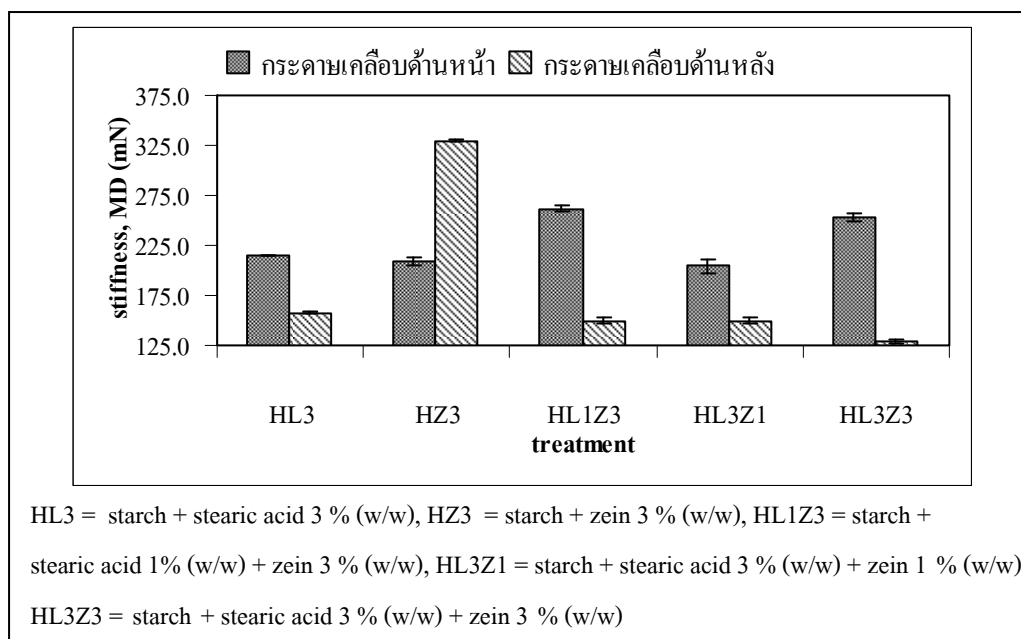


(ก) ความต้านทานแรงกดวงแหวนในทิศ MD

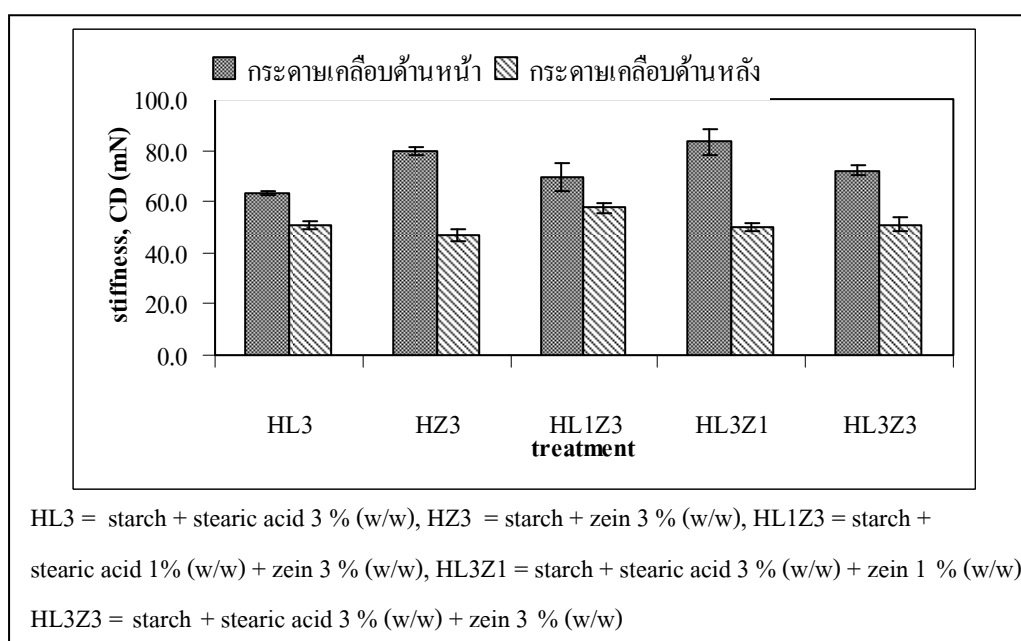


(ข) ความต้านทานแรงกดวงแหวนในทิศ CD

ภาพที่ 12 ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดวยที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก ไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับซิน เปรียบเทียบกับกระดวยเคลือบสารผสมระหว่างสารทั้งสาม (ก) ความต้านทานแรงกดวงแหวนในทิศ MD (ข) ความต้านทานแรงกดวงแหวนในทิศ CD



(ก) ความแข็งตึงในทิศ MD



(ข) ความแข็งตึงในทิศ CD

ภาพที่ 13 ค่าความแข็งตึงของกระดวยที่เคลือบด้านหน้า และด้านหลังด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซีน เปรียบเทียบกับกระดวยเคลือบสารผสมระหว่างสารทั้งสาม (ก) ความแข็งตึงในทิศ MD
(ข) ความแข็งตึงในทิศ CD

4.3 สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษหลังเคลือบ

มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน แสดงดังตารางที่ 23 เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของหยดน้ำปริมาตร 40 ไมโครลิตรบนกระดาษ พบว่า ความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก และซินส่งผลให้มูมสัมพัทธ์ของกระดาษที่เคลือบทั้งด้านหน้า และด้านหลังมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนเพียงสารเดียว ซึ่งการเคลือบกระดาษด้วย สารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 และ สารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 ส่งผลให้กระดาษมีค่ามูมสัมพัทธ์มากที่สุดทั้งการเคลือบ ด้านหน้าและด้านหลัง โดยเพิ่มขึ้นจากกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบถึงร้อยละ 67 และ ร้อยละ 88 ตามลำดับ แสดงว่าการเคลือบด้วยสารทั้งสองในปริมาณดังกล่าวสามารถทำให้กระดาษต้านทานน้ำ ได้ดีขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าการดูดซึมน้ำ พบว่ากระดาษหลังเคลือบสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซินในอัตราส่วน 1:3, 3:1 และ 3:3 ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ โดยการดูดซึมน้ำมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมัน สเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าต่ำกว่า กระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบทั้งการเคลือบด้านหน้าและด้านหลังเป็นร้อยละ 94 และ ร้อยละ 79 ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษด้านหลังในการเคลือบสารดังกล่าวที่มีค่า เท่ากับ 58.080 กรัมต่อตารางเมตร ยังมีค่ามากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำ เป็น 27.960 กรัมต่อตารางเมตร เนื่องจากการที่มีชั้นเคลือบเพิ่มขึ้นมาเป็นชั้นที่สองบนกระดาษที่ เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนร่วมกับกรดไขมันสเตียริก จะส่งผลให้กระดาษดูดซับ ความชื้นได้ดีขึ้นเนื่องจากฟิล์มชั้นที่ขึ้นรูปโดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย สามารถละลายน้ำได้ดี ขึ้น จึงดูดซับน้ำมากกว่า (Yoshino *et al.*, 2002)

ตารางที่ 23 มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาดหลังเคลือบสารผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดสเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น จีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
			มุมสัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำ (นาทิจ)
ด้านหน้า	กระดาดไม่เคลือบ		54 ± 0.6 ^c	230.280 ± 0.192 ^a	> 200 ^a
	0	0	58 ± 0.3 ^d	20.600 ± 1.911 ^b	124 ± 1.0 ^b
	1	3	83 ± 0.3 ^b	19.260 ± 1.682 ^b	> 200 ^a
	3	1	90 ± 0.3 ^a	13.280 ± 1.894 ^c	> 200 ^a
	3	3	82 ± 0.3 ^c	16.940 ± 1.378 ^b	> 200 ^a
ด้านหลัง	กระดาดไม่เคลือบ		48 ± 0.3 ^c	276.720 ± 1.329 ^a	2 ± 0.0 ^c
	0	0	66 ± 0.3 ^d	177.700 ± 1.543 ^b	30 ± 0.6 ^d
	1	3	73 ± 0.3 ^c	144.020 ± 2.435 ^c	40 ± 1.0 ^c
	3	1	90 ± 0.6 ^a	58.080 ± 2.762 ^c	75 ± 3.0 ^a
	3	3	78 ± 0.3 ^b	109.000 ± 2.233 ^d	51 ± 2.0 ^b

หมายเหตุ ^{abce} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ส่วนเวลาในการดูดซึมน้ำ เมื่อพิจารณาการเคลือบด้านหน้า กระดาดที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชเพียงสารเดียวส่งผลให้เวลาในการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด เนื่องจากกระดาดเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชเพียงอย่างเดียวนั้นอาจมีประสิทธิภาพในการต้านทานน้ำยังไม่เพียงพอ ส่วนการเคลือบกระดาดด้านหลัง กระดาดที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และสารละลายจีนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก มีเวลาในการดูดซึมน้ำมากที่สุด และมากกว่ากระดาดที่ไม่ผ่านการเคลือบถึง 38 เท่า ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีแนวโน้มสอดคล้องตามผลการทดสอบค่ามุมสัมผัส และการดูดซึมน้ำเช่นกัน

4.3 สมบัติการต้านทานน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบ

มูมสัมพัทธ์ การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ และกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน แสดงดังตารางที่ 24 พบว่าในการเคลือบกระดาษด้านหน้าด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ที่มีอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันสเตียริกต่อซินเท่ากับ 1:3 และ 3:1 มีค่ามูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันมากที่สุดโดยมีค่าประมาณ 2 เท่า ของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ ส่วนการเคลือบกระดาษด้านหลัง กระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ที่มีอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันสเตียริก และซินเป็น 1:3 มีค่ามูมสัมพัทธ์มากที่สุดและมีค่าประมาณ 2 เท่าของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบ เป็นไปได้ว่าสารเคลือบที่มีองค์ประกอบของซินมากกว่าทำให้กระดาษมีความต้านทานน้ำมันมากขึ้น

ส่วนการดูดซึมน้ำมันพบว่า ทั้งการเคลือบด้านหน้าและด้านหลังของกระดาษที่เคลือบสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ที่มีอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันสเตียริก และซินเป็น 1:3 ส่งผลให้การดูดซึมน้ำมันของกระดาษลดลงร้อยละ 29 สำหรับกระดาษที่เคลือบด้านหน้า และ ร้อยละ 67 สำหรับกระดาษที่เคลือบด้านหลัง อย่างไรก็ตาม กระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ร่วมกับไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 ซึ่งมีค่าการดูดซึมน้ำมันเป็น 28.660 กรัมต่อตารางเมตร สำหรับกระดาษที่เคลือบด้านหน้า และ 28.900 กรัมต่อตารางเมตร สำหรับกระดาษที่เคลือบด้านหลัง ยังคงมีค่าการดูดซึมน้ำมันต่ำกว่ากระดาษหลังเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ที่มีอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันสเตียริก และซินเป็น 1:3 เป็นไปได้ว่า การเคลือบกระดาษด้วยสารผสมจะมีสมบัติการต้านทานน้ำมันได้ไม่ดีเท่ากับกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 เพียงอย่างเดียว และเมื่อพิจารณาเวลาในการดูดซึมน้ำมันพบว่าทุกการทดลองกระดาษมีค่าการดูดซึมน้ำมันมากกว่า 200 นาที่

4.5 สมบัติการด้านการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบ แสดงดังตารางที่ 25 พบว่า กระดาษหลังเคลือบด้านหน้า อัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่ามากกว่ากระดาษไม่เคลือบ โดยมีค่าอยู่ในช่วง 15,834 – 95,743 ซีซี/ตารางเมตร/วัน และมีความแปรปรวนสูง สำหรับการเคลือบกระดาษด้านหลังพบว่า กระดาษเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมัน

สเดียริกความเข้มข้นร้อยละ 1 และขึ้นความเข้มข้นร้อยละ 3 มีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำที่สุด เป็นไปได้ว่ากระดาษหลังเคลือบด้วยสารผสมที่มีซินเป็นองค์ประกอบมาก จะส่งผลให้กระดาษมีอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนต่ำลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ร่วมกับซิน ส่วนกระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ร่วมกับกรดไขมันสเดียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และขึ้นความเข้มข้นร้อยละ 3 มีอัตราการซึมผ่านออกซิเจนสูง เนื่องมาจากสารเคลือบพริตเมนต์ดังกล่าวประกอบด้วยปริมาณสารผสมระหว่างซิน และกรดไขมันสเดียริกสูงกว่าพริตเมนต์อื่น อาจส่งผลให้ซินซึ่งมีขั้วต่างกับกรดไขมันสเดียริกมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทั้งสองน้อยลง และเกิดการแยกชั้น (Khwalidia *et al.*, 2005) โครงสร้างของฟิล์มจึงเกิดช่องว่าง อัตราการซึมผ่านออกซิเจนจึงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 24 มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบสารผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ร่วมกับกรดไขมันสเดียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และซิน (ชั้นที่สอง)

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น สเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น ซิน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ		
			มุมสัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำมัน (นาท)
ด้านหน้า	กระดาษไม่เคลือบ		24 ± 0.3 ^d	42.840 ± 1.620 ^a	> 200
	0	0	33 ± 0.3 ^c	35.020 ± 2.618 ^b	> 200
	1	3	55 ± 0.3 ^a	30.360 ± 1.983 ^c	> 200
	3	1	56 ± 0.3 ^a	30.060 ± 1.591 ^c	> 200
	3	3	51 ± 0.3 ^b	40.700 ± 1.109 ^a	> 200
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ		23 ± 0.3 ^c	95.020 ± 1.249 ^a	> 200
	0	0	30 ± 1.3 ^d	36.620 ± 1.924 ^b	> 200
	1	3	52 ± 0.3 ^a	31.060 ± 1.854 ^c	> 200
	3	1	49 ± 0.3 ^b	40.720 ± 1.265 ^b	> 200
	3	3	46 ± 0.3 ^c	36.600 ± 1.538 ^b	> 200

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวนี้หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 25 แสดงอัตราการซึมผ่านออกซิเจนของกระดาษหลังเคลือบสารผสมระหว่างสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริก (ชั้นที่หนึ่ง) และจีน (ชั้นที่สอง)

ด้านที่เคลือบ	ความเข้มข้น กรดไขมันสเตียริก (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ความเข้มข้น จีน (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	ค่าทดสอบ อัตราการซึมผ่านออกซิเจน (ซีซี/ตร.ม./วัน)
	กระดาษไม่เคลือบ		
ด้านหน้า	0	0	11654 ± 195.5^c
	0	0	34530 ± 1485.1^c
	1	3	95743 ± 1261.6^a
	3	1	77254 ± 1123.3^b
	3	3	15834 ± 1116.5^d
ด้านหลัง	กระดาษไม่เคลือบ		11555 ± 163.7^d
	0	0	72374 ± 167.6^b
	1	3	10154 ± 131.4^c
	3	1	57605 ± 120.0^c
	3	3	92441 ± 134.4^a

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวนี้หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

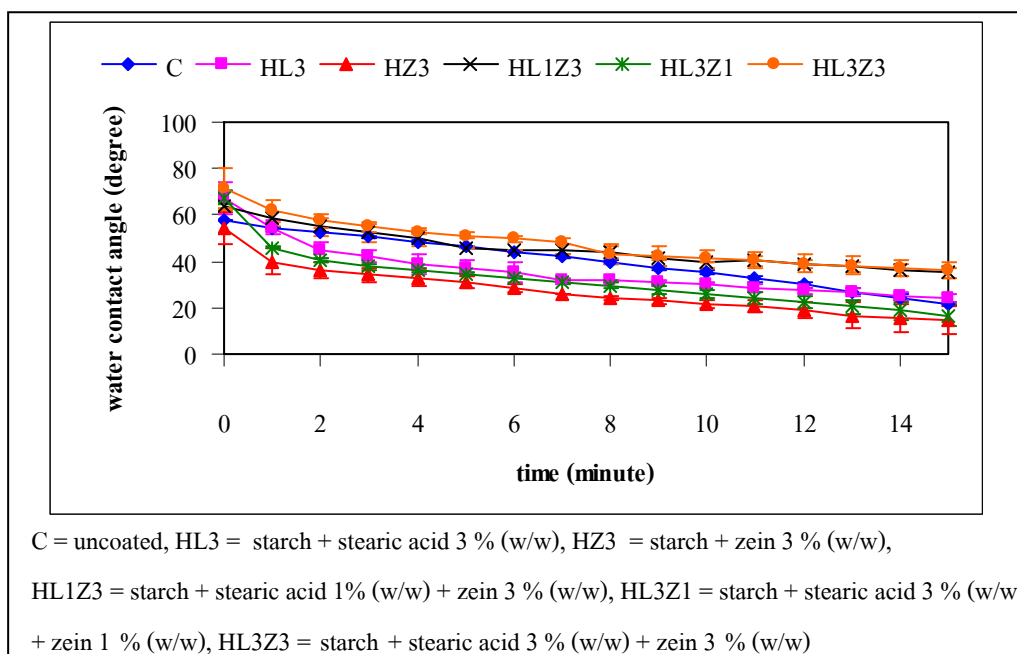
5. มุมสัมผัสของหยดน้ำ และน้ำมันแบบต่อเนื่องของกระดาษหลังเคลือบด้วยกรดไขมันสเตียริกและจีน ร่วมกับสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัส

ในการพิจารณาเลือกกระดาษความเข้มข้นที่เหมาะสมของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริก กระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับจีน และกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริกและจีน จะพิจารณาจากกระดาษความเข้มข้นที่ทำให้กระดาษมีสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันโดยรวมสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ ดังนั้นกระดาษหลังเคลือบด้วยทริทเมนต์ต่างๆที่เลือกศึกษาในขั้นตอนนี้ได้แก่ กระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก กระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรฟอสฟอรัสร่วมกับจีนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก เปรียบเทียบกับกระดาษ

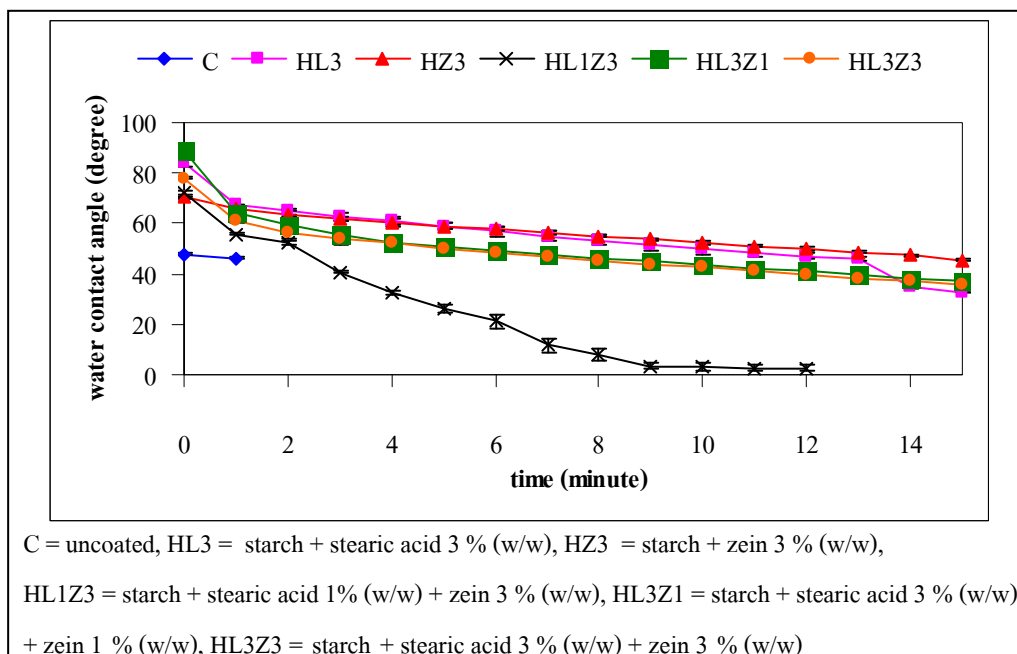
หลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน โดยอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันสเตียริกและซินเป็น 1:3, 3:1 และ 3:3 ทั้งนี้การเปรียบเทียบสมบัติด้านการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษที่ศึกษาสามารถพิจารณาจากค่าการวัดมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของหยดน้ำปริมาตร 5 ไมโครลิตรจากนาที่ที่ 0 ถึงนาที่ที่ 15 เพื่อศึกษาการลดลงของมุมสัมผัสน้ำ และน้ำมันบนกระดาษเมื่อเวลาผ่านไป ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 14 และภาพที่ 15 ตามลำดับ (รายละเอียดค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ข)

ในการเคลือบกระดาษด้านหน้าดังภาพที่ 14 (ก) พบว่ามุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษที่เคลือบในแต่ละทรีตเมนต์มีค่าแตกต่างกับกระดาษไม่เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำที่ลดลงในแต่ละนาที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างสูง อาจเนื่องมาจากกระดาษด้านหน้าเคลือบไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้มุมสัมผัสของหยดน้ำที่วัดได้มีค่าไม่คงที่ เมื่อพิจารณากระดาษที่เคลือบด้านหลังดังภาพที่ 14 (ข) พบว่ากระดาษที่เคลือบในแต่ละทรีตเมนต์มีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากกว่ากระดาษไม่เคลือบ โดยกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับซินมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำใกล้เคียงกัน และมีค่ามากกว่ากระดาษเคลือบสารผสมระหว่างไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ตลอดระยะเวลาในการทดสอบ

เมื่อวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำมันแบบต่อเนื่องของกระดาษที่เคลือบแต่ละทรีตเมนต์ดังภาพที่ 15 (ก) พบว่า กระดาษที่เคลือบด้านหน้า ค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดระยะเวลาทดสอบ อย่างไรก็ตาม ค่ามุมสัมผัสที่วัดได้มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงเช่นเดียวกับการวัดมุมสัมผัสอย่างต่อเนื่องของหยดน้ำของกระดาษสำหรับการเคลือบกระดาษด้านหน้า ส่วนกระดาษที่เคลือบด้านหลัง กระดาษเคลือบทุกทรีตเมนต์มีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันมากกว่ากระดาษไม่เคลือบอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ดังภาพที่ 15 (ข) โดยกระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันมากที่สุดตลอดระยะเวลาในการทดสอบ ตามด้วยกระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน และกระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับซิน แสดงว่าสารเคลือบดังกล่าวสามารถต้านทานน้ำมันได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกเพียงอย่างเดียว



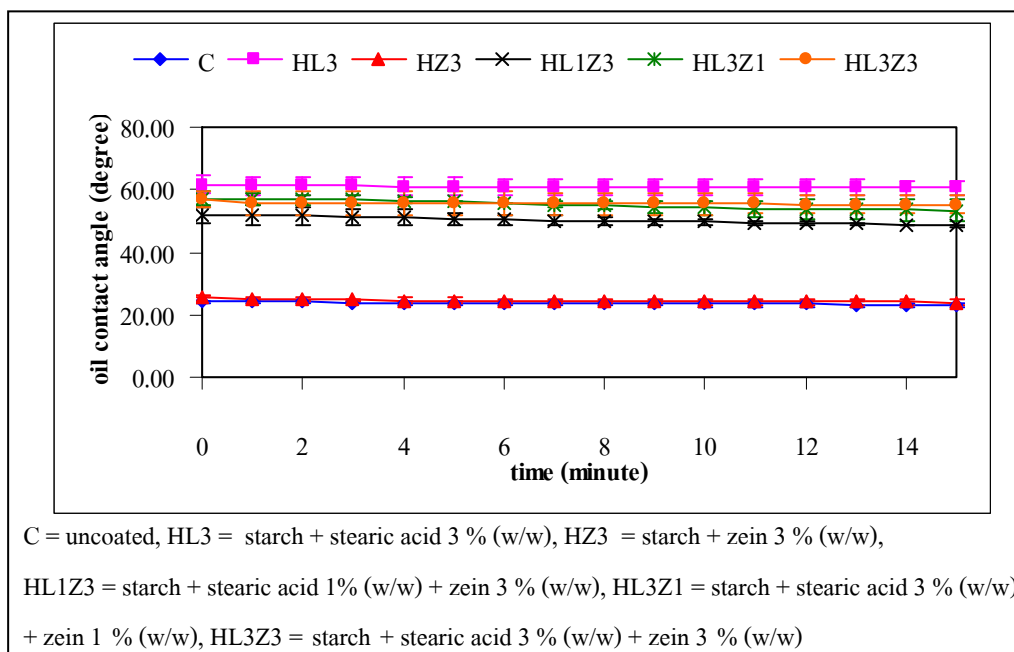
(ก) กระดาษเคลือบด้านหน้า



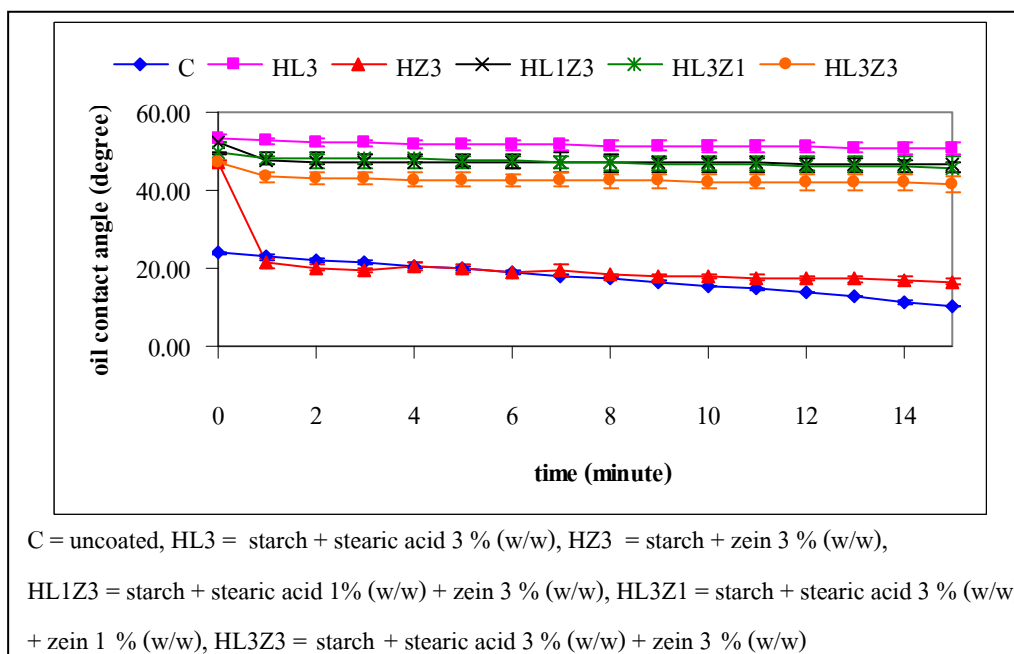
(ข) กระดาษเคลือบด้านหลัง

ภาพที่ 14 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระดาษหลังเคลือบ

(ก) กระดาษเคลือบด้านหน้า และ (ข) กระดาษเคลือบด้านหลัง



(ก) กระจายเคลือบด้านหน้า



(ข) กระจายเคลือบด้านหลัง

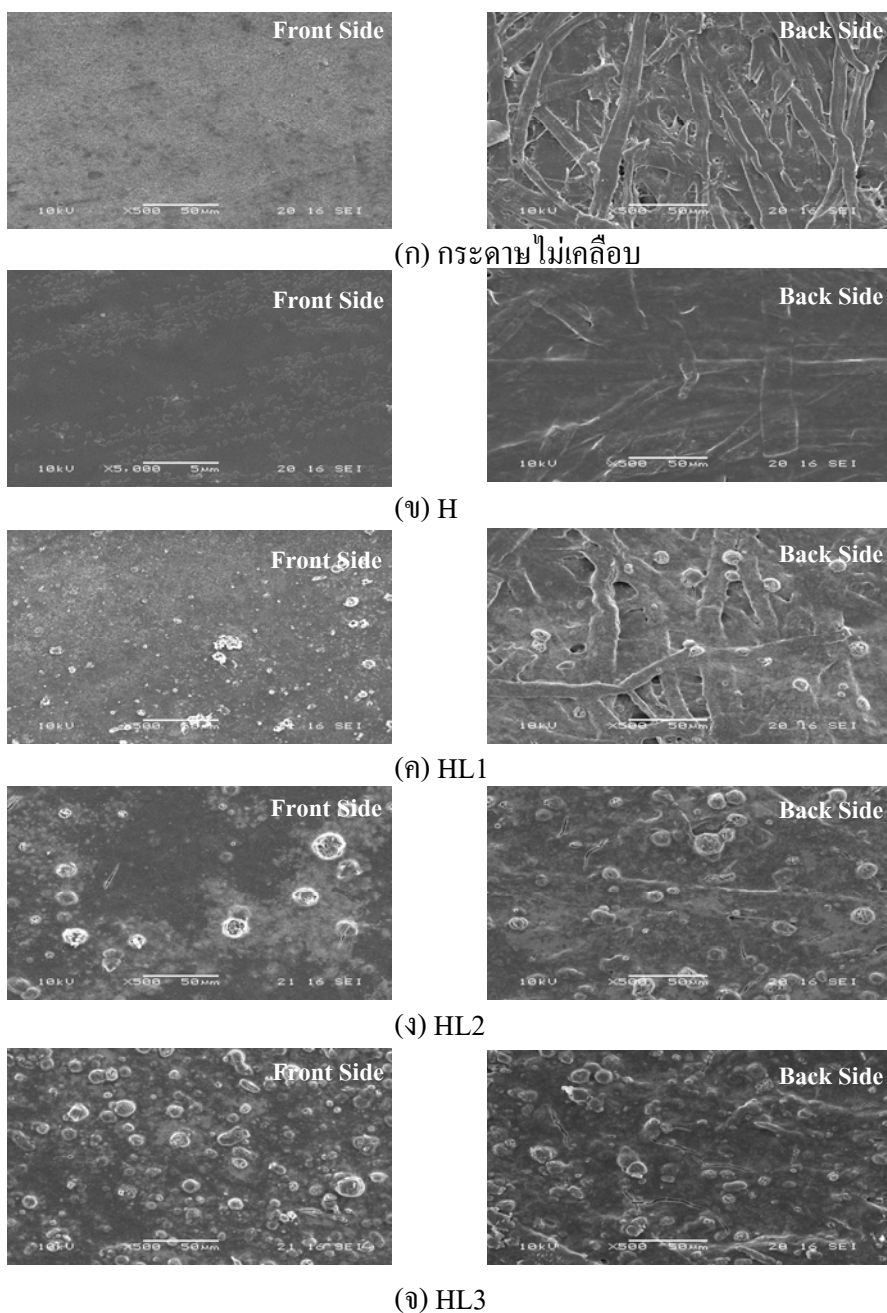
ภาพที่ 15 การลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปสำหรับกระจายหลังเคลือบ
 (ก) กระจายเคลือบด้านหน้า และ (ข) กระจายเคลือบด้านหลัง

6. ลักษณะผิวหน้าของสารเคลือบบนกระดาษ

6.1 ลักษณะผิวหน้าของกระดาษจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

ลักษณะผิวหน้าของกระดาษด้านหน้าและด้านหลังก่อนและหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเพียงสารเดียว และกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกแสดงดังภาพที่ 16 สังเกตได้ว่าผิวหน้ากระดาษด้านหน้าก่อนการเคลือบมีความเรียบ เนื่องจากผ่านกระบวนการขัดเงามาแล้ว เมื่อเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักดังภาพที่ 16(ข) พบว่ามีสตาร์ชตกค้างอยู่บนผิวหน้าอย่างไม่สม่ำเสมอ และเมื่อเคลือบด้วยด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 ดังภาพที่ 16(ค) ภาพที่ 16(ง) และภาพที่ 16(จ) ตามลำดับ พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริก จะทำให้มีกรดไขมันสเตียริกที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมเล็กๆจำนวนมากขึ้น แต่กระจายตัวอย่างไม่ค่อยสม่ำเสมอ เนื่องจากผิวของกระดาษด้านหน้าผ่านการขัดเงา จึงทำให้มีความเรียบมากขึ้น สารเคลือบจึงแทรกซึมลงไปในเยื่อกระดาษลดลง ส่งผลให้สารเคลือบกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ และส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ สมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน สมบัติต่างๆของกระดาษที่เคลือบด้านหน้าจึงมีค่าไม่คงที่ ไม่สามารถบอกแนวโน้มค่าทดสอบเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงปริมาณองค์ประกอบของสารเคลือบได้ชัดเจนนัก

เมื่อพิจารณาผิวหน้าของกระดาษด้านหลังพบว่า กระดาษก่อนเคลือบมีผิวหน้าที่เป็นเส้นใยประสานกันอย่างชัดเจน และมีรูพรุนจำนวนมาก จึงทำให้สมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันมีค่าต่ำ เมื่อเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ผิวหน้าของกระดาษที่ถูกเคลือบมีความเรียบมากขึ้น และสารเคลือบปกคลุมเส้นใยกระดาษ กระดาษมีรูพรุนลดลง มีความแข็งแรง สามารถต้านทานน้ำ และน้ำมันได้ดีขึ้น



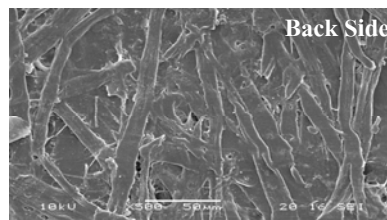
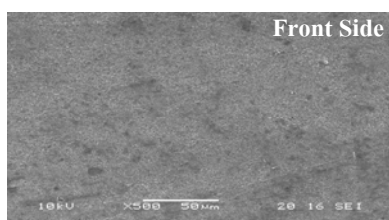
ภาพที่ 16 ลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board เคลือบด้านหน้า และด้านหลังขยาย 500 เท่า ด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดร-โฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 (ค) HL1; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 กรดไขมัน สเตียริกร้อยละ 1 (ง) HL2; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 กรดไขมันสเตียริก ร้อยละ 2 (จ) HL3; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3

เมื่อเคลือบกระดาษด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 ในกระดาษด้านหลัง ดังภาพที่ 16 ทำให้กระดาษมีความเรียบมากขึ้น โดยมีกรดไขมันสเตียริกที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมกระจายตัวอยู่ในชั้นของฟิล์มไฮโดรฟลูออโรซิลิกอย่างสม่ำเสมอ และมีจำนวนมากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริก กระดาษจึงมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น และสามารถต้านทานน้ำได้ดี (Bravin *et al.*, 2004 ; Perez-Gago and Krochta, 2001 ; Callegarin *et al.*, 1997) แต่เมื่อสังเกตผิวหน้าของกระดาษที่เติมกรดไขมันสเตียริกมากขึ้น จะทำให้มีรอยแตกบนผิวหน้าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระดาษมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำลง ซึ่งลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน

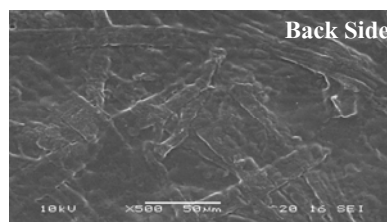
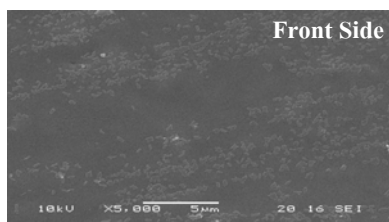
ลักษณะผิวหน้าของกระดาษด้านหน้า ก่อนและหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเพียงสารเดียว และกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายซิน แสดงดังภาพที่ 17 เมื่อเปรียบเทียบผิวหน้าของกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบดังภาพที่ 17(ก) กระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเพียงสารเดียวดังภาพที่ 17(ข) และกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก และเคลือบชั้นที่สองด้วยสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 1, 2 และ 3 โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 17(ค) ภาพที่ 17(ง) และภาพที่ 17(จ) ตามลำดับ เมื่อเคลือบด้วยสารละลายซินที่ระดับความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้มีปริมาณซินที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกลมขนาดเล็กจำนวนมาก และมีความเรียบมากขึ้น สังเกตได้ว่าการเคลือบกระดาษด้วยสารละลายซินอีกชั้นบนกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิก ส่งผลให้กระดาษมีความเรียบมากกว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกร่วมกับกรดไขมันสเตียริก

เมื่อสังเกตลักษณะผิวหน้าของกระดาษด้านหลังดังภาพที่ 17 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซิน ส่งผลให้กระดาษมีความเรียบมากขึ้นเช่นเดียวกับการเคลือบด้านหน้า กระดาษจึงมีความแข็งแรง และต้านทานน้ำ และน้ำมันได้ดี ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันของกระดาษที่เคลือบสารดังกล่าว

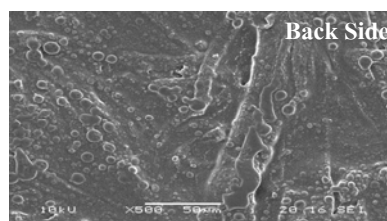
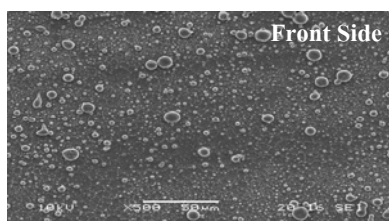
ลักษณะผิวหน้าของกระดาษด้านหลังก่อนและหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักเพียงสารเดียว และกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรซิลิกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซิน แสดงดังภาพที่ 18



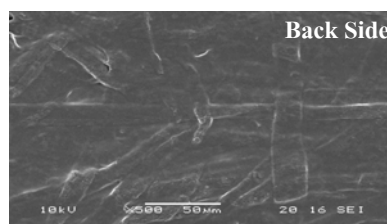
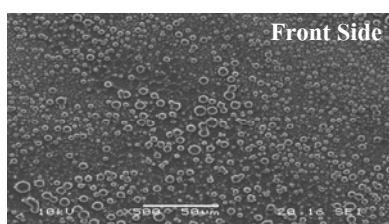
(ก) กระดาษไม่เคลือบ



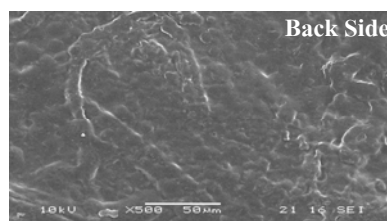
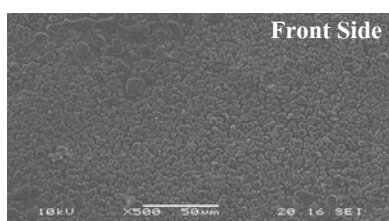
(ข) H



(ค) HZ1

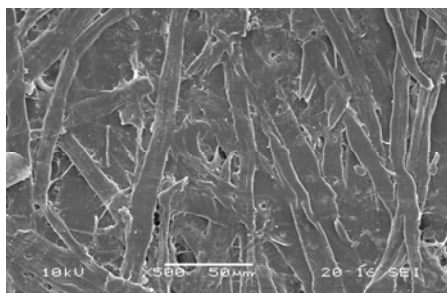


(ง) HZ2

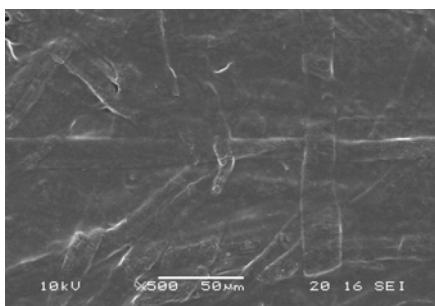


(จ) HZ3

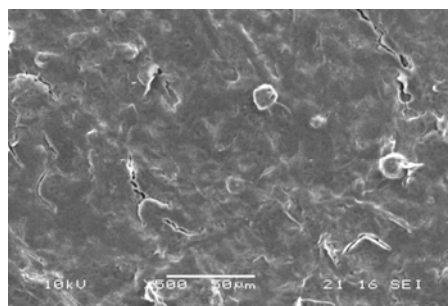
ภาพที่ 17 ลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board เคลือบด้านหน้าและด้านหลัง ขยาย 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 (ค) HZ1; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 ซีนร้อยละ 1 (ง) HZ2; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 ซีนร้อยละ 2 (จ) HZ3; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 ซีนร้อยละ 3



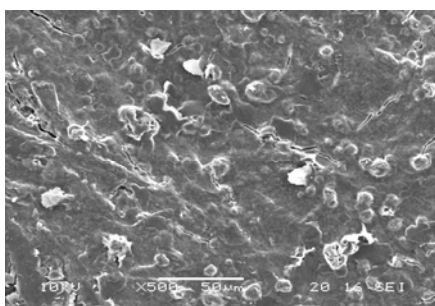
(ก) กระดาษไม่เคลือบ



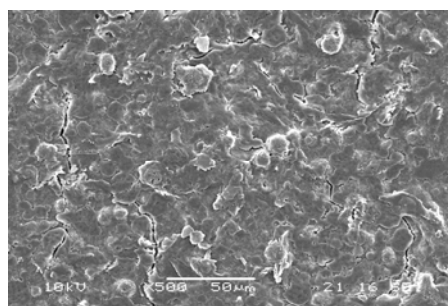
(ข) H



(ค) HL1Z3



(ง) HL3Z1



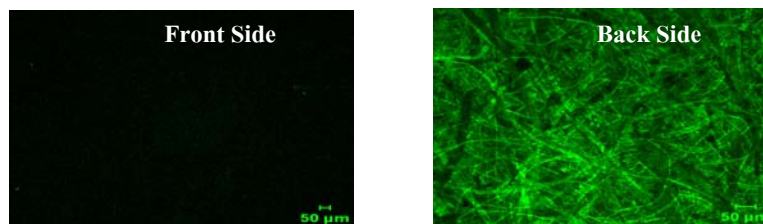
(จ) HL3Z3

ภาพที่ 18 ลักษณะผิวหน้ากระดาษ Duplex Board เคลือบด้านหลัง ขยาย 500 เท่า ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) กระดาษไม่เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 (ค) HL1Z3; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 ซีนร้อยละ 3 (ง) HL3Z1; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ซีนร้อยละ 1 (จ) HL3Z3; เคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 ซีนร้อยละ 3

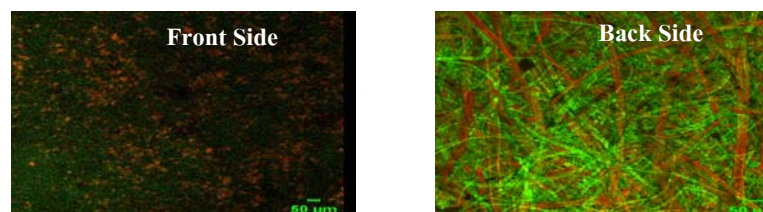
จากภาพที่ 18(ค) แสดงถึงผิวหน้าของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 1 และสารละลายซินร้อยละ 3 จะสังเกตเห็นลักษณะผิวที่เรียบ และมีกรดไขมันสเตียริกเป็นรูปทรงกลมแทรกอยู่ในชั้นฟิล์ม จึงทำให้กระดาษมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ส่วนผิวหน้าของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 และสารละลายซินร้อยละ 1 ดังภาพที่ 18(ง) จะสังเกตเห็นว่าเมื่อมีกรดไขมันสเตียริกมากกว่า จะส่งผลให้ฟิล์มมีรอยแตกเล็กน้อย แต่สามารถด้านการซึมผ่านได้ดี ส่วนภาพที่ 18(จ) แสดงผิวหน้าของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 และสารละลายซินร้อยละ 3 พบว่า มีรอยแตกจำนวนมาก แสดงว่าเมื่อสารเคลือบประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริก และซินปริมาณร้อยละ 3 อาจทำให้สมบัติเชิงกลต่ำลง

6.2 ลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบบนกระดาษจากการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยเลเซอร์ (Confocal Laser Scanning Microscope, CLSM)

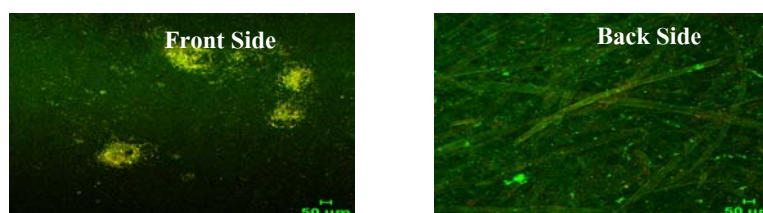
ลักษณะของกระดาษไม่เคลือบ และกระดาษเคลือบด้านหน้าและด้านหลังด้วยไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน และซินระดับความเข้มข้น 1-3 ที่ศึกษาโดยใช้กล้อง CLSM แสดงดังในภาพที่ 19 เมื่อพิจารณาภาพที่ 19(ก) แสดงถึงกระดาษด้านหน้าที่ไม่เคลือบซึ่งค่อนข้างมีความเรียบ และเมื่อเคลือบไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (ภาพที่ 19(ข)) จะเห็นกระดาษที่มีสีส้มแดงกระจายตัวอยู่บนกระดาษค่อนข้างสม่ำเสมอ เมื่อเคลือบกระดาษด้วยไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน ร่วมกับสารละลายซินร้อยละ 1-3 (ภาพที่ 19(ค)(ง)(จ)) พบว่าเมื่อเคลือบซินที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1 และร้อยละ 2 โดยน้ำหนักซินค่อนข้างรวมตัวกันเป็นส่วนๆ การเคลือบไม่สม่ำเสมอ แต่เมื่อเคลือบกระดาษด้วยสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 3 ซินกระจายตัวบนกระดาษอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น แสดงว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซินในการเคลือบกระดาษ ส่งผลให้การเคลือบเรียบมากขึ้น และด้านทานน้ำและน้ำมันได้ดี



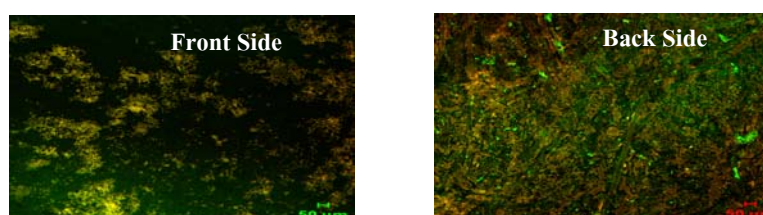
(ก) กระดาษไม้เคลือบ



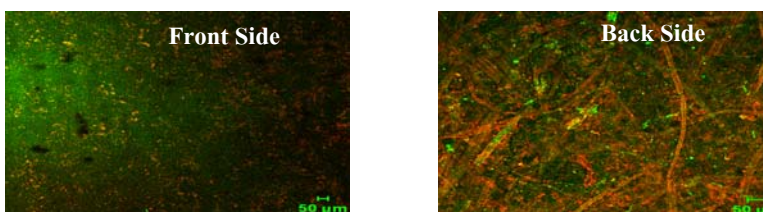
(ข) H



(ค) HZ1



(ง) HZ2



(จ) HZ3

ภาพที่ 19 แสดงลักษณะสารเคลือบบนกระดาษด้านหน้าและด้านหลังจากกล้องจุลทรรศน์
ส่องกราดด้วยเลเซอร์ กำลังขยาย 50 เท่า (ก) กระดาษไม้เคลือบ (ข) H; เคลือบไฮโดร-
ฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 (ค) HZ1; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 ซีนร้อยละ 1
(ง) HZ2; เคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 ซีนร้อยละ 2 (จ) HZ3; เคลือบไฮโดร-
ฟอบิกสตาร์ชร้อยละ 15 ซีนร้อยละ 3

เมื่อพิจารณาลักษณะสารเคลือบบนกระดาษด้านหลังดังภาพที่ 19 จากกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยเลเซอร์ พบว่ากระดาษไม่เคลือบจะเห็นเส้นใยที่เป็นสีเขียวอย่างชัดเจน (ภาพที่ 19(ก)) ส่วนกระดาษเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 19(ข)) จะสังเกตเห็นสตาร์ชเคลือบอยู่บนเส้นใยอย่างชัดเจน แต่เมื่อเคลือบด้วยสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 1-3 โดยน้ำหนักบนกระดาษเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ภาพที่ 19(ค)(ง)(จ)) พบว่าเมื่อส่องกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดด้วยเลเซอร์จะไม่เห็นสตาร์ชที่เคลือบบนกระดาษ และจะสังเกตเห็นสารซินเคลือบอยู่บนกระดาษเล็กน้อยที่ระดับความเข้มข้นของซินเป็นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก เมื่อเติมสารละลายซินระดับความเข้มข้นมากขึ้น ทำให้การเคลือบมีความสม่ำเสมอ และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวัดความต้านทานแรงกดวงแหวน และความแข็งแรงดึงของกระดาษ

ในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดเลเซอร์ ผลการทดสอบมีเพียงลักษณะของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงสารเดียว และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซินเท่านั้น เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบยังไม่มีสภาวะที่เหมาะสมในการดูการกระจายตัวของกรดไขมันสเตียริกบนกระดาษได้ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในโอกาสต่อไป

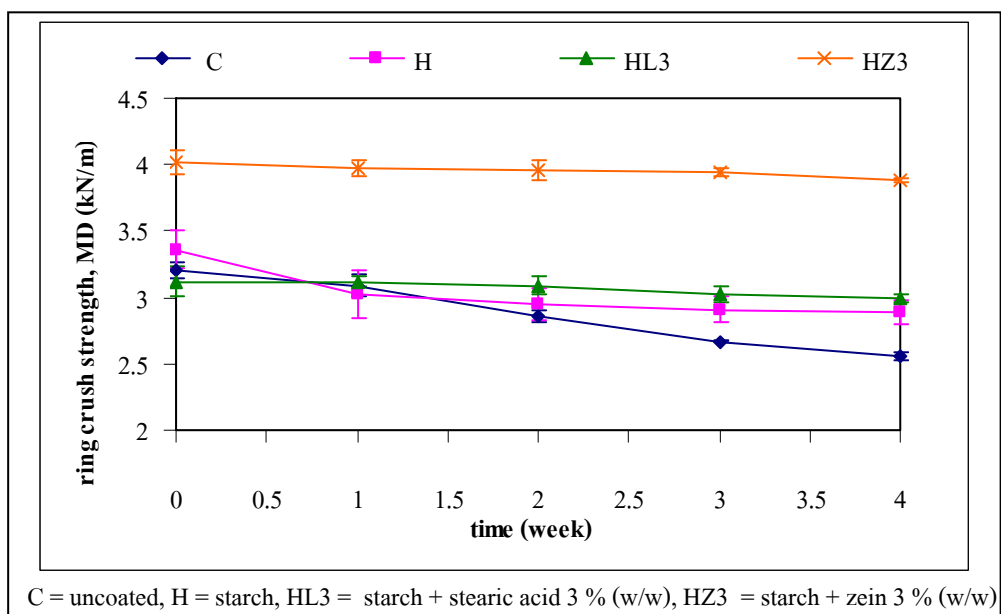
ในการพิจารณาเลือกระดับความเข้มข้นของกรดไขมันสเตียริกและสารละลายซินที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้เคลือบกระดาษในการศึกษาขั้นต่อไปนั้น จะพิจารณาจากระดับความเข้มข้นของสารเคลือบที่ทำให้กระดาษมีความต้านทานแรงกดวงแหวน และความแข็งแรงดึงมากที่สุด รวมทั้งสารเคลือบที่สามารถทำให้กระดาษต้านทานน้ำ และน้ำมันดีที่สุดในเมื่อเปรียบเทียบกับกระดาษไม่เคลือบ และกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงสารเดียว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่ากระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีความต้านทานน้ำและน้ำมันมากที่สุด ส่วนกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับซินความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักมีความต้านทานแรงกดวงแหวน และความแข็งแรงดึงมากที่สุด โดยสารเคลือบทั้งสองจะเลือกนำไปศึกษาเฉพาะในการเคลือบกระดาษด้านหลัง เนื่องจากในการเคลือบกระดาษด้านหน้าพบว่า การเคลือบไม่ค่อยสม่ำเสมอ ทำให้ค่าทดสอบที่วัดได้มีความแปรปรวนสูง เนื่องจากอิทธิพลของการเคลือบผิวหน้ามาก่อน สำหรับกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกและสารละลายซินนั้น ไม่ได้นำศึกษา เนื่องจากเมื่อสารเคลือบประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริกและซินอยู่ร่วมกัน

สมบัติต่างๆจะไม่ดีเท่ากับกระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก หรือกระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซิน

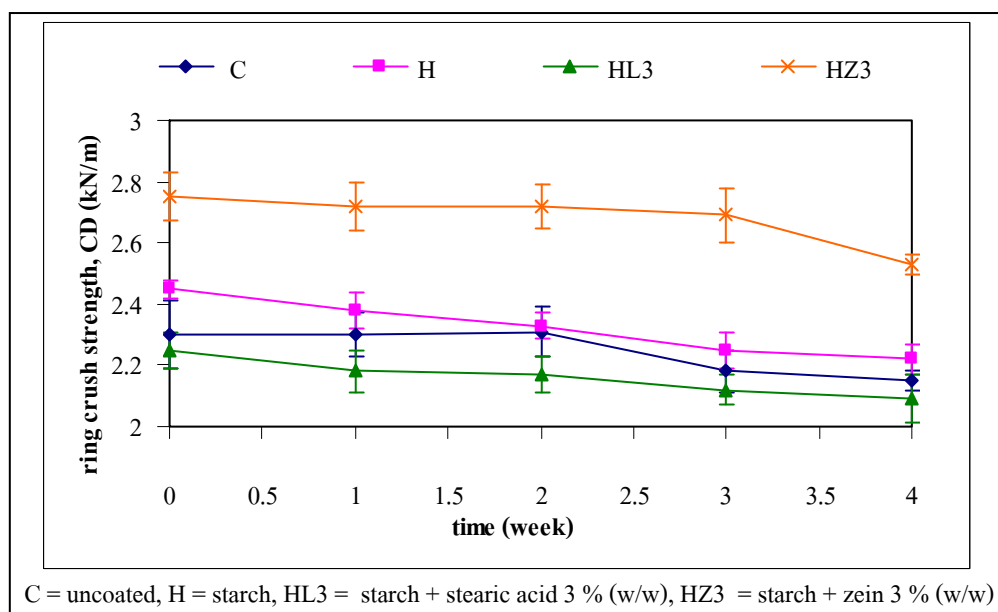
7. ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บกระดาษเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพที่มีต่อสมบัติเชิงกลและสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน

สมบัติเชิงกลของกระดาษ ได้แก่ ความต้านทานแรงกดวงแหวน และความแข็งดึงของกระดาษก่อนและหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 3 ภายหลังการเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไปที่อุณหภูมิ 25–32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 -74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ แสดงดังภาพที่ 20 และภาพที่ 21 (รายละเอียดค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ค)

เมื่อพิจารณาความต้านทานแรงกดวงแหวนในทิส MD และทิส CD ของกระดาษดังภาพที่ 20 (ก) และ ภาพที่ 20 (ข) หลังเก็บตัวอย่างเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า กระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนสูงที่สุดตลอดระยะเวลาการเก็บ โดยความต้านทานแรงกดวงแหวนมีค่าลดลงเล็กน้อยในช่วงสัปดาห์หลังๆ ส่วนกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาษไม่เคลือบมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนใกล้เคียงกันในแต่ละสัปดาห์ และมีค่าต่ำกว่าค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อย่างไรก็ตามหลังจากสัปดาห์ที่ 2 กระดาษไม่เคลือบมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนลดลงมากกว่ากระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และกระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ซึ่งอาจมาจากประสิทธิภาพการต้านทานน้ำของสารเคลือบที่ประกอบไปด้วยไฮโดร โฟบิกสตาร์ชและกรดไขมันสเตียริก ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษจึงลดลงไม่มากทำให้กระดาษยังคงมีความแข็งแรง ส่วนกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินมีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนสูงอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของฟิล์มซินประกอบด้วยพันธะไฮโดรเจน และพันธะไดซัลไฟด์จำนวนมาก ประกอบกับซินมีหมู่อะมิโนที่ไม่มีขั้วจึงต้านทานความชื้น (Krochta *et al.*, 1994) ส่งผลให้กระดาษมีความแข็งแรงสูงตลอดระยะเวลาการเก็บ

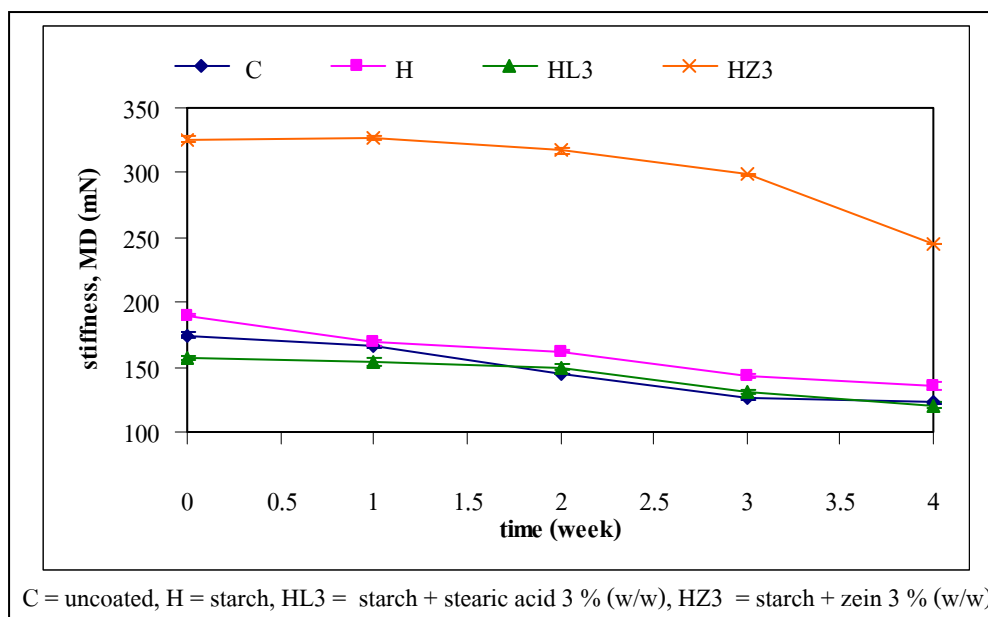


(ก) ทิศ MD

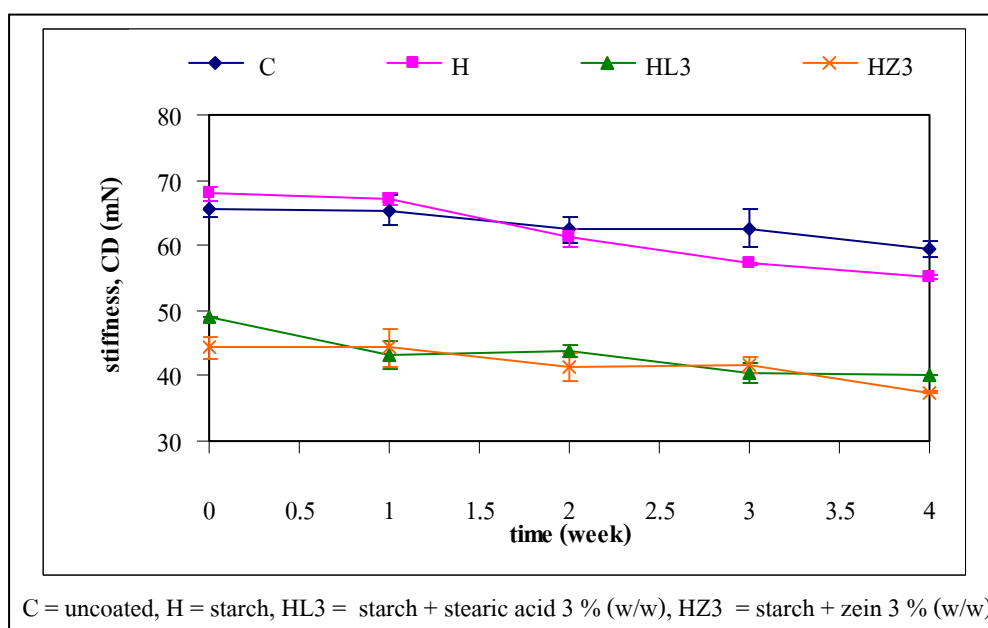


(ข) ทิศ CD

ภาพที่ 20 ความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาษก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้
การจำลองสถานะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)
(ก) ทิศ MD (ข) ทิศ CD



(ก) ทิศ MD



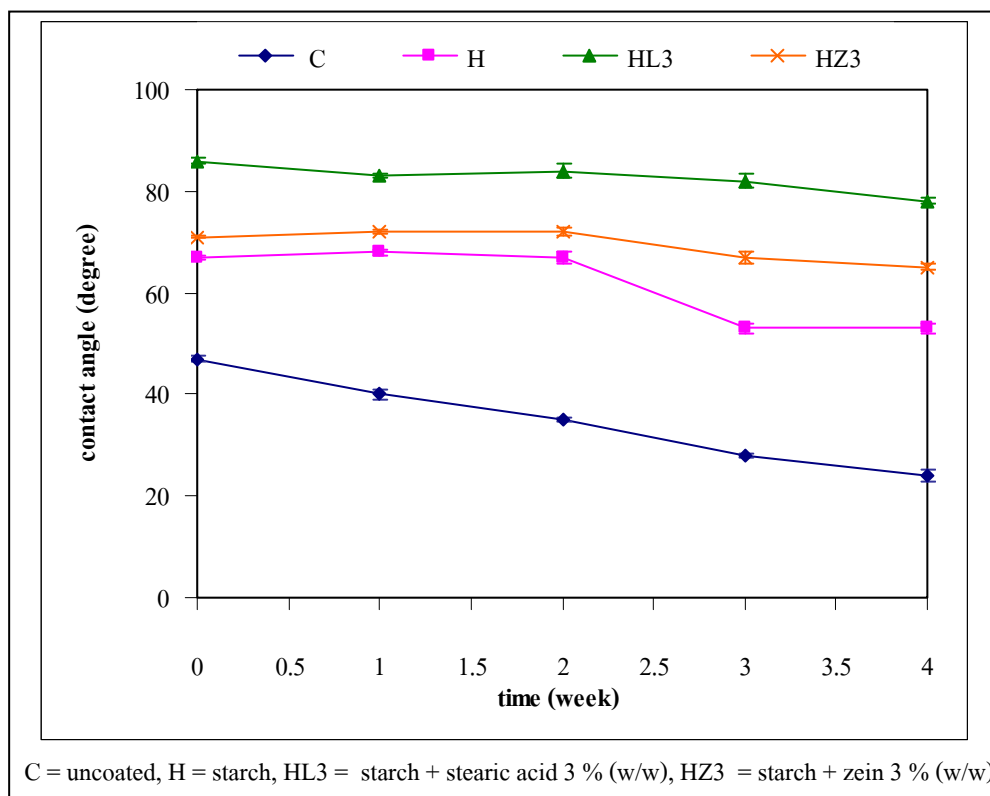
(ข) ทิศ CD

ภาพที่ 21 ความแข็งตัวของกระดาษก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บ
ในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH) (ก) ทิศ MD (ข) ทิศ CD

ค่าความแข็งดึงในทิส MD ของกระดวยเคลือบ และไม่เคลือบตลอดระยะเวลาการเก็บ 4 สัปดาห์ แสดงดังภาพที่ 21 (ก) พบว่าความแข็งดึงของกระดวยหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ร่วมกับซินมีค่าสูงสุดตลอดระยะเวลาการเก็บ โดยค่าความแข็งดึงมีค่าลดลงค่อนข้างมากในสัปดาห์ที่ 3 ส่วนกระดวยหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช กระดวยหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกและกระดวยไม่เคลือบมีค่าแข็งดึงใกล้เคียงกัน โดยลดลงเล็กน้อยในแต่ละสัปดาห์ และมีค่าความแข็งดึงต่ำกว่ากระดวยหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับซิน อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

เมื่อพิจารณาค่าความแข็งดึงของกระดวยเคลือบและไม่เคลือบในทิส CD ตลอดระยะเวลาในการเก็บ 4 สัปดาห์ ดังภาพที่ 21(ข) พบว่าค่าความแข็งดึงของกระดวยไม่เคลือบ และกระดวยเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชมีความแข็งดึงมากที่สุด ตามด้วย กระดวยหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดวยหลังเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับซินซึ่งมีค่าใกล้เคียงกัน และพบว่าในสัปดาห์ที่ 4 กระดวยไม่เคลือบยังคงมีค่าความแข็งดึงสูงที่สุด เป็นไปได้ว่าสารเคลือบไม่มีผลต่อค่าความแข็งดึงของกระดวยหลังเคลือบในทิส CD

สมบัติการต้านทานน้ำของกระดวย ได้แก่ มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำ และเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดวยก่อนและหลังเคลือบด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ช กระดวยเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ช ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดวยเคลือบไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซิน ภายหลังการเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไปที่อุณหภูมิ 25-32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ (รายละเอียดค่าทดสอบแสดงในภาคผนวก ข) แสดงดังภาพที่ 22 ภาพที่ 23 และภาพที่ 24

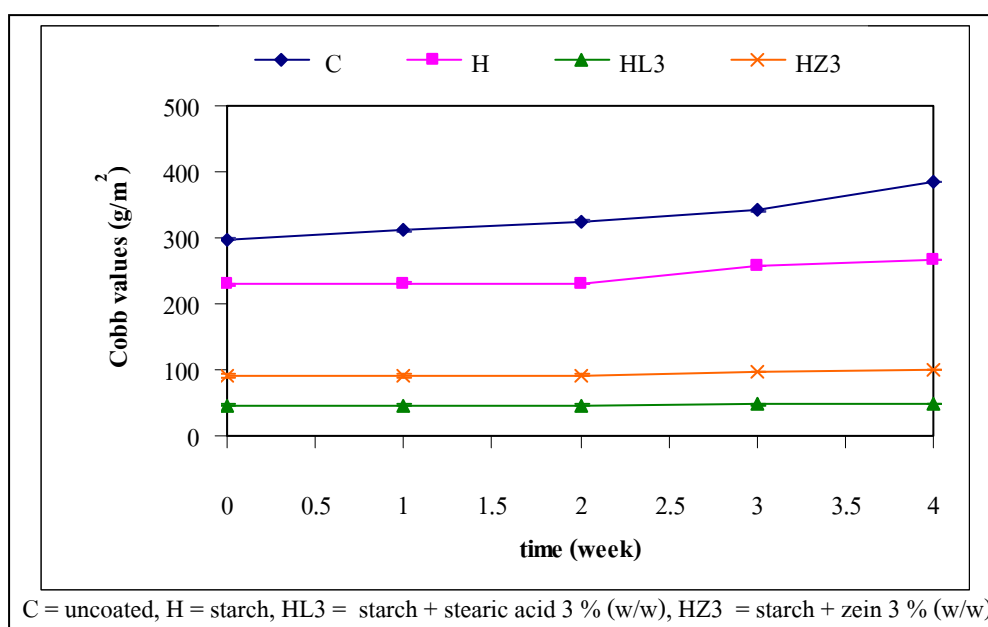


ภาพที่ 22 มุมสัมผัสพื้นน้ำของกระดาษก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

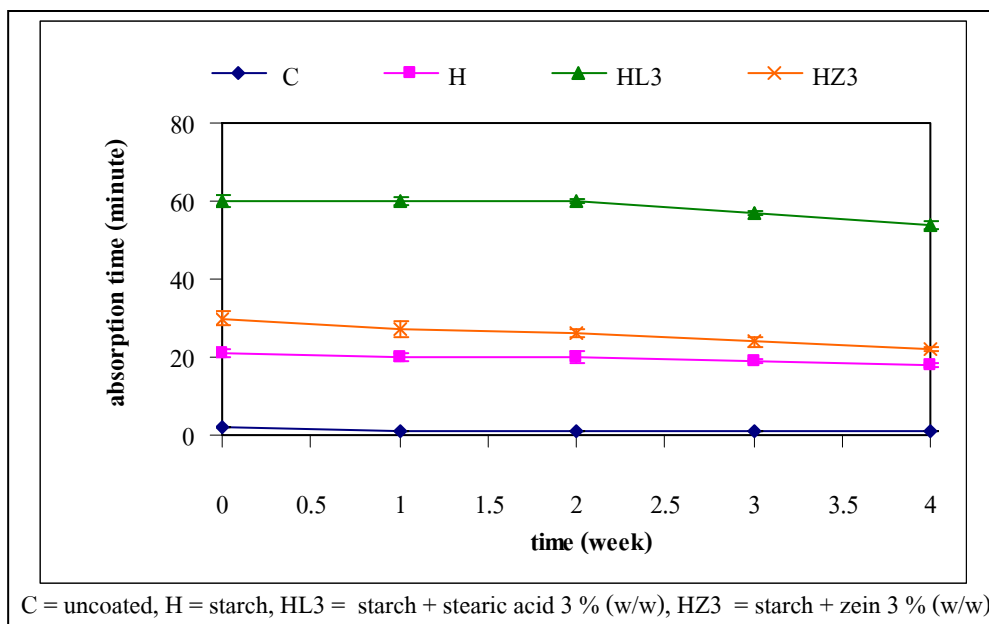
เมื่อพิจารณามุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษหลังการเก็บดังภาพที่ 22 เมื่อหยดน้ำปริมาตร 40 ไมโครลิตร บนกระดาษที่ไม่เคลือบพบว่า ในตอนต้นกระดาษมีค่ามุมสัมผัสเท่ากับ 47 องศา หลังจากเก็บเป็นเวลา 4 สัปดาห์ กระดาษมีมุมสัมผัสลดลงเป็น 24 องศา หรือลดลงร้อยละ 49 ส่วนกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินมูมสัมผัสมีค่าลดลงในการเก็บสัปดาห์ที่ 4 คิดเป็นร้อยละ 21 ร้อยละ 9 และ ร้อยละ 8 ตามลำดับ จะเห็นว่ากระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมีมุมสัมผัสของหยดน้ำมากที่สุด ตามด้วยกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับซินมูม กระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และกระดาษไม่เคลือบตลอดระยะเวลาการเก็บ โดยกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเริ่มมีค่ามุมสัมผัสลดลงมากกว่าทรีตเมนต์อื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในสัปดาห์ที่ 2 เนื่องจากสตาร์ชมีความชอบน้ำจึงต้านทานน้ำได้น้อยกว่าสารเคลือบทรีตเมนต์อื่น การที่กระดาษเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมี

มุ่มสัมพัทธ์มากที่สุด อาจเนื่องมาจากกรดไขมันสเตียริกมีความไม่มีขั้วสูง และยังคงสภาพความไม่มีขั้วตลอดระยะเวลาการเก็บมากกว่าสารเคลือบอื่น จึงต้านทานน้ำได้ดี

ในการวัดค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษก่อนเคลือบ และหลังเคลือบตลอดระยะเวลาการเก็บ ดังภาพที่ 23 พบว่ากระดาษไม่เคลือบเริ่มต้นมีค่าการดูดซึมน้ำ 297.600 กรัมต่อตารางเมตร เมื่อเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บเป็นเวลา 4 สัปดาห์ กระดาษมีค่าดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 29 ส่วนกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ช กระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซีน ภายหลังการเก็บ มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 16 ร้อยละ 7 และ ร้อยละ 10 ตามลำดับ โดยค่าการดูดซึมน้ำของกระดาษตลอดระยะเวลาการเก็บเรียงลำดับจากต่ำไปสูงคือ กระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก ตามด้วยกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซีน กระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ช และกระดาษไม่เคลือบ ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับค่ามุ่มสัมพัทธ์ โดยเมื่อมุ่มสัมพัทธ์มีค่ามาก การดูดซึมน้ำจะต่ำ ส่วนผลของเวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาษตลอดระยะเวลาการเก็บเป็นดังภาพที่ 24 พบว่าเวลาในการดูดซึมน้ำให้ผลสอดคล้องกับค่ามุ่มสัมพัทธ์ และค่าการดูดซึมน้ำ



ภาพที่ 23 การดูดซึมน้ำของกระดาษก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

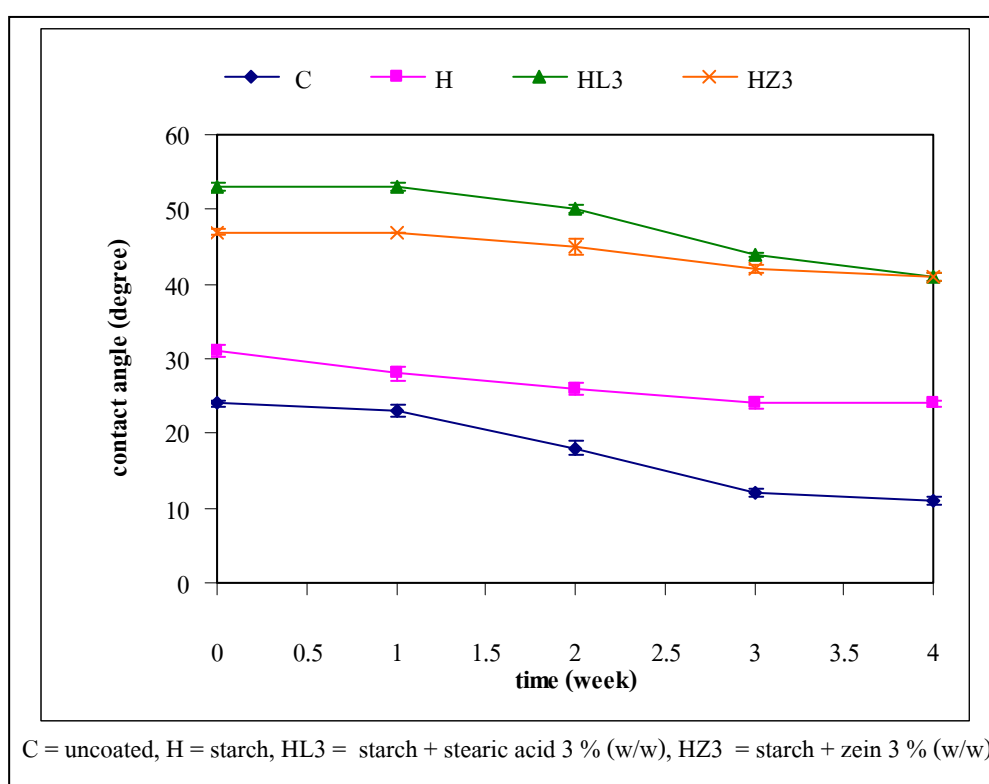


ภาพที่ 24 เวลาในการดูดซึมน้ำของกระดาก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

สมบัติการต้านทานน้ำมันของกระดาก่อน ได้แก่ มุมสัมผัส การดูดซึมน้ำมัน และเวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาก่อนและหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กระดากเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดากเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซิน ภายหลังการเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไปที่อุณหภูมิ 25 – 32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68-74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ (รายละเอียดค่าทดสอบแสดงดังภาคผนวก ข) แสดงดังภาพที่ 25 ภาพที่ 26 และภาพที่ 27

เมื่อพิจารณามุมสัมผัสของน้ำมันปริมาตร 40 ไมโครลิตรบนกระดากไม่เคลือบและกระดากเคลือบตลอดระยะเวลาการเก็บดังภาพที่ 25 พบว่ากระดากไม่เคลือบเริ่มต้นมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันเป็น 24 องศา ภายหลังการเก็บเป็นเวลา 4 สัปดาห์ มีค่าลดลงเป็น 11 องศา หรือลดลงร้อยละ 54 ส่วนกระดากเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช และกระดากเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมีค่ามุมสัมผัสลดลงร้อยละ 23 และกระดากเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซินมีค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันลดลงร้อยละ 13 จะเห็นว่าสารเคลือบที่ประกอบด้วยซินมีการลดลงของค่ามุมสัมผัสของหยดน้ำมันน้อยที่สุด และหลังการเก็บเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ทุกทริตเมนต์มีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันมากกว่ากระดากที่ไม่ผ่านการเคลือบ แสดงว่า

การเคลือบด้วยสารเคลือบในทุกการทดลองส่งผลให้กระดาษด้านทานน้ำมันได้ดีขึ้น โดยแนวโน้มการลดลงของมุมสัมผัสน้ำมันบนกระดาษมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วภายหลังสัปดาห์ที่ 2 ตลอดระยะเวลาในการเก็บ ค่ามุมสัมผัสเรียงลำดับจากสูงไปต่ำในแต่ละชนิดของสารเคลือบพบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริกมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันสูงที่สุด ตามด้วยกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซิน กระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชเพียงสารเดียว และกระดาษไม่เคลือบมีค่ามุมสัมผัสของน้ำมันต่ำที่สุด

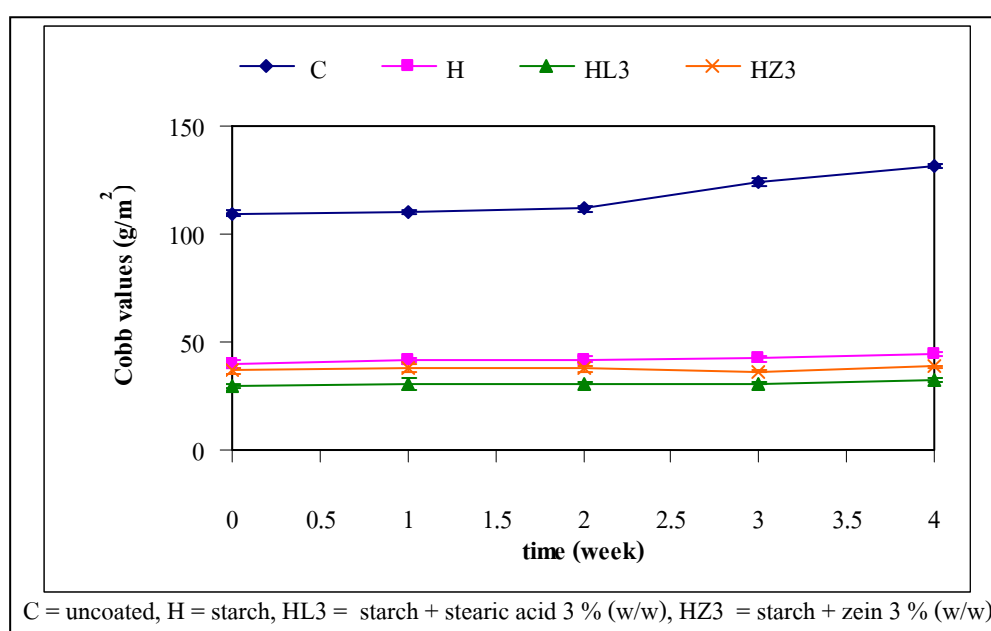


ภาพที่ 25 มุมสัมผัสน้ำมันของกระดาษก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

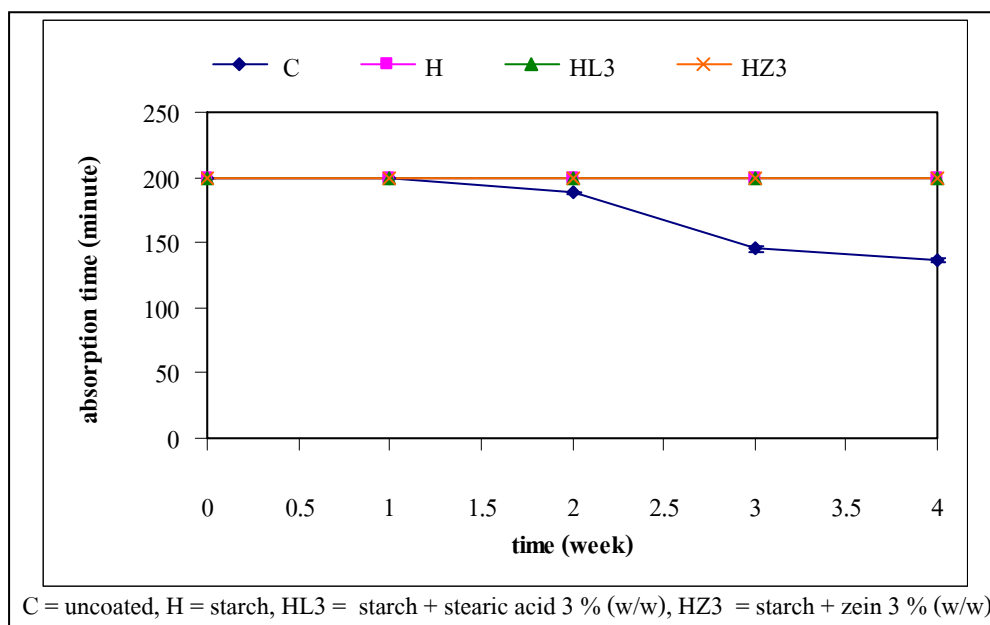
ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมันของกระดาษตลอดระยะเวลาการเก็บดังภาพที่ 26 พบว่ากระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร่วมกับสารละลายซิน ภายหลังการเก็บ 4 สัปดาห์ การดูดซึมน้ำมันเพิ่มขึ้นร้อยละ 20 ร้อยละ 11 ร้อยละ 10 และ ร้อยละ 5 ตามลำดับ โดยแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซึมน้ำมันในแต่ละทริตเมนต์ พบว่ากระดาษไม่

เคลือบมีแนวโน้มของการดูดซึมน้ำมันเพิ่มขึ้นและมีค่ามากกว่ากระดาษเคลือบทุกทรีตเมนต์ตลอดการเก็บ 4 สัปดาห์ แสดงว่าการเคลือบทำให้กระดาษต้านทานน้ำมัน ได้ดีขึ้น ซึ่งผลดังกล่าวสอดคล้องกับค่ามุมสัมผัสของน้ำมัน

เมื่อจับเวลาในการดูดซึมน้ำมันกระดาษภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บดังภาพที่ 27 พบว่ากระดาษไม่เคลือบ และกระดาษเคลือบสารทุกทรีตเมนต์มีเวลาในการดูดซึมน้ำมันมากกว่า 200 นาที เมื่อพิจารณาการลดลงของเวลาในการดูดซึมน้ำมัน จะเห็นว่ามีเพียงกระดาษไม่เคลือบเท่านั้นที่มีเวลาในการดูดซึมน้ำมันต่ำลง และภายหลังการเก็บ เวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาษไม่เคลือบลดลงเป็น 137 นาที ส่วนกระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช กระดาษเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซินยังคงมีค่าเวลาในการดูดซึมน้ำมันมากกว่า 200 นาทีเช่นเดิม



ภาพที่ 26 การดูดซึมน้ำมันของกระดาษก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)



ภาพที่ 27 เวลาในการดูดซึมน้ำมันของกระดาศก่อนและหลังเคลือบเมื่อเก็บไว้ภายใต้การจำลอง
สภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

ผลการศึกษาการเคลือบกระดาศด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก กระดาศเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมัน สเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 และกระดาศเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดย น้ำหนัก ร่วมกับสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 3 ที่มีอิทธิพลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการ ด้านทานน้ำ และน้ำมันภายหลังการเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้า ทั่วไป ที่อุณหภูมิ 25-32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 68 -74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ พบว่ากระดาศ เคลือบทุกพรีตเมนต์มีสมบัติเชิงกล ทั้งความต้านทานแรงกดวงแหวนและความแข็งดึงสูงกว่า กระดาศไม่เคลือบ โดยกระดาศเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับสารละลายซินความเข้มข้นร้อยละ 3 มีความต้านทานแรงกดวงแหวนและความแข็งดึงมาก ที่สุด และทำให้กระดาศยังรักษาค่าความแข็งแรงได้ดีตลอดระยะเวลาการเก็บเป็นเวลา 4 สัปดาห์ ส่วน สมบัติการด้านทานน้ำและน้ำมันพบว่า กระดาศเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 สามารถด้านทานน้ำและน้ำมัน ได้มากที่ตลอดระยะเวลาการเก็บ 4 สัปดาห์

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลงานวิจัยพบว่าการเคลือบกระดาด้านหน้านั้นมีการกระจายตัวของสารเคลือบไม่สม่ำเสมอซึ่งเกิดจากอิทธิพลของการจัดผิวกระดาดทำให้สารเคลือบแทรกซึมลงในเนื้อกระดาดได้น้อยและไม่กระจายตัว อิทธิพลของการเคลือบกระดาดจึงสามารถสรุปทำความเข้าใจได้ดีในการเคลือบที่ผิวด้านหลังของแผ่นกระดาด โดยสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

1. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นกรดไขมันสเตียริกร่วมกับสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชต่อสมบัติของกระดาดแข็งพบว่า กระดาดที่เคลือบด้านหลังด้วยไฮโดรฟอบิกสตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่าความต้านทานแรงกดวงแหวน และค่าความแข็งดึงในทิศ MD และ CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) แสดงว่ากระดาดมีสมบัติเชิงกลต่ำลง เนื่องจากเมื่อมีไขมันแทรกอยู่ในชั้นฟิล์มพอลิแซ็กคาไรด์ ฟิล์มที่ได้จึงขาดความสมบูรณ์และขาดความต่อเนื่องทางโครงสร้าง ส่วนสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาดหลังเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกรดไขมันสเตียริกมีความไม่ชอบน้ำ และสามารถแทรกซึมเข้าไปอยู่ในรูพรุนของโครงสร้าง ส่งผลให้ของเหลวซึมผ่านลงไปได้ยาก ส่วนอัตราการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันสเตียริก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกรดไขมันสเตียริกในสารเคลือบส่งผลให้ในโครงสร้างของฟิล์มที่เคลือบบนกระดาดมีช่องว่างขนาดเล็กมากขึ้น ออกซิเจนจึงสามารถซึมผ่านกระดาดได้ง่าย อีกทั้งกระดาดมีการดูดซึมของเหลวระหว่างการเคลือบทำให้มีปริมาณความชื้นมากขึ้น มีปริมาตรอิสระมากขึ้นจึงต้านทานการซึมผ่านของออกซิเจนได้ดีลง

2. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นของซินร่วมกับสารละลายไฮโดรฟอบิกสตาร์ชต่อสมบัติของกระดาดแข็ง ผลการทดลองพบว่า การทดสอบสมบัติเชิงกลของการเคลือบกระดาดด้านหลัง ได้แก่ ความต้านทานแรงกดวงแหวนของกระดาดหลังเคลือบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความแข็งดึงมีค่าเพิ่มขึ้นในทิศ MD แต่ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นในทิศ CD เมื่อทดสอบความต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาดที่เคลือบทั้งด้านหน้าและด้านหลังพบว่า กระดาดหลังเคลือบสามารถต้านทานน้ำและน้ำมันได้ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากซินที่เคลือบชั้นที่สองบนกระดาดมีความไม่ชอบน้ำ และสามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มที่มีโครงสร้างที่ต่อเนื่อง ส่วนอัตราการ

ซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณซินในสารเคลือบ อย่างไรก็ตามอัตราการซึมผ่านของกระดาษเคลือบซินในทุกทรีตเมนต์ยังคงมีค่าสูงกว่ากระดาษก่อนเคลือบซึ่งอาจเป็นผลจากการมีปริมาตรอิสระมากขึ้นจากความชื้นที่เพิ่มขึ้นภายหลังการเคลือบ

3. การศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นกรดไขมันสเตียริกในสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับการเคลือบสารละลายซินต่อสมบัติของกระดาษแข็ง โดยปรับอัตราส่วนระหว่างกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซินเป็น 1:3, 3:1 และ 3:3 พบว่า ค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนมีค่ามากที่สุดเมื่อเคลือบกระดาษด้วยกรดไขมันสเตียริก และซินในอัตราส่วน 1:3 โดยค่าความแข็งดึงก็ให้ผลทดสอบในทำนองเดียวกัน แสดงว่าสารเคลือบที่มีซินปริมาณมากกว่ากรดไขมันสเตียริกส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น ผลการทดสอบเพิ่มเติมพบว่า กระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซินในอัตราส่วน 3:1 สามารถต้านทานน้ำได้ดีที่สุด แสดงว่าสารเคลือบที่ประกอบด้วยกรดไขมันสเตียริกปริมาณมากกว่าซิน ส่งผลให้กระดาษหลังเคลือบสามารถต้านทานน้ำได้มากขึ้น ในการทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำมันพบว่า กระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซินในอัตราส่วน 1:3 สามารถความต้านทานน้ำมันและแก๊สออกซิเจนได้มากที่สุดทั้งกระดาษเคลือบด้านหน้าและด้านหลัง อย่างไรก็ตาม สมบัติเชิงกล รวมทั้งสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันของกระดาษที่เคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซิน ยังไม่ดีเท่ากับกระดาษเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร่วมกับกรดไขมันสเตียริก หรือ ซิน เพียงอย่างเดียวหนึ่ง

4. ผลการเปรียบเทียบสมบัติด้านการต้านทานน้ำและน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบ โดยทดสอบค่ามูมสัมพัทธ์แบบต่อเนื่องเป็นเวลา 15 นาที พบว่า มูมสัมพัทธ์ของหยดน้ำ และน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ชที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ร่วมกับกรดไขมันสเตียริกที่ระดับความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนัก มีค่ามากที่สุดตลอดระยะเวลาการทดสอบ แสดงว่าสารเคลือบทรีตเมนต์ดังกล่าวส่งผลให้กระดาษมีความต้านทานน้ำและน้ำมันมากที่สุด

5. การศึกษาลักษณะผิวหน้า และการกระจายตัวของสารเคลือบบนกระดาษแข็งพบว่า ลักษณะผิวหน้าของกระดาษหลังเคลือบ มีการกระจายตัวของสารเคลือบไม่สม่ำเสมอในการเคลือบด้านหน้า ส่วนการเคลือบด้านหลัง สารเคลือบสามารถปกคลุมเส้นใย ทำให้กระดาษมีรูพรุนลดลง สารเคลือบกระจายตัวบนกระดาษอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งมีผลต่อสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมัน

6. การศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาการเก็บกระดาษหลังเคลือบที่มีผลต่อสมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมัน โดยนำกระดาษหลังเคลือบ เฉพาะกระดาษที่ผ่านการเคลือบ ด้านหลังมาเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในคลังสินค้าที่อุณหภูมิ 25-32 °C ความชื้นสัมพัทธ์ ร้อยละ 68-74 เป็นเวลา 1-4 สัปดาห์ และสุ่มตัวอย่างมาทดสอบสมบัติเชิงกล และสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันในทุกสัปดาห์ พบว่าในสัปดาห์ที่ 4 กระดาษหลังเคลือบด้วยไฮโดรโฟบิก สตาร์ชความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับสารละลายซินร้อยละ 3 สามารถรักษาค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนได้ดีที่สุดตลอดระยะเวลาการเก็บ ส่วนค่าความแข็งดึงก็มีแนวโน้ม สอดคล้องกับค่าความต้านทานแรงกดวงแหวน ดังนั้นกระดาษหลังเคลือบด้วยทรีตเมนต์ดังกล่าวจึง มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด ส่วนการทดสอบสมบัติการต้านทานน้ำและน้ำมันพบว่า กระดาษเคลือบ ไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ความเข้มข้นร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3 สามารถรักษาสสมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันได้ดีที่สุด

ข้อเสนอแนะ

1. กระดาษเป็นวัสดุที่ไวต่อการดูดและคายความชื้น ก่อนและหลังเคลือบกระดาษควรมี การควบคุมสภาวะในการเก็บ เนื่องจาก เมื่อเก็บกระดาษไว้เป็นระยะเวลานาน กระดาษจะมีความชื้นมากขึ้น ส่งผลให้การทดสอบสมบัติต่างๆ มีความคลาดเคลื่อน ดังนั้นในการทดสอบแต่ละ ครั้งควรทดสอบตัวอย่างกระดาษที่ไม่ผ่านการเคลือบทุกครั้งเพื่อเปรียบเทียบกับกระดาษหลังเคลือบ
2. กระดาษหลังเคลือบควรมีการทดสอบเพิ่มเติมเกี่ยวกับผลกระทบต่อการบวนการพิมพ์ เนื่องจากการเคลือบกระดาษในแต่ละทรีตเมนต์จะส่งผลให้กระดาษมีความหนา และความชื้น เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพงานพิมพ์
3. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้งานกระดาษหลังเคลือบพอลิเมอร์ชีวภาพ เช่น การ ทดสอบการบรรจุอาหาร สินค้าอุปโภค และสินค้าบริโภคทั่วไป
4. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษในแต่ละทิศทางทั้งในทิศ MD หรือในทิศ CD และศึกษาโครงสร้างของกระดาษหลังเคลือบว่าสารเคลือบแทรกซึมเข้าไปใน โครงสร้าง และยึดเกาะอยู่บนเส้นใยอย่างไร

5. ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องการสลับชั้นของสารเคลือบกระดาษแต่ละชั้น หรือการลามิเนตเพื่อเปรียบเทียบสมบัติด้านต่างๆของกระดาษ

6. ควรศึกษาระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลายกระดาษ เพื่อพิจารณาใช้ในการเก็บก่อนนำไปใช้งาน

7. ในการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของสารเคลือบด้วยกล้องจุลทรรศน์ส่องกราดเลเซอร์ ผลการทดสอบมีเพียงลักษณะของกระดาษที่เคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟิสิกสตาร์ชเพียงสารเดียว และกระดาษเคลือบสารละลายไฮโดรฟิสิกสตาร์ชร่วมกับสารละลายซินแทนั้นเนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบในห้องปฏิบัติการขณะทำการศึกษายังไม่มีสภาวะที่เหมาะสมในการดูการกระจายตัวของกรดไขมันสเตียริกบนกระดาษได้ จึงควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในโอกาสต่อไป

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. ม.ป.ป. การผลิตกระดาษ. แหล่งที่มา:

http://www.diw.go.th/EMS%20for%20SMEs%20Website/page%203_files/text/env/pulp-paper/thai/chap4.pdf, 8 พฤษภาคม 2552.

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

ขวัญใจ สุชินพงศ์พันธ์. 2543. การนำโคโคแซนไปใช้ประโยชน์ทางการบรรจุ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

จิริญญา โชตยะกุล. 2545. การลดต้นทุนการเคลือบผิวกระดาษด้วยการกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

ดวงทิพย์ กู้เกียรติกุลชัย. 2550. ผลการเคลือบสตาร์ชตัดแปรและสารกันซึมต่อสมบัติของกระดาษกราฟทำผิวกล่องเพื่อใช้งานในสภาวะห้องเย็น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พันธวัฒน์ ไชยวรรณ. 2546. การใช้พลาสติกคลุมหมุดสำหรับการปรับปรุงสมบัติการไม่ซึมน้ำของผ้าไหม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

รัฐภูมิ ตันตยานนท์. 2544. การปรับปรุงคุณสมบัติด้านการทนความชื้นของแป้งมันสำปะหลังเพื่อใช้งานเป็นบรรจุภัณฑ์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

ศิริธร เลิศพานิช. 2549. ศึกษาในกระบวนการผลิตและสมบัติทางเคมี-ฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลังที่ถูกลอกซีไดซ์ด้วยโซเดียมไฮโปคลอไรท์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สตรีรัตน์ ไซค์. 2550. **ทำผ้ากันน้ำด้วยพลาสมา**. วิชาการคอตคอม. แหล่งที่มา:

<http://www.vcharkarn.com/varticle/33704>, 15 พฤศจิกายน 2551.

สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรม. 2540. **พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2529. การผลิตกระดาษแข็ง, น.111-120 ใน รายงานการสัมมนาเรื่อง กระดาษแข็งเพื่อการบรรจุภัณฑ์. ศูนย์การบรรจุหีบห่อไทย, กรุงเทพฯ.

สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. 2522. **กระดาษแข็งเพื่อการพิมพ์**. มอก. 283-2521.

อัญชลี กมลรัตนกุล, ไพศาล อนันต์นุกูล, อมรรัตน์ สวัสดิ์ทิต และ มยุรี ภาคลำเจียก. 2545. **คู่มือการใช้กระดาษเพื่อการหีบห่อ**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, กรุงเทพฯ.

อรสิริ เสมรสุต. 2545. **การพัฒนากระดาษสาเพื่อการพิมพ์และการนำไปใช้ประโยชน์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Advance Agro Public Co.,Ltd. n.d. **Paper Analysis**. Available Source:

<http://www.doublepaper.com/knowning/>, June, 12 2008.

Al-Mehbad, N. Y. 2004. Improving Paper Properties. **Polymer-Plastics Technology And Engineering** 43: 963-979.

Arfa, A.B., P. Laurence, C. Pascale and G. Nathalie. 2007. Antimicrobial paper based on a soy protein isolate or modified starch coating including carvacrol and cinnamaldehyde. **J. Agric. Food Chem.** 55: 2155-2162.

ASTM International. 2004a. Standard Test Methods for Grammage of Paper and Paperboard (Mass Per Unit Area). ASTM D 646-96 (Reapproved 2001). **Annual Book of ASTM Standards** 15.09: 40-44.

_____. 2004b. Standard Test Methods for Moisture Content of Paper and Paperboard by Oven Drying. ASTM D 644-99 (Reapproved 2002). **Annual Book of ASTM Standards** 15.09: 34-36.

_____. 2004c. Standard Test Methods for Thickness of Paper and Paperboard. ASTM D 645/D 645M-97 (Reapproved 2002). **Annual Book of ASTM Standards** 15.09: 37-39.

_____. 2004d. Standard Test Methods for Water Absorptiveness of Nonbibulous Paper and Paperboard (Cobb Test). ASTM D 3285-93 (Reapproved 1999). **Annual Book of ASTM Standards** 15.09: 327-329.

_____. 2004e. Standard Test Methods for Corona-Treated Polymer Films Using Water Contact Angle Measurement. ASTM D5946-04. **Annual Book of ASTM Standards** 20.19: 1-6.

Ayranci, E. and S.Tunc. 2001. The effect of fatty acid content on water vapor and carbon dioxide transmissions of cellulose-based edible films. **Food Chemistry** 72: 231-236.

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.

- Bravin, B., N. Peressini and A. Sensidoni. 2004. Influence of emulsifier type and content on functional properties of polysaccharide lipid-based edible films. **J. Agric Food Chem.** 52: 6448-6455.
- Casey, P. J. 1981. **Pulp and paper volume III.** 3 ed. John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- Chanurier, H., P. Colonna, G. D. Valle and D. Lourdin. 2005. Structure and mechanical behavior of corn flour and starch-zein based materials in glassy state. **Carbohydrate Polymers** 59: 109-119.
- Chewangkul, L., O. Naivikul, W. Garnjanagoonchorn, C. G. Oates, K. Siroth and T. Suwonsichon. 2001. Microstructural changes in instant noodles during production via triple staining and confocal laser scanning microscopy and scanning electron microscopy. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 35: 311-317.
- Clark, J.A. 1978. **Pulp technology and treatment for paper.** 2 ed. Miller freeman publication, Inc., United States of America.
- Colla, E., P. J. Do, A. Sobral, F. Cecialia and M. Alli. 2006. Amaranthus cruentus flour edible films: Influence of stearic acid addition, plasticizer concentration, and emulsion stirring speed on water vapor permeability and mechanical properties. **J. Agric. Food Chem.** 54: 6645-6653.
- Coma, V., I. Sebti., P. Pardon, A. Deschamps and F.H. Pichavant. 2001. Antimicrobial edible packaging based on cellulosic ethers, fatty acids and nisin incorporation to inhibit *Listeria innocua* and *Staphylococcus aureus*. **Journal of food protection** 64: 470-475.
- Conservation Resources International. n.d. **Paper structure.** Available Source: <http://www.conservationresources.com/Main/S%20CATALOG/Archival%20Papers.htm>, July, 20 2008.

- Despond, S., E. Espuche, N. Cartier and A. Domard. 2004. Barrier properties of paper–chitosan and paper–chitosan–carnauba wax films. **Journal of Applied Polymer Science** 98: 704–710.
- Doi, Y. and K. Fukuda. 1994. **Biodegradable plastics and polymers**. Elsevier, Amsterdam.
- Dury-Brun, C., V. Jury, V. Guillard, S. Desobry, A. Voilley and P. Chalier. 2006. Water barrier properties of treated-papers and application to sponge cake storage. **Food Research International** 39: 1002-1011.
- Gällstedt, M., A. Brottman and M.S. Hedenqvist. 2005. Packaging-related properties of protein- and chitosan-coated paper. **Packag. Technol. Sci.** 18: 161–170.
- Gallstedt, M. and M.S. Hedenqvist. 2002. Oxygen and water barrier properties of coated whey protein and chitosan films. **Journal of Polymers and the Environment** 10: 1-4.
- Guadalupe I., J.J. Rodriguez and V. Gustavo and B., Canovas. 2003. Edible coatings composed of methylcellulose, stearic acid and additives to preserve quality of pear wedges. **Journal of Food Processing Preservation** 27: 299-320.
- Hagenmaier, R.D. and P.E. Shaw. 1990. Moisture permeability of edible films made with fatty acid and hydroxypropyl methyl cellulose. **J. Agric. Food Chem.** 38(9): 1799-1803.
- Hagenmaier, R.D. and R.A. Baker. 1997. Edible coatings from morpholine-free wax microemulsions. **J. Agric. Food Chem.** 45(2): 349-352.
- Han, J.H. and J.M. Krochta. 2001. Physical properties and oil absorption of whey-protein coated paper. **J Food Sci** 66(2): 294–9.

Ham-Pichavanta, F. , G. Sebeb , P. Pardona. and V. Coma. 2005. Fat resistance properties of chitosan-based paper packaging for food applications. **Carbohydrate Polymers** 61: 259–265.

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.

Jansson, A. and L. Jarnstrom. 2005. Barrier and mechanical properties of modified starches. **Cellulose** 12: 423–433.

Rhim, J., J. Lee and S. Hong. 2007. Increase in water resistance of paperboard by coating with poly(lactide). **Packaging Technology and science** (in press).

Kenneth, W. B. 1970. **Handbook of Pulp and Paper Technogy.** 2 ed. Litton Educational Publishing. Inc., New York.

Ketola, H. and P. Hagberg. 2003. **Modified starch.** US Patent 6,670,470.

Khwaldia, K., M. Linder, S. Banon and S. Desobry. 2005. Effects of mica, carnauba wax, glycerol and sodium caseinate concentrations on water vapor barrier and mechanical properties of coated paper. **J Food Sci** 70(3): 192-197.

Kimberly, C., D. Farrell, C. Godwin and Y. Xi. 2004. **Biopolymer. Available Source:** <http://depts.washington.edu/poeweb/gradprograms/envmgt/2004symposium/GreenPackagingReport.pdf>, September, 26 2008.

Kjellgren, H., M. Gallstedt, G. Engstrom and L. Jarnstrom. 2006. Barrier and surface properties of chitosan-coated greaseproof paper. **Carbohydrate Polymers** 65: 453–460.

- Kline, E. J. 1982. **Paper and paperboard manufacturing and converting fundamentals**. 2 nd. Miller Freeman Publications, Inc., California.
- Kohji, Y., H. Takahashi and A. Noguchi. 1995. Improved water resistance in edible films and composites for biodegradable food packaging. **International Journal of Food Science and Technology** 30: 599-608.
- Krochta, M.J, E.A. Baldwin and M.O. Nisperos-Carriedo. 1994. **Edible coatings and films to improve food quality**. 10 ed. Technomic Publishing Company, Inc., Pennsylvania.
- Lai, H., G.W. Padua and L.S. Wei. 1997. Properties and microstructure of zein sheets plasticized with palmitic and stearic acids. **Cereal Chem.** 74: 83-90.
- Lin, S.Y. and J.M. Krochta. 2003. Plasticizer effect on grease barrier and color properties of whey-protein coatings on paperboard. **Journal of Food Science** 68: 229-233.
- Nicholas, P., M. Sykes, L.C. Dickey, J.L. Wiles., T.J. Urbanik. and P.H. Cook. 2002. Recyclable zein-coated kraft paper and linerboard. **Progress in paper Recycling** 11: 24-29.
- Prez-Gago, M.B. and J.M. Krochta. 2001. Lipid particle size effect on water vapor permeability and mechanical properties of whey protein/beeswax emulsion films. **J. Agric. Food Chem** 49: 996-1002.
- Mchugh, H.T. and J.M. Krochta. 1994. Water vapor permeability properties of edible whey protein-lipid emulsion films. **JAOCs** 71: 307-312.
- Rhim, J., J. Lee and S. Hong. 2006. Water resistance and mechanical properties of biopolymer (alginate and soy protein) coated paperboards. **LWT** 39: 806-813.

- Rhim, J., J. Lee and S. Hong. 2007. Increase in water resistance of paperboard by coating with poly(lactide). **Packag. Technol. Sci.** 20(6): 393-402.
- Roberts, J.C. 1996. **The chemistry of paper.** The Royal Society of Chemistry, UK
- Rodriguez-Gonzalez¹, F.J., B.A. Ramsay and B.D. Favis. 2004. Rheological and thermal properties of thermoplastic starch with high glycerol content. **Carbohydrate Polymers** 58: 139–147.
- Sanchez, A.C., Y. Popineau, C. Mangavel, L. Colette, and G. Jacques. 1998. Effect of different plasticizers on the mechanical and surface properties of wheat gliadin films. **J. Agric. Food Chem.** 46: 4539-4544.
- Sebti, I., F.R. Ham-Pichavant and V.R. Coma. 2002. Edible bioactive fatty acid-cellulosic derivative composites used in food-packaging applications. **J Agric. Food Chem.** 50: 4290-4294.
- Suyatma, N.E., L. Tighzert and A. Copinet. 2005. Effects of hydrophilic plasticizers on mechanical, thermal, and surface properties of chitosan films. **J. Agric. Food Chem.** 53: 3950-3957.
- Koji, T., A. Ogata, W. Yang and M., Hattori. 2002. Increased hydrophobicity of carboxy methyl starch films by conjugation with zein. **Biosci. Biotechnol** 66: 1276-1280.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. 2004. **Ring crush of paperboard. TAPPI T 818 cm-97.** Tappi Journal, Atlanta.
- Tomoyuki, Y., S. Isobe and T. Maekawa. 2002. Influence of preparation condition on the physical properties of zein films. **JAOCs** 79: 345-349.

Trezza, T.A. and P.J. Vergana. 1994. Grease resistance of corn zein coated paper. **J. Food Sci.** 59: 912-915.

Trezza, A.T., J. Wiles and P. J. Vergano. 1998. Water vapor and oxygen barrier properties of corn zein coated paper. **TAPPI Journal** 81(8): 171-176.

Weller, C.L., A. Gennadios and R.A. Saraiva. 1998. Edible bilayer films from zein and grain sorghum wax or carnauba wax. **Lebensm.- Wiss. U.- Technol.** 31: 279-285.

Yang, L. and A.T. Paulson. 2000. Effects of lipids on mechanical and moisture barrier properties of edible gellan film. **Food Research International** 33: 571-578.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการทดสอบ

การทดสอบปริมาณความชื้นของสตาร์ช

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก AOAC 1995

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดตณนิยม 4 ตำแหน่ง
2. ถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาปิด (moisture can)
3. ตู้อบไฟฟ้า
4. เครื่องเคเตอร์พร้อมบรรจุมารวัดความชื้น

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักถ้วยพร้อมฝาก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบไฟฟ้า $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยระหว่างการอบให้เปิดฝาด้วยเอาไว้เล็กน้อย
2. ชั่งน้ำหนักสตาร์ชประมาณ 3 กรัมใส่ในถ้วยอลูมิเนียม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักสตาร์ชก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบไฟฟ้า $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักสตาร์ชหลังอบ
3. เมื่อครบเวลา ปิดฝาด้วยแล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักสตาร์ชหลังอบ
4. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ในหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

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

การทดสอบหาน้ำหนักมาตรฐานของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 646-96

เครื่องมือ

1. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 20×25 ซม. จำนวน 10 แผ่น นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างกระดาษครั้งละ 1 แผ่น รายงานค่าน้ำหนักมาตรฐานเฉลี่ยเป็นกรัมต่อตารางเมตร

การคำนวณ

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

การทดสอบหาความหนาของกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 645-97

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. เตรียมกระดาษขนาด 30×150 มิลลิเมตร อย่างน้อย 10 แผ่น เก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. วัดความหนาด้วยไมโครมิเตอร์ แผ่นละ 5 จุด โดยให้ห่างจากขอบของกระดาษอย่างน้อย 6 มิลลิเมตร รายงานค่าความหนาเฉลี่ยเป็นมิลลิเมตร

การทดสอบหาปริมาณความชื้นในกระดาษ

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 644-99

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. อบถ้วยอลูมิเนียมพร้อมฝาในตู้อบไฟฟ้าที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์เป็นเวลา 30 นาที แล้วนำไปชั่งหาน้ำหนักถ้วยพร้อมฝา
2. สุ่มตัวอย่างกระดาษเพื่อนำไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$ ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง
3. ตัดกระดาษให้มีขนาดประมาณ 2×2 เซนติเมตร ใส่ในถ้วยอลูมิเนียมให้มีน้ำหนักประมาณ 3 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาษก่อนอบ นำไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยระหว่างการอบให้เปิดฝาด้วยเอาไว้เล็กน้อย
4. เมื่อครบเวลา ปิดฝาด้วยแล้วนำออกมาทิ้งไว้ให้เย็นในเครื่องเคเตอร์เป็นเวลาประมาณ 30 นาที แล้วนำไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำไปอบอีกครั้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำซ้ำจนกระทั่งน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกัน มีค่าแตกต่างกันไม่เกิน 0.0010 กรัม บันทึกเป็นค่าน้ำหนักกระดาษหลังอบ
5. ทำการทดสอบอย่างน้อย 5 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยของความชื้นที่ได้ในหน่วยร้อยละ

การคำนวณ

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

การทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน

มาตรฐานการทดสอบ TAPPI T 818-om97

เครื่องมือ

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

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษขนาด 12.7×152 มิลลิเมตร (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 (ISO 187)
2. นำกระดาษสอดเข้าไปใน Specimen Holder ที่มีลักษณะเป็นวงกลม
3. กดตัวอย่างด้วยเครื่องทดสอบความต้านทานแรงกดวงแหวน จนขอบขึ้นทดสอบเสียรูปจากแรงกด รายงานค่าเฉลี่ยของค่าความต้านทานแรงกดวงแหวนทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงกดต่อความยาวของกระดาษที่รับแรงกด (กิโลนิวตันต่อเมตร)

การทดสอบความแข็งดิ่งของกระดาษ (Taper type stiffness test)

มาตรฐานการทดสอบ TAPPI T 489 om-04

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องทดสอบความแข็งดิ่งของกระดาษ (Taber Type Stiffness Tester)
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดตัวอย่างกระดาษขนาด 1.5 x 2.75 นิ้ว ทั้งแนว MD และ CD โดยตัดตัวอย่างให้ขนานกับแนวทดสอบด้วยเครื่องตัดขึ้นทดสอบ 10 ชิ้นต่อแนว นำกระดาษไปเก็บไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่อุณหภูมิ 27 ± 1 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
2. นำกระดาษสอดเข้าที่ยึดทั้งสองของเครื่องทดสอบ โดยให้ตัวอย่างอยู่ในแนวตั้ง และใช้ค้อนน้ำหนักขนาด 5 นิวตัน
3. หมุนสวิทช์เครื่องทดสอบความแข็งดิ่ง ไปด้านใดด้านหนึ่งเป็นมุม 15 องศา รายงานค่าเฉลี่ยความแข็งดิ่งทั้งแนว MD และ CD เป็นค่าแรงด้านการโก่งงอของตัวอย่าง (มิลลินิวตัน)

การคำนวณ

$$\text{ความแข็งดิ่ง (มิลลินิวตัน)} = \frac{(\text{ค่าความแข็งดิ่งที่อ่านได้} \times 5) \times 0.098066}{(0.05)}$$

การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ (Water Cobb test)

มาตรฐานการทดสอบ ASTM D 3285-93

เครื่องมือ

1. ชุดทดสอบค่า Cobb test (เส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวน 6 เซนติเมตร)
2. ลูกกลิ้งโลหะผิวเรียบ น้ำหนัก 10.0 ± 0.5 กิโลกรัม
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. กระบอกตวงปริมาตร 100 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษทิชชูอ่อนประเภทประสงค์ยี่ห้อ สก็อต (Scott towel)
8. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 12.5×12.5 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^\circ\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. นำตัวอย่างออกมา ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ จากนั้นนำกระดาษวางบนชุดทดสอบค่า Cobb test โดยหันกระดาษด้านที่จะทดสอบขึ้นด้านบน
4. เทน้ำกลั่นปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไปในวงแหวนของชุดทดสอบค่า Cobb test แล้วเริ่มจับเวลาทันที ระวังไม่ให้มีหยดน้ำหกออกมานอกวงแหวน
5. เมื่อถึงวินาทีที่ 105 ให้เทน้ำออกจากวงแหวนอย่างรวดเร็ว โดยไม่ให้มีน้ำหยดออกนอกพื้นที่วงแหวน นำกระดาษทดสอบวางลงบนกระดาษทิชชู โดยให้ผิวกระดาษด้านเปียกอยู่ข้างบน จากนั้นรับกระดาษทิชชูอีกแผ่นหนึ่งวางบนกระดาษทดสอบ ใช้ลูกกลิ้งโลหะกลิ้งทับไปบนกระดาษทิชชูไปและกลับ จากนั้นนำกระดาษทดสอบไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
6. ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ แบ่งเป็นกระดาษด้านหน้า 5 ซ้ำ และกระดาษด้านหลัง 5 ซ้ำ

การคำนวณ

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)} = (\text{น้ำหนักหลังทดสอบ}) - (\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ}) \times 100$$

การทดสอบค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water Contact Angles)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D 5946-04

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดมุมสัมผัส
3. นาฬิกาจับเวลา
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 1 x 5 เซนติเมตร
 2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
 3. วางตัวอย่างกระดาษในจับยึดตัวอย่าง แล้ววางตัวอย่างทดสอบบนแผ่นตัวอย่าง
 5. หยดน้ำกลั่นปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างกระดาษ
 6. บันทึกภาพหยดน้ำ และวัดค่ามุมสัมผัสด้วยโปรแกรม SCA 20
 6. หากต้องการค่ามุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง ให้ถ่ายวิดีโอหยดน้ำทุกๆ 1 นาที จนครบ 15 นาที
- ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ
8. บันทึกไฟล์ภาพลงในคอมพิวเตอร์

การทดสอบเวลาในการดูดซึมน้ำ (Water Absorption Time)

มาตรฐานการทดสอบ อ้างอิงจาก Selli *et al.* (2001) และ สตรีรัตน์ (2551)

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. ไมโครปิเปต ขนาด 100 ไมโครลิตร
3. นาฬิกาจับเวลา
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. หยอดน้ำกลั่นปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครปิเปต โดยให้ไมโครปิเปตอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้น และเริ่มจับเวลา
4. บันทึกเวลาที่หยดน้ำหายไปจากผิวกระดาษ โดยที่เวลาที่ตัวอย่างกระดาษใช้ในการดูดซับน้ำหนึ่งหยด (absorption time) นี้จะถูกกำหนดไว้สูงสุดที่ 200 นาที เนื่องจากที่ระยะเวลานานกว่านี้จะพิจารณาว่าปริมาตรของหยดน้ำหายไปเนื่องจากเกิดการระเหย
5. ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ซ้ำ

การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำมัน (Oil Cobb test)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D 3285-93

เครื่องมือ

1. ชุดทดสอบค่า Cobb test (เส้นผ่านศูนย์กลางวงแหวน 6 เซนติเมตร)
2. ลูกกลิ้งโลหะผิวเรียบ น้ำหนัก 10.0 ± 0.5 กิโลกรัม
3. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
4. กระบอกตวงปริมาตร 100 มิลลิลิตร
5. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง
6. นาฬิกาจับเวลา
7. กระดาษทิชชูอเนกประสงค์ ยี่ห้อ สก็อต (Scott towel)
8. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ โอเล็น
9. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 12.5×12.5 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. นำตัวอย่างออกมา ชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนการทดสอบ จากนั้นนำกระดาษวางบนชุดทดสอบค่า Cobb test โดยหันกระดาษด้านที่จะทดสอบขึ้นด้านบน
4. เทน้ำมันปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงไปในวงแหวนของชุดทดสอบค่า Cobb test แล้วเริ่มจับเวลาทันที ระวังไม่ให้มีหยดน้ำหกออกมานอกวงแหวน
5. เมื่อถึงวินาทีที่ 105 ให้เทน้ำมันออกจากวงแหวนอย่างรวดเร็ว โดยไม่ให้มีน้ำมันหยดออกนอกพื้นที่วงแหวน นำกระดาษทดสอบวางลงบนกระดาษทิชชู โดยให้ผิวกระดาษด้านเปียกอยู่ข้างบน จากนั้นรีบนำกระดาษทิชชูอีกแผ่นหนึ่งวางบนกระดาษทดสอบ ใช้ลูกกลิ้งโลหะกลิ้งทับไปบนกระดาษทิชชูไปและกลับ จากนั้นนำกระดาษทดสอบไปชั่งน้ำหนักอีกครั้ง
6. ทำการทดสอบทั้งหมด 10 ซ้ำ แบ่งเป็นกระดาษด้านหน้า 5 ซ้ำ และกระดาษด้านหลัง 5 ซ้ำ

การคำนวณ

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)} = (\text{น้ำหนักหลังทดสอบ}) - (\text{น้ำหนักก่อนทดสอบ}) \times 100$$

การทดสอบค่ามุมสัมผัสของน้ำมัน (Oil Contact Angles)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D 5946-04

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดมุมสัมผัส
3. นาฬิกาจับเวลา
4. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ
5. น้ำมัน ยี่ห้อ โอลีน

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 1 x 5 เซนติเมตร
 2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
 3. วางตัวอย่างกระดาษในจับยึดตัวอย่าง แล้ววางตัวอย่างทดสอบบนแผ่นตัวอย่าง
 5. หยดน้ำมันปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างกระดาษ
 6. บันทึกภาพหยดน้ำ และวัดค่ามุมสัมผัสด้วยโปรแกรม SCA 20
 6. หากต้องการค่ามุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง ให้ถ่ายวิดีโอหยดน้ำทุกๆ 1 นาที จนครบ 15 นาที
- ทำการทดสอบทั้งหมด 3 ซ้ำ
8. บันทึกไฟล์ภาพลงในคอมพิวเตอร์

การทดสอบเวลาในการดูดซึมน้ำมัน (Oil Absorption Time)

มาตรฐานการทดสอบ อ้างอิงจาก Selli *et al.* (2001) และ สตรีรัตน์ (2551)

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. ไมโครปิเปต ขนาด 100 ไมโครลิตร
3. นาฬิกาจับเวลา
4. น้ำมันปาล์ม ยี่ห้อ โอสิน
5. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาด 5×5 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. หยดน้ำมันปริมาตร 40 ไมโครลิตร ลงบนตัวอย่างกระดาษด้วยไมโครปิเปต โดยให้ไมโครปิเปตอยู่ในแนวตั้งฉากกับพื้น และเริ่มจับเวลา
4. บันทึกเวลาที่หยดน้ำมันหายไปจากผิวกระดาษ โดยที่เวลาที่ตัวอย่างกระดาษใช้ในการดูดซับน้ำมันหนึ่งหยด (absorption time) นี้จะถูกกำหนดไว้สูงสุดที่ 200 นาที เช่นเดียวกับน้ำกลั่น
5. ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ซ้ำ

การทดสอบอัตราการส่งผ่านออกซิเจน (Oxygen Transmission Rate, OTR)

มาตรฐานการทดสอบ ดัดแปลงจาก ASTM D3985

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดอัตราการซึมผ่านออกซิเจน
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างให้มีขนาดเปิดเหลี่ยมเท่ากับ Template โดยกระดาษจะต้องปราศากรอยย่น รอยพับหรือหักงอ
2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ 27 ± 1 °C, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. เปิดเครื่องทดสอบ และเปิดฝาแชมเบอร์
4. ทา sealant บ้างๆ บริเวณ seal วงแหวนที่ส่วนล่างของแชมเบอร์เครื่องทดสอบ
5. นำตัวอย่างกระดาษวางบนส่วนล่างของแชมเบอร์โดยต้องวางตัวอย่างให้ตั้งไม่มีฟองอากาศเหลืออยู่บริเวณวงแหวน
6. ปิดฝา และกดปุ่มทำงาน
7. รอจนเครื่องส่งสัญญาณเสียง แสดงว่าวัดค่าเสร็จแล้ว บันทึกค่าอัตราการส่งผ่านออกซิเจนที่ได้
8. ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ครั้ง

การทดสอบค่าสี (L a b)

เครื่องมือ

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์
2. เครื่องวัดสี
3. อุปกรณ์สำหรับตัดกระดาษ

วิธีการทดสอบ

1. ตัดกระดาษตัวอย่างขนาด 6×6 เซนติเมตร
2. นำตัวอย่างไปเก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ ที่สภาวะอุณหภูมิ $27 \pm 1^{\circ}\text{C}$, ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 65 ± 2 อย่างน้อย 24 ชั่วโมง (ISO 187)
3. เปิดเครื่องและทำการ calibrate เครื่องวัดสี
4. นำหัววัดวางบนตัวอย่างกระดาษ สังเกตไม่ให้มีบริเวณใดของหัววัดเลยออกไปนอกกระดาษที่ต้องการวัดสี
5. กดปุ่มเพื่อให้เครื่องทำการวัดสี
6. บันทึกค่าสี L a b ที่ได้
7. ทำการทดสอบทั้งหมด 5 ซ้ำ

ภาคผนวก ข

ค่าทดสอบมุมสัมผัสแบบต่อเนื่อง (dynamic contact angle) ของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรโฟบิก
สสารร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซีน

ตารางผนวกที่ ข1 มุมสัมผัสของหยดน้ำเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนความเข้มข้นร้อยละ 15 ร่วมกับกรดไขมัน สเตียริก และสารละลายซินในปริมาณที่คัดเลือก

กระดาษ	สารเคลือบ	มุมสัมผัส (องศา)							
		นาที่ที่ 0	นาที่ที่ 1	นาที่ที่ 2	นาที่ที่ 3	นาที่ที่ 4	นาที่ที่ 5	นาที่ที่ 6	นาที่ที่ 7
ด้านหน้า	C	57.73 ±0.32 ^{ns}	54.35 ±0.19 ^a	52.60 ±0.21 ^a	50.63 ±0.29 ^a	48.54 ±0.34 ^a	46.43 ±0.42 ^{ab}	44.25 ±0.51 ^b	42.11 ±0.66 ^b
	HL3	67.49 ±6.93 ^{ns}	54.60 ±2.95 ^a	44.75 ±3.39 ^b	41.98 ±2.53 ^b	38.68 ±4.04 ^b	37.15 ±3.66 ^c	35.37 ±3.96 ^c	32.00 ±0.75 ^c
	HZ3	54.21 ±7.16 ^{ns}	39.38 ±5.36 ^b	36.21 ±3.87 ^c	34.19 ±3.02 ^c	32.76 ±3.04 ^b	30.89 ±2.57 ^d	28.51 ±1.45 ^d	25.68 ±0.07 ^d
	HL1Z3	63.90 ±0.64 ^{ns}	58.52 ±3.04 ^a	55.00 ±3.90 ^a	52.43 ±3.92 ^a	50.34 ±3.53 ^a	46.08 ±0.40 ^b	44.98 ±0.20 ^b	45.17 ±2.40 ^b
	HL3Z1	67.63 ±2.83 ^{ns}	46.08 ±0.63 ^b	40.48 ±1.25 ^{bc}	37.83 ±1.39 ^{bc}	36.18 ±1.13 ^b	34.66 ±0.56 ^{cd}	32.88 ±0.40 ^{cd}	31.16 ±0.98 ^c
	HL3Z3	71.23 ±9.33 ^{ns}	61.65 ±4.52 ^a	57.49 ±2.97 ^a	54.93 ±2.18 ^a	52.79 ±1.21 ^a	51.10 ±1.39 ^a	49.70 ±1.28 ^a	48.42 ±1.42 ^a
ด้านหลัง	C	47.79 ±0.26 ^e	46.17 ±0.37 ^f	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	HL3	83.31 ±1.55 ^b	67.59 ±0.05 ^a	64.72 ±1.30 ^a	62.74 ±1.81 ^a	60.85 ±2.19 ^a	59.09 ±1.37 ^a	57.04 ±1.91 ^a	55.16 ±2.18 ^a
	HZ3	70.81 ±0.85 ^d	66.25 ±0.67 ^b	63.81 ±1.06 ^a	61.94 ±1.07 ^a	60.61 ±1.18 ^a	59.05 ±1.04 ^a	57.76 ±0.79 ^a	56.44 ±0.91 ^a
	HL1Z3	71.90 ±1.02 ^d	55.95 ±0.61 ^c	52.11 ±0.80 ^c	40.82 ±0.10 ^c	32.34 ±0.71 ^c	26.33 ±1.47 ^c	21.17 ±2.95 ^c	11.62 ±2.97 ^c
	HL3Z1	89.24 ±0.52 ^a	64.49 ±0.36 ^c	59.31 ±1.20 ^b	55.73 ±0.95 ^b	52.59 ±1.43 ^b	50.63 ±1.47 ^b	48.87 ±1.50 ^b	47.77 ±1.38 ^b
	HL3Z3	77.96 ±0.54 ^c	60.77 ±0.46 ^d	56.48 ±2.58 ^b	54.33 ±2.80 ^b	52.13 ±2.39 ^b	50.25 ±1.86 ^b	48.54 ±1.86 ^b	46.98 ±1.70 ^b

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวนี้หมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

กระดาษ	สารเคลือบ	มุมสัมผัส (องศา)							
		นาทิจี่ 8	นาทิจี่ 9	นาทิจี่ 10	นาทิจี่ 11	นาทิจี่ 12	นาทิจี่ 13	นาทิจี่ 14	นาทิจี่ 15
ด้านหน้า	C	39.78 ±0.70 ^a	37.40 ±0.88 ^a	34.95 ±0.89 ^{bc}	32.47 ±1.02 ^b	29.85 ±1.11 ^b	27.15 ±1.17 ^b	24.38 ±1.24 ^b	21.77 ±0.83 ^{bc}
	HL3	31.60 ±0.34 ^b	31.35 ±0.61 ^b	30.52 ±0.40 ^{cd}	28.39 ±1.61 ^{bc}	27.20 ±1.33 ^{bc}	26.39 ±1.68 ^b	25.33 ±1.81 ^b	24.23 ±1.71 ^b
	HZ3	24.27 ±0.57 ^c	22.93 ±1.22 ^c	21.72 ±1.87 ^c	20.44 ±2.51 ^d	19.05 ±3.28 ^d	16.56 ±5.63 ^c	15.58 ±5.82 ^c	14.66 ±5.82 ^c
	HL1Z3	43.89 ±2.36 ^a	41.24 ±0.44 ^a	39.54 ±0.11 ^{ab}	40.10 ±2.33 ^a	38.63 ±1.98 ^a	37.52 ±2.24 ^a	36.18 ±2.20 ^a	35.09 ±2.36 ^a
	HL3Z1	29.52 ±1.39 ^{bc}	27.63 ±1.96 ^{bc}	26.12 ±1.89 ^{de}	24.20 ±2.31 ^{cd}	22.35 ±2.74 ^{cd}	20.43 ±3.16 ^{bc}	18.58 ±3.61 ^{bc}	16.52 ±4.61 ^{bc}
	HL3Z3	42.95 ±4.44 ^a	42.10 ±4.14 ^a	41.13 ±3.91 ^a	40.41 ±3.56 ^a	39.01 ±4.01 ^a	38.21 ±3.74 ^a	37.35 ±3.53 ^a	36.42 ±3.34 ^a
ด้านหลัง	C	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	HL3	53.56 ±2.06 ^a	51.51 ±2.52 ^a	50.06 ±2.17 ^a	48.46 ±1.97 ^a	47.08 ±1.40 ^a	45.78 ±0.73 ^a	34.96 ±0.56 ^c	32.89 ±0.08 ^c
	HZ3	54.96 ±0.47 ^a	53.61 ±0.54 ^a	52.30 ±0.65 ^a	51.06 ±0.51 ^a	49.91 ±0.57 ^a	48.49 ±0.43 ^a	47.29 ±0.35 ^a	45.55 ±0.17 ^a
	HL1Z3	8.07 ±2.54 ^c	3.35 ±1.23 ^c	3.07 ±1.36 ^c	2.75 ±0.99 ^c	2.71 ±0.98 ^c	2.70 ±0.99 ^c	2.67 ±1.00 ^d	2.66 ±1.02 ^d
	HL3Z1	46.02 ±2.13 ^b	44.94 ±1.82 ^b	43.36 ±2.17 ^b	42.11 ±2.34 ^b	40.91 ±2.37 ^b	39.75 ±1.85 ^b	38.45 ±2.04 ^b	37.11 ±1.72 ^b
	HL3Z3	45.44 ±1.58 ^b	44.01 ±1.21 ^b	42.50 ±0.90 ^b	41.00 ±0.71 ^b	39.67 ±0.42 ^b	38.25 ±0.15 ^b	36.98 ±0.30 ^{bc}	35.49 ±0.05 ^b

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ข2 มุมสัมพัทธ์ของหยดน้ำมันเมื่อเวลาผ่านไปของกระดาษหลังเคลือบด้วยสารละลายไฮโดรฟลูออโรคาร์บอนความเข้มข้นร้อยละ 15 ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และสารละลายซินในปริมาณที่คัดเลือก

กระดาษ	สารเคลือบ	มุมสัมพัทธ์ (องศา)							
		นาที่ที่ 0	นาที่ที่ 1	นาที่ที่ 2	นาที่ที่ 3	นาที่ที่ 4	นาที่ที่ 5	นาที่ที่ 6	นาที่ที่ 7
ด้านหน้า	C	24.13 ±0.40 ^c	24.12 ±0.52 ^c	24.04 ±0.55 ^c	23.97 ±0.67 ^c	23.97 ±0.67 ^c	23.90 ±0.73 ^c	23.80 ±0.67 ^c	23.79 ±0.80 ^c
	HL3	61.50 ±2.87 ^a	61.35 ±2.88 ^a	61.23 ±2.80 ^a	61.17 ±2.76 ^a	61.10 ±2.74 ^a	61.04 ±2.67 ^a	60.97 ±2.64 ^a	60.93 ±2.61 ^a
	HZ3	25.81 ±0.22 ^c	25.27 ±0.56 ^c	25.02 ±0.60 ^c	24.75 ±0.50 ^c	24.52 ±0.81 ^c	24.48 ±0.84 ^c	24.42 ±0.78 ^c	24.32 ±0.82 ^c
	HL1Z3	51.82 ±2.78 ^b	51.82 ±3.05 ^b	51.67 ±2.84 ^b	51.16 ±2.51 ^b	51.10 ±2.53 ^b	50.52 ±2.01 ^b	50.35 ±1.78 ^b	50.11 ±1.46 ^b
	HL3Z1	57.26 ±2.30 ^{ab}	56.88 ±1.69 ^{ab}	56.70 ±1.44 ^{ab}	56.64 ±1.30 ^{ab}	56.47 ±1.00 ^{ab}	56.06 ±0.40 ^{ab}	55.71 ±0.15 ^{ab}	55.34 ±0.68 ^{ab}
	HL3Z3	56.84 ±2.50 ^{ab}	55.79 ±3.81 ^{ab}	55.77 ±3.84 ^{ab}	55.76 ±3.80 ^{ab}	55.71 ±3.72 ^{ab}	55.67 ±3.66 ^{ab}	55.63 ±3.59 ^{ab}	55.58 ±3.50 ^{ab}
ด้านหลัง	C	23.89 ±0.38 ^d	22.98 ±0.80 ^d	22.21 ±0.60 ^d	21.51 ±0.64 ^d	20.73 ±0.57 ^d	20.03 ±0.40 ^d	19.09 ±0.47 ^d	18.15 ±0.37 ^d
	HL3	53.20 ±1.02 ^a	52.74 ±0.80 ^a	52.33 ±0.82 ^a	52.12 ±0.91 ^a	51.92 ±1.10 ^a	51.83 ±1.11 ^a	51.69 ±1.22 ^a	51.56 ±1.29 ^a
	HZ3	47.16 ±0.53 ^c	21.37 ±1.22 ^d	20.05 ±0.74 ^d	19.67 ±0.47 ^d	20.36 ±0.97 ^d	20.11 ±1.04 ^d	18.99 ±0.09 ^d	19.52 ±1.46 ^d
	HL1Z3	52.20 ±0.10 ^a	47.83 ±1.08 ^b	47.37 ±1.62 ^b	47.32 ±1.66 ^b	47.29 ±1.64 ^b	47.24 ±1.70 ^b	47.19 ±1.72 ^b	47.14 ±1.75 ^b
	HL3Z1	49.59 ±0.17 ^b	48.19 ±1.35 ^b	48.14 ±1.39 ^b	48.09 ±1.36 ^b	48.15 ±1.17 ^b	47.80 ±1.57 ^b	47.54 ±1.89 ^b	47.10 ±2.41 ^b
	HL3Z3	47.10 ±0.05 ^c	43.35 ±1.20 ^c	43.05 ±1.51 ^c	42.91 ±1.49 ^c	42.82 ±1.55 ^c	42.73 ±1.63 ^c	42.67 ±1.69 ^c	42.59 ±1.79 ^c

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

กระดาด	สารเคลือบ	มุมสัมผัส (องศา)							
		นาทิตี่ 8	นาทิตี่ 9	นาทิตี่ 10	นาทิตี่ 11	นาทิตี่ 12	นาทิตี่ 13	นาทิตี่ 14	นาทิตี่ 15
ด้านหน้า	C	23.70 ±0.77 ^c	23.59 ±0.75 ^c	23.53 ±0.81 ^c	23.46 ±0.85 ^d	23.39 ±0.90 ^d	23.29 ±0.88 ^d	23.17 ±0.80 ^d	22.96 ±0.62 ^d
	HL3	60.89 ±2.54 ^a	60.85 ±2.52 ^a	60.83 ±2.45 ^a	60.81 ±2.39 ^a	60.77 ±2.36 ^a	60.73 ±2.35 ^a	60.69 ±2.30 ^a	60.64 ±2.27 ^a
	HZ3	24.30 ±0.77 ^c	24.26 ±0.78 ^c	24.17 ±0.82 ^c	24.12 ±0.81 ^d	24.05 ±0.79 ^d	24.05 ±0.73 ^d	24.01 ±0.71 ^d	23.95 ±0.72 ^d
	HL1Z3	49.89 ±1.16 ^b	49.82 ±1.04 ^b	49.70 ±0.85 ^b	49.51 ±0.69 ^c	49.21 ±0.51 ^c	49.07 ±0.32 ^c	48.66 ±0.01 ^c	48.38 ±0.39 ^c
	HL3Z1	54.91 ±1.26 ^{ab}	54.49 ±1.90 ^{ab}	54.17 ±2.30 ^{ab}	53.80 ±2.83 ^{bc}	53.64 ±3.07 ^{bc}	53.54 ±3.20 ^{bc}	53.46 ±3.34 ^{bc}	53.29 ±3.55 ^{bc}
	HL3Z3	55.52 ±3.43 ^{ab}	55.47 ±3.38 ^{ab}	55.43 ±3.30 ^{ab}	55.41 ±3.22 ^b	55.35 ±3.18 ^b	55.31 ±3.11 ^b	55.23 ±3.03 ^b	55.17 ±3.00 ^b
ด้านหลัง	C	17.40 ±0.21 ^d	16.47 ±0.25 ^d	15.38 ±0.23 ^d	14.78 ±0.16 ^d	13.80 ±0.05 ^c	12.72 ±0.07 ^c	11.36 ±0.42 ^c	10.28 ±0.21 ^c
	HL3	51.46 ±1.35 ^a	51.37 ±1.36 ^a	51.27 ±1.40 ^a	51.19 ±1.43 ^a	51.12 ±1.43 ^a	51.02 ±1.48 ^a	50.94 ±1.51 ^a	50.83 ±1.56 ^a
	HZ3	18.35 ±0.25 ^d	18.12 ±0.35 ^d	17.88 ±0.41 ^d	17.69 ±0.57 ^d	17.41 ±0.59 ^d	17.21 ±0.70 ^d	17.09 ±0.61 ^d	16.62 ±0.76 ^d
	HL1Z3	47.09 ±1.79 ^b	47.03 ±1.80 ^b	47.02 ±1.82 ^b	46.93 ±1.93 ^b	46.90 ±1.96 ^b	46.86 ±1.95 ^b	46.83 ±1.97 ^b	46.74 ±1.97 ^b
	HL3Z1	46.95 ±2.25 ^b	46.54 ±1.74 ^b	46.51 ±1.78 ^b	46.45 ±1.74 ^b	46.36 ±1.67 ^b	46.33 ±1.66 ^b	46.21 ±1.51 ^b	45.86 ±1.17 ^b
	HL3Z3	42.38 ±1.69 ^c	42.31 ±1.75 ^c	42.23 ±1.80 ^c	42.15 ±1.88 ^c	42.05 ±1.94 ^c	41.96 ±2.02 ^c	41.89 ±2.10 ^c	41.72 ±2.07 ^c

หมายเหตุ ^{abcde} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ภาคผนวก ค

สมบัติเชิงกล สมบัติการต้านทานน้ำ และน้ำมันของกระดาษหลังเคลือบไฮโดรฟลูออโรพอลิเมอร์ร่วมกับ
กรดไขมันสเตียริก และขึ้นภายหลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้า
ทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

ตารางผนวกที่ ก1 สมบัติเชิงกลของกระดาก่อนและหลังเคลือบสารละลายไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร้อยละ 15 โดยน้ำหนักร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และชินภายหลังเก็บภายใต้ การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป(25-32 °C,68-74%RH)

สัปดาห์ ที่	สารเคลือบ	ค่าทดสอบ			
		ความต้านทาน แรงกดวงแหวน (กิโลนิวตัน/เมตร)		ความแข็งตึง (มิลลินิวตัน)	
		ทิส MD	ทิส CD	ทิส MD	ทิส CD
0	กระดากไม่เคลือบ ¹	3.21 ± 0.06 ^e	2.30 ± 0.11 ^{ef}	174.8 ± 2.0 ^f	65.7 ± 1.2 ^b
	H ²	3.36 ± 0.14 ^d	2.45 ± 0.03 ^c	189.7 ± 0.9 ^e	67.9 ± 1.1 ^a
	HL3 ³	3.12 ± 0.11 ^f	2.25 ± 0.06 ^{fg}	157.5 ± 1.3 ^j	49.0 ± 0.0 ^g
	HZ3 ⁴	4.02 ± 0.09 ^a	2.75 ± 0.08 ^a	326.0 ± 2.5 ^a	44.3 ± 1.8 ^h
1	กระดากไม่เคลือบ	3.09 ± 0.08 ^{fg}	2.30 ± 0.07 ^{ef}	165.7 ± 0.5 ^h	65.3 ± 2.3 ^b
	H	3.02 ± 0.18 ^{ghi}	2.38 ± 0.06 ^d	168.9 ± 2.1 ^g	67.1 ± 0.9 ^{ab}
	HL3	3.12 ± 0.04 ^f	2.18 ± 0.07 ^{hi}	153.8 ± 2.7 ^k	43.1 ± 2.2 ^{hi}
	HZ3	3.97 ± 0.06 ^{ab}	2.72 ± 0.08 ^a	326.4 ± 1.8 ^a	44.3 ± 2.8 ^h
2	กระดากไม่เคลือบ	2.86 ± 0.04 ^l	2.31 ± 0.08 ^{ef}	144.9 ± 0.5 ^m	62.4 ± 2.1 ^c
	H	2.95 ± 0.12 ^{ijk}	2.33 ± 0.04 ^{de}	162.4 ± 1.3 ⁱ	61.2 ± 1.3 ^{cd}
	HL3	3.09 ± 0.07 ^{fg}	2.17 ± 0.06 ^{hi}	149.6 ± 2.5 ^l	43.7 ± 0.9 ^h
	HZ3	3.96 ± 0.07 ^{ab}	2.72 ± 0.07 ^a	316.9 ± 2.0 ^b	41.4 ± 2.1 ^{ij}
3	กระดากไม่เคลือบ	2.67 ± 0.01 ^m	2.18 ± 0.07 ^{hi}	125.5 ± 0.2 ^p	62.6 ± 2.9 ^c
	H	2.91 ± 0.10 ^{kl}	2.25 ± 0.06 ^{fg}	143.0 ± 2.1 ^m	57.2 ± 0.2 ^c
	HL3	3.03 ± 0.06 ^{gh}	2.12 ± 0.05 ^{ij}	130.6 ± 2.0 ^o	40.4 ± 1.6 ^j
	HZ3	3.94 ± 0.03 ^{bc}	2.69 ± 0.09 ^a	298.4 ± 0.2 ^c	41.6 ± 1.3 ^{ij}

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

สัปดาห์ ที่	สารเคลือบ	ค่าทดสอบ			
		ความต้านทาน แรงกดวงแหวน (กิโลนิวตัน/เมตร)		ความแข็งแรง (มิลลินิวตัน)	
4	กระดาษไม่เคลือบ	$2.55 \pm 0.03^{\text{n}}$	$2.15 \pm 0.03^{\text{i}}$	$122.6 \pm 0.4^{\text{q}}$	$59.4 \pm 1.3^{\text{d}}$
	H	$2.89 \pm 0.09^{\text{kl}}$	$2.22 \pm 0.05^{\text{gh}}$	$135.3 \pm 2.7^{\text{n}}$	$55.2 \pm 0.4^{\text{f}}$
	HL3	$2.99 \pm 0.03^{\text{hij}}$	$2.09 \pm 0.08^{\text{j}}$	$120.8 \pm 2.0^{\text{q}}$	$40.1 \pm 0.1^{\text{j}}$
	HZ3	$3.88 \pm 0.02^{\text{c}}$	$2.53 \pm 0.03^{\text{b}}$	$245.1 \pm 0.3^{\text{d}}$	$37.5 \pm 0.1^{\text{k}}$

หมายเหตุ ^{a-q} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

กระดาษไม่เคลือบ = กระดาษไม่เคลือบ

H = ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก

HL3 = ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก + กรดไขมันสเตียริกร้อยละ 3

HZ3 = ไฮโดรโฟบิกสตาร์ชร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก + สารละลายซินร้อยละ 3

ตารางผนวกที่ ค2 สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษก่อนและหลังเคลือบไฮโดรโฟบิกสตาร์ช ร้อยละ 15 ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซินนอยล์หลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะการเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

สัปดาห์ ที่	สารเคลือบ	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำ (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำ (นาทีก)
0	กระดาษไม่เคลือบ	47 ± 0.6 ⁱ	297.600 ± 1.690 ^e	2 ± 0.0 ^j
	H	67 ± 0.5 ^f	228.880 ± 1.071 ⁱ	21 ± 1.2 ^h
	HL3	86 ± 0.5 ^a	45.840 ± 1.392 ⁿ	60 ± 1.5 ^a
	HZ3	71 ± 0.3 ^e	90.720 ± 1.894 ^l	30 ± 2.0 ^d
1	กระดาษไม่เคลือบ	40 ± 1.0 ^j	311.162 ± 0.643 ^d	1 ± 0.0 ^j
	H	68 ± 0.5 ^f	230.880 ± 1.714 ^h	20 ± 1.2 ^h
	HL3	83 ± 0.3 ^{bc}	45.860 ± 1.199 ⁿ	60 ± 1.0 ^a
	HZ3	72 ± 0.5 ^e	91.240 ± 2.762 ^l	27 ± 2.0 ^e
2	กระดาษไม่เคลือบ	35 ± 0.3 ^k	325.518 ± 0.884 ^c	1 ± 0.0 ^j
	H	67 ± 1.3 ^f	229.800 ± 0.967 ^{hi}	20 ± 1.5 ^{hi}
	HL3	84 ± 1.3 ^b	46.360 ± 1.585 ⁿ	60 ± 0.6 ^a
	HZ3	72 ± 0.8 ^e	92.220 ± 2.762 ^l	26 ± 1.0 ^e
3	กระดาษไม่เคลือบ	28 ± 0.5 ^l	341.636 ± 0.733 ^b	1 ± 0.0 ^j
	H	53 ± 0.9 ^h	256.570 ± 0.509 ^g	19 ± 0.6 ^{hi}
	HL3	82 ± 1.3 ^c	47.340 ± 1.857 ⁿ	57 ± 0.6 ^b
	HZ3	67 ± 1.2 ^g	96.350 ± 0.679 ^k	24 ± 1.2 ^f
4	กระดาษไม่เคลือบ	24 ± 1.3 ^m	385.318 ± 0.693 ^a	1 ± 0.0 ^j
	H	53 ± 1.0 ^h	266.402 ± 0.822 ^f	18 ± 0.6 ⁱ
	HL3	78 ± 1.0 ^d	49.158 ± 0.609 ^m	54 ± 1.0 ^c
	HZ3	65 ± 0.6 ^g	99.702 ± 0.360 ^j	22 ± 0.6 ^g

หมายเหตุ ^{a-n} ตัวอักษรที่ต่างกันในแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางผนวกที่ ก3 สมบัติด้านการต้านทานน้ำมันของกระดาษก่อนและหลังเคลือบไฮโดรโฟบิก
 สตาร์ร่วมกับกรดไขมันสเตียริก และซีน ภายหลังเก็บภายใต้การจำลองสภาวะ
 การเก็บในสภาวะของคลังสินค้าทั่วไป (25-32 °C, 68-74 %RH)

สัปดาห์ ที่	สารเคลือบ	ค่าทดสอบ		
		มุมสัมผัส (องศา)	การดูดซึมน้ำมัน (กรัม/ตร.ม.)	เวลาในการ ดูดซึมน้ำมัน (นาทีก)
0	กระดาษไม่เคลือบ	24 ± 0.3^{jk}	109.580 ± 1.551^e	$> 200^a$
	H	31 ± 0.8^g	39.740 ± 1.585^h	$> 200^a$
	HL3	53 ± 0.5^a	29.400 ± 0.837^m	$> 200^a$
	HZ3	47 ± 0.5^c	36.680 ± 1.103^k	$> 200^a$
1	กระดาษไม่เคลือบ	23 ± 0.8^k	110.340 ± 1.026^{cd}	$> 200^a$
	H	28 ± 0.9^h	41.380 ± 0.998^g	$> 200^a$
	HL3	53 ± 0.5^a	30.380 ± 2.519^m	$> 200^a$
	HZ3	47 ± 0.0^c	37.680 ± 1.853^{ij}	$> 200^a$
2	กระดาษไม่เคลือบ	18 ± 0.9^l	111.860 ± 1.036^c	188 ± 1.2^b
	H	26 ± 0.8^i	41.900 ± 1.396^g	$> 200^a$
	HL3	50 ± 0.5^b	30.820 ± 0.661^{lm}	$> 200^a$
	HZ3	45 ± 1.0^d	37.520 ± 1.390^{ij}	$> 200^a$
3	กระดาษไม่เคลือบ	12 ± 0.6^m	124.220 ± 1.567^b	145 ± 2.1^c
	H	24 ± 0.8^{jk}	42.220 ± 1.74^g	$> 200^a$
	HL3	44 ± 0.3^d	30.81 ± 0.380^{lm}	$> 200^a$
	HZ3	42 ± 0.6^e	36.500 ± 0.583^k	$> 200^a$
4	กระดาษไม่เคลือบ	11 ± 0.5^n	131.160 ± 0.989^a	137 ± 1.5^d
	H	24 ± 0.3^j	44.100 ± 0.995^f	$> 200^a$
	HL3	41 ± 0.5^f	32.346 ± 0.434^l	$> 200^a$
	HZ3	41 ± 0.6^{ef}	38.618 ± 0.591^{hi}	$> 200^a$

หมายเหตุ ^{a-n} ตัวอักษรที่ต่างกันแถวตั้งหมายถึงค่าเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสลิลดา บุตรกีนรี
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 1 มกราคม 2526
สถานที่เกิด	นครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	ปริญญาตรี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-